TESIS DE LA UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
2024
216

Antonio Aretxabala Diez

Historia y desarrollo de la geotecnia en las Margas de Pamplona
Una interacción constructiva a lo largo de los siglos

http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis

Director/es
Casas Sainz, Antonio María
Gisbert Aguilar, José

ISSN 2254-7606

Prensas de la Universidad
Universidad Zaragoza

Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606

Universidad Zaragoza
1542

Tesis Doctoral

HISTORIA Y DESARROLLO DE LA GEOTECNIA EN LAS MARGAS DE PAMPLONA
UNA INTERACCIÓN CONSTRUCTIVA A LO LARGO DE LOS SIGLOS

Autor

Antonio Aretxabala Diez

Director/es

Casas Sainz, Antonio María
Gisbert Aguilar, José

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

Programa de Doctorado en Geología

2024

Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zaguan http://zaguan.unizar.es

Historia y desarrollo de la geotecnia en las Margas de Pamplona

Una interacción constructiva a lo largo de los siglos

Antonio Aretxabala Díez

Universidad de Zaragoza

ÍNDICE

	Página
I. Agradecimientos	**8**
II. Generalidades y Metodología	**9**
III. Los cuatro objetivos de la tesis	**10**
IV. Motivaciones	**11**

PARTE 1
MEDIO FÍSICO E HISTORIA GEOLÓGICA

1.1. Historia y geotecnia en el Reino de Pamplona	**16**
1.2. La historia y la ciencia en el ámbito geotécnico. Un bosquejo	**23**
1.3. Límites considerados en Navarra	**24**
1.4. Límites geotécnicos	**27**
1.5. Entorno geográfico de las Margas de Pamplona	**28**
1.5.1. Zonificación Navarra 2000	
1.5.2. Pamplona. Zona 3	
1.5.3. Distribución de la población	
1.5.4. Morfología	
1.5.5. Clima	
1.6. Geología	**38**
1.6.1. Estratigrafía del Biarritziense (Eoceno medio y superior)	
1.6.2. Jurásico	
1.6.3. Cretácico	
1.6.4. Paleoceno	
1.6.5. Mineralogía de las Margas de Pamplona	
1.6.6. El cemento calcáreo y la pérdida de cohesión	
1.7. Las tufas	**49**
1.7.1 Tufas, geotecnia, normativa y autoridad	
1.7.2. El reciente acceso a las tufas en Pamplona	

PARTE 2
RECORRIDO HISTÓRICO. CASOS CARACTERÍSTICOS

2.1. Geotecnia y Margas de Pamplona en la Edad de Hierro. Tabar y Garítoain	**56**
2.1.1. El caso de Tabar. Una fortaleza esculpida en las Margas de Pamplona.	
2.1.1.1. La defensa del territorio como motor principal del desarrollo urbanístico	
2.1.1.2. Irrupción de la modernidad	
2.1.1.3. Conclusiones	
2.1.2. El caso de Garítoain. Edad de Hierro y Edad Media	
2.1.2.1. La desaparición de Garítoain	
2.1.2.2. Conclusiones. Adaptación y evolución en las comunidades protohistóricas	
2.2. El caso de Tiebas. La entrada a la modernidad	**70**
2.2.1. La disposición defensiva a través de los siglos	
2.2.2. Estudio de patologías geotécnicas a través de la arqueología	
2.2.3. Conclusiones. Disponibilidad de materiales y destreza tecnológica	
2.3. El caso del cerro de Santa Lucía.	
Similitudes geomorfológicas y geotécnicas con Pamplona	**74**
2.3.1. El paulatino abandono de Santa Lucía y el crecimiento de Pamplona	
2.3.2. El desarrollo definitivo de Pamplona	
2.4. Las pestes y la reducción de la población.	
Impacto en la construcción y expansión a nuevos terrenos	**79**
2.5. La reconstrucción y la construcción enfocada a la salud	**81**
2.6. Una nueva experiencia para el sector de la mano de la gran aceleración	**83**

2.7. Sarriguren, de necrópolis de la Edad de Hierro a ecociudad del siglo XXI 85
2.7.1. El mayor modificado del entorno de la historia de Navarra
2.7.2. Sarriguren como un éxito de la actividad geotécnica en las Margas de Pamplona
2.7.3. Primeras zonificaciones geotécnicas incluidas en proyecto
2.7.4 Conclusiones. Importancia estratégica de Sarriguren en el sector de la construcción
2.8. El caso de la iglesia de San Miguel Arcángel (S. XIII) de Noáin 98
2.8.1. Contexto histórico
2.8.2. Patologías repentinas
2.8.3. Entorno geológico de San Miguel de Noáin, interacciones con el macizo rocoso
2.8.4. Condiciones geotécnicas de partida y cambios ambientales
2.8.5. Deformaciones y actuaciones humanas
2.8.6. Vibrado, compactado y deterioro del monumento y su entorno
2.8.7. El papel de la reptación del terreno
2.8.8. Facilidades geotécnicas para desencadenar patologías
2.8.9. Lo que no le sucedió a la iglesia de San Miguel de Noáin
2.8.10. La rotonda de la calle San Miguel
2.8.11. La reparación y el ideario del sector
2.8.12. Discusión final y conclusiones
2.9. Pamplona, orígenes y evolución urbana 136
2.9.1. Pamplona y los materiales cuaternarios P1 y P2
2.9.2. Las primeras normativas constructivas y urbanísticas
2.10. El Palacio del Condestable de Pamplona 145
2.10.1. El acceso a las Margas de Pamplona
2.10.2. Importancia de las técnicas reveladas en el Palacio del Condestable
2.11. Nueva construcción. Rehabilitación. Mañueta. Capitanía. Paseo del Obispo Barbazán 151
2.11.1. Nueva construcción. Edificio micropilotado en c/La Mañueta
2.11.2. Rehabilitación. De Palacio Real a Archivo General de Navarra
2.11.3. El edificio del paso del Obispo Barbazán
2.11.3.1. Deformación del terreno al reformar y ampliar edificios históricos en vertical
2.11.3.2. Conclusiones y lecciones aprendidas al borde de las murallas
2.12. Pamplona a punto de salir de las murallas 177
2.13. Una rehabilitación histórica: el convento de Salesas 178
2.13.1. Historia reciente
2.13.2. Correlaciones para cimentaciones en las terrazas P1
2.13.3. Discusión geotécnica de la adecuación de un edificio histórico sobre gravas o margas
2.13.4. Conclusiones: Patrimonio Histórico y cambios en las cargas de las cimentaciones
2.14. El Parlamento de Navarra 197
2.14.1. La irrupción de la concavidad
2.14.2. Consideraciones sobre las reacciones a un colapso parcial
2.14.3. Contradicciones detectadas en el nivel de gravas heterométricas en el siglo XX
2.14.3.1. Penetrómetros y capacidad portante en las gravas cuaternarias de Pamplona
2.14.3.2. Carga con placa y capacidad portante en las gravas cuaternarias de Pamplona
2.14.3.3. Preguntas y respuestas mecánicas bajo el Parlamento de Navarra
2.14.4. Análisis de un colapso desde la estabilidad de las cimentaciones
2.14.5. Análisis de un colapso desde la estabilidad de las excavaciones
2.14.6. Proyectos exitosos sin prisas
2.14.7. Conclusiones. Análisis integrado de un colapso parcial
2.15. El siglo XX. La geotecnia de Pamplona en la era del hormigón armado 225
2.16. Juventud, madurez y vejez de nuestras nuevas estructuras 227

PARTE 3
CARACTERIZACIONES GEOMECÁNICAS Y GEOTÉCNICAS

3.1. Área estudiada, selección de lugares representativos. Influencia del muestreo 231
3.2. Propiedades mecánicas esenciales de las Margas de Pamplona. 234
3.2.1. Peso específico
3.2.1.1. Peso específico y distribución espacial
3.2.1.2. Peso específico y características geomecánicas
3.2.1.3. Peso específico y humedad natural
3.2.1.4. Peso específico, plasticidad, cambios de volumen
3.2.2. Resistencia mecánica
3.2.2.1. Resistencia mecánica y distribución espacial
3.2.2.2. Resistencia mecánica y características geomecánicas
3.2.2.3. Resistencia mecánica y profundidad
3.2.2.4. Resistencia mecánica, humedad, plasticidad, cambios de volumen
3.2.3. Resistencia mecánica y peso específico
3.3. Propuesta para una clasificación 261

PARTE 4
MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

4.1. Antes de la era científica y el Sistema Internacional de medidas (SI) 266
4.2. La nueva concepción del medio geotécnico 269
4.3. Propuesta de perfiles adecuados al Código Técnico de la Edificación (CTE) 273
4.3.1. Código Técnico de la Edificación (CTE) y geotecnia
4.3.2. Los terrenos en la NCSE-02
4.4. Microzonación geotécnica 280
4.4.1. Microzonación geotécnica, litológica y geomorfológica
4.4.2. Microzonación geotécnica, perfiles geotécnicos

PARTE 5
INESTABILIDADES GEOTÉCNICAS

5.1. Fenómenos de inestabilidad en los márgenes de la formación de Margas de Pamplona 284
5.2. El caso de Cemboráin 286
5.2.1. Cronología y fenómenos observados
5.2.2. Desglose geotécnico de una inestabilidad
5.3. El deslizamiento histórico de Arre 300
5.3.1. Estudio del deslizamiento y la reactivación
5.3.2. El deslizamiento y la actuación de 1992 en Arre y alrededores
5.3.3. Reactivación en 2013 y nuevas actuaciones
5.3.4. Análisis de los deslizamientos de 1992 y 2013
5.3.5. La influencia de las temperaturas
5.3.6. El nulo papel de la sismicidad en la experiencia de Arre
5.3.7. El efecto de las lluvias
5.4. La ladera derecha de Yesa 316
5.4.1. Situación actual
5.4.2. Últimos estudios en Yesa (2016-2023)
5.4.3. Consideraciones de importancia sobre la modelización geológica
5.4.4. No hay una explicación satisfactoria de lo observado
5.4.5. Sobre la consideración de las superficies de deslizamiento
5.4.6. Yesa, ejemplo de no linealidad
5.4.7. Medida de la velocidad del movimiento como definición de estabilidad
5.4.8. Someter a las presas a situaciones esperables en su futura explotación
5.4.9. La sismicidad en Yesa
5.4.10. Situación actual y reflexión final
5.4.11. Conclusiones

PARTE 6
SEGURIDAD SÍSMICA.
SISMICIDAD HISTÓRICA Y GEOTECNIA

6.1. Fenómenos de sismicidad en una unidad alóctona. Seguridad 367
6.2. Límites mecánicos de la Cuenca de Pamplona 369
6.3. El estudio geohistórico 372
6.3.1. Factores culturales
6.3.2. Perspectiva histórica y seguridad
6.4. El impacto sísmico. El concepto de aceleración del suelo y su aplicación 379
6.5. Factores que determinan la amenaza sísmica 381
6.6. Configuraciones urbanas y geotecnia. La experiencia de Lorca para Navarra 382
6.6.1. La educación en sismicidad. Una cultura que salva vidas
6.6.2. Elementos no estructurales
6.7. Urbanismo, sismicidad en Navarra y actualizaciones de la NCSE-02 393
6.8. Acontecimientos sísmicos históricos que afectaron a poblaciones situadas sobre las Margas de Pamplona y terrenos asociados 402
6.8.1. Pamplona y Sangüesa, 1612 y 1755
6.8.1.1. Pamplona y Sangüesa 1612
6.8.1.2. Pamplona y Sangüesa 1755
6.8.1.3. Conclusiones
6.8.2. Pamplona 1903
6.8.2.1. El evento sísmico del 10 de marzo de 1903 en Pamplona desde la hemeroteca
6.8.2.2. El testimonio científico del terremoto de Pamplona del 10 de marzo de 1903
6.8.2.3. Conclusiones
6.8.3. Terremotos históricos al suroeste y oeste de Pamplona: 1982 y 1998
6.8.3.1. Pamplona 1982
6.8.3.2. Lizarraga, martes 27 de octubre de 1998
6.8.3.3 Instalaciones digitales de banda ancha
6.8.3.4. Conclusiones
6.8.4. El primer llenado del embalse de Itoiz. Año 2004 y siguientes
6.8.4.1. Marco tectónico
6.8.4.2. Seguimiento de las primeras fases de llenado
6.8.4.3. Conclusiones
6.8.5. El Perdón-Etxauri, 2013
6.8.5.1. Colapsos de galerías, deslizamientos y terremotos
6.8.5.2. Geomorfología de la Sierra de El Perdón
6.8.5.3. Tectónica del área de El Perdón
6.8.5.4. Precipitaciones sin precedentes y sismicidad
6.8.5.5. Hidrogeología, potasas, galerías abandonadas y lluvias extraordinarias
6.8.5.6. El enjambre de 2013 y la primera actualización del SISNA
6.8.5.7. Conclusiones
6.8.6. Olave 2017
6.8.6.1. Sobre el favorable comportamiento general de las edificaciones del área metropolitana de Pamplona. Aspectos geotécnicos, geofísicos y estructurales
6.8.6.2. Conclusiones
6.8.7. Los enjambres de 2020-2022
6.8.7.1. Distribución de la sismicidad
6.8.7.2. Reajuste constante
6.8.7.3. Conclusiones
6.8.8 Pamplona y la seguridad sísmica. Una mirada al futuro
6.8.8.1. Revisiones importantes
6.8.8.2. Procedimientos de actuación e intensidad
6.8.8.3. Consideraciones finales

PARTE 7
RECOMENDACIONES DE PROYECTO Y CONSTRUCTIVAS

7.1. Introducción **492**
7.2. Herramientas complementarias **493**
7.3. Familia geotécnica E (Margas de Pamplona y sus residuales) **496**
7.3.1. Perfil geotécnico E1. Margas de Pamplona sanas y semisanas
7.3.1.1. Cimentaciones
7.3.1.2. Excavaciones
7.3.1.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas
7.3.1.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015)
7.3.1.5. Contenciones
7.3.1.6. Utilización de los materiales para préstamos
7.3.2. Perfil geotécnico E2. Margas de Pamplona alteradas
7.3.2.1. Cimentaciones
7.3.2.2. Excavaciones
7.3.2.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas
7.3.2.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015)
7.3.2.5. Utilización de los materiales para préstamos
7.3.2.6. Consideraciones referentes al cambio de volumen
7.4. Familia geotécnica P (Perfiles geotécnicos tipo Pamplona 1 y 2. Gravas cuaternarias) **501**
7.4.1. Perfil geotécnico P11. Gravas cuaternarias de terrazas someras, medias y altas
7.4.1.1. Cimentaciones
7.4.1.2. Excavaciones
7.4.1.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas
7.4.1.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015)
7.4.1.5. Utilización de los materiales para préstamos
7.4.2. Perfil geotécnico P12. Gravas cuaternarias de terrazas potentes, medias y altas
7.4.2.1. Cimentaciones
7.4.2.2. Excavaciones
7.4.2.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas
7.4.2.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015)
7.4.2.5. Utilización de los materiales para préstamos
7.4.3. Recomendaciones especiales sobre los Perfiles geotécnicos P2 de terrazas bajas
7.4.4. Perfil geotécnico P21. Terrazas bajas y márgenes de las llanuras de inundación
7.4.4.1. Cimentaciones
7.4.4.2. Excavaciones
7.4.4.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas
7.4.4.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015)
7.4.4.5. Utilización de los materiales para préstamos
7.4.5. Perfil geotécnico P22. Gravas cuaternarias y terrazas bajas. Llanuras de inundación
7.4.5.1. Cimentaciones
7.4.5.2. Excavaciones
7.4.5.3. Estabilidad de las excavaciones
7.4.5.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015)
7.4.5.5. Utilización de los materiales para préstamos
7.4.6. Consideraciones geológicas e históricas adicionales sobre urbanización en perfiles P2
7.4.7. Consideraciones generales sobre la construcción en las llanuras de inundación
7.5. Perfiles geotécnicos C. Relieves estructurales **521**
7.5.1. Disposiciones estructurales desfavorables e inestabilidades
7.5.1.1. Cimentaciones
7.5.1.2. Excavaciones
7.5.1.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas
7.5.1.4. Contenciones
7.5.1.5. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015)
7.5.1.6. Utilización de los materiales para préstamos

PARTE 8
EL SIGLO XXI Y LA SOSTENIBILIDAD GEOTÉCNICA
HORMIGÓN Y ACTUACIONES EN EL TERRENO

8.1. El siglo XXI y la sostenibilidad en el sector de la construcción. Hormigón y geotecnia 525
8.1.1. Emisiones de CO_2
8.1.2. Estrategias de mitigación
8.2. El sector de la construcción ante el incremento de la presión ambiental por unidad de actividad económica 529
8.3. Reducción, reutilización y reciclado 534
8.4. Retos para una economía verde 536
8.5. El impacto del hormigón en Navarra 537
8.6. El hormigón y la construcción después de 2020 540
8.6.1. Incremento en el costo del mantenimiento de infraestructuras y parque inmobiliario
8.6.2. Los bio-hormigones
8.6.3. El futuro de las cimentaciones en las Marga de Pamplona y terrenos asociados
8.7. Apuntes sobre geotermia y soluciones mixtas 549

9. RESUMEN FINAL 558

10. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES 561

Historia y desarrollo de la geotecnia en las Margas de Pamplona
Una interacción constructiva a lo largo de los siglos

Antonio Aretxabala Díez

I. Agradecimientos.

A Javier Bada, "el jefe", la persona que más me animó a hacer esta tesis y el primero en recopilar la información y agrupar estudios e intervenciones en 2013, antes que yo. Un día de marzo de 1996 que hicimos juntos tres ensayos de carga en el polígono de Agustinos, bajo el cerro de Santa Lucía, con la placa directamente sobre las tufas (Margas de Pamplona) recién expuestas en una excavación, muertos de risa nos preguntábamos qué sentido tenía hacer aquello. Me dijo que eso habría que contarlo. Pues aquí está, Javier. Él nos dejó en mayo de 2017 no sin antes tener unas emotivas palabras de ánimo cuando ya estaba en marcha esta tesis.

A Mariano González-Presencio por sus consejos y por haber intentado hasta el último segundo que esta tesis pudiera haberse desarrollado en el programa de Historia de la Arquitectura.

A la Universidad de Navarra, por el cuarto de siglo que me brindó de desarrollo profesional y docente, manteniendo la geología y la geotecnia en el Laboratorio de Edificación y en los diferentes planes de estudio de arquitectura, ingeniería y ciencias.

A la Universidad de Zaragoza por la cariñosa acogida, por creer en esta propuesta y en especial a mis directores, Antonio Casas y Josep Gisbert por todo.

II. Generalidades y Metodología.

1. La tesis se ha realizado a partir de la integración de datos de campo, revisión de documentos históricos, hemeroteca, trabajos de carácter arqueológico, urbanístico, de edificación, de obra pública, geológico-forense y estudios geotécnicos convencionales.

2. Las características geotécnicas de las Margas de Pamplona y sus terrenos asociados con detalle local y regional, son analizados desde mecanismos de respuesta al esfuerzo natural o debidos a cambios tensionales originados por el ser humano con una perspectiva fundamentalmente histórica, considerando el comportamiento evolutivo de la formación eocena y sus terrenos asociados desde un punto de vista geológico y geotécnico. Se intenta integrar ese comportamiento en los distintos contextos naturales, tecnológicos, edificatorios, constructivos, de restauración o como respuesta a acontecimientos históricos que determinaron nuevas vías de exploración constructiva, terremotos, conflictos bélicos, pestes y pandemias o la irrupción de nuevas tecnologías de interacción con los materiales del subsuelo, desde la Edad del Hierro hasta nuestros días, en especial el hormigón armado.

3. La base de datos manejada para la caracterización geomecánica regional proviene de 1745 informes y trabajos de geotecnia y mecánica de suelos realizados o supervisados por el autor entre 1991 y 2022. Se han seleccionado los trabajos sobre la formación eocena, biarritziense, de Margas de Pamplona, quedando 362 lugares que ofrecen calidad y fiabilidad de resultados con datos para poder cuantificarlos y ser compaginados con nuevos trabajos de campo. Se ha refinado la base de datos como tabla Excel de 14 parámetros geográficos, topográficos, mecánicos y geomecánicos que incluyen valores numéricos de campo y laboratorio cuya ordenación pueda ser mapeada. Se han estudiado finalmente 4.000 datos geotécnicos de localidad, latitud, longitud, cota, profundiadad, peso específico, resistencia a compresión, humedad natural, Límites de Atterberg, índice de expansividad en aparato Lambe, RQD y RMR (Beniawski 1989). Los datos en afloramientos de macizos rocosos de Margas de Pamplona son fundamentalmente geomecánicos, RQD desde sondeo o por el método Jv en excavación, calicata o afloramiento con la conversión al factor Rock Mass Rating (RMR) de Beniawski (1989). Especialmente se han tenido en cuenta lugares históricos. La superficie en la que aparecen las Margas de Pamplona abarca unos 250 km² en Navarra por lo que se ha procesado una media de 16 datos/km², siendo el área metropolitana de Pamplona la de mayor densidad.

4. Este último filtrado y ordenado busca tomar como referencia de la investigación a realizar la posibilidad de zonificar geotécnicamente, de una manera sencilla, el área metropolitana de Pamplona (367.000 habitantes) y dar pautas para el desarrollo futuro desde propuestas basadas en los datos manejados y la experiencia constructiva local, codificada desde normativas que evolucionaron en el tiempo. El trabajo está, sobre todo, enfocado a sectores como el de la construcción o la industria. Se relacionan las actividades constructivas, industriales y de edificación sobre la formación eocena de Margas de Pamplona y terrenos asociados, se investiga la interacción histórica entre las actividades del ser humano y estos materiales, sus tratamientos tecnológicos, así como con sus residuales y materiales circundantes y cuaternarios que sustenta, cuya importancia es esencial debido al relativo número y tipología de patologías que se derivan de su desconocimiento.

5. Las coordenadas GPS de longitud, latitud, cota superficial de extracción de las muestras, epicentros, deslizamientos o accidentes geomorfológicos se relacionan con parámetros geomecánicos y se proyectan con programas de tratamiento geográfico: Google Earth, Surf 13 y el European Ground Motion Service (EGMS) del Proyecto Copernicus de la UE.

6. Establecemos protocolos de actuación en obra civil, de cara al presente con un tanteo hacia un futuro más sostenible en que el comportamiento de los materiales sea adecuado y alineado con los objetivos de los proyectos constructivos, de edificación y restauración en el siglo XXI y con los itinerarios de desarrollo sostenible puestos en marcha desde la UE.

III. Los cuatro objetivos de la tesis.

1) Investigar en detalle los mecanismos de respuesta a actuaciones en Margas de Pamplona y sus terrenos asociados por el ser humano, analizando el comportamiento evolutivo de la formación eocena desde un punto de vista geológico e interactivo, pero, sobre todo histórico, poniendo especial atención a decisiones acertadas que se fueron extendiendo entre la cultura constructiva y a los desaciertos que supusieron grandes lecciones para los sectores de la construcción o la industria.

2) Analizar ese comportamiento en los distintos contextos naturales e históricos, en la actividad edificatoria, constructiva, de restauración, etc., en que actuaciones humanas interactúan con los materiales del subsuelo relacionados con las Marga de Pamplona y sus terrenos asociados: diferentes grados de alteración, residuales y terrenos que acompañan a la evolución geomorfológica, gravas cuaternarias, llanuras de inundación, terrenos arcillosos de alteración, glacis o formaciones de transición a muro y techo, considerando las condiciones climáticas, morfológicas, tectónicas, de urbanización y modificación del medio.

3) Investigar en diferentes contextos históricos, desde la Edad del Bronce hasta la era del declive del hormigón armado, soluciones geotécnicas óptimas y su relación con eventos históricos destacables, conflictos bélicos, pandemias, modas culturales, religiosas, tecnologías, terremotos o disponibilidad energética. Para ello se estudian enclaves arqueológicos, medievales, infraestructuras y edificios que han llegado (o no) a nuestros días o han sido adecuados a nuevos usos.

4) Establecer pronósticos y protocolos de actuación en edificación y obra civil de cara a que el comportamiento de los materiales sea adecuado con los objetivos de los proyectos constructivos o de restauración en el futuro. Especialmente una microzonación geotécnica sencilla como pronóstico para cualquier proyecto de cara a un futuro de desarrollo sostenible.

IV. Motivaciones.

Se presenta una tesis con ocho partes bien diferenciadas. Surgen del intento de integración de las expectativas de los profesionales de la construcción e industria y de la experiencia de más de tres décadas en que el autor ha trabajado para sectores como el industrial, la edificación, la ingeniería civil, la geotecnia forense o la educación, en estrecho contacto con proyectistas, ingenieros, arquitectos, colegios profesionales, universidades, administración o fundaciones sectoriales.

La primera parte, de carácter descriptivo, contextualiza a las Margas de Pamplona desde un análisis geográfico, climático y geológico. En la segunda parte se investigan diferentes maneras de relación del ser humano con ellas. Desde la arquitectura, la construcción o la industria, se desarrollaron normas, escritas o no, con costumbres constructivas e incluso modas que se trazan a través de los milenios y los siglos, éstas fueron evolucionando o cambiando con las diferentes tecnologías, a veces, incluso de manera abrupta por causas históricas con grandes impactos sociales. Para ello se utilizan ejemplos significativos, lo más didácticos posible, de parajes abandonados, edificios emblemáticos o infraestructuras que han sido objeto de trabajos de geotecnia forense. En la tercera parte, eminentemente descriptiva, se analizan características geomecánicas, mineralógicas y cambios ambientales, geográficos o forzados por actuaciones humanas. La cuarta parte facilita la unificación de los criterios ambientales, tecnológicos e históricos con pautas y procedimientos para optimizar estrategias constructivas en los terrenos que han evolucionado con y desde las Margas de Pamplona. Se proponen siete perfiles característicos (E1, E2, P11, P12, P21, P22 y C) pertenecientes a tres familias (E, P y C) de conducta análoga, como utilidad de clasificación sistemática y simplificada para esos sectores económicos. La quinta parte analiza la existencia de patrones ante el recurrente problema de las inestabilidades geológicas: geotecnia, tectónica y clima.

El análisis de pequeñas patologías por desprendimientos o colapsos a nivel de obra, el que se realiza sobre deslizamientos latentes y reactivados como el de Arre o el gran deslizamiento de Yesa de las dos últimas décadas, están vinculados al clima, a actuaciones humanas o a la sismicidad y pueden ser evaluados para mostrar sus respuestas similares a diferentes escalas. En la sexta parte se analiza el impacto de la sismicidad a través de la historia y se dan pautas para mejorar la seguridad presente y futura. La séptima parte es un compendio de recomendaciones para proyectos y construcciones en relación al tipo de obra, familia geotécnica y espécimen de terreno. Finalmente, en la parte ocho se analizan las tendencias de la producción industrial en el sector de la construcción y obra pública ante los retos del siglo XXI, tales como el calentamiento global, el cambio climático derivado, el aumento de la concentración de CO_2 y afección a cimentaciones y recalces, estructuras de hormigón o el declive de recursos no renovables. El objetivo buscado es también de carácter sostenible, en línea con los itinerarios de desarrollo sostenible. Se explora una manera adecuada a cada perfil y no sólo para la estrategia de investigación geotécnica, sino para que todo el proceso constructivo pueda enriquecerse de ese impulso fomentando el ahorro de recursos, reduciendo el impacto medioambiental y propiciando la colaboración público-privada que facilita la universidad.

La tesis se apoya en más de tres décadas de experiencia geotécnica en obra civil y edificación en Navarra y otras comunidades, especialmente en la Cuenca de Pamplona y sus alrededores. El autor ha realizado una buena parte de su trabajo en contacto con esta singular formación rocosa, tanto desde empresas dedicadas a la geotecnia a principios de los años 90 del siglo XX, como desde el Laboratorio de Edificación de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Navarra desde 1992 (denominado Laboratorio de Arquitectura a partir de 2014) donde fue director técnico (desde el inicio de 1993 hasta el final de 2016) y desde la firma IoNa a partir de 2016. Buena parte de las observaciones tienen un marcado carácter histórico; el momento de aceleración del sector de la construcción vivido a finales del siglo XX y principios del XXI, con el posterior colapso de 2008 están muy presentes, como también lo está la aparición o evolución —simultánea al nuevo marco de acelerado desarrollo—, del número importante de patologías muy concretas que son desgranadas y analizadas detenidamente. Esta experiencia en el campo de la arquitectura y la ingeniería sienta las bases para las dos últimas partes como un itinerario de proyección futura.

No existe aún un documento académico de carácter geotécnico y ambiental sobre las tan utilizadas y no tan comprendidas Margas de Pamplona y terrenos asociados, con una particularidad nada despreciable: son los únicos materiales obligatorios en la actividad constructiva en prácticamente toda la parte previsiblemente urbanizable de la Cuenca de Pamplona y muchos de sus alrededores. Ni siquiera existen trabajos de carácter puramente petrológico o tecnológico que sirvan a los sectores más involucrados como referencias a la hora de transitar hacia un futuro más sostenible.

Tampoco se dispone de un estudio histórico dedicado que destaque la interacción humana con estos materiales evolutivos sobre los que cientos de miles de personas desarrollamos cotidianamente nuestras actividades y nuestras vidas.

La tesis investiga y relaciona, además de la actividad constructiva y de edificación sobre la formación eocena, los diferentes tratamientos tecnológicos utilizados, tanto con las Margas de Pamplona como con los terrenos cuaternarios que anuncian su presencia y sus residuales, cuya importancia es esencial debido al número y coste económico y social de las patologías que se derivan del apuntado desconocimiento sobre su comportamiento; también los niveles de areniscas y calcarenitas que aparecen gradualmente a muro y techo de la formación tienen espacio en los aspectos más importantes en que históricamente han sido aprovechados por los sectores de la construcción o la industria. Esta tesis intentará rellenar esos huecos.

Las Margas de Pamplona, con sus terrenos asociados, han sido, son y serán los únicos materiales de construcción obligatorios que impone la Naturaleza a la actividad arquitectónica, constructiva y, en general, toda actividad ingenieril en una buena parte de la Cuenca de Pamplona, además de en una amplia franja de Navarra y Huesca. Otros especímenes similares se extienden por Álava, Guipúzcoa y hasta Zaragoza y Barcelona.

Si observamos las tres familias de terrenos más representativos en la actual Cuenca de Pamplona y tenemos en cuenta lo dicho, llegamos a la conclusión de que, en los últimos 20.000 años, el ser humano ha tenido que interactuar con los mismos tipos de suelos y rocas en sus actividades en las diferentes épocas que acompañan a su desarrollo. En muchos casos las modificaciones introducidas en el medio, por el propio ser humano, provocaron que ciertos tipos de urbanismo se expandieran desde perfiles de uso ancestrales hacia nuevos terrenos desconocidos, entonces algunos se expandieron a costa de otros. Hoy, cerca de 367.000 personas vivimos sobre esas familias y otras variantes parecidas solamente en el área metropolitana de la capital de Navarra, Pamplona. En Navarra se siguen manifestando patologías geotécnicas, geomecánicas, dinámicas, evolutivas, etc., en edificaciones, pavimentos, soleras, grandes obras de infraestructura, urbanizaciones, obras lineales, a veces muy costosas, y no sólo por vicios constructivos o especulativos, derivan en buena medida del desconocimiento explícito de algunos de sus peculiares comportamientos.

Nuestra interacción con estos materiales depende en gran medida de condiciones naturales muy cambiantes: clima, tectónica, nuevos usos del territorio o una sismicidad natural o inducida que no podemos obviar para llevar a buen éxito nuestras grandes construcciones. Tal ha sido el caso en estos últimos años cuando atendemos a edificación, urbanizaciones, embalses, líneas de alta velocidad o extracción minera.

La perspectiva evolutiva, en relación a los terrenos y su dinámica en la Cuenca de Pamplona y alrededores, que descubre la investigación en buen número de construcciones patrimoniales, desvela una serie de comportamientos inherentes a las tres familias descritas (E, P y C) y a la configuración e implantación de ciertas edificaciones, tales como la influencia de la localización en valles, laderas, cerca de desmontes y taludes, en cimas topográficas o llanuras de inundación, con cimentaciones diversas y de muy diferentes épocas para un mismo conjunto arquitectónico, etc. Toda una estratigrafía geotécnica que hasta ahora no se había fundido en un documento académico.

Desde la construcción defensiva en la primera Edad de Hierro, como el supuesto germen de lo que iba a ser Pamplona, o las construcciones a modo de silos para guardar el grano en Sarriguren, hasta nuestros días, el ser humano ha ido poco a poco aprendiendo que ciertas configuraciones y disposiciones de sus edificios y obras civiles son idóneas en según qué contextos geomorfológicos y climáticos. Pero a través de la historia, y especialmente en la época contemporánea, los métodos constructivos y el uso del territorio no siempre han sido completamente exitosos. El montante de desaciertos vincula la actividad de la edificación, grandes infraestructuras, el cuidado del patrimonio histórico (parte del eje e itinerario investigado) y a la urbanización en general, con un cierto desconocimiento de las características mecánicas, dinámicas y evolutivas de las Margas de Pamplona y sus terrenos asociados.

Hasta hoy, y a pesar de las propuestas hechas en varias ocasiones, no existía un documento académico sobre las margas eocenas de Pamplona (coloquialmente denominadas "tufas" en el sector de la construcción local) y su papel en los diferentes campos de la arquitectura o la ingeniería, desde la distribución del territorio hasta la edificación más compleja, pasando por obras subterráneas o el cuidado del patrimonio. Generalmente, el subsuelo no ha pasado de ser percibido como un mero y simple sustrato de apoyo. Con la aparición de normativas en la modernidad, muchas veces el estudio geotécnico aplicado a intervenciones industriales, arquitectónicas o patrimoniales complejas, tampoco pasó de ser percibido como un obligatorio trámite burocrático en el que poder ahorrar parte del presupuesto. Esta predisposición, afortunadamente cada vez más ausente, fue la razón por la que, incluso con una importante profusión normativa, originó desavenencias y daños irreparables a edificaciones, grandes obras o comunidades al completo. La universidad, las administraciones públicas o sectores como el de la construcción o la industria, cuentan así con un documento académico dedicado a los materiales que se van a encontrar, sin poder escoger, en el lugar donde se les adjudique un proyecto o una obra. Será el único material de obra innegociable, impuesto por las circunstancias geográficas y geológicas, y sobre todo, cambiante con las condiciones ambientales. Bien parece, por tanto, contar con un cierto apoyo académico.

PARTE 1

MEDIO FÍSICO E HISTORIA GEOLÓGICA

1.1 Historia y geotecnia en el Reino de Pamplona.

La primera industria lítica encontrada en las terrazas del río Arga data de hace unos 75.000 años. Tras la última glaciación, hace unos 12.000, los cazadores recolectores vivieron con un clima más oceánico y lluvioso en una fértil Cuenca de Pamplona que propició el asentamiento y desarrollo humano temprano desde cerros como el de Santa Lucía, poco a poco se modificó el territorio partiendo de los márgenes del río Arga, como en San Jorge-Sanduzelai hasta los pies del citado cerro. Desde la prehistoria hasta el viejo Reino de Pamplona, esta cuenca despierta interés entre historiadores, geógrafos, científicos y concretamente geólogos, cuyo campo profesional es la geotecnia o la prevención de riesgos. Sin embargo, tanto desde la perspectiva de su enclave geográfico como desde su historia, apenas aparecen estudios que vinculen circunstancias de carácter geológico a la razón de su nacimiento, evolución y desarrollo. En algunos estudios arqueológicos, no obstante, asoman características geomorfológicas: criterios estratégicos y de tipo militar son claves en el nacimiento de la ciudad a costa de otras poblaciones con similares posibilidades.

Historiadores, geógrafos, urbanistas y recientemente también geólogos y científicos prevencionistas, vienen analizando, cada vez con mayor carácter interdisciplinar, el modificado territorial, el trazado y origen de las plantas urbanas de pequeños enclaves o ciudades medievales y su relación con el medio físico y geográfico en el que nacen, se desarrollan, alcanzan cierto éxito e incluso por qué desaparecen. J. M. Lacarra fue pionero en investigar este tipo de circunstancias (Lacarra, J. M., "*El desarrollo urbano en las ciudades de Navarra y Aragón en la Edad Media",* Pirineos. Revista del Instituto de Estudios Pirenaicos, núm. 15-16, Zaragoza, 1950, pp. 5-10). También J. I. Linazasoro aplicó el sistema del análisis morfológico al estudio de la estructura urbana y tipología de edificios en poblaciones vascas (Linazasoro, J. I., Permanencias y arquitectura urbana. *"Las ciudades vascas de la época romana a la Ilustración"*. Barcelona, Gili, 1978). Centrándose en Puente la Reina, J. J. Uranga aporta un estudio basado en los textos más antiguos de importancia trascendental para comprender el desarrollo de la ruta jacobea desde un marcado carácter religioso. Éste parece determinar el trazado de sus primeras décadas de existencia (Uranga Santesteban, J. J., *"Puente la Reina, del puente al fuero (1085-1122)",* en Scripta Theologica, XVI, 1984, pp. 473-484. No obstante, por su tamaño e historia, ha sido Pamplona la circunscripción que acumula mayor número de estudios de todas esas disciplinas, aunque nunca, hasta ahora, se había hecho en relación al sustrato que la mantiene, las Margas de Pamplona, su evolución o los cambios históricos, tanto tecnológicos como estratégicos de los materiales que las acompañan. En efecto, la ciudad de Pamplona ha venido siendo desde la antigüedad un enclave valioso y decisivo, su posición de enlace entre regiones como Francia, Pirineos, la Cornisa Cantábrica y la depresión del Ebro, ha supuesto para todas las culturas un lugar con una marcada importancia estratégica, de recursos, pero, sobre todo, religiosa y militar.

Ya desde la fundación romana, el primer núcleo urbano se ubicó sobre un promontorio de gravas de condiciones maleables muy favorables que descansaban sobre unas rocas gris azuladas *aitzurdin* (roca azul en euskera) que caían desde debajo del límite de las gravas rojizas en invierno y anaranjadas en verano como *arriurdineta* o lugar de abundantes piedras azules que hoy da nombre incluso a una plaza de la capital. Eran lo que hoy conocemos como margas; entonces aún no tenían el apellido "de Pamplona" pero sí se transmitieron con el tiempo con el nombre de tufas y no eran muy útiles para la siembra o como material de edificación, pero tenían óptimas condiciones geotécnicas a la hora de esculpir, construir y moldear. El cerro rojizo por arriba y azul por abajo desde el que se desarrolló la ciudad no fue el único con esas características, pero fue el que finalmente prosperó para convertirse en el gran núcleo urbano de Navarra; veremos además un ejemplo (el citado cerro de Santa Lucía) que pudo haber sido el núcleo inicial, pero finalmente, sobre todo por razones geomorfológicas y de tamaño, la historia se decantó por Pompaelo.

Dada la poca dureza de los materiales para esculpir cimentaciones, defensas fosos o adecuar las preexistentes defensas naturales, la energía que había que gastar en su moldeado era menor en comparación a localidades con sustratos geológicos más duros, la localización geomorfológica, en cualquier caso, contiene de manera intrínseca una compleja relación de características mecánicas óptimas para el esculpido y la defensa. Pamplona y alrededores se presenta así como uno de los mejores enclaves geohistóricos para contemplar la relación entre la geotecnia de un determinado territorio, el uso del suelo y el carácter del desarrollo que, sin ser determinante, puede propiciar su evolución, mientras que otros enclaves, como el citado cerro de Santa Lucía, por ejemplo, en el siglo I a. de C., estaban en condiciones similares en cuanto a ubicación, población y cercanía a ciertos recursos, pero quizás no se desarrollaron al estar sus dominios geomorfológicos demasiado claramente definidos. Incluso algunos otros lugares similares, veremos que fueron abandonados y su población absorbida por la emergente Pompaelo. Sin duda, un centro de gravedad demográfico que vació con el paso del tiempo a otras posibles aspirantes en kilómetros a la redonda, varias de ellas igualmente sustentadas por la formación biarritziense. Esa dinámica sigue en marcha.

No obstante, aunque Pamplona creció como un centro de gravedad poblacional a costa de vaciar poblaciones vecinas e incluso apartadas, no siempre se mantuvo en esa dinámica de expansión imparable. Los más de tres siglos que van del XIV al XVIII fueron una auténtica catástrofe para todos los sectores económicos, en especial la construcción y obligó a sus habitantes a explorar nuevos terrenos. Esos siglos plasmaron su huella para siempre en las actividades económicas de Navarra y dejaron una buena impronta en las maneras y los objetivos de las construcciones. Con la peste de 1348, Navarra perdió la mitad de su población, siendo la región más castigada de Europa (las adyacentes coronas de Castilla y Aragón perdieron un 20% y un 35% respectivamente).

La ciudad de Pamplona vio morir o huir a la tercera parte de su población. Las obras que se construían fueron abandonadas, como lo fueron molinos, carreteras e infraestructuras; muchas quedaron arruinadas por décadas, otras pervivieron inactivas durante siglos, otras para siempre, ya nunca más se recuperarían. Las pandemias siguieron golpeando cada una o dos décadas hasta la última de 1723, entonces la población, a base de un mecanismo secular de ensayo y error, había aprendido a enfrentarse a ellas y a añadir e incluso sustituir, en sus expectativas constructivas y de distribución del territorio, el antiguo impulso defensivo, estratégico y militar por el de la salud y la construcción religioso-terapéutica-hospitalaria. Ello llevó a la población a expandirse hacia nuevas zonas con nuevos terrenos sobre los que excavar, adecuar, estabilizar, cimentar, construir y mantener edificaciones e infraestructuras. Al igual que con los conflictos, las guerras o las pandemias, se fue labrando una tradición constructiva con detalles geotécnicos interesantes que ponen de manifiesto un conocimiento explícito del comportamiento de los terrenos a veces ausente en nuestros días. Algunas de las costosas patologías que vamos a describir son inherentes a la era de irrupción en la obra pública de la maquinaria de combustión interna, por ejemplo. Sin ella sería imposible desencadenarlas.

Durante los años 1992 y 1993 se realizaron excavaciones en el núcleo inicial urbano de la ciudad: la catedral de Pamplona. En general, debemos subrayar que una buena parte del conjunto del patrimonio arqueológico terminó siendo móvil para acabar en museos o exposiciones permanentes o itinerantes. Esta manera de acercamiento a cimientos y estructuras es emergente entre los profesionales de la geología y debe ser considerada por la geohistoria. Cada vez son más las labores de restauración que guardan este carácter centinela, casi de guardería, lo que asegura su conservación para generaciones futuras y para poder desarrollar trabajos como este. Algunas de las piezas que han servido para completar el rompecabezas que describimos no estaban en su lugar de origen, sino en alguna exposición. También hemos utilizado otro tipo de "hallazgos" que por su naturaleza son inamovibles, tal es el caso de las modificaciones del terreno, en especial fosos, cimientos de murallas, de fortificaciones y torres, o cimentaciones de edificios de carácter religioso y militar con la propia disposición in situ y su acción sobre el terreno que recibe las cargas, las modificaciones o usos heredados. Todos definen también el tipo de sociedad, el uso de los recursos naturales, los objetivos de las élites o de la propia comunidad que nos relata la historiografía.

Finalmente, estos elementos quedan forzosamente sobre el terreno como testigos de aquellos acontecimientos, algunos se han volatilizado para siempre, como el lugar de Garítoain al que dedicaremos un capítulo, otros pueden visitarse porque alguna valiosa y avispada dirigente supo conciliar la cultura milenaria con el crecimiento económico y se salvaron de la voracidad constructiva de las últimas décadas.

Los resultados de los distintos niveles constructivos del núcleo inicial de Pamplona son los siguientes desarrollados en torno a la catedral: comenzando por el inferior, nos muestra una estructura urbana de final de siglo I a.C. que por su trazado obedece a pautas de un asentamiento urbano anterior. La zona de la catedral ocupa un alto cerro sobre el río Arga en una situación topográfica característica de los poblados de la Edad de Hierro (Mezquíriz-Irujo, M. A, Tabar-Sarrías, I. 1994).

Esta agrupación social inicial fue romanizada a partir de la estancia de Pompeyo en el siglo I a.C. La ciudad romana de Pompaelo mantuvo su carácter estratégico, pero desde nuevas perspectivas en cuanto a intereses de dominio. Entonces se asomaba a los valles creciendo desde este punto como una ciudadela. La estructura urbana con su trazado de calles, casas, etc., seguirá con igual distribución en esta zona casi cuatro siglos, hasta finales del siglo III en que se produce una destrucción prácticamente total de la ciudad. Aparece claramente constatada en todos los sectores excavados por los arqueólogos, ha sido patente también en otras excavaciones previas, no sólo dentro del área de la actual catedral, también en zonas aledañas.

Entre los siglos IV-V, ya en una época tardo-romana, la distribución urbana vivió un cambio que se puede ver en las orientaciones de los edificios. Se evidencia por la distinta orientación de los restos de edificaciones de esa época; las razones en el nuevo cambio de orientación pueden ser debidos a varios tipos, entre los que probablemente, destaquen los de alguna moda de tipo religioso, pues cuando se excavaron los estratos superiores, se observó la existencia de una zona de carácter sagrado con los restos de dos fuentes (ninfeos) con un reconocido ritual: se depositaban monedas, es posible que, como ofrendas a dioses romanos, paganos, precristianos; cientos de monedas de bronce correspondientes al siglo IV-V se conservan en diferentes museos de la ciudad (Mezquíriz-Irujo, M. A., Unzu-Urmeneta, M. 2021).

En los niveles estratigráficos más recientes aparecen detalles que se pueden categorizar como de época paleocristiana o visigoda. Sepulturas y elementos de piedra reutilizados en las construcciones posteriores a esas alturas de la historia ya eran habituales. En las excavaciones de 1993 estas arqueólogas encontraron una estela funeraria formando parte de una cimentación gótica. Este fenómeno de reutilización de sillería o antiguas cimentaciones para sustentar las nuevas edificaciones o infraestructuras llega en la parte más antigua de Pamplona hasta nuestros días, con la consiguiente problemática geotécnica derivada del enorme desarrollo vivido por las sociedades que se fueron estructurando, enterrando y sustituyendo, en especial a partir de la segunda mitad del siglo XX, como veremos más adelante en ejemplos concretos, en especial en el Paseo del Obispo Barbazán adyacente a una parte del ábside de la Catedral de Santa María de Pamplona.

En los estratos finales se encuentran elementos sueltos que evidencian el culto cristiano en este lugar entre los siglos VI-VII d.C. Además, por fuentes históricas sabemos que en esta época se realizaron los viajes y las estancias de los obispos de Pamplona a los denominados Concilios de Toledo y de Zaragoza. El nivel prerrománico también ha quedado descrito con trazas de muros que fueron destruidos por las construcciones posteriores con algunos elementos escultóricos (capitel, canecillos) que pueden fecharse en el siglo X-XI. Estas obras escultóricas fueron reutilizadas en las cimentaciones de la catedral románica, de las cuales, desde 1993, se dispone de toda la información en planta, terreno de apoyo, cargas, cimentación y respuestas geotécnicas, las cuales, por cierto, fueron favorables y solo hay que destacar un incidente de colapso posiblemente provocado por un terremoto el 1 de julio de 1390 (Mezquíriz, M.A., Unzu M. 2021). Aunque las evidencias arqueológicas previas son bastante parciales, dadas las destrucciones y reutilizaciones sucesivas, en la planta de la catedral románica hay muy buenos detalles. Las cimentaciones y el arranque de los muros románicos nos permitieron conocer el trazado del perímetro de apoyo al completo. Los pilares góticos rompen los restos románicos, la explicación más plausible de las autoras del estudio de 1993, Mezquíriz Irujo, M. A y Tabar Sarrías, I. (1994) es que se buscaba un terreno más firme que el de los rellenos de carácter histórico. Tras la traumática experiencia de 1390 que reflejan los escritos, especialmente las cartas del rey a su familia, se intuye una mayor consideración de la importancia de las características mecánicas —como un conjunto terreno-cimiento— de los diferentes estratos de apoyo. Para esa época el arte en el cálculo y puenteado de heterogeneidades bajo las cimentaciones ya parece haber alcanzado un notable desarrollo. Esto se verá también en otros edificios históricos como el Palacio Real, después Palacio de Capitanía y hoy Archivo General de Navarra (Moneo, R. 2003).

En general, durante toda la historia que desemboca finalmente en la era contemporánea, se llevaron las cargas a las terrazas cuaternarias P1, como era habitual hasta bien entrada la era de la maquinaria con motor de combustión en el siglo XX (Aretxabala, A. 2012) y en especial la moda de los sótanos tras la irrupción del vehículo autónomo también con motor de combustión. Son un material imposible de ser desligado de las Margas de Pamplona, aunque no fueron claramente reconocidas hasta tiempos muy recientes como una unidad geológica y cronológica e incluso geotécnica propia, tal y como queda hecho a partir de los años ochenta del siglo XX con el *"Mapa Geotécnico para Ordenación Territorial y Urbana de Pamplona, escala 1:20.000 y 1:5.000"* del IGME (1988). Por otro lado, las fuentes del geohistoriador pasan también por las toponimias y en Navarra conocemos bien su uso preferente en el sector de la obra pública, desde el punto de vista geotécnico y en términos de resistencia, competencia y "buen terreno de apoyo", estos niveles han llegado a nuestros tiempos como "cascajo" (castellano) y "kaskallueta" (euskera) en prácticamente toda la geografía navarra.

La catedral, que había ampliado y profundizado sucesivamente sus cimientos sin alcanzar directamente a la Margas de Pamplona (pero sí lo habían hecho los bulbos de presión de sus enormes cimientos) fue consagrada en 1127, con la asistencia de Alfonso el Batallador.

Esta construcción se ve que fue de una ejecución excelente con un tamaño extraordinario para la época: son 70 metros de longitud y como se ha podido descubrir en su totalidad el crucero, una anchura de 50 metros, que es la misma que tiene el de la actual catedral gótica[1].

El núcleo inicial en torno a la catedral, además, sigue estando rodeado al norte y al este por el río Arga erigiéndose unos 50 metros sobre un escarpe que se aprovechó como defensa natural. Sin embargo, al oeste y al sur, las suaves llanuras que rodearon a la ciudad no disponían de ese carácter defensivo topográfico, por lo que fueron objeto de proyectos y reformas constantes que, con la conquista del Reino de Navarra por parte de las tropas de Castilla, alcanzaron las mayores cotas de modificación del medio geológico que circundó la ciudad de Pamplona.

La ciudad se convierte con el tiempo en una destacada plaza fuerte, una señal de fortaleza entre dos monarquías rivales: la española y la francesa. La parte sur y oeste de la ciudad, al ser llana, era desde el punto de vista estratégico uno de los puntos más vulnerables, pero también de potencial de expansión.

Quizás entenderlo como una mera cuestión de espacio sería demasiado simplista, en las excavaciones arqueológicas que acompañan a muchos de los estudios geotécnicos, se observa que, a lo largo de los siglos, las diferentes estructuras defensivas son acordes con la evolución histórica de la fortificación y su ampliación.

Esa apertura geomorfológica —de idénticas características geotécnicas que el núcleo inicial del que casi nadie se atrevía a salir, excepto bajo circunstancias especiales como guerras o las sucesivas pandemias— hacia el sur y hacia el oeste, puede ser una razón de peso para explicar por qué finalmente catapultó a la vieja Iruña a consolidarse como la gran ciudad de Navarra y no a otras localidades cercanas que compitieron con ella como la igualmente próspera Santa Lucía.

---

[1] Hoy ya se puede visitar el recorrido histórico en la exposición permanente "Occidens", comprobando que en el núcleo inicial —que corresponde tanto donde se erige actualmente la catedral como alrededor del edificio religioso—, ya se había situado un poblado prerromano durante la Edad de Hierro.

En muchos casos, como el de las sucesivas modas defensivas, las modificaciones introducidas en el territorio por el ser humano han hecho que ciertos tipos de terrenos se hayan expandido a costa de otros, acarreando desde hace siglos materiales cuaternarios de gravas que llegaron a formar enormes depósitos moldeados e incluso parte de las estructuras defensivas y de edificación, tal y como se ha podido comprobar en los tapiales (varias plantas con gravas P1 se elevan desde la terraza cuaternaria a modo de muros sustentando forjados y pisos) del Palacio del Condestable o en los rellenos y terraplenados del Palacio Real o de los Reyes, más tarde Capitanía y hoy Archivo General de Navarra.

Durante todo este tiempo relatado, el contacto directo con las margas biarritzienses fue puntual en los diferentes desarrollos de la ciudad de Pamplona dentro de las murallas, sin embargo, hay evidencias no centradas en el casco histórico de la futura urbe en que sí hubo interacción constructiva y arquitectónica entre el ser humano y las Margas de Pamplona de manera directa, sin terrenos intermediarios. La mayoría de ellas se encuentran hoy dentro de lo que se conoce como zona metropolitana y prácticamente la totalidad en el área de la conocida como Cuenca de Pamplona.

Nada de lo descrito anteriormente con el lenguaje de la era científica existía en las primeras etapas de interacción humana con las Margas de Pamplona. Sin embargo, veremos cómo a través de los tiempos esas características, o más bien, sus resultados, no pasaron desapercibidos. Para poder bucear en el tiempo y encontrar los primeros vestigios de dicha interacción vamos a ver media docena de lugares en que, desde la Edad de Hierro, se pueden evidenciar en unos tres milenios las primeras y las últimas relaciones del sector constructivo directamente con las Margas de Pamplona y sus terrenos asociados, además de ser lugares que han presentado complicaciones inicialmente desconocidas y que sólo la investigación geohistórica y científica pudo explicar.

También veremos otra media docena de lugares dentro del área histórica de Pamplona. Igualmente, han sido considerados como representativos por las lecciones aprendidas y los retos futuros a que se enfrentan los distintos sectores económicos mencionados.

Existen, sin duda, otros lugares de mayor calado arqueológico o con más importancia histórica, algunos casi han desaparecido a causa de nuevas urbanizaciones o grandes infraestructuras, pero su trascendencia geohistórica no aportaría grandes dosis de cultura geotécnica al sector de la construcción y obra pública como los escogidos; nos quedan además de las huellas, los estudios arqueológicos que tuvieron la oportunidad de contextualizarlos, seguramente muchos ya se han perdido para siempre y otros, quizá esperan.

En esta ocasión vamos a dirigir nuestra mirada desde aquellos primeros vínculos hasta nuestros días, pues la utilización geotécnica de las Margas de Pamplona no es una cuestión exclusivamente geográfica, climática o geológica, sino en mucha mayor medida lo es cultural, histórica, estratégica.

El caso concreto de Pamplona es sutilmente paradójico, pues la localidad que da nombre a la formación rocosa prácticamente asentada sobre las margas, no tuvo un encuentro directo con ellas hasta bien entrado el siglo XX, debido sobre todo a que, durante la mayor parte de la historia, la utilización tecnológica del suelo fue sobre las terrazas cuaternarias (cascajo, kaskallueta) y no sobre las propias margas que las sustentan. Una cuestión puramente energética que supuso durante siglos la optimización de procedimientos constructivos adecuados y compatibles con las compañeras inseparables (en Pamplona) de las Margas de Pamplona: las terrazas cuaternarias de gravas o familia de terrenos P1.

1.2 La historia y la ciencia en el ámbito geotécnico. Un bosquejo.

La denominada Formación de Margas de Pamplona, de Arguís-Pamplona, también apareció como de Jaca-Pamplona, dependiendo de a qué lado de la muga se las nombrase, han sido y siguen siendo denominadas fundamentalmente como Margas de Arguís en Aragón y Margas de Pamplona en Navarra. Esta unidad fue estudiada por primera vez con detalle por Almela y Ríos en 1954. Sin embargo, la Formación de Margas de Pamplona fue definida por Mangin (1959-60) refiriéndose a los afloramientos margosos de edad Biarritziense que van desde las inmediaciones de la propia capital Pamplona hasta la cuenca sinorogénica de Jaca, concretamente alrededor del sinclinorio del Guarga.

Fue Puigdefábregas en 1975 quien integró en la definición de la formación biarritziense los afloramientos del sur de dicho sinclinorio a lo que consideró materiales equivalentes, de manera que, desde entonces, en la literatura de las áreas profesionales que estudiamos dicha unidad, las conocemos como Formación de Margas de Pamplona-Arguís o Arguís-Pamplona. No obstante, en tiempos más recientes, la unidad ha sido objeto de trabajos más focalizados hacia aspectos sedimentológicos, geomorfológicos o cronoestratigráficos.

En cuanto a estos últimos cabe destacar que las dataciones realizadas por Canudo y Molina (1988) fueron basadas en foraminíferos planctónicos, mientras que Hogan (1991) se centró en la magnetoestratigrafia sin que se dieran cambios revolucionarios en la delimitación estratigráfica. Por ejemplo, desde el punto de vista estratigráfico, lo veremos más adelante, en los afloramientos del norte del sinclinorio (anticlinal de Basa), la unidad tiene como base a la Formación de Arenisca de Sabiñánigo, mientras que el techo lo constituye las areniscas y margas de la Formación Belsué-Atarés.

En el flanco sur la unidad se apoya sobre las calizas de Guara, con el mismo techo de la Formación Belsué-Atarés. El espesor en el flanco sur del sinclinorio del Guarga, está condicionada fuertemente por la sincronía entre el desarrollo de los anticlinales N-S del sector central de las Sierras Exteriores y el depósito de la propia unidad. En concreto, en la charnela del anticlinal de Bentué de Rasal se alcanzan unos 400 m, mientras que en el sinclinal contiguo la potencia de la unidad aumenta notablemente hasta alcanzar los 1.700 m. Esta fuerte disparidad ha sido descrita en la literatura geológica en esta área geográfica (Almela y Ríos, 1951; Puigdefábregas y Soler, 1973; Millán, 1992; Barnolas 1992) e incluso en artículos de prensa a lo largo de la historia más reciente en relación a cuestiones geohistóricas o relacionadas con grandes obras.

1.3. Límites considerados en Navarra.

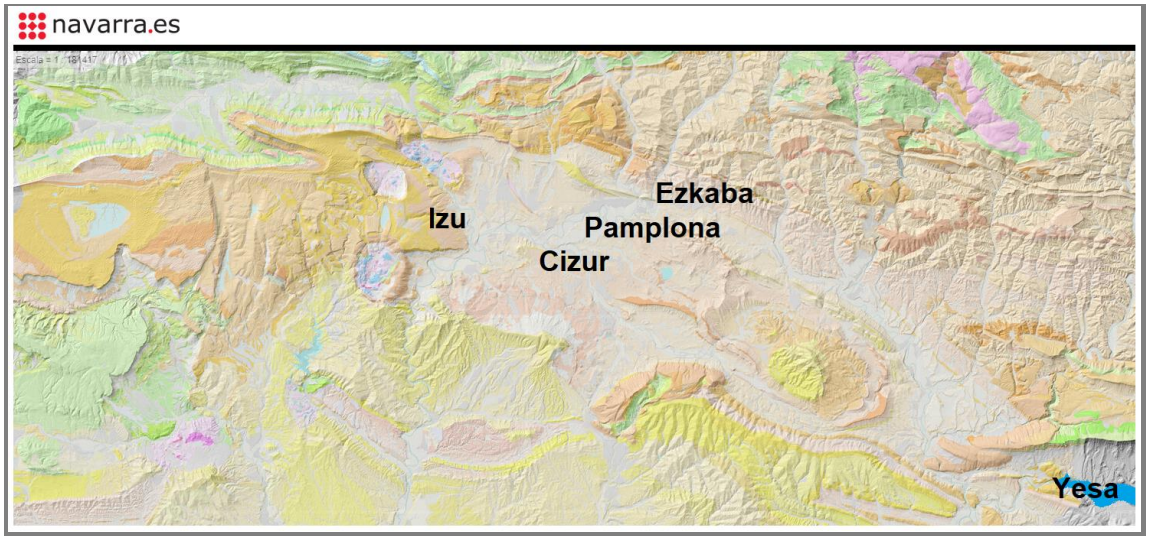


Figura 1.01 Cinco lugares: Pamplona como referencia central y metropolitana y cuatro puntos periféricos con afloramientos de calidad donde ver la transición de las Margas de Pamplona (Luteciense-Bartoniense) al Priaboniense: Izu al oeste, Yesa al sureste, Ezkaba al norte y Cizur al sur del área metropolitana.

La potencia de la formación de Margas de Pamplona es variable, aumentando sensiblemente de E a O. En el anticlinal de Basa los espesores mínimos se han medido en el borde oriental con apenas 200 m de alternancia de margas y niveles de areniscas, pero hacia el NO se alcanzan espesores de más de 1.000 m.

El contacto con el Flysch de Yesa, en la zona donde afloran las margas al sureste del límite navarro de las Margas de Pamplona (figuras 1.01 y 1.02), en el límite administrativo con Navarra, es gradual hacia el techo, aumentando el contenido en areniscas hasta llegar a predominar claramente en el Flysch de Yesa en que alternan en pequeños niveles centimétricos las limolitas, margas, lutitas y areniscas.

Lo mismo sucede en las inmediaciones de Cizur que anuncian las formaciones alternantes de areniscas y margas fuertemente estratificadas, también en la variante norte de Pamplona encontramos la misma gradualidad. Sin embargo, en Izu, en la parte más occidental donde encontramos las Margas de Pamplona, se puede observar en los afloramientos una alternancia más suave con intercalaciones de limolitas hasta la aparición del Priaboniense. En la figura 1.01 reflejamos los límites con afloramientos vistosos; de oeste a este y de norte a sur: Izu, Yesa, Ezkaba y Cizur.

Figura 1.02. El Flysh de Yesa como límite gradual de las Margas de Pamplona en la zona más oriental de Navarra.

El criterio empleado desde las primeras determinaciones ha venido siendo esa relación de areniscas/margas. Se han considerado pues, como Margas de Pamplona, a los materiales margosos que presentan un contenido en niveles de arenisca inferior al 20% y cuando el contenido en areniscas supera el 20% se considera el dominio del Flysch de Yesa (figura 1.02).

En el límite suroccidental, por ejemplo, en Cizur, donde se encuentra uno de los mejores afloramientos de toda la cuenca, al suroeste de Pamplona, las areniscas (calcarenitas) de Cizur marcarían el mismo techo (figura 1.03), como en la variante norte en Ezkaba al norte, donde la estratificación presenta inclinaciones por encima de 60º, enseguida se da paso al Priaboniense fuertemente estratificado, en cada zona ese paso gradual es más o menos visible gracias, sobre todo a las obras de infraestructura como en el caso de Cizur o Ezkaba. En el límite más occidental, por ejemplo, al sur de Izu, vemos que el paso es mucho más gradual, apareciendo los mencionados niveles de limolitas (figura 1.04) hasta el Priaboniense.

Litológicamente las Margas de Pamplona corresponden a un potente nivel de margas con coloraciones grises y azuladas. La parte inferior de las margas suele ser bastante homogénea y azoica (sin restos de vida) pasando hacia techo a intercalar niveles arenosos cada vez más abundantes y de mayor espesor con una aparición de fauna asociada a los propios niveles arenosos. En la vertical esta fauna apunta a una disminución de la batimetría. Briozoos, nummulites y bivalvos en las partes inferiores dan paso a una herencia de aguas más someras con restos de gasterópodos, algas y corales hacia el techo.

Esta evolución de la fauna sugiere una sedimentación de plataforma margosa profunda (afótica) inicial, mientras que el progresivo enriquecimiento en niveles arenosos, acompañados de fauna de ambientes más someros hacia techo se consideran sedimentos de medios deltaicos en las zonas más cercanas a la costa del este.

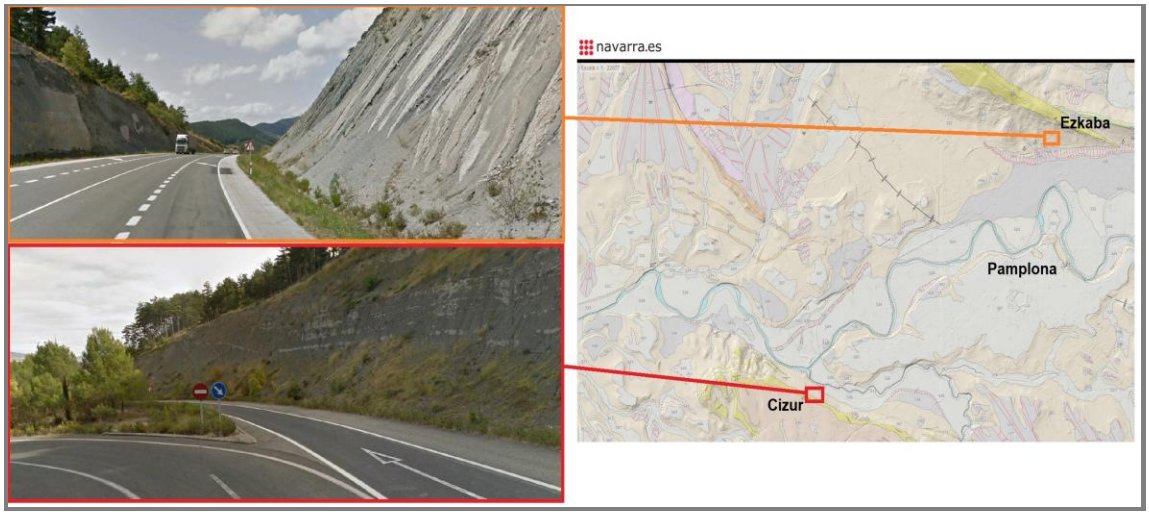


Figura 1.03. Ezkaba (norte) y Cizur (sur) como afloramientos para observar el límite gradual de las Margas de Pamplona hacia el Priaboniense en la zona metropolitana de la capital.

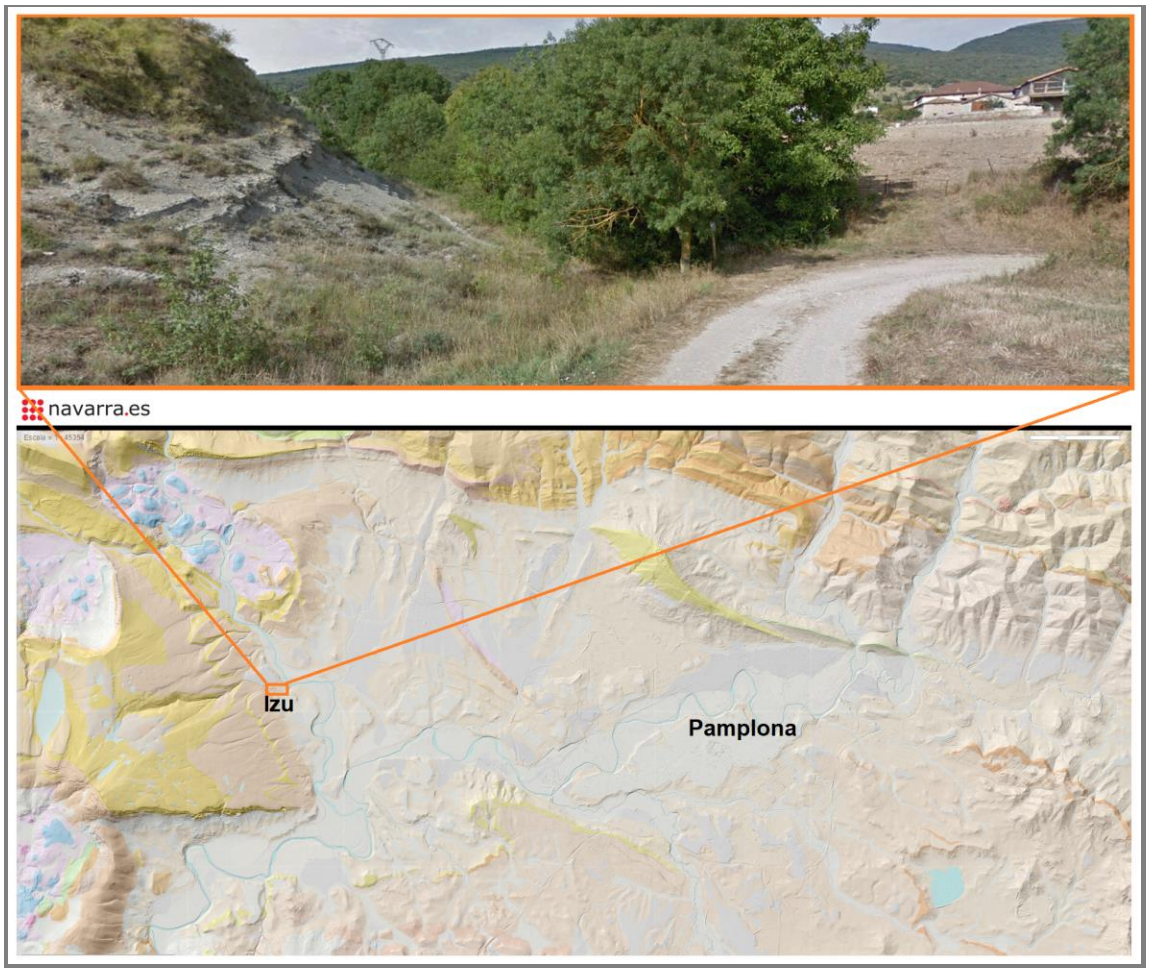


Figura 1.04. Izu, al oeste, como límite gradual de las Margas de Pamplona hacia el Priaboniense en la zona occidental del área metropolitana. Es el área que menores intercalaciones presenta, a la izquierda de la fotografía se puede ver el resalte de un estrato de limolitas.

1.4. Límites geotécnicos.

La utilización de estos terrenos para la construcción, edificación y obras de ingeniería civil, queda en buena manera determinada por su pasado y su posición estratigráfica, sobre todo en los márgenes de la formación, y especialmente a techo, cuando la estructura geológica comienza su transición somera y la aparición de alternancias y Flysch con niveles graduales de areniscas.

Este fenómeno puramente geológico tiene consecuencias a la hora de limitar geotécnicamente las posibilidades de la formación rocosa y confiere heterogeneidad y anisotropías reológicas que, sumadas a condiciones estructurales y topográficas desfavorables, pueden derivar en grandes inestabilidades. En general, hablando de taludes o laderas, cortes de más de 15 a 20 m y pendientes que varían entre 1H: 1V y 1H: 2V podrían mostrar desprendimientos, cuarteados, deslizamientos e incluso deslizamientos circulares (Alonso, E. E., Pineda, J. A. y Cardoso, R. 2015).

Tanto su uso tecnológico como de apoyo de cargas o los modificados geomorfológicos que se hacen en obra civil, urbanización o edificación, no cuentan con un sistema ni siquiera orientativo, más allá de la geotecnia general o la mecánica de suelos convencional aplicada a todas las margas, sus residuales y suelos asociados. Por ejemplo, existe un consenso no escrito, al que sí podemos catalogar como de carácter o herencia histórica (desde que existen convenios de medidas internacionales como las MKS) que aconseja el apoyo en la zona alta con grados de alteración III-IV (según la clasificación en grados de ISMR, 1981) de unos 3 kp/cm², para las II-III unos 5 kp/cm² y para el caso I-II hasta 7 e incluso 10-12 kp/cm² y otorga valores de entre 20º y 25º de ángulo de rozamiento interno de manera generalizada, independiente del clima, al conjunto marginal de las Margas de Pamplona en su transición con niveles de sedimentación más somera.

Los límites geotécnicos son por tanto, los relativos a las propias Margas de Pamplona (perfil geotécnico E1) y su evolución hacia los terrenos residuales o alterados que ellas mismas generan (perfil geotécnico E2), las gravas heterométricas que se depositaron sobre ellas en el holoceno como terrazas medias-altas (P1, P11 si no sobrepasan los 3 m y P12 si lo hacen), las terrazas bajas que conforman las llanuras de inundación sobre ellas (P2, P21 si no sobrepasan los 3 m y P22 si lo hacen) y los terrenos circundantes de carácter estructural formados por alternancias de calcarenitas, margas, areniscas, Flysch, etc., en los márgenes de la formación (perfil geotécnico C).

1.5. Entorno geográfico de las Margas de Pamplona.

Por la configuración de su relieve y localización física, Navarra se encuentra en la denominada Zona de Montaña, dentro del área de los Pirineos occidentales y de los Montes Vascos orientales y, en su parte sur o Ribera de Navarra, en la Cuenca del Ebro.

Los demás rasgos de carácter físico (hidrología, climatología, vegetación o geología) presentan patrones similares acordes con la estructuración geográfica. La extensión de Navarra es de 10.400 km² lo que supone algo más del 2% del territorio del Estado.

La gran diversidad que tiene Navarra en todos los aspectos geográficos viene determinada por esa singular localización con una orografía y variedad climática única en Iberia. En la mayor parte de las publicaciones relativas a aspectos geográficos de Navarra se habla de "zonas" o de "comarcas". Esta manera de hacer geografía responde fundamentalmente a criterios de herencia histórica: a las áreas similares se les asigna un calificativo normalmente de carácter localista donde destaca una población importante. Tradicionalmente se ha caracterizado la geomorfología y el relieve de Navarra en tres áreas principales. El relieve de Navarra es montañoso en su mitad norte (la Zona de Montaña) con una depresión en la zona meridional (la Ribera) que ha sido rellenada durante la reciente historia geológica con materiales provenientes de la primera.

La transición entre ambas es tan gradual que el relieve permite diferenciar una bien esculpida Zona Media, en ella confluyen los caracteres del norte húmedo y montañoso y el sur seco y llano.

Las divisiones territoriales, en especial en zonas de tan marcados cambios geológicos, morfológicos, climáticos, paisajísticos y humanos, como es el caso de Navarra, responden a largos procesos históricos, reflejando los cambios de las diferentes sociedades con su mayor o menor impacto en el territorio.

El trabajo histórico ha sido más enfocado a facilitar la compleja tarea de diferenciar espacios sin caer en atomizaciones excesivas; según se iban desarrollando los estudios de diferenciación de los espacios territoriales en función de características comunes, se fue parcelando el territorio según cada objeto de estudio: elementos naturales, delimitaciones administrativas dependientes de las actividades socioeconómicas, políticas, etc. Aun así, las divisiones históricamente presentadas, parece que resultan insuficientes para delimitar los fuertes contrastes existentes en Navarra y siempre abren una puerta para su modificación. Las tres grandes regiones (Montaña, Zona Media y Ribera), a su vez, con el tiempo se dividieron en comarcas, especialmente a partir de la década de 1980, cuando hubo un intento de suministrar una base de distribución útil para los diferentes sectores. Así, la Montaña está formada por las comarcas denominadas la Navarra Húmeda, los Valles Pirenaicos y las Cuencas Prepirenaicas como la de Pamplona; la Zona Media por Tierra Estella y la Navarra Media Oriental y, por último, las tierras del sur, próximas al Ebro: Ribera Estellesa y Ribera Tudelana e incluso hay algunas distribuciones que separan las Bardenas Reales.

1.5.1. Zonificación Navarra 2000.

En los años setenta del siglo XX la Diputación de Navarra encargó a la Universidad de Zaragoza la elaboración de un estudio de distribución territorial que pudiera servir de base para la mayor parte posible de los sectores.

El trabajo se tituló "Estudio Prospectiva Navarra 2000" y fue presentado en 1980. Los autores y coordinadores fueron Ardaiz Loyola, I. y Martínez Vicente para la Diputación Foral de Navarra, y Gabinete de Estudios y Planificación. A partir de él se buscaba crear la base de un Plan de Ordenación para Navarra.

La necesidad fue debida a los fuertes cambios sociales que se estaban produciendo en las últimas décadas de crecimiento económico y sobre todo urbanístico y constructivo. En bastantes casos había cierto descontrol en la asignación (o no) de permisos para grandes infraestructuras, fondos europeos o proyectos que modificaban de manera sustancial el territorio y su uso con importantes consecuencias en la propia organización territorial e impactos ambientales.

En 1980 se publicaron dos estudios. Es de destacar en primer lugar el comentado *"Zonificación Navarra 2000"*, y, en segundo lugar, el estudio *"Navarra, elementos para su estudio regional"*. Fue a partir de este momento que desde el punto de vista urbanístico se asume el concepto de "comarca" como una unidad básica de planificación territorial.

Esta zonificación divide el territorio navarro en 7 zonas o comarcas, 19 subzonas y 68 áreas, que fueron aprobadas en primer lugar por el Decreto Foral 253/1993, de 6 de septiembre, sobre la composición y denominaciones de la zonificación "Navarra 2000" y posteriormente, se dictó la "Orden Foral 89/2001, de 5 de abril, del consejero de Economía y Hacienda, por la que se estableció la nueva composición y denominaciones de la Zonificación Navarra 2000". Este trabajo que resultó prácticamente definitivo fue publicado por el Departamento de Economía y Hacienda en el "Decreto Foral 253/1993, de 6 de septiembre, sobre la composición y denominaciones de la zonificación "Navarra 2000" y en el Boletín Oficial de Navarra nº 122, de 6 de octubre de 1993. Más tarde se dictó la "Orden Foral 89/2001, de 5 de abril, del consejero de Economía y Hacienda, por la que se establece la nueva composición y denominaciones de la Zonificación Navarra 2000", ésta apareció en el Boletín Oficial de Navarra nº 69, de 6 de junio de 2001, p. 4406-4412. Esta distribución supone el nivel más importante a partir del cual se configuró la escala intermedia de ordenación territorial con las siete comarcas:

Zona 1: Noroeste

Zona 2: Pirineo

Zona 3: Pamplona

Zona 4: Tierra Estella

Zona 5: Navarra Media Oriental

Zona 6: Ribera Alta

Zona 7: Tudela

Esta división se ha venido utilizando habitualmente y ha sido aceptada por la mayoría de las instituciones, también ajenas al Gobierno de Navarra, tanto de ámbito estatal como europeo. La Zonificación Navarra 2000 es considerada como uno de los primeros intentos de elaborar un mapa útil para todos los sectores tal y como se presentaba por Jiménez Nespereira, F., Biurrun Aramayo, L. y Marcén Zunzarren J. A. en su *"Estudio sobre la estructura administrativa y funcional de Navarra: Análisis y propuesta"*. Pamplona. Gobierno de Navarra, Departamento de Administración Local, 1989 (figura 1.05).

También esta zonificación sirvió para adecuar casos concretos como el estudio Objetivo 5b (1994-99) relativo al Plan de Desarrollo de Zonas rurales, realizado por el Departamento de Agricultura, Ganadería y Promoción Rural del Gobierno de Navarra que fue distribuida por el Departamento de Presidencia.

Existen otras comarcalizaciones para fines más específicos que sirvieron, por ejemplo, para la comarcalización del Planeamiento Urbanístico de Navarra y que aportan algún criterio añadido, pero, en general, éstos son los utilizados para las comarcalizaciones.

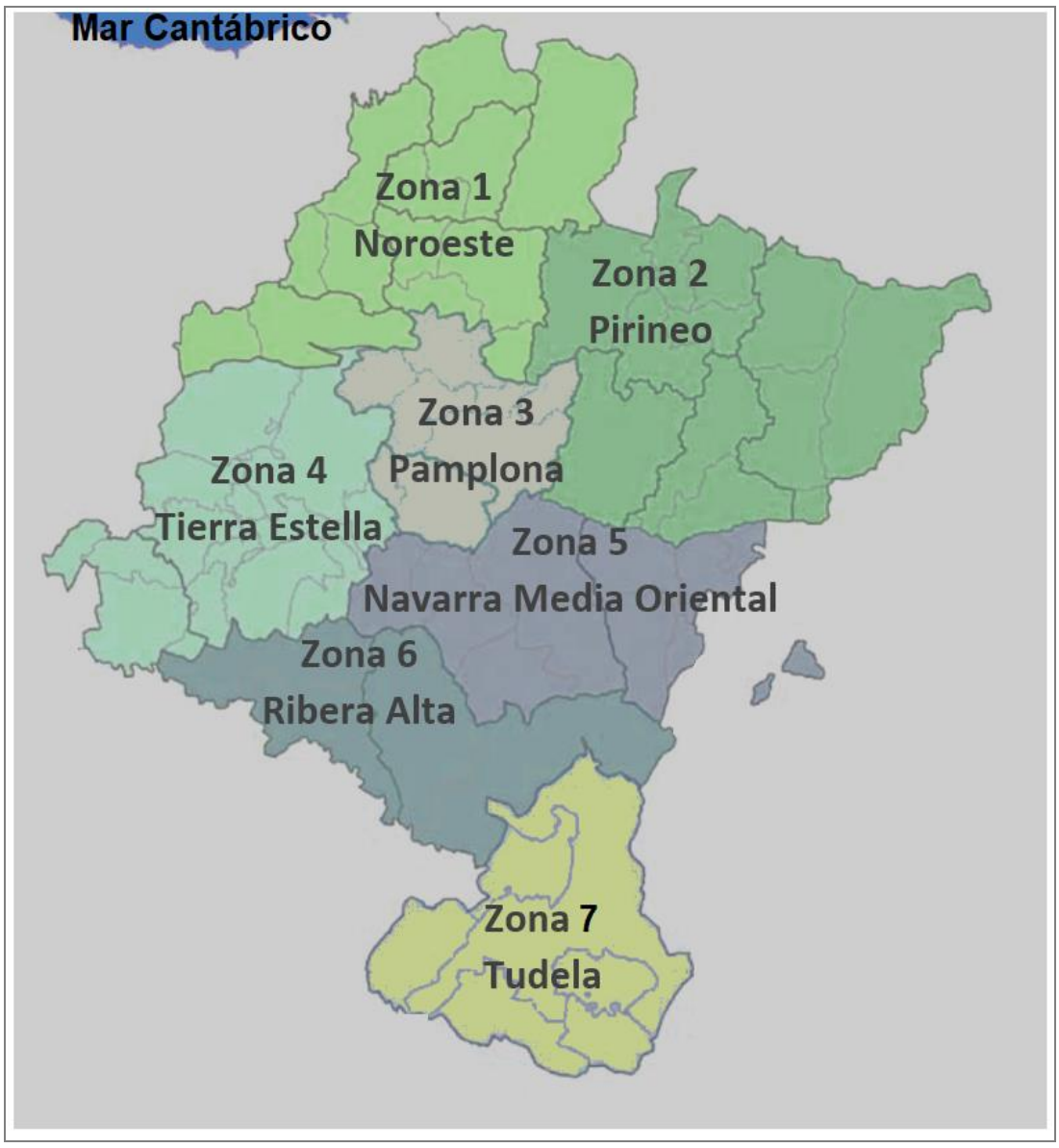


Figura 1.05. División geográfica de Navarra. Zonificación Navarra 2000 (elaboración propia).

1.5.2. Pamplona. Zona 3.

Pamplona ocupa un lugar céntrico en el mapa navarro en la Montaña, en los valles o cuencas Prepirenaicas, concretamente en la denominada Cuenca de Pamplona; se sitúa sobre una meseta de 449 metros de altitud media sobre el nivel del mar que en gran parte queda enmarcada por la traza del río Arga, afluente del Ebro por el norte o margen izquierda. Con 23,55 km², la comarca de Pamplona limita al norte con Juslapeña y Ezcabarte, al este con Villava, Burlada, Mendillorri y Aranguren, al sur con Galar y al oeste con Cizur y Olza. Está enclavada en la llamada Cuenca de Pamplona que a su vez limita al norte con el monte San Cristóbal, al este con la Peña Izaga, al oeste con las sierras de Sarbil y Satrústegui y al sur con las de El Perdón y Aláiz-Izco. La Cuenca de Pamplona es, por tanto, una comarca geográfica dentro de la Comunidad Foral de Navarra.

La extensión que se le adjudicó ha variado a lo largo de la historia. Actualmente, está delimitada con criterios estrictamente geográficos contemporáneos y engloba a la capital, Pamplona, así como a su área metropolitana que abarca un total de 587,3 km². Esto supone que el 56% de la población que estaba censada en Navarra en 2022 vivía en el área metropolitana. Ese año un total de 366.974 de los 664.117 habitantes de Navarra, habitaban el 5,6% del territorio, lo que supone una densidad de población de 750 habitantes/km² (INE).

1.5.3. Distribución de la población.

En cuanto a la distribución actual de la población, conviven en la cuenca dos espacios humanos bien diferenciados. En primer lugar, el área urbana de la capital, Pamplona: los municipios de Pamplona, Sarriguren, Burlada, Villava, Huarte, Barañáin, Berriozar y Ansoáin, son los más densamente poblados y están distribuidos con un urbanismo compacto y continuo que, en la mayor parte de las ocasiones no se diferencia desde el punto de vista urbano entre sus diferentes municipios. Y, en segundo lugar, una periferia rural que circunda a la anterior.

La colonización de esta periferia se ha llevado a cabo desde la segunda mitad del siglo XX siguiendo el modelo de expansión urbana de la mayoría de las ciudades europeas, el denominado crecimiento en mancha de aceite. Así se desarrolló y evolucionó el reciente crecimiento y expansión de la metrópolis, con la creación de satélites residenciales e industriales (figura 1.06).

El núcleo metropolitano entonces, tras el acelerado crecimiento vivido a partir de los años 60 del siglo XX, contiene una parte central, urbanizada, densamente construida y poblada completamente destacable en el área metropolitana de Pamplona, la integran los municipios de: Pamplona, Berriozar, Villava, Huarte, Burlada, Barañáin, Ansoáin, Orcoyen, Cendea de Olza, Zizur Mayor, Cendea de Cizur, Galar, Beriáin, Noáin-Valle de Elorz, Valle de Aranguren y el Valle de Egüés.

La periferia está compuesta por un conjunto de valles y cendeas que enmarcan al núcleo urbano desde el norte hasta el oeste, dando a la comarca una forma bastante asimétrica, notoriamente expandida en dirección noroeste siguiendo un trazado eminentemente geomorfológico favorecido por los procesos de erosión y adecuación en las Margas de Pamplona.

La conforman: Valle de Ollo, Cendea de Iza, Valle de Gulina, Valle de Juslapeña, Tiebas-Muruarte de Reta, Val de Echauri, Echauri, Ciriza, Vidaurreta, Echarri, Ciriza y Belascoáin. Ninguno de ellos pertenece al área metropolitana. Son núcleos puramente rurales, no obstante, muchos cuentan con pequeñas urbanizaciones y acogen segundas residencias.

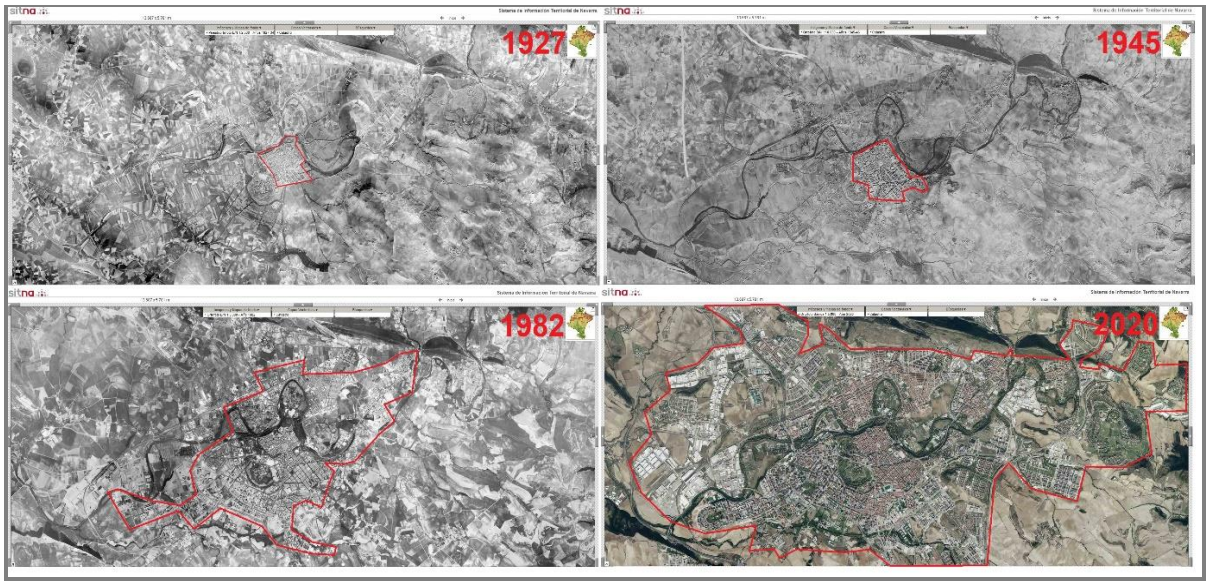


Figura 1.06. División de las áreas de crecimiento del área metropolitana de Pamplona en 1927, 1945, 1982 y 2020. Fuente: SITNA.

1.5.4. Morfología.

Pamplona y su comarca están enmarcadas entre sierras, montes y montañas con una altitud cercana a los 1.000 metros. Destaca la Peña Izaga con 1.353 metros. La Cuenca de Pamplona se encuentra rodeada por relieves positivos que actúan como barreras climáticas con una cierta componente protectora para la capital de Navarra. Las sierras prepirenaicas exteriores (también hay relieves interiores de mucha menor entidad) constituidas por calizas mesozoicas y eocenas, son por lo general el resultado de una actividad tectónica que se desarrolló en torno a la Falla de Pamplona o Estella, un accidente tectónico que viene desde Saint Jean Pied de Port y llega hasta La Rioja: resulta en un conjunto de pliegues y fallas cabalgantes hacia el sur, hacia la gran unidad sedimentaria que conocemos como Depresión del Ebro, también las grandes crestas monoclinales formadas por rocas detríticas, areniscas y conglomerados se inclinan hacia esta depresión.

Hay que apuntar que la Sierra de Alaiz, con la Higa de Monreal de 1.288 m, y las Sierras de Illón, Idokorri y Leire, pertenecientes a la Cuenca de Lumbier-Aoiz, son la expresión más externa y meridional de la gran unidad geográfica denominada "Los Pirineos". Las Sierras de Izco, con el Anchurda de 1.039 m, y El Perdón (1.037 m) conforman el gesto más externo y septentrional de la Depresión del Ebro.

Los relieves más acentuados en el interior de la Cuenca de Pamplona y de otras Cuencas Prepirenaicas son el resultado sedimentario de la intercalación variable de niveles detríticos (areniscas y conglomerados) en la gran masa de las Margas de Pamplona, en el ambiente marino local del Eoceno, también en su techo se cierra el ciclo con estos materiales.

Las areniscas y calcarenitas son mucho más resistentes a la erosión que las margas, eso explica que aparezcan en forma de crestas y cuestas, de pequeñas sierras que resaltan y también delimitan a las cuencas prepirenaicas. En el caso de Pamplona son de destacar las Sierras de San Cristóbal al norte y la de Tajonar al sur.

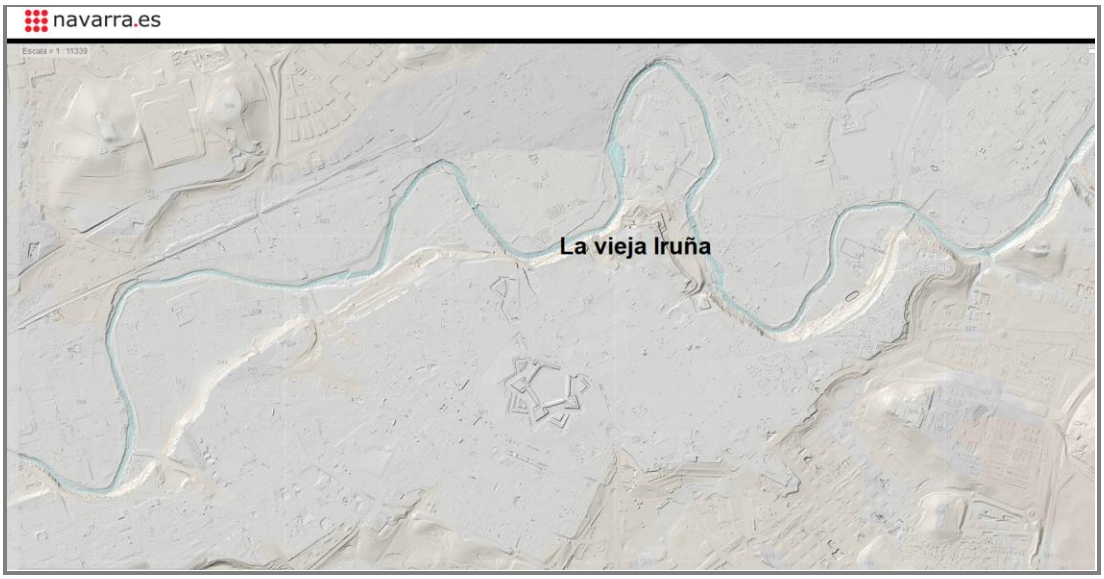


Figura 1.07. La vieja Iruña se sitúa en su suave meseta de gravas cuaternarias P1 sobre las tufas E1. Obsérvense las huellas de los restos de las murallas tanto el norte como en la zona central que se abría hacia el sur y el oeste y el límite de la elevación donde se sitúa la vieja Iruña esculpido por el río Arga.

1.5.5. Clima.

El clima es un factor geológico y geotécnico de primer orden. Quizás el más importante. Buena parte de las patologías geotécnicas que nos han llevado a diagnosticar y peritar en juzgados, o aclarar como expertos en las más altas instancias autonómicas, están íntimamente relacionadas con el clima de la Cuenca de Pamplona, aunque la mano del ser humano sea su ejecutor.

Muchas de ellas no se entenderían si no fuera por el hecho de que especímenes rocosos similares e incluso de la misma formación de Margas de Pamplona, no han generado problemas en contextos arquitectónicos similares con configuraciones de excavación, cimentación y distribución de cargas prácticamente iguales. La delimitación geográfica que acabamos de ver (figura 1.05) nos lleva a considerar que en Navarra podrían convivir hasta cuatro zonas climáticas distintas (figura 1.08) con un contraste inexistente en otras comunidades y que ha labrado con la geodinámica interna y la mano del ser humano la extrema variedad geomorfológica y paisajística de la Comunidad Foral. En apenas los 150 km que van de norte a sur se desarrollan paisajes cantábricos y pirenaicos herederos de la actividad glaciar o desiertos como el de Bardenas Reales bajo influencia mediterránea.

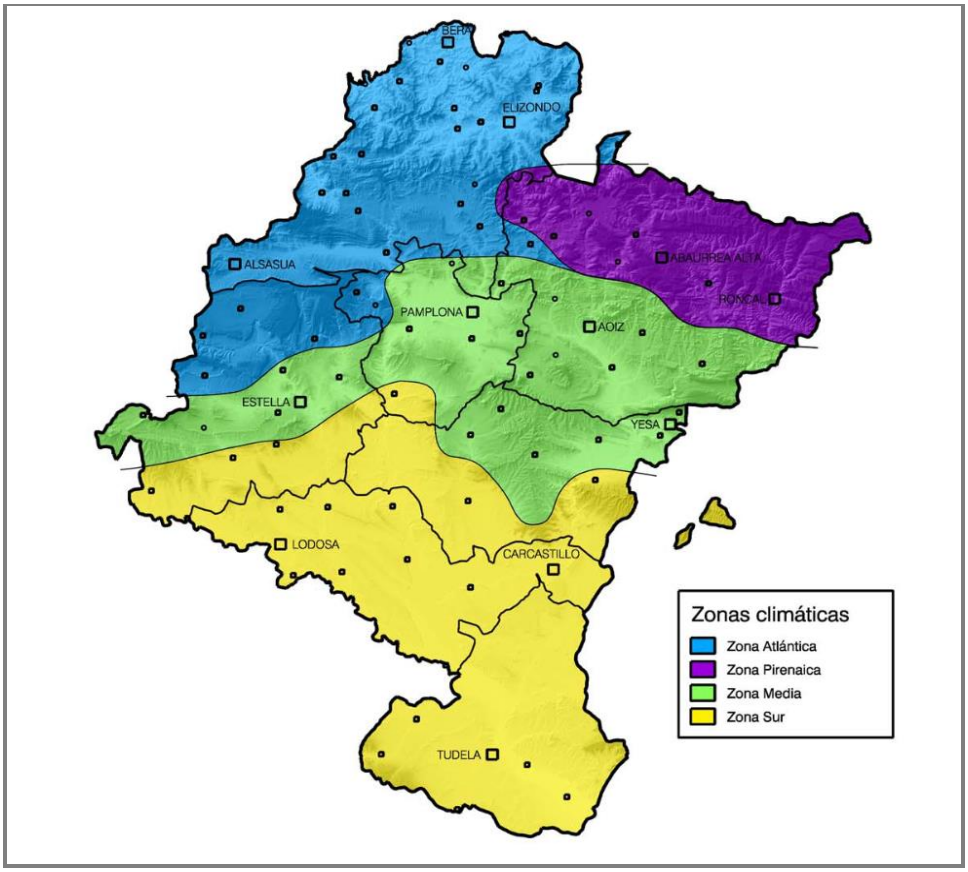


Figura 1.08. Distribución de las cuatro zonas climáticas de Navarra. Fuente: Gobierno de Navarra. Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente.

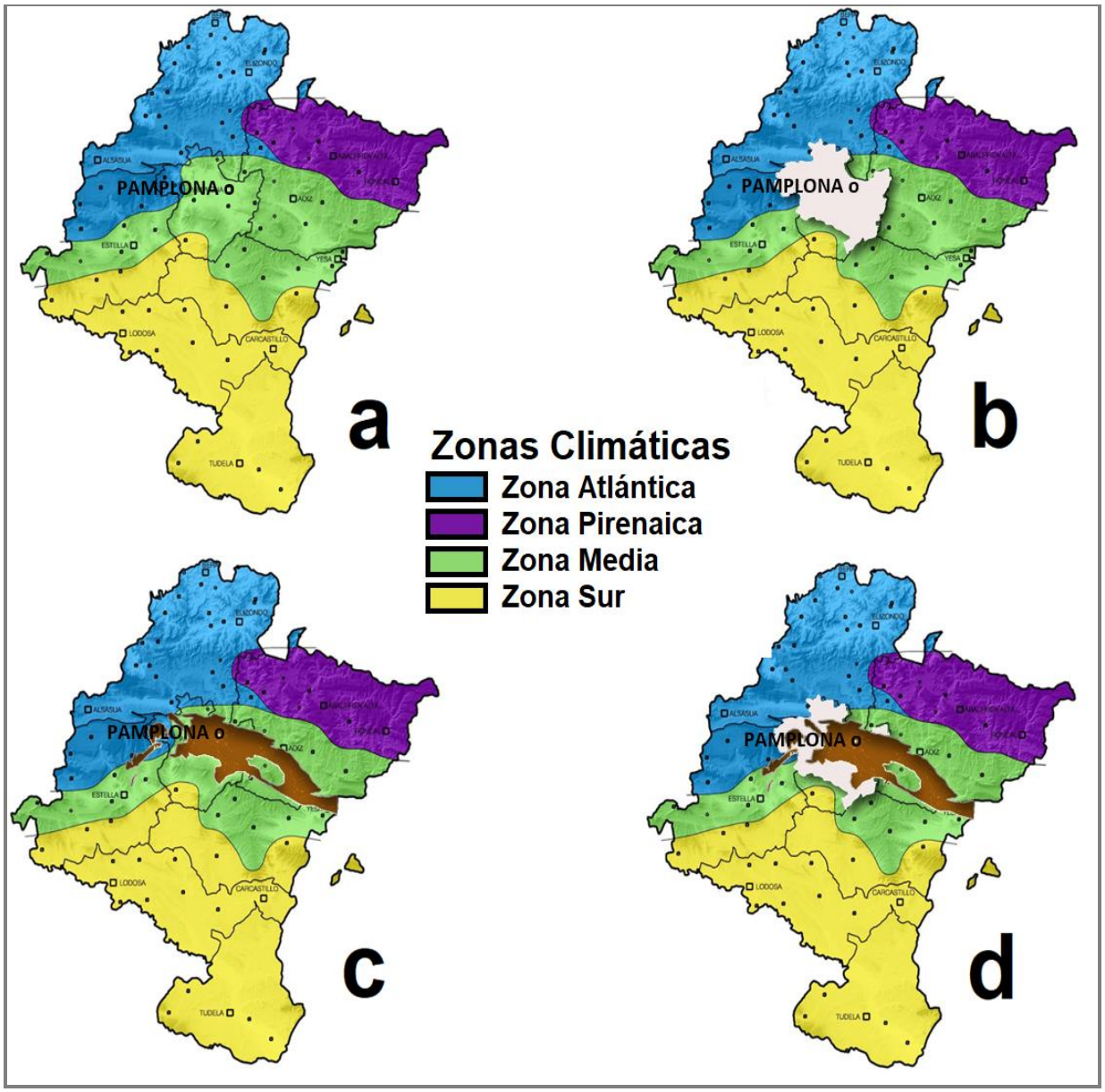
Así, el territorio que ocupa nuestra comunidad está moldeado desde cuatro factores geográficos que se dan cita en un espacio geográfico relativamente pequeño: el mar Cantábrico, la cordillera pirenaica, la influencia continental de la meseta y la cuenca del Ebro. Zona Atlántica al noroeste, el Pirineo al nordeste, la Zona Media en el centro y la Zona Sur, serían las cuatro grandes unidades diferenciadas:

1. *Zona Atlántica:* comprendería los valles cantábricos, el corredor del Arakil y las sierras de Urbasa y Andia al sur. Se trata de un clima oceánico de costa occidental Cfb (Köppen, 1918) fuertemente influido por la proximidad del Cantábrico con abundantes lluvias, nieblas y lloviznas. Es la zona más lluviosa de Navarra y con las temperaturas menos extremas. En el extremo meridional, al sur de la Sierra de Urbasa, se da cierta sequía estival en un área de topografía bastante encajonada.

2. *Zona Pirenaica:* el Pirineo ocupa la parte nororiental, la Mesa de los Tres Reyes de 2.433 m casi en Huesca y colindando con Francia es el techo topográfico de Navarra. Comprende la parte alta de los valles pirenaicos, desde el de Esteribar al oeste hasta el límite con Huesca al este. El clima en esta área muestra condiciones más continentales que los valles cantábricos, su mayor distancia al mar y altitud es determinante. Sigue siendo oceánico o marítimo de costa occidental Cfb (Köppen, 1918), aunque con inviernos más fríos. En las cimas más altas se da un clima subalpino, o continental de verano fresco Dfb con inviernos muy fríos y nieve.

3. *Zona Media:* una amplia zona en el centro de Navarra, en el norte están las cuencas prepirenaicas de Pamplona y Aoiz-Lumbier y el tramo más bajo de los valles pirenaicos. En el suroeste, abarca las tierras al pie de las sierras de Urbasa y Lóquiz, y su límite sur está en las cercanías de Arróniz, Puente la Reina y Cáseda, incluyendo la Sierra de Ujué. Su altitud es superior en general a los 400 m sobre el nivel del mar. Destaca que esta zona es de clima de transición entre el oceánico del norte y el mediterráneo del sur de Navarra. En esta área se distinguen climáticamente dos zonas de norte a sur: el norte, que comprende el tramo bajo de los valles pirenaicos y las cuencas prepirenaicas como es el caso de la de Pamplona y Aoiz-Lumbier, en las que en ambas abunda la formación eocena de Margas de Pamplona, y excepto en el extremo sur de ésta, se vive un clima suboceánico, marítimo de costa occidental Cf2b (Köppen, 1918) con dos meses relativamente secos.

4. *Zona Sur:* el sur, sin embargo, presenta un clima mediterráneo de veranos frescos Csb ya que existe un verano seco, excepto en el extremo suroriental al este de las sierras de Tabar e Izco, en que es Cfa o subtropical húmedo, clima algo más continental, y con veranos demasiado lluviosos para ser mediterráneo y demasiado cálidos para ser marítimo. En el sur de Navarra, de orografía llana y donde se alcanza una altitud no superior en general a los 400 m sobre el nivel del mar, el clima en la parte más al norte es mediterráneo Csa (Köppen, 1918), de precipitaciones más bien escasas y veranos cálidos y secos. Las precipitaciones, que todavía alcanzan los 600 l/m² anuales en el límite con la Zona Media, van disminuyendo de norte a sur, de manera que al sur de Villafranca hace su aparición el clima estepario propio de la zona central del Valle del Ebro, Bsk (Köppen, 1918) o clima estepario frío.



Figuras 1.09: Figura 1.09a. Distribución de las cuatro zonas climáticas de Navarra (Gobierno de Navarra) 1.09b. Cuenca de Pamplona y zonas climáticas Atlántica y Media. 1.09c. Margas de Pamplona y zona climática Media 1.09d. Margas de Pamplona, Cuenca de Pamplona y zonas climáticas Atlántica y Media.

En la figura 1.09 podemos ver las cuatro grandes zonas climáticas de Navarra, la cuenca de Pamplona repartida entre la zona atlántica (azul) y media (verde), la extensión de la formación eocena de Margas de Pamplona enmarcada en más de un 90% en la zona climática media, con una parte al norte tocando parte de la Zona Atlántica y otra al este no llega a introducirse en la Zona Pirenaica. Finalmente se pude ver la cuenca de Pamplona (figura 1.09d) con cerca de la mitad de su extensión sobre dicha formación, situándose hoy el área metropolitana de Pamplona prácticamente en toda su extensión sobre esta formación rocosa eocena en la franja climática de la Zona Media.

1.6. Geología.

El núcleo original de la vieja Iruña ocupa el borde de una terraza (figura 1.07). Se trata de una meseta donde hoy se encuentran el Casco Viejo, el Primer y Segundo Ensanche, Iturrama, San Juan y se prolonga por Mendebaldea incluyendo Barañáin (20.200 habitantes en el censo de 2020). Este depósito de gravas redondeadas heterométricas con arcilla y esporádicamente lentejones de limo y arena que vamos a llamar P1, recubre las Margas de Pamplona (localmente tufa) en prácticamente toda la meseta que forma la parte alta de Iruña, excepto en sus bordes inclinados. Se trata de un depósito del río Arga que se desarrolló durante la glaciación de Riss (180.000-130.000 años).

Entonces, a partir de algunos restos arqueológicos del Paleolítico Inferior, hallados en este nivel por diferentes lugares de la Cuenca de Pamplona, podríamos afirmar que el río estaba excavando la zona (hoy alta). Desde entonces el Arga continúa su esculpido, formando nuevos fondos más bajos a costa de los que creó previamente. Así, distinguimos varios niveles diferentes de terrazas por debajo del nivel de Pamplona. El nivel actual del río Arga, con su llanura de inundación (niveles P2), afecta a los meandros de la Magdalena, Aranzadi, Rochapea, Costalapea, Miluce, Landaben, etc., con inundaciones cada cierto tiempo.

Estas formaciones (P2) más actuales, presentan menos cantos rodados y su color es más pálido, menos rojizo que el de la terraza alta, debido al periodo interglaciar más cálido que el actual sucedido antes de la última glaciación. La diferencia de color es debida al óxido de hierro presente en estos materiales y en su matriz arcillosa. Con la glaciación de Würm, que terminó hace unos 11.000 años, la actividad geomorfológica disminuyó en intensidad. Por tanto, los perfiles geotécnicos de buena parte de la ciudad de Pamplona se van a definir a partir de estos materiales que descansan por encima de E1 (las Margas de Pamplona), que son P1 en la zona alta y P2 en la parte más baja. Los glacis presentan poco desarrollo en la zona y podrían determinar un perfil tipo de carácter geotécnico a nivel local. Sin embargo, en el área metropolitana son escasos por lo que finalmente la evaluación geotécnica se realizará con el estudio geotécnico de cada proyecto, la mayoría de las veces son retirados o puntualmente contenidos. Los niveles de terraza (P1 y P2) responden a la actuación de fuerzas geomorfológicas y tectónicas que actúan sobre los materiales y formaciones heredadas cuando se va formando una cuenca. La formación de una cuenca como la de Pamplona es impulsada por un engrosamiento orogénico responsable de diferencias de altitud y energía potencial entre el orógeno y la cuenca en desarrollo. La consecuencia es la erosión del orógeno y la correspondiente recepción de sedimentos en la parte cóncava (cuenca). Cuando el orógeno se eleva, los procesos atmosféricos incrementan el suministro de sedimentos terrígenos a la cuenca en cualquier ambiente, sea éste cercano o marginal. El clima es un factor clave, fundamental para explicar los comportamientos que sigue conformando en las unidades geotécnicas.

De esta manera, la distribución de masas se ve modificada y la evolución de la cuenca refleja en cada momento esa relación acorde con la evolución tectónica y los procesos de equilibrado que protagonizan la atmósfera y la hidrosfera. Prácticamente en cualquier área de la Cuenca de Pamplona se pueden diferenciar las margas grises azuladas a las que históricamente se denomina "tufas" (en toda Navarra y en territorios limítrofes). Existe una variedad notable de especímenes de margas y alternancias de éstas con otras litologías como turbiditas, limolitas, areniscas o calizas. Sin embargo, destaca un paquete de hasta unos 700 m de espesor cuya importancia trasciende la pura ciencia geológica, las Margas de Pamplona sustentan el área metropolitana de la capital con más de 367.000 personas. Esta formación rocosa ha jugado un papel crucial en el desarrollo histórico y evolución de la ciudad que les dio su nombre, aunque ese papel no haya sido completamente reconocido para los sectores que más interactúan con ellas, a veces, incluso han sido unas desconocidas desde el punto de vista geotécnico o geomecánico, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XX con la súbita irrupción de la maquinaria de obra basada en el motor de combustión interna.

La formación de Margas de Pamplona yace sobre niveles turbidíticos que también se intercalan en ésta formando lentejones distribuidos hacia el NO (barras de Huarte, San Cristóbal, Berriosuso, Añézcar) mostrando en sus estructuras de sedimentación la existencia de una no muy acentuada pero sí continua subsidencia al NE de la cuenca que debió avanzar también cuando se depositaron las Margas de Pamplona en el Biarritziense a ritmos bastante uniformes y de una manera tan masiva que hace que constituyan una formación bastante original comparada con las que le precedieron y las que le siguen. Es de destacar que las facies de esta formación son prácticamente idénticas en cualquier parte de su extensión, los datos geotécnicos que manejamos así lo indican y los cambios laterales de comportamiento son tan leves que se pueden considerar, a efectos geotécnicos, como irrelevantes, tal cual hemos investigado en el pasado y seguiremos haciéndolo en el futuro. En la parte superior existen, como en la base, niveles de areniscas de carácter turbidítico. Éstos se pueden distinguir en resaltes como los de las sierras de Tajonar, Tabar, Góngolaz y Ardanaz y que, a veces, producen ciertas discordancias (areniscas de Cizur, Tajonar) que podrían suponer movimientos de cierta entidad al final del Biarritziense.

En la siguiente imagen (figura 1.10) podemos ver el límite superior del ciclo Bartoniense-Priaboniense inferior (en color amarillo en el mapa y desde el ángulo opuesto de la figura 1.03) en el talud escogido para observar el cambio gradual de la formación en el límite sur del área metropolitana, quizás uno de los mejores afloramientos en Pamplona, es la desviación de la salida de Landaben para incorporarse a la A-8 en dirección Zaragoza.

A estos niveles se les ha denominado calcarenitas y han tenido una importancia clave en la construcción histórica basada en la sillería y en la restauración moderna, tanto en edificación como en pavimentación en la ciudad de Pamplona y en localidades cercanas. Litológicamente son biocalcarenitas (grainstone) marrones claro, con granos de cuarzo que abundan en los tramos basales, distribuidos en capas de unos 10 cm de espesor. La potencia total de cada nivel es muy variable, sobrepasando raramente los 50 m. Los análisis petrológicos han determinado que estos niveles tienen un 97% de CO_3Ca y un 3% de terrígenos, fundamentalmente cuarzo. La deposición muestra abundantes estructuras tractivas producidas por tormentas con frecuentes incisiones y formas canalizadas similares a canales de plataforma. Se corresponde a una plataforma siliciclástica abierta, expuesta a la acción de las tormentas. Le sigue en la serie las margas del Priaboniense (Eoceno superior) muy semejantes a las de Pamplona, Margas de Ilundáin (bajo la franja amarilla).

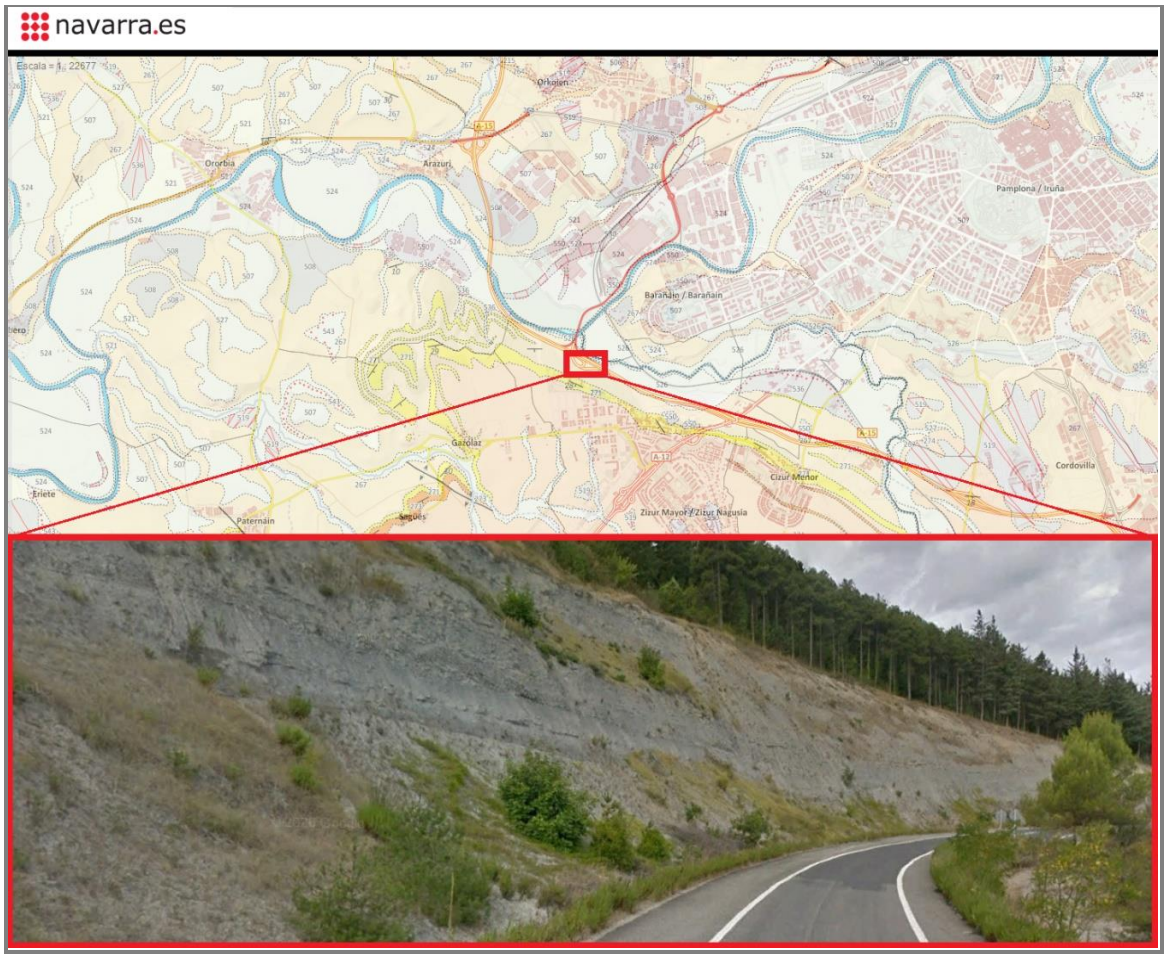


Figura 1.10. Límite sur del contacto a techo del ciclo Bartoniense-Priaboniense inferior (desde el ángulo opuesto de la figura 1.03) en el talud escogido para observar el cambio gradual de la formación en el límite sur del área metropolitana. Desviación de la salida de Landaben para incorporarse a la A-8 en dirección Zaragoza.

A finales del Eoceno el mar se retiraba hacia el NO y la corteza acabó cerrándose por lo que actualmente es territorio de Guipúzcoa. Entonces en la parte sur de lo que ya era cuenca sedimentaria quedó una zona con un mar cerrado de alta salinidad, seguramente comunicado levemente con el mar abierto. Se depositaba anhidrita, sales sódicas y potásicas que son las que dieron lugar a las explotaciones mineras de Potasas de Subiza durante el siglo XX de 1962 a 1997 y de sal de sodio actualmente (desarrollado en *"La minería en Navarra ante el nuevo contexto histórico de transición energética y global"*. Fundación Sustrai Erakuntza. Aretxabala, A. 2020). Sobre estos depósitos se sedimentaron las margas rojas lacustres (margas fajeadas). Ya por encima se encuentran unos niveles de arenisca con "ripple-marks" de carácter litoral (areniscas de Galar) que delatan una relativa vuelta de ambiente marino poniendo fin a la sedimentación eocena. En el Oligoceno, el mar se retiró definitivamente y se establecieron condiciones lacustres. Se depositaron las margas rojas y grises con yesos y algún nivel de sal que afloran al sur, como los yesos de Undiano. Estos materiales fueron recubiertos de forma discordante por los conglomerados de El Perdón que pertenecen al Oligoceno-Mioceno (Chattiense-Aquitaniense).

Una de las mejores pistas sobre el origen de la cuenca de Pamplona y su evolución vino en 1975 cuando se culminó la perforación del denominado "sondeo de Astráin" que llegó a perforar hasta 4.500 m. En ese momento en España se buscaban depósitos de petróleo tras el estímulo vivido en 1964 al encontrar Standard Oil y Texaco en La Lora (Burgos) el almacén que comenzó a explotarse en 1967 hasta hoy (en la parte ocho ampliaremos información en el ámbito de la geotermia).

En ese sondeo de Astráin, tras atravesar la secuencia desde prácticamente el techo de las Margas de Ilundáin hasta el Keuper, se penetró en las calizas lutecienses, mostrando que la Cuenca de Pamplona es una unidad alóctona y se encuentra desplazada por lo menos 15 km. Se trataba de un importante avance en la comprensión de la estructura de la cuenca, no solamente para la interpretación de su estructura, también como pieza fundamental de la tectónica regional *("La Hoja de Pamplona. Evolución de su conocimiento geológico"* Del Valle Lersundi, J. ISSN 0214-6622, Nº. 14-15, 1996). Ese mismo año de 1975 se publicó la tesis de Cayo Puigdefábregas por el CSIC-Instituto de Estudios Pirenaicos, sobre *"La sedimentación molásica en la cuenca de Jaca"* que suma una visión de la evolución paleogeográfica del área estudiada. También da una explicación de la presencia de los niveles turbidíticos existentes entre las Margas de Pamplona. La formación queda entonces en el Biarritziense y las Margas de Ilundáin en el Priaboniense.

El sondeo de Astráin realizado para la explotación de hidrocarburos, al interceptar bajo el Triásico nuevamente materiales del Eoceno y Paleoceno, sugiere la existencia de una gran unidad alóctona, en la que estaría integrada toda la cuenca de Pamplona. Como comentábamos sobre los límites de la Cuenca de Pamplona, la Sierra de Alaiz es una parte importante del extremo sur de ésta.

El anticlinal cabalgante de Alaiz mostraría un salto mínimo de 5 km, indicando que estamos ante la estructura provocada por un accidente de notable importancia que se verá reflejado en la sismicidad y la seguridad que analizaremos en la parte sexta. El desplazamiento, como apuntaron varios autores tras revisar los resultados del sondeo de Astráin, en la zona de sales y potasas podría haber alcanzado 15 km. Relacionado con la Orogénesis Alpina, cuya fase principal tuvo lugar en esta zona al final del Oligoceno, aún mostraría pequeños movimientos que se perciben como actividad sísmica recurrente, el año 2013 nos lo recordó. En el Mioceno se produjo una destacable reactivación; existen, por lo menos, cuatro niveles de terrazas aluviales formadas por gravas, arenas, limos y arcillas, de las que el tercero de ellos que hemos comentado (terraza de Pamplona P1, figura 1.07) se correlaciona frecuentemente con glacis (glacis de Esparza y Beriáin). Los derrubios de ladera tienen desarrollo en la falda Norte de la Sierra de El Perdón, donde se acumulan los cantos rodados procedentes de los conglomerados del terciario continental. Entre Ibero y Echauri existen tres niveles de terrazas formadas por tobas. Probablemente sean debidas a diversos emplazamientos del actual manantial termal de Ibero, con un alto contenido en bicarbonato cálcico.

1.6.1. Estratigrafía del Biarritziense (Eoceno medio y superior).

La Cuenca de Pamplona limita al oeste por la Falla de Pamplona o Estella. En realidad, son dos fallas de desgarre diferentes, una que afecta solamente a la cobertera y otra profunda que afecta al zócalo y que es la que desplaza la Falla Norpirenaica al "Manto de los Mármoles" o Falla de Leiza. No se trata de un accidente neto, es una extensa banda de cizallamiento de orientación NNE a SSO que afecta a la cobertera desde la Sierra de Andía hasta la zona oriental de la Sierra de El Perdón. Al este, la cuenca está limitada por las estructuras pirenaicas del entorno del Macizo de Oroz-Betelu con el desarrollo de sedimentos turbidíticos de manera bastante destacable. Éstos se sumergen bajo los sedimentos margosos típicos de la cuenca. Al sur, está limitada por el cabalgamiento de las sierras de Alaiz y El Perdón que la separan definitivamente de la Cuenca del Ebro y al norte, por estructuras de dirección NO-SE, relacionadas probablemente por el cabalgamiento de Roncesvalles.

La ausencia de depósitos terciarios posteriores al Priaboniense en el área en torno a la capital, Pamplona, no permite trazar una secuencia precisa de acontecimientos, aunque por el estudio de sectores próximos todo parece indicar que la compresión pirenaica en el sector de Aralar con estructuras vergentes hacia el norte, acabó con la retirada del mar hacia el NO, favoreciendo en la Cuenca de Pamplona la instalación de lagunas con depósitos salinos. En el Oligoceno, con un régimen continental generalizado, tuvo lugar una nueva fase compresiva, caracterizada por sus vergencias al sur y algunas piezas desplazadas y alóctonas como el caso de la Cuenca de Pamplona. El aspecto que ofrece actualmente el área es el resultado de los procesos de modelado cuaternarios.

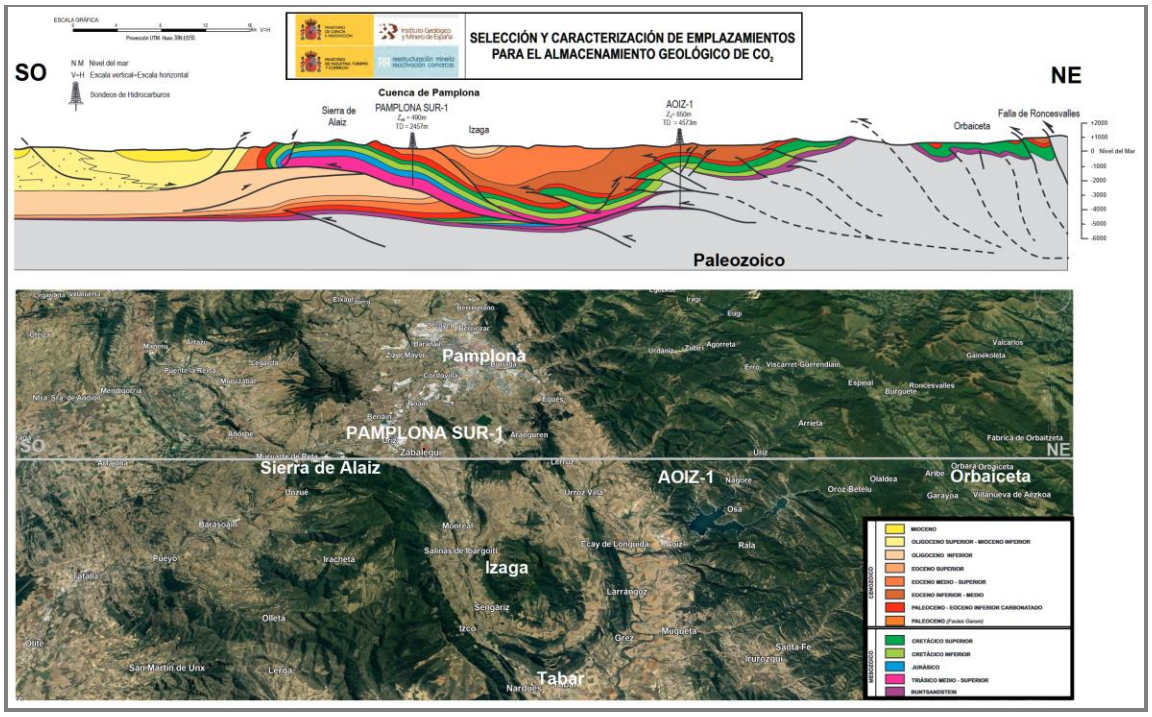


Figura 1.11. Corte NE-SO desde Roncesvalles a Larraga. *Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento de CO_2.* Mº Ciencia y Tecnología, IGME, Gessal (2010).

Geológicamente, esta zona se sitúa en el sector occidental del Pirineo Central (figura 1.11). La cordillera de los Pirineos es el resultado de la convergencia entre las placas ibérica y europea. En la deformación u orogenia alpina se deformaron las rocas del basamento paleozoico que ya habían sido deformadas por la orogénica hercínica. Además, una serie mesozoica se depositó en un contexto extensional y un conjunto de sedimentos del Cretácico terminal y del Terciario lo hicieron al mismo tiempo que se sucedían los cambios, estos últimos aparecen integrados en las láminas cabalgantes y en las cuencas del antepaís que bordean la cordillera. Los materiales que afloran o lo hacen bajo los depósitos cuaternarios recientes son depósitos arcillosos salinos del Triásico Superior en facies Keuper.

1.6.2. Jurásico.

El Jurásico no se ha encontrado a este lado de la Falla de Estella o Pamplona, pero sí hacia el oeste y más al norte arrastrado por fenómenos diapíricos. En los sondeos profundos realizados en esta zona se presenta con bastante uniformidad con respecto a la zona de Estella, Ayegui o Alloz, con media docena de niveles bastante homogéneos: arcillas anhidríticas grises y rojas que pasan hacia techo a dolomías cavernosas carniolares que fueron explotadas para sillería ligera en monumentos como el Monasterio de Irache, la potencia en el sondeo de Astráin fue de 260 m. Le siguen calizas y calizas dolomíticas con laminaciones y margas arcillosas, su potencia máxima es de unos 50 m.

A techo se observa un conjunto fundamentalmente margoso con intercalaciones calcáreas y potencias de 50 m. La siguiente unidad está formada por caliza arcillosa con filamentos que en el sondeo de Astráin alcanza otros 50 m de espesor, finalmente el Jurásico termina con calizas oscuras algo arenosas y calizas beige con una potencia de 180 m.

1.6.3. Cretácico.

La transición al Cretácico no está clara. La base del Cretácico se ha cortado en algunos sondeos como el de Astráin, son limolitas negras micáceas alternando con areniscas de grano fino, contienen piritas. Hay niveles con mayor contenido arcilloso y otras arenoso. En el sondeo de Astráin todo el paquete presenta una potencia de 1212 m.

El paso al Cretácico superior comienza con margas arcillosas y carbonatos a techo. En el sondeo de Astráin se observa una evolución hacia facies más profundas. En la Sierra de Alaiz, el paquete de calizas santonienses va de arenoso a microconglomerático.

Durante el Campaniense, la sedimentación se hace homogénea en la cuenca sin variaciones de potencia. En el sondeo de Astráin se observan margas en el Campaniense que evolucionan hacia techo a areniscas en el Maastrichtiense.

1.6.4. Paleoceno.

El Paleoceno en el sondeo de Astráin muestra calizas dolomíticas con cerca de 100 m de espesor. El Eoceno inferior y medio está representado por un paquete de calizas masivas. En la base del Bartoniense existe una fase erosiva que ha hecho desaparecer parte de los niveles calcáreos anteriores y sobre esta sucesión se desarrollan las Margas de Pamplona del Eoceno Medio, Luteciense Superior-Bartoniense. A techo de esta formación de margas, se culmina la formación con los materiales calcomargosos detríticos de Cizur y sobre ellos con un límite erosivo se desarrollan las Margas de Ilundáin anunciándose por niveles detríticos calcáreos turbidíticos como los de Tajonar dando paso a margas con intercalaciones turbidíticas. Los últimos metros de las Margas de Ilundáin indican condiciones reductoras, y es sobre estos materiales euxínicos que se desarrollan las sucesiones evaporíticas que forman los yacimientos potásicos de El Perdón.

Por encima de las evaporitas se encuentran unos 50 m de margas fajeadas y un paquete detrítico compuesto por areniscas con ripples (Areniscas de Galar) que representan el Eoceno terminal. Continúa la sedimentación con una potente serie evaporítica continental con lutitas, anhidrita y niveles de halita (Yesos de Undiano) que se encuentran decapitados por los niveles de conglomerados inferiores de El Perdón y sobre ellos el ciclo de los conglomerados superiores de El Perdón.

Las Margas de Arguís-Pamplona son una potente serie de unos 1.000 m de margas calcáreas gris azuladas masivas con pocas u ocasionales intercalaciones de espesor centimétrico de areniscas calcáreas de grano medio y fino de marcado carácter turbidítico. Destaca la homogeneidad en su tramo inferior y carece de restos fósiles. Los niveles que marcan la estratificación aparecen bioturbados.

Es hacia el techo de la unidad donde aparecen las mencionadas intercalaciones de niveles areniscosos, como hemos visto, por ejemplo, en Cizur (figuras 1.03 y 1.10). Su aparición va siendo cada vez más frecuente. En la zona oriental, el contacto con el Flysch de Yesa suprayacente es gradual, aumentando el contenido en areniscas hasta llegar a predominar claramente en el Flysch (figura 1.02).

A efectos de cartografía, tal y como hemos adelantado, el criterio empleado para determinar un contacto o el límite superior de las Margas de Pamplona, ha venido siendo esa relación de margas y areniscas. Se han considerado pues, como Margas de Pamplona, a los materiales margosos que presentan un contenido en niveles de arenisca inferior al 20% y cuando el contenido en areniscas supera el 20% se considera el dominio del Flysch de Yesa.

1.6.5. Mineralogía de las Margas de Pamplona.

La calcita es el mineral componente más abundante, aparece en peso con concentraciones por encima del 50%. En superficie, hasta unos 2 m de profundidad aproximadamente, la calcita puede caer a valores de alrededor del 10% (SETRA y LCPC 1976) (figura 1.12). Además, se suele oxidar derivando en un depósito arcilloso de color marrón con espesores muy variables de entre varios centímetros hasta unos pocos metros; también suelen mezclarse con materiales coluviales e incluso con los de las terrazas que ocupan buena parte, por ejemplo, de la Cuenca de Pamplona, o con las dos.

Las causas de esta erosión diferencial no se deben a procesos de meteorización química (diferencias en tasas de disolución) ni a la naturaleza mineralógica de las arcillas. Hay que recurrir a causas físicas (susceptibilidad ante la helada, humectación-desecación) para explicar la rápida disgregación de las rocas margosas, ver, por ejemplo, el papel de las concreciones carbonatadas en el proceso en *Concreciones carbonatadas en margas del Eoceno. Consecuencias geomorfológicas.* Martí Bono, C., Plana, F. 1996.

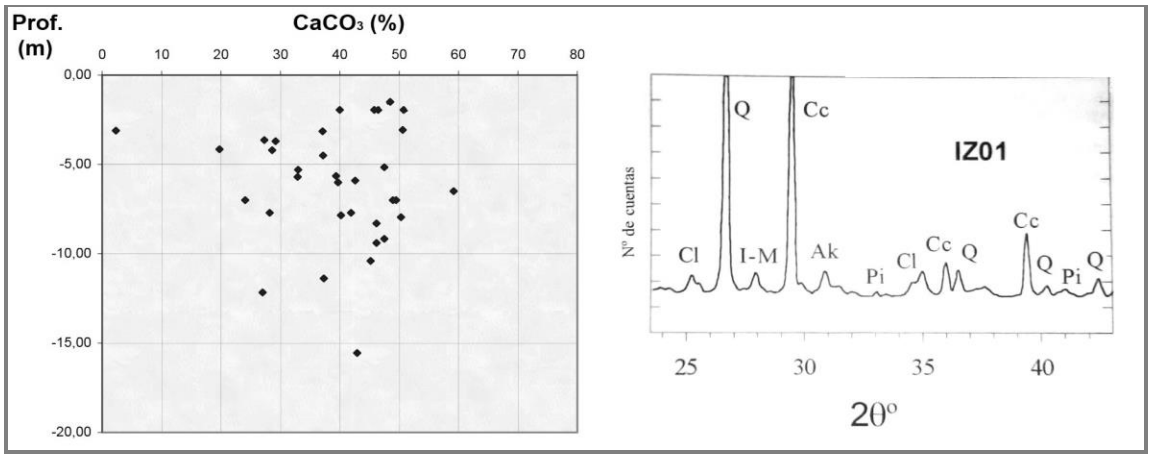


Figura 1.12. Izquierda: variación del contenido de $CaCO_3$ en porcentaje con la profundidad de 28 muestras de Margas de Pamplona (Mapa Geotécnico del área de Pamplona. Departamento de Obras Públicas, Transportes y Comunicaciones del Gobierno de Navarra. ISBN: 84-235-2275-X, 2002). Derecha: difractograma de una muestra de Margas de Pamplona. Ak: ankerita, Cc: calcita, Cl: clorita, I-M: illita-moscovita, Py: pirita, Q: cuarzo (Larrasoaña, J.C. 2000).

Los análisis químicos y de difracción por Rayos X de este material proporcionan una composición mineralógica de 51% de calcita, 20% de illita, 15% de cuarzo, 5% de caolinita, 5% de attapulgita y 4% de ankerita (Seco, 2010).

El clima de la Cuenca de Pamplona y de la Canal de Berdún y, por tanto, la presencia o ausencia de agua, es clave para comprender el comportamiento más plástico o más elástico del conjunto más superficial de estos materiales, así como la generación de tensiones en su interior. Este fenómeno es el que provoca su degradado progresivo hasta la completa transformación en un suelo arcilloso vulnerable a cambios de humedad y de volumen estacionales, también a la erosión diferencial.

Las áreas ocupadas por las Margas de Pamplona presentan una serie de características geomorfológicas que han sido esquematizadas de manera bastante didáctica desde ese punto de vista por Martí Bono y C., Plana, F. (1996) en los cinco puntos que vamos a concretar, los cuales son un preámbulo de las tres familias geotécnicas que también vamos a desarrollar más adelante:

a) Presencia de superficies con relieves suaves; glacis o rampas de erosión, conos-glacis (Sole i Sabaris LL., 1941; Barrère P. 1966, 1975) que enlazan las vertientes con los niveles de base, constituidos por un sistema escalonado de terrazas pleistocenas.

b) Superficies regularizadas de fuerte pendiente, entre niveles diferentes de terrazas o de glacis.

c) Incisión de dichas superficies de enlace y de las laderas, con formación de cárcavas, cuya profundidad es de orden métrico a decamétrico.

d) Acumulación de materiales finos, limos con ocasionales canales de gravas, en espesores de 5-10 m, dando lugar, por colmatación, a fondos de valle llanos, análogos a los descritos en la depresión del Ebro (Rodríguez Vidal, 1986; Pena et al, 1991; Gutiérrez y Pena, 1991; Chueca et al, 1992), donde las últimas alternancias regularización-incisión han sido atribuidas a variaciones climáticas dentro del Holoceno.

e) Incisión final del relleno de material fino de los fondos de valle, y continuación del proceso de acarcavamiento en las margas. Es un proceso que se puede atribuir a la actividad antrópica del último milenio, tal como indican los registros sedimentarios lacustres (Montserrat, 1992).

Los procesos de formación de cárcavas y erosión de laderas en las margas implican una alteración previa de éstas. El arrastre por procesos de arroyada se realiza sobre materiales sueltos, mientras que en el fondo de las cárcavas aparece la roca sin meteorizar.

Cuando existen materiales más resistentes interestratificados (areniscas o concreciones) éstos quedan en relieve, dando lugar a un paisaje muy característico, especialmente, como ya se ha indicado, en el caso de las concreciones que aparecen en las Margas de Larrés.

Pero la implicación reológica de los minerales arcillosos es quizás la que mayor trascendencia denota a la hora de explicar el carácter evolutivo de esta formación rocosa y de otras de características similares. La función geomecánica y evolutiva que desempeña cada uno de los minerales que componen las Margas de Pamplona se simplifica en la cuarta columna de la tabla I.

En la publicación del Gobierno de Navarra de 2002 "*Mapa Geotécnico Para Ordenación Territorial y Urbana de Pamplona",* los análisis petrológicos arrojan porcentajes medios de minerales de arcilla y calcita del 84%, con un 3% de bioclastos de micromamíferos, miliólidos y globigerinas, cuyo tamaño oscila entre 0,05 y 0,5 mm.

Los opacos representan el 3% con tamaños comprendidos entre 0,02 y 0,25 mm; el cuarzo, con un 10%, en tamaños de 0,05 a 0,07 mm; y las micas representan menos del 1%. Cita de la publicación:

> *"En su composición mineralógica, se han determinado porcentajes de cuarzo que oscilan entre el 15-17%, de calcita entre 40 y 51%, de illita entre el 20 y 40%, caolinita entre el 5 y el 12%, atapulgita un máximo del 13% y ankerita, un máximo del 6%. No hay datos concretos sobre su espesor en la zona de estudio, pero se estima que puede oscilar entre los 400 y los 1500-2000 m. Su abundante fauna permite datarlas como Bartoniense-Priaboniense inferior. Las Margas de Pamplona se interpretan depositadas en un ambiente de plataforma externa y se estima que pueden constituir los equivalentes prodeltacios de formaciones situadas en posiciones más orientales".*

Tabla I

Composición de las Margas de Pamplona	Compuesto	Presencia relativa	Importancia tecnológica	Observaciones Importantes
Carbonatos	Calcita	Alta 30-60%	Muy alta	Constituye el cemento natural
Minerales arcillosos	Illitas, cloritas, caolinitas, ankerita	Media 20-40%	Alta	Admiten moléculas de agua en su composición
Cuarzo	Como granos o gel de sílice	Poca 10-15%	Poca	Le infringe la dureza necesaria para su tecnología

1.6.6. El cemento calcáreo y la pérdida de cohesión

El cemento natural calcáreo, presente en un 30-60% (ver tabla I y figura 1.12), constituye con la matriz arcillosa el elemento de cohesión que, en estado natural, brinda un carácter elástico a las margas. Es el responsable más directo de la resistencia a la compresión y del peso específico y su dependencia de la profundidad relaciona todo ello con el clima.

La calcita dota de unas cualidades notables, como terreno de apoyo de cimentaciones, a las Margas de Pamplona. Además, dado que no se trata de una roca dura, los medios de excavación pueden ser mecánicos convencionales la mayor parte de las veces.

Los procesos anteriormente descritos dejan el acceso del agua atmosférica con CO_2 disuelto que penetre en la estructura de la roca produciéndose el proceso de solubilización por formación de bicarbonatos a partir del cemento carbonatado.

La fracción arcillosa es fundamental a la hora de comprender la degradación de las margas. Pequeñas variaciones de humedad producen un cambio que se traducen en:

1- Si el cambio es hacia el lado seco, el proceso se manifiesta por una pérdida de cohesión y un agrietamiento inmediato con desmoronamiento, disgregación y la propensión a recuperar la humedad; se trata de un fenómeno irreversible.

2- Si el cambio es del lado húmedo, se traduce en un aumento de volumen. El resultado, el mismo, pero esta vez no se forma polvo, lo que tenemos es un lodazal preparado para perder parte del agua sobrante ya que muchas partículas han quedado otra vez en forma coloidal. Las simulaciones numéricas de los efectos de humectación fragmentos de marga de tamaño finito ayudaron a identificar la naturaleza de los mecanismos de degradación corroborando lo observado a nivel visual: van asociados al desarrollo de superficies de tracción dentro de la matriz de la marga.

Estos, a su vez, se deben al comportamiento expansivo de la fracción arcillosa de la marga en relación con los cambios de succión (E. E. Alonso, J. A. Pineda & R. Cardoso, 2015). Realmente, conseguir condiciones ideales de humedad para la manipulación geotécnica o tecnológica y trabajo con las Margas de Pamplona extraídas en excavaciones o puestas en obra con las humedades ideales es casi una casualidad. En la parte siete se darán algunas recomendaciones para mejores resultados tecnológicos y de uso, tanto en extracción como compactación y durabilidad.

1.7. Las tufas.

Parece que del latín tufa derivó en castellano toba; según el Diccionario de la RAE aparece escrita refiriéndose a una piedra caliza y porosa en 1570. Existen varias derivaciones como Tobar, Toboso, que se consolidan en Navarra en la palabra tufa a lo largo del siglo XIX.

En euskera encontramos *tufarri* y en el castellano de la cuenca Pamplona, tufarro, palabra que se vino utilizando para referirse además a un individuo rústico o aldeano según la publicación del Instituto Príncipe de Viana del Gobierno de Navarra *"Vocabulario navarro"* de José María Iribarren (1984).

En la zona de Yesa afloran en una extensa superficie las Margas de Pamplona, es el área de Navarra más alejada del núcleo urbano de Pamplona donde se vienen utilizando como terreno de cimentación estas rocas; aún se le dice y se llama a esos sitios con las Margas de Pamplona *"terreros"*. El diccionario etimológico de la lengua castellana ya comentaba que: *"llaman así a la primera capa de tierra marga o dura que se encuentra al excavar para hacer una cimentación"*, también se refiere a la tufa como una *"piedra blanda que se erosiona con facilidad"* y como nota importante a tener en cuenta para comprender ciertos aspectos de la relación humana con las Margas de Pamplona: a una "*capa de tierra en la que abunda la toba y resulta imposible de ser sembrada"*.

Los problemas de carácter geotécnico que se han vivido en Pamplona son también derivados de las actuaciones previas a cada momento histórico en que se interactúa con los terrenos que sustentaron los diferentes episodios históricos. Los restos de aquellas actividades eran heredaros por los descendientes que a su vez actuaban de igual manera o parecida.

En ese devenir, las Margas de Pamplona, cuando aparecían sanas, eran un alivio constructivo. Pero el gasto de energía para acceder a ellas se fue incrementando en las áreas que mantuvieron el desarrollo urbanístico durante los siglos. Por ello también se articularon leyes y normas para el uso del territorio en relación a la excavación y apoyo de edificaciones e infraestructuras de defensa desde relativamente muy temprano si lo comparamos con otras formaciones rocosas.

1.7.1. Tufas, geotecnia, normativa y autoridad.

En la época visigoda Pamplona era un pequeño núcleo alrededor del actual complejo catedralicio y agrupado en torno al único poder que sobrevivió a la organización social pública tardorromana: el eclesiástico. Su protagonismo sociopolítico es prácticamente omnipresente y sería el primer factor histórico a tener en cuenta que afecta directamente a la manera de relación entre el ser humano y el suelo que sustenta la ciudad a través de un conjunto de preferencias constructivas.

La autoridad que mejor se adaptó —e incluso podríamos considerarla como la única superviviente al colapso del reino visigodo— es la de carácter religioso. Ello determina que Pamplona continúe durante la Edad Media siendo una ciudad fundamentalmente episcopal. Tanto las edificaciones como la construcción en general, se proyectan para preservar ese carácter. La defensa de la ciudad debe achacarse a la voluntad de mantenerse en ese ámbito espiritual, evitando en lo posible la recepción de otras creencias (no muy lejanas) en pugna. Esa Pamplona, religiosamente blindada, evolucionó y creció siempre en torno a una posición defensiva favorecida por la geomorfología. Inicialmente, como en el caso de Tabar, se esculpían los materiales con fosos y terraplenes, pero debido a la degradación, poco a poco se sumaron murallas que tenían que permanecer sólidas ante las tormentas o los arietes. Y sobre todo, tuvieron que ser debidamente cimentadas.

Las murallas fueron transformando así el propio núcleo y la fisonomía de los terrenos hacia donde se ampliaban. Esa fisonomía perduró por siglos. Aunque ya en el siglo XIX las murallas habían perdido prácticamente su función defensiva, no fue hasta finales del XIX y principios del XX que Pamplona se decidió a cruzar ese umbral físico. Una historia de miles de años encorsetada y amurallada en torno a una concepción fundamentalmente religiosa y espiritual de la sociedad y de la ciudad se consolidó alrededor del conjunto catedralicio y se desvincula de él hace apenas un siglo. Aunque realmente la primera apertura fue por la fuerza de la mano de Carlomagno en su expedición a Zaragoza: sus tropas abrieron la primera mayor brecha en la historia de la fortaleza, una lección no sólo estratégica o arquitectónica, también geotécnica. Las murallas creadas en época bajo-imperial eran acompañadas de torres de vigilancia y otras construcciones como la de la calle Merced, de planta circular, que se sustentaba sobre una estructura de madera para solventar el dificultoso acceso a las tufas.

Su competencia mecánica era de sobra conocida, pero no eran de fácil acceso siquiera en el núcleo central de la ciudad; sí suponían la manera de evitar el asentamiento o desplomes derivados de apoyar las cargas geotécnicas en un barranco rellenado, por eso su uso geotécnico históricamente, hasta bien entrado el siglo XX fue muy puntual y relacionado con barrancos y cursos intermitentes de agua que previamente habían retirado las gravas del perfil geotécnico P1.

El núcleo inicial desde el que se desarrolla Pamplona lo hace apoyándose fundamentalmente sobre las terrazas cuaternarias de gravas (P1) que yacen sobre las Margas de Pamplona (E1). Esto fue también una constante geotécnica cuya brecha se abrió mucho más tarde que la de las propias murallas. Aunque la tecnología y las características constructivas en las margas eran sobradamente conocidas en la periferia (perfiles geotécnicos directos E1 y E2), no lo eran tanto en el núcleo urbano de la vieja Iruña y la tradición constructiva reciente dio claras muestras de cierta falta de familiaridad con las características especiales de los terrenos E en el entorno urbano de Pamplona.

La anterior afirmación se puede corroborar simplemente repasando algunos de los problemas geotécnicos derivados de esa falta de experiencia geotécnica en el lugar que proporciona el nombre de la formación. Hubo de irrumpir el siglo XX con su gran aceleración y el motor de combustión basado en la quema de combustibles fósiles para comenzar a acceder a la formación biarritziense en lo que en su día se encontraba intramuros.

Históricamente en el núcleo inicial de la ciudad —como mayor exponente tenemos la catedral y sus alrededores— fueron los depósitos P1 de gravas heterométricas de características GC, GM, GW, GS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos – SUCS) y variedades intercaladas de SC, SM, ML, etc., los terrenos con los que interactuaron generaciones y generaciones de constructores. Se denominan localmente cascajo y han dejado un reguero de lugares toponímicos en el catastro por toda la Navarra Media. Resultaron en ocasiones no solamente un buen terreno de apoyo, sino un material para utilizar en la construcción de terraplenados, tapiales e incluso estructuras consolidadas como veremos en algunos casos históricos como el Palacio del Condestable, hoy Civivox Condestable.

1.7.2. El reciente acceso a las tufas en Pamplona.

El acceso al substrato biarritziense de margas se hacía cuando conseguirlo era económica y físicamente posible. El cascajo (P1) ha sido tradicionalmente el terreno de apoyo de las cargas de la edificación promovida por motivos religiosos, militares o civiles hasta bien entrado el siglo XX. En la misma Iruña el euskera la identifica como *kaskallueta*, en castellano "cascajera", descripción perfecta de lo que encontraron, dicen los pioneros del barrio de lo que fue la Txantrea (al NE del núcleo inicial) antes de su urbanización. Hoy da nombre incluso a una plaza, la Plaza Kaskallueta.

Corroboramos este conocimiento y la experiencia de uso del territorio, previo al siglo XX, tras la realización de más de tres mil estudios del terreno en los últimos 35 años, de los que un porcentaje importante (en torno al 40%) podrían relacionarse directamente con tufas o similares materiales evolutivos y sus patologías. Se pueden encontrar publicaciones al respecto en revistas técnicas y en manuales de arquitectura e ingeniería, bien directamente publicados desde los propios laboratorios donde se desarrolló este conocimiento o en colaboración con otros colegios profesionales o fundaciones del sector. El ámbito cultural, científico y técnico de la ciudad de Pamplona y no sólo en Navarra, sino de todo el país, ha mostrado en ocasiones interés por las singulares características de las Margas de Pamplona y otras tufas o incluso las derivaciones lingüísticas como cayuelas (en Vitoria-Gasteiz) en relación a su comportamiento e interacción secular con los habitantes a los que sustentan. Además, se puede también apuntar a cierto desconocimiento de su carácter evolutivo y profundamente dependiente del clima como causa de algunos desaciertos en la planificación y uso del territorio, lo cual supone todavía un peligro potencial para ciertas poblaciones, algunas fueron afectadas, como veremos, incluso dichas carencias resultaron ser un obstáculo para el desarrollo económico de algunas comarcas. Tanto a nivel microscópico, textural, estructural, como a escala de hectárea o regional, el conocimiento del peculiar comportamiento de estos materiales evolutivos y absolutamente conectados a las condiciones climáticas puede dotarnos de herramientas eficientes para que nuestros proyectos no deriven en patologías y perjuicios. Hemos visto que evitarlos es uno de los objetivos de esta tesis. La totalidad de los desastres que describiremos son evitables al 100% y son derivados —en prácticamente todas las ocasiones en las que no se trata de un accidente— de la falta de un conocimiento detallado sobre las Margas de Pamplona y sus materiales asociados, además propiciamos una nueva relación más sostenible y eficiente en su uso. Por eso el conocimiento histórico es la mejor de las herramientas para culminarlo.

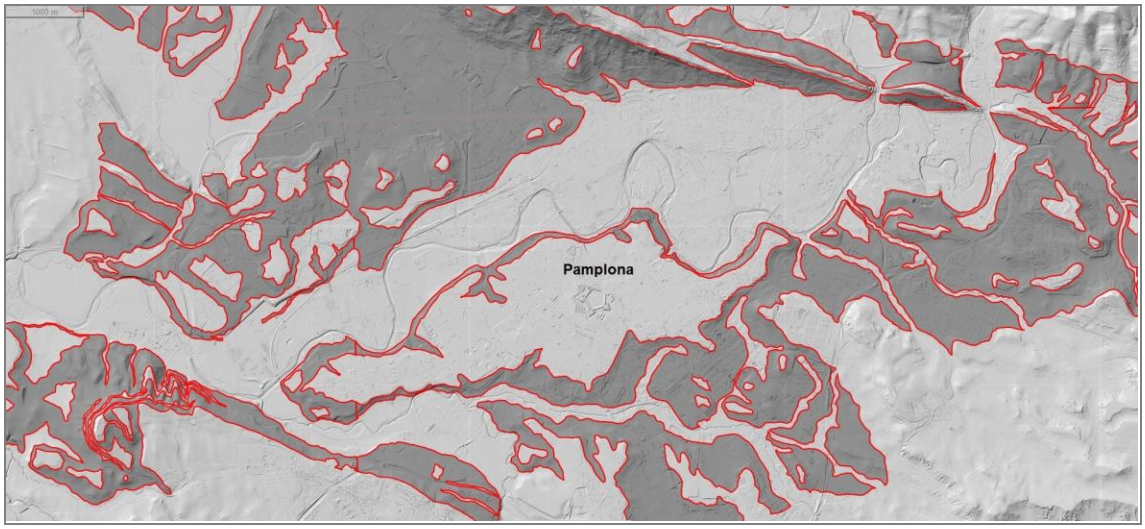


Figura 1.13. Lugares del área metropolitana donde afloran directamente las Margas de Pamplona.

Otra de esas herramientas que entregamos así, sin duda, es de carácter pedagógico: acercar el conocimiento y la experiencia a aquellos sectores sociales que interactúan con las Margas de Pamplona y formaciones similares. Un ejemplo representativo en que se ha modificado un medio del que tenemos conocimiento desde tiempos pretéritos hasta esta segunda década del siglo XXI es la ecociudad de Sarriguren, en el área metropolitana de Pamplona. Ahora mismo representa el mayor salto histórico desde la más remota antigüedad hasta nuestra era termoindustrial. En Sarriguren vamos a experimentar cómo desde la Edad de Hierro hasta las propuestas más sostenibles del siglo XXI, hay, en relación a nuestra inevitable interacción con las Margas de Pamplona, más cosas en común que diferencias en el tratamiento tecnológico. Sarriguren marca un hito en la historia de nuestra inevitable interacción milenaria, y es que, a pesar del tiempo transcurrido, aún no podemos elegir el tipo de roca que deseamos para nuestras infraestructuras, por lo que, de momento, seguimos optando por lo mismo que quienes lo hacían en la Edad del Hierro: el modificado histórico, urbanístico, geomorfológico y geotécnico. Situada al este de la zona metropolitana de la ciudad, en 2005 según el censo del INE, Sarriguren albergaba a 5 habitantes, una década después superaba los 15.000. Recordemos que Pamplona, desde sus inicios milenarios de los que hablaremos más adelante, hasta principios del siglo XVII apenas llegó a albergar a 10.000 habitantes, tal y como investigó Alfredo Floristán Imizcoz en "*La Historia de Navarra en la Edad Moderna (1512-1750)"* para el Servicio de publicaciones del Gobierno de Navarra. Sarriguren pertenece al Concejo del Valle Egüés y en 2020 ya fue después de la ciudad de Pamplona con 204.000 habitantes, el segundo concejo más poblado de la comarca, aglutinando a 21.500, por delante de Barañáin (al oeste) con algo más de 20.200, que hasta tiempos muy recientes era la tercera mayor concentración de Navarra después de Pamplona y Tudela. Hoy el Concejo del Valle de Egüés con Sarriguren a la cabeza, es la tercera población de Navarra tras Pamplona y Tudela.

Desde que las Margas de Pamplona y formaciones que las enmarcan cronológica y geográficamente se utilizan como terrenos de edificación, urbanización o se modifican para redibujar el paisaje urbano, configuraciones arquitectónicas o constructivas incompatibles con ese carácter mineralógico evolutivo han surgido ocasionalmente; incluso hasta el desasosiego de poblaciones enteras desalojadas o forzosamente expropiadas como resultado de actuaciones desafortunadas en un territorio sustentado por margas con formaciones de tránsito (perfiles geotécnicos C). Hay una serie de factores comunes que, una vez identificados y diagnosticados, pueden ahorrar esfuerzos y recursos económicos a sectores que demandan un conocimiento más profundo del medio sobre el que actúan, especialmente en una época de disponibilidad limitada (por varios factores) de recursos geológicos, algo que será analizado en la octava parte. La sociedad al completo demanda nuevas relaciones económicas en las que la optimización con la emergencia de criterios sostenibles, en cuanto al uso y desecho de dichos recursos, adquiere la mayor importancia y se plantea como meta.

El ejemplo de las hoy urbanizaciones desaparecidas en Yesa (figura 1.13, años 2008 a 2020) es significativo de la necesidad de conocer bien este tipo de materiales antes de proyectar grandes obras o localmente, obras que al final son demolidas. Quizás el caso de Yesa sea uno de los más conocidos desde que hace más de dos décadas, en 2001, se puso la primera piedra que preveía culminar una gran obra de infraestructura, el recrecimiento de la antigua presa, en 2006.

En la quinta parte analizaremos con detenimiento la implicación del tránsito a techo de las Margas de Pamplona en un gran problema que ha supuesto varias llamadas de atención como, por ejemplo, el del Tribunal de Cuentas del Estado en 2018 o el de Gobierno de Navarra en 2019. Hoy (2024) las obras de Yesa permanecen paradas desde el verano de 2023. Se está a la espera de aprobar el cuarto modificado que se propuso y aprobó en 2016 para intentar seguir avanzando.

Figura 1.13. Evolución de las obras de la ladera derecha de Yesa desde 2008, cuando se está construyendo la urbanización El Mirador (se distingue por la piscina entre dos bloques), hasta 2020 cuando es demolida por ruina tras la expropiación forzosa. Se puede ver también la desaparición y demolición de la urbanización Lasaitasuna (a su izquierda y formada por casitas pequeñas) previa a El Mirador. Toda a ladera está sustentada sobre las Margas de Pamplona en transición a la Formación Flysch. Se baraja la posibilidad de que la Superficie Inferior de Rotura (SIR), la más profunda, deslice justo en el contacto gradual entre las Margas de Pamplona y el Flysch de Yesa y en algunos puntos se acerque a los 120 m de profundidad. En la parte cinco profundizaremos sobre la evolución histórica de este tipo de inestabilidades geotécnicas y los perfiles C.

PARTE 2

RECORRIDO HISTÓRICO. CASOS CARACTERÍSTICOS

2.1. Geotecnia y Margas de Pamplona en la Edad de Hierro. Tabar y Garítoain.

Resumen: el rasgo más común de los enclaves de la I Edad del Hierro en Navarra es que son más abundantes que los de la II Edad de Hierro, pero lo que nos transmite la arqueología es que muchas veces eran los mismos, simplemente desplazados. Aunque padecemos una importante carencia de estudios dedicados a ambas edades, Tabar y Garítoain suponen buenos ejemplos de cómo los antiguos habitantes que usaron las Margas de Pamplona para construcción, urbanismo y defensa tenían un conocimiento tecnológico del material que, sin sistemas internacionales de medida, muestran una capacidad y destreza que a veces, se pierde en el tiempo. En Tabar los herederos siguen viviendo a unos 100 m del antiguo poblado en el cerro de Santa Catalina. Garítoain se ha volatilizado. Los estudiosos de la arqueología destacan la similitud que ofrecen las diferentes edades del hierro, tanto entre ellas como con otras circunscripciones particulares de zonas geográficas próximas. Existe una unificación de tratamiento de las Margas de Pamplona, tanto espacial como temporal que se corrobora hasta bien entrada la modernidad.

2.1.1. El caso de Tabar. Una fortaleza esculpida en las Margas de Pamplona.

Ficha técnica de Tabar:

- Castro y fortaleza de la Edad de Hierro del primer milenio a.C.
- Foso perimetral (posiblemente helicoidal) excavado en las Margas de Pamplona de unos 8 m de ancho con varios niveles de muralla concéntricos realizados con calcarenitas y areniscas de los niveles intercalados en la formación eocena de Margas de Pamplona.
- Cimentaciones someras en margas con grado de meteorización II-III (ISRM, 1981).
- Patologías modernas debidas a actuaciones agresivas de urbanización y pavimentación: compactación con apisonadoras, vibrado, etc., que afectan también al nuevo núcleo urbano a unos 100 m.

La localidad de Tabar se encuentra a unos 40 km al SE de Pamplona y a unos 20 km al NO de Yesa. El antiguo poblado de la Edad de Hierro se sitúa en el cerro que se erige a la salida de la localidad hacia Lumbier, a la izquierda por la carretera de Izagaondoa (figura 2.01).

El cerro donde se localiza el poblado fortificado de la Edad del Hierro (figuras 2.01 y 2.02) se encuentra muy alterado por diversas acciones relacionadas con la actividad humana de los últimos siglos, por lo que el yacimiento arqueológico avanza hacia un proceso de deterioro muy avanzado; prácticamente está ya destruido.

A simple vista en la cumbre de este cerro testigo no existen afloramientos constructivos para verificar su pasado fortificado. No obstante, los restos arqueológicos que se observan en el corte del camino que accede al cementerio de Tabar (figura 2.02), en la parte superior de la ladera de la colina, permitieron reconstruir cómo el castro se estructuró de manera defensiva con las habituales disposiciones artificiales iniciales de aquella época. (*De aldeas a ciudades. El poblamiento durante el primer milenio a.C. en Navarra*. Javier Armendáriz Martija. Gobierno de Navarra, Departamento de Cultura y Turismo, Institución Príncipe de Viana, 2008).

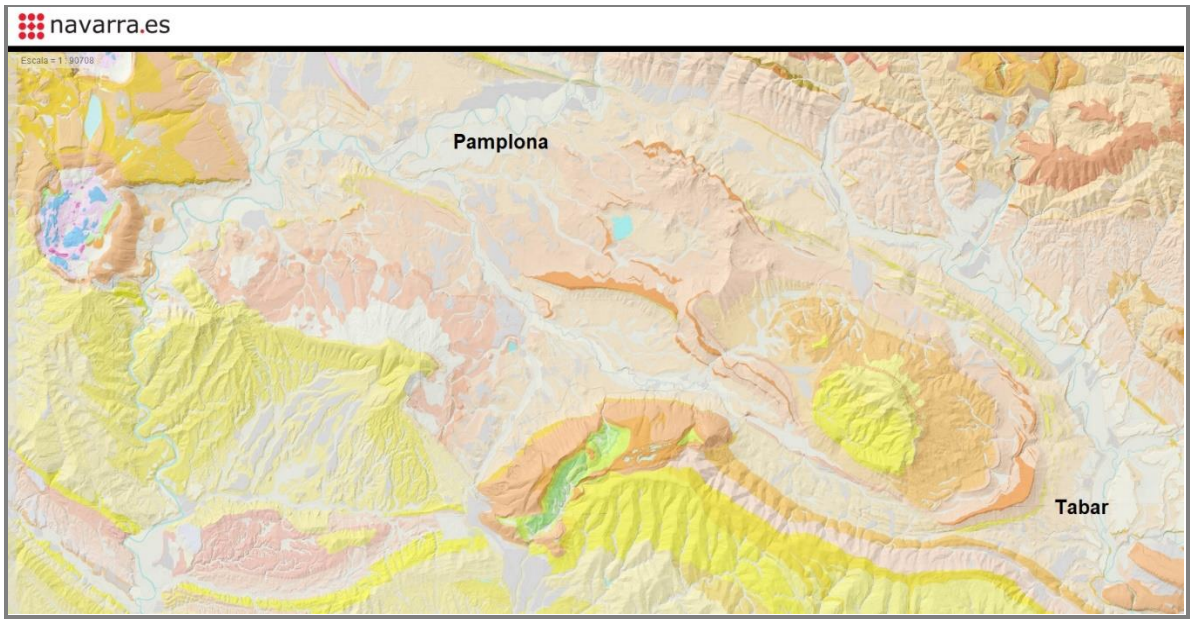


Figura 2.01. Situación geográfica y geológica de Tabar al SE de Pamplona.

La lectura estratigráfica de carácter geotécnico no es fácil por la vegetación que lo cubre, el deterioro y el paso del tiempo. Sin embargo, las formas naturales y las esculpidas expresan la embrionaria relación entre la geomorfología y la actividad humana de adaptación, amplia perspectiva del horizonte y una (relativamente importante para su época) trabajada defensa.

Amparo Castiella-Rodríguez, por ejemplo, en su trabajo *"De la Protohistoria navarra: La Edad del Hierro"*. (Cuadernos de Arqueología de la Universidad de Navarra. 1993, nº1, pp.121-175) ha reunido a estos enclaves del Hierro como una sola organización social con una configuración urbana en toda regla que atiende a criterios geomorfológicos, tecnológicos, de acceso a recursos y claramente de distribución urbanística planificada acorde con la geología y los materiales geológicos disponibles, directamente manufacturados o transformados de manera más o menos rudimentaria:

- Situados en cerros de poca altura, ocupan extensiones reducidas que oscilan entre los 3.000 y 10.000 m². Pueden estar protegidos o no por un muro, en uno o varios de los escalones con frecuencia se dibuja su perfil.

- Siempre tuvieron el agua próxima.

- Desarrollan una economía mixta agrícola-ganadera que en algunos casos se completa con la metalurgia.

- Tienden a levantar sus viviendas de manera ordenada, próximas unas a otras o contiguas. Cabe hablar de una planificación del entorno.

- Son de planta rectangular con medidas y distribución variable. Los materiales empleados en su construcción dependen, como es lógico, de lo existente en la zona: adobe y tapial al sur y en el centro de Navarra y calcarenitas, areniscas y calizas eocenas del nivel de Margas de Pamplona, de las zonas marginales o intercaladas. La madera es empleada en todos los casos como soporte de la techumbre.

Figura 2.02. El nuevo acceso al cerro de Santa Catalina de Tabar ha dejado al descubierto su estratigrafía y su pasado estratégico y defensivo, con lo que quizás se haya hecho visible la interacción geotécnica más antigua de cierta complejidad constructiva en las Margas de Pamplona.

Comentaba, sin embargo, en 2008 Javier Armendáriz Martija, que, para realizar las excavaciones arqueológicas, *"hace años no opuso resistencia cuando tuvimos oportunidad de examinarlo al hacer la prospección de este sitio"*. Las obras de adecuación en hormigón en masa del camino de acceso dejaron a la vista la sección de un foso artificial de unos 8 m de anchura a unos 15 m de distancia del reborde exterior de la cumbre. El análisis de la composición del relleno desveló los restos cerámicos del Hierro.

Es de destacar un nivel de derrumbe de una muralla que debió levantarse sobre su escarpe con el buzamiento de los niveles que lo colmatan por todo el perímetro del cerro y con una disposición de arriba abajo, lo que permite reconstruir un posterior sistema defensivo en la colina de Tabar (figura 2.03) hasta el cerro de Santa Catalina.

Debió de ser un castro en la parte alta fortificado por todo su perímetro. Lo más probable es que estuviese circundado con una muralla de piedra de sillarejo de los niveles de calcarenitas locales inmersos en las Margas de Pamplona, que son los que se ven ahora más o menos esparcidos.

Esta solución ha venido siendo la norma, los niveles de calcarenitas inmersos en la formación no sólo sirvieron como materia prima tallada para construir fortificaciones y delimitaciones (Castiella-Rodríguez, A. 1993), también más tarde con los romanos, calzadas, palacios y ya en nuestros días, podemos ver edificios y calles emblemáticas pavimentadas o restauradas, parcial o completamente con estos niveles eocenos de la formación de Margas de Pamplona, Plaza del Castillo, Palacio del Condestable, Calle Estafeta, Edificio de Capitanía, Catedral de Santa María, etc.

Los trabajos arqueológicos de Armendáriz y su equipo (2008), no pudieron, dado el deterioro en que se encuentra Tabar, averiguar las dimensiones de la construcción, pero sí su apoyo en las margas eocenas y en parte, sobre el sistema amurallado del primer milenio a.C. Además, de forma contigua a la construcción defensiva apoyada en las Margas de Pamplona, éstas fueron excavadas ya en la ladera superior de la colina, por todo su perímetro y de forma concéntrica. De esta manera, el foso construido arrancando parte del macizo rocoso que ahora forma parte de los rellenos a pie de talud, circundaba toda la población.

Posiblemente el perímetro al completo tuvo en alguna ocasión la referida muralla con una cimentación simple. Existen numerosos sillares y trozos de roca de las embebidas areniscas y calcarenitas de las Margas de Pamplona por toda la zona. El apoyo es inmediato en margas (II-III). No se ha podido encontrar un cimiento claro de sillar para poder observar el tipo, ancho y profundidad de apoyo de la antigua fortaleza. Subiendo al cerro de Santa Catalina parte de la excavación del foso puede aún seguirse. La foto lidar muestra parte de la excavación (figura 2.03).

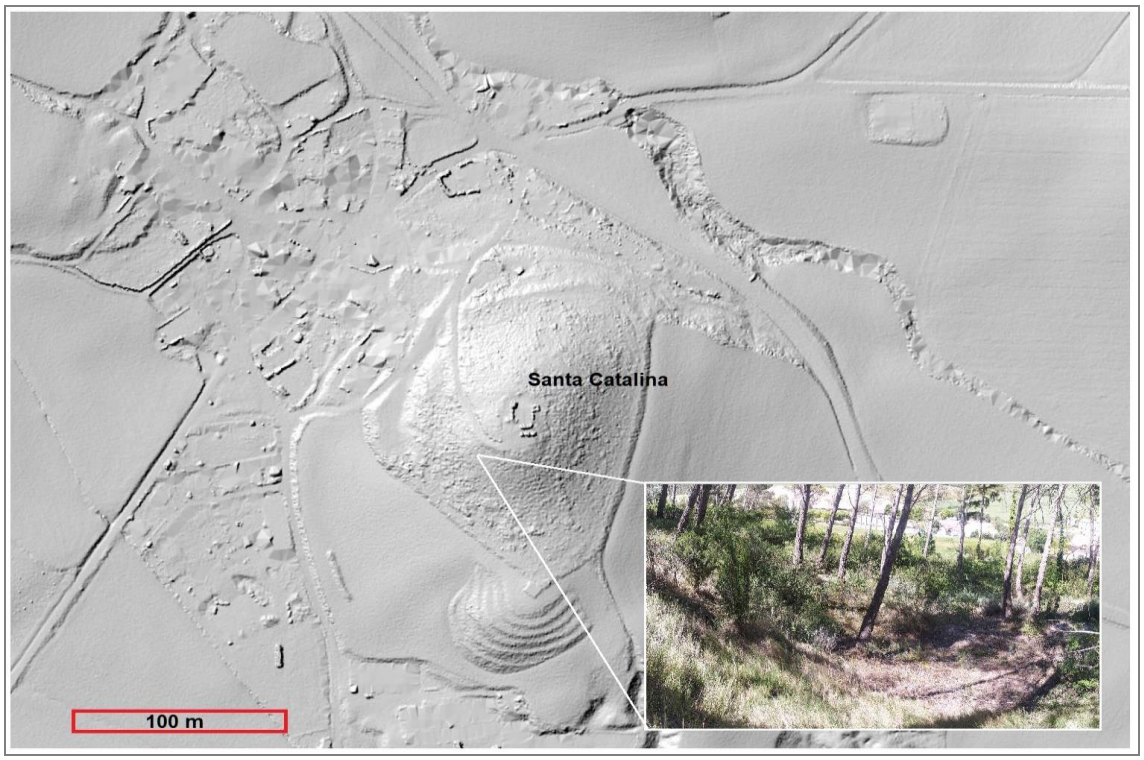


Figura 2.03. Foto lidar del cerro de Santa Catalina de Tabar. Se pueden vislumbrar restos del antiguo foso de Tabar que circunda el cerro de forma concéntrica y por el que muy probablemente se accedía al castro superior.

2.1.1.1. La defensa del territorio como motor principal del desarrollo urbanístico.

Estas observaciones además de muy importantes para comprender las primeras relaciones de las sociedades arcaicas con las Margas de Pamplona, son, aunque parezca una obviedad, el precedente que va a marcar durante siglos la disposición inicial y el núcleo de muchas poblaciones no solamente navarras, también de comunidades cercanas y en especial, prácticamente la misma a partir de la cual se desarrollará lo que iba a ser la capital de Navarra, Pamplona.

Nos desvela también, al igual que en otros castros que coinciden en el tiempo en la Navarra del Hierro, que el sistema de acceso y entrada al propio castro se habría realizado siguiendo una disposición helicoidal a través del foso. Actualmente coexisten con el despoblado de Tabar heredero del Hierro, construcciones muy ligeras ligadas al cementerio, en las que se puede ver el efecto del abandono, pero también el recurrente impacto en edificaciones cimentadas en los primeros tramos de tufas (aunque estas edificaciones sean de poca importancia histórica o patrimonial) causado por la evolución de las margas debido a causas climáticas (ciclos de humedad-sequedad o hinchamiento-retracción) y a causas humanas: vibraciones y compactaciones enérgicas al ejecutar la explanada, subbase, base y rodadura de hormigón del nuevo acceso.

2.1.1.2. La irrupción de la modernidad.

Tabar ha sufrido recientemente (no solo en el enclave arqueológico, sino también en el actual núcleo urbano) una patología desafortunadamente más extendida de lo deseable, que vamos a ampliar cuando estudiemos la Iglesia de Noáin. Los caminos de acceso se ejecutan y compactan con la tecnología desplegada en la era de la gran aceleración de los últimos 60 años, desde mediados del siglo XX, con el motor de combustión interna, aplicando dichas tecnologías de compactación en las inmediaciones de edificios ligeros e incluso de alto valor histórico, cultural y patrimonial, el efecto puede ir desde daños leves a la ruina completa.

Figura 2.04. Pequeñas edificaciones en ruinas o muy deterioradas ligadas al actual cementerio de Tabar. Antiguo castro en la parte alta del cerro de Santa Catalina.

Este proceder se ha venido observando en diversos monumentos cimentados tanto en las Margas de Pamplona como en otras litologías, más adelante veremos casos concretos en los que haremos un análisis pormenorizado de cómo se han dañado, en nuestro caso en las Margas de Pamplona, edificaciones de carácter religioso o administrativo —que tienen un lugar especial en la historia de Navarra— a través de la aplicación de prácticas nacidas a la luz de la ingeniería civil del siglo XX en el ámbito geológico y geotécnico donde nuestros ancestros decidieron edificar sus edificios más emblemáticos (figura 2.04)

El caso de Tabar es un ejemplo (realmente un aperitivo) de poca relevancia en comparación a lo que veremos en la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin (siglo XIII) y en otras circunscripciones históricas en que estas mismas prácticas han supuesto impactos económicos y patrimoniales en ocasiones calificadas de imperdonables.

Las edificaciones situadas en el lugar que ocupaba el antiguo castro presentan una serie de afecciones merecedoras de estudios dedicados, aunque dada su poca importancia patrimonial e histórica se consideran irrelevantes. Por su distribución en las escuadras, en muchos casos no expresan asientos del terreno de carácter plástico, consolidación o colapso, tampoco son achacables a empujes desde techumbres o forjados abandonados por décadas; el impacto sísmico, sin haber sido aún estudiado, no parece, sin embargo, haber tenido una importancia histórica especial en el área de Tabar. Pero el mismo patrón lo encontramos en el cercano núcleo urbano a unos 100 m.

Muchas de esas roturas por zonas débiles o preferentes se pueden achacar a las agresivas actuaciones llevadas a cabo con las reurbanizaciones, tal y como ha sucedido en numerosos pueblos de Navarra como Mendaza, Olite, Puente La Reina o Noáin; veremos ejemplos que, como en Tabar, transmiten sus cargas generalmente a los primeros nivele de las Margas de Pamplona. En el caso de las poco importantes (desde el punto de vista patrimonial) edificaciones del antiguo castro, se intuye el papel de las compactadoras que "arreglaron" el terreno antes de acometer el nuevo acceso por la pista de hormigón en masa (figura 2.04).

Un caso estudiado y documentado con los mismos ingredientes lo tenemos en la no muy lejana Ayesa, al sur de Tabar (Aretxabala, A. 2003). Pero también en el núcleo urbanizado de Tabar hemos podido observar similares evoluciones (figuras 2.04 y 2.05) como en la iglesia de San Juan Bautista, un caso similar al que analizaremos más adelante con la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin, pero de mucha mayor magnitud y entidad.

Figura 2.05. La iglesia de San Juan Bautista de Tabar muestra algunas grietas que se pueden haber amplificado con las diferentes actuaciones agresivas de urbanización y pavimentación.

2.1.1.3. Conclusiones.

Tabar fue castro y fortaleza de la Edad de Hierro del primer milenio a.C. en el que las Margas de Pamplona fueron esculpidas con fines fundamentalmente defensivos, excavaciones para fosos y utilización de los niveles de areniscas y calcarenitas de la propia formación para ejecutar el conjunto de fosos con muralla (posiblemente helicoidal) de distribución concéntrica.

Las cimentaciones fueron someras en margas con grado de meteorización II-III (ISRM, 1981) y no hay restos de muros de cimentación.

En el enclave de la Edad de Hierro, cerro de Santa Catalina, se sitúa actualmente un camposanto.

Anecdóticamente, ambos lugares, el de la Edad de Hierro (hoy cementerio) que convive con un cercano núcleo urbano moderno, han sufrido patologías recientes debidas a actuaciones agresivas de urbanización y pavimentación.

Una de las importantes lecciones aprendidas en Tabar (que ampliaremos más adelante y afectan de una manera especial a los edificios históricos) es que algunas actuaciones humanas modernas entran en resonancia con ciertas condiciones de humedad, resistencia mecánica, peso específico, mineralogía, porosidad, compactación y agentes externos. El clima es un factor importante, las actuaciones humanas realizadas sin conocer bien esas condiciones y agentes, ponen en marcha mecanismos que pueden generar patologías indeseables, desde ligeros daños fácilmente corregibles, hasta patologías muy serias en el Patrimonio Histórico o la ruina al completo de urbanizaciones enteras.

2.1.2. El caso de Garítoain. Edad de Hierro y Edad Media.

El lugar medieval de Garítoain estaba a unos 20 km al SE de Pamplona, a casi 1 km al NO de Monreal y unos 30 km al NO de Yesa (figura 2.06). Ya no queda nada de lo que vamos a relatar, las obras del Canal de Navarra en 2003 y la adecuación de los terrenos para la agricultura han hecho desaparecer todo vestigio de actividad arqueológica.

Ficha técnica de Garítoain:

- Enclave demolido y enterrado que abarcaba desde la Edad de Hierro (primer milenio a.C.) a la Edad Media como hito importante en la ruta jacobea.
- Suministro de piedra para terraplenados del Canal de Navarra (2003).
- Trazado urbano posiblemente rectangular adaptado a la geomorfología, excavado y apoyado en las Margas de Pamplona con aparato defensivo imposible de haber podido ser estudiado.
- Cimentaciones someras en Margas de Pamplona, grado de meteorización I-III (ISRM, 1981).

Garítoain aparece en la documentación de los archivos del siglo XI ligado al universo jacobeo como lugar destacado. Hoy, aunque desaparecido, sigue estando en pleno itinerario Patrimonio de la Humanidad sin una sola referencia para el usuario cultual, espiritual o cultural del mismo. La primera referencia está relacionada con una donación de Pedro de Roda, obispo de Pamplona, hecha al monasterio benedictino de Santa Fe de Conques, santa a la que dedicaron su primer templo románico. En este lugar se cita en 1444 uno de los templos del Camino de Santiago al que se le adosaba un hospital de peregrinos atendido por una cofradía. Garítoain aparece documentada hasta la época moderna (Jimeno, Aranguren, 2003: 117-118) y aunque ya no queda nada de aquello. Se sabe que a finales del siglo XVIII el obispo de la Seo de Pamplona visitó la abadía de Santa Fe y su caserío, que era un señorío con coto asentado a orillas del río Elorz. Entonces ordenó reparar el templo de Santiago, por lo que tanto el caserío como el templo aún se mantenían en pie por esas fechas.

2.1.2.1. La desaparición de Garítoain.

Durante el siglo XX se desmanteló la población por completo. Se trasladaron algunas de las estructuras góticas del antiguo templo a la ermita de Santa Bárbara que se encuentra en lo alto de la Higa de Monreal.

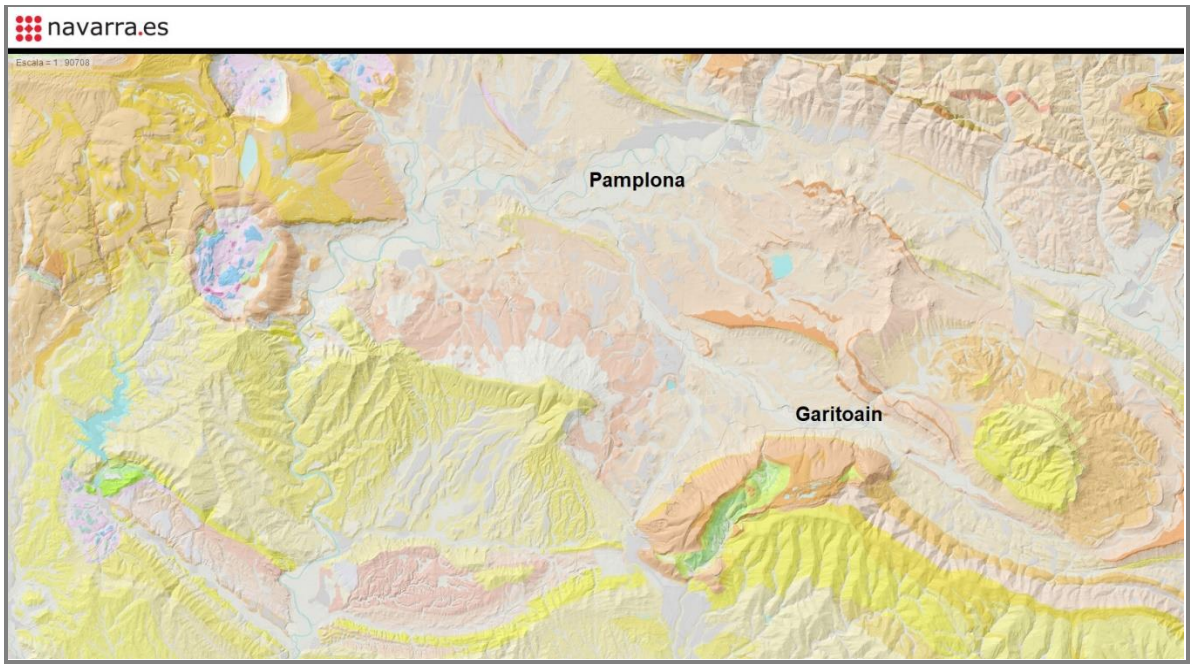


Figura 2.06. Situación geográfica y geológica de Garítoain al SE de Pamplona.

La única evidencia arquitectónica que quedó fue un viejo corral levantado con la sillería del antiguo caserío y la iglesia que tres siglos antes ordenara restaurar el obispo de la Catedral de Pamplona. Sobre este último suceso se expresaba así Javier Armendáriz Martija en 2008:

> "*Es ejemplo de cómo un importante centro de vida espiritual, asistencial y residencial medieval desaparece casi por completo en poco tiempo y en fechas bastante recientes sin dejar apenas rastro, pues nos puede ayudar a determinar por qué la célula de población protohistórica que estuvo asentada en el cerro de este sitio en lo que debió ser un poblado de caserío agrupado, debidamente estructurado y fortificado, hoy sólo se manifieste por un reducido número de fragmentos de cerámica, sin que ello signifique que aquí hace más de dos mil años no hubiera existido un importante hábitat de la Edad del Hierro".* (Armendáriz J. 2008).

En efecto, durante los años 2003-2008 el cerro se volatilizó (ver la excavación total del cerro de Garítoain en 2003, 2008 y en 2021 con motivo de las obras del Canal de Navarra justo en el sitio del yacimiento denominado Garítoain III por Castiella-Rodríguez, A. et al., en la figura 2.07).

Varios trabajos como suministro de material (Margas de Pamplona y restos arqueológicos) para explanadas y terraplenados, convivieron durante varios años con trabajos arqueológicos de carácter urgente y bastante vocacional.

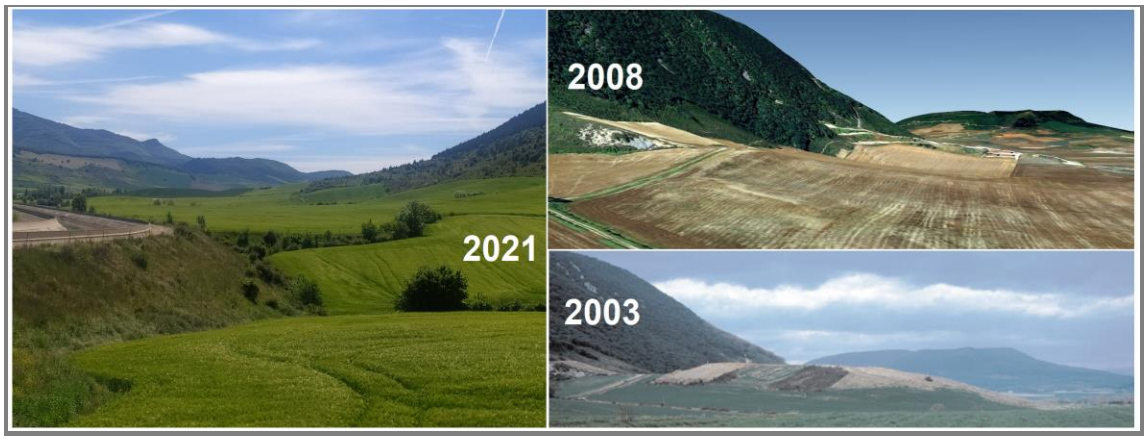


Figura 2.07. Geomorfología de Garítoain actualmente (foto desde el oeste hecha en junio de 2021 donde ya no queda nada que recuerde a un poblado) con el Canal de Navarra a la izquierda. En 2008 (caché de Google Maps desde el este) se ve que se acababa de arar el terreno tras las obras del Canal de Navarra. Y foto de Garítoain en 2003 desde el este en que aún se puede ver el cerro donde se encontraba la antigua fortaleza (J. Armendáriz Martija 2008) al SE de Pamplona.

Los trabajos voluntarios permitieron comprobar que, bajo la capa de uso agrícola, ya quedaban únicamente contadas estructuras negativas de cimientos, hoyos y excavaciones varias que con el tiempo fueron rellenadas de restos óseos, cerámicos y fragmentos de cerámicas que en algunos casos pudieron datarse con cronologías muy antiguas como del Neolítico final. En cualquier caso, las que delimitaban cimentaciones eran bastante someras y llevaron las cargas al sustrato eoceno en grado de meteorización I-III (ISRM, 1981).

Más tarde, y una vez desaparecido el denominado yacimiento Garítoain II (el propio cerro), nuevos hallazgos de cerámicas protohistóricas en la ladera baja del cerro sugieren que el enclave elevado desaparecido se utilizó como defensivo ya en esas épocas. El acceso debió ser directo en las margas y de manera prácticamente inmediata, dado que no hay una cobertura cuaternaria importante, lo que le convirtió en un lugar interesante para la extracción de material de préstamo en las obras del Canal de Navarra en 2003. Probablemente el poblado protohistórico estuvo ubicado en el desaparecido cerro, al cobijo de sus condiciones defensivas naturales como son los glacis de la Sierra de Alaiz combinadas con las de carácter constructivo (murallas, foso, etc.).

Hubo un intento de recuperar más información sobre la adaptación de Garítoain a través del tiempo, en 2003 los autores de las investigaciones, que convivieron con la rápida desaparición del enclave, pudieron revisar los fotogramas de los vuelos de 1956 y 1967 y también accedieron al denominado *"Vuelo Histórico de la Diputación Foral de Navarra"* de 1929-1931. Así es como se corroboró que, para esas fechas, este asentamiento de la Edad del Hierro ya se encontraba muy alterado por la presión agrícola y fue imposible estimar su disposición espacial.

No obstante, las conclusiones finales apuntan a las constantes que nos llevarán a través de los siglos a concluir que la relación histórica del ser humano con las Margas de Pamplona es en su mayor espacio de tiempo de carácter defensivo y que como en el caso de Garítoain, un buen número ha desaparecido.

2.1.2.2. Conclusiones. Adaptación y evolución en las comunidades protohistóricas.

Aprovechando la geomorfología natural, la cercanía de cursos de agua, la moderada docilidad de la roca para ser esculpida y la comprobada competencia geotécnica dentro de sus límites mecánicos, tanto para soportar cargas como para mantener espacios abiertos y explanadas, se pudieron desarrollar por siglos muchos núcleos de población acordes con las necesidades de alimentación, desarrollo y seguridad de cada momento histórico. Nunca las Margas de Pamplona fueron utilizadas directamente en sillería de murallas y mucho menos en edificaciones. Al no haber constancia histórica de este hecho, queda clara una cosa: nuestros antepasados conocieron por observación la capacidad portante de las tufas, conocieron el potencial de estabilidad y el grado de inclinación y fertilidad de las laderas desarrolladas en ellas, también la naturaleza evolutiva de éstas a la intemperie, como supieron de los rellenos y excavaciones ejecutados en y con ellas, y muy probablemente la capacidad de cambio de volumen en relación a los cambios de condiciones meteorológicas de sus residuales.

En posteriores capítulos, ya dentro de los márgenes de la vieja Iruña o en sus aledaños, intentaremos analizar —con lo que nos aporta la geología y la geotecnia— por qué fue el lugar de Pamplona el que acabó en gran urbe, si las características geológicas y geotécnicas fueron decisivas, y por qué no prosperaron, por ejemplo Sarriguren, Garítoain o Santa Lucía, con geologías similares y características geotécnicas comunes. En los detalles que las diferencian, sobre todo en la geomorfología, está la clave. La mirada del geohistoriador no deja de sorprenderse, sin embargo, con la lógica que se desvela al observar las profundidades de cimentación, la anchura de los fosos como en Tabar hace 3.000 años o la inclinación dada a las excavaciones.

Todo indica que se tomaron medidas más que adecuadas y que hoy, ante la posibilidad de poner en funcionamiento ingentes cantidades de energía en muy poco tiempo, podrían parecer extrañas si se desconoce el carácter evolutivo de nuestra formación eocena y los mucho más lentos ritmos constructivos de antaño. La propia disposición de las viviendas, casi entrelazadas es una optimización del espacio en relación a cierta estabilidad estructural ante empujes horizontales (terremotos o deslizamientos en zonas de ladera) y vertical (ciclos extremos de movimiento del terreno por retracción e hinchamiento) denotaría un tipo de urbanismo armónico con el carácter evolutivo, geológico y geotécnico de los territorios modificados sobre las Margas de Pamplona.

En general el trazado de las poblaciones más antiguas —que podemos estudiar desde la historia de la geotecnia local— estaba formado por un reducido número de viviendas, de tamaño pequeño, levantadas con adobe generalmente de los residuales de las "tufas", tapial de las terrazas cuaternarias que se suelen encontrar sobre ellas o areniscas y calcarenitas de los niveles inmersos en las Margas de Pamplona que nuestros antepasados de la Edad del Hierro recogían de afloramientos cercanos; en los poblados estudiados queda claro también que compartían los muros medianiles con un alzado de adobes y cubierta de ramas.

Es importante considerar que el avance en construcción es paralelo al de otros sectores, incluido el industrial (si hablamos de Edad de Hierro hablamos de hornos de carbón vegetal, deforestación y reposición) que se dilata hasta bien entrada la Edad Media (Castiella-Rodríguez, A. 1993).

El paso a la modernidad supone garantizar un flujo constante y creciente de recursos para cada vez más población, lo que debe hacerse dentro de unos parámetros de garantía de acceso a dichos recursos, a disponer de espacio con posibilidades de expansión, continuidad, defensa del territorio y sobre todo una sostenibilidad transversal aplicable a todos los sectores en desarrollo para que una determinada localidad alcance los niveles de crecimiento y expansión como los que alcanzó Pamplona. Otras, cuando alguno de esos factores se debilitó, desaparecieron. Muchas fueron incorporadas a la que emergía con más prosperidad debido a que su equilibrio geológico y de uso del territorio y los recursos permaneció estable a través de los tiempos. La mayoría de las que fueron incorporadas o fagocitadas eran cercanas. Hay constancia histórica de que en algún momento de conflicto fueron abandonadas debido a la búsqueda de protección de sus habitantes.

Por ejemplo, añade Amparo Castiella-Rodríguez en la citada obra *"De la Protohistoria navarra: La Edad del Hierro"*. (Cuadernos de Arqueología de la Universidad de Navarra. 1993, nº1, pp.121-175) que:

> *"Los análisis de flora y fauna realizados muestran cómo a lo largo de esta fase de la protohistoria, el hombre va adaptándose paulatinamente al medio. Utiliza la riqueza forestal —iniciando así su destrucción— para alimentar los hornos cerámicos, de fundición y caseros, construir sus viviendas, etc. El conocimiento que progresivamente adquiere de la agricultura le permite cultivar especies diferentes de cereales y leguminosas que recolectan en distintas épocas del año, y cubren las necesidades alimenticias de hombres y ganado".* (Castiella-Rodríguez, A. 1993).

2.2. El caso de Tiebas. La entrada a la modernidad.

El conocido Castillo de Tiebas da la bienvenida por el sur a los visitantes que vienen a Pamplona. Está situado a unos 14 km al sur del centro de la ciudad (figura 2.08). La edificación del castillo-palacio por la monarquía navarra alteró totalmente cualquier evidencia de estructuración protohistórica en el solar, sin embargo, se ha podido perfilar una imagen de lo que hubo allí desde varias fuentes de investigación histórica, geológica y arqueológica.

Ficha técnica de Tiebas:

- Ruinas de castillo-palacio fortificado con restos de una notable actividad industrial.
- Mismo trazado defensivo que en la Edad de Hierro (Tabar, Garítoain, etc.).
- Apoyo de la cimentación en terrenos de las margas a poca profundidad, bien ejecutados, pero en estrecho contacto con las variaciones atmosféricas.
- Se describe una patología geotécnica en terrenos E2 que causa la caída de varios tramos de muro.
- La sillería de cimentaciones y muros proviene de canteras cercanas de la parte marginal de la serie eocena (terrenos C).

Como hipótesis, a la luz de las características del emplazamiento, se trata de un espolón a los pies de las calizas de la Sierra de Alaiz, lo que sugiere que inicialmente se trataba de un recinto fortificado acomodado a la topografía de dicho espolón.

Es prácticamente seguro que las líneas defensivas alrededor y aprovechando el acceso a modo de istmo, convivieron con la ejecución de fosos (una especie de Pamplona en pequeñito); existe un claro exceso de movimiento de tierras que corroboraría esta, más que probable, hipótesis.

2.2.1. La disposición defensiva a través de los siglos.

La disposición defensiva de la Edad del Hierro es la habitual compuesta por murallas y foso, exactamente como vimos en Tabar lo vemos en Tiebas. No quedan vestigios del poblado prerromano, al menos eso parecen arrojar los estudios consultados; sin embargo, en el ala sur se hallaron unos muros de piedra pertenecientes a una casa con un par de habitaciones de un asentamiento de la Edad del Hierro I y II (siglos VIII a I a. de C.) lo que nos pone en la pista del papel transversal habitacional, defensivo y aristocrático de Tiebas (Ramos M. 1998).

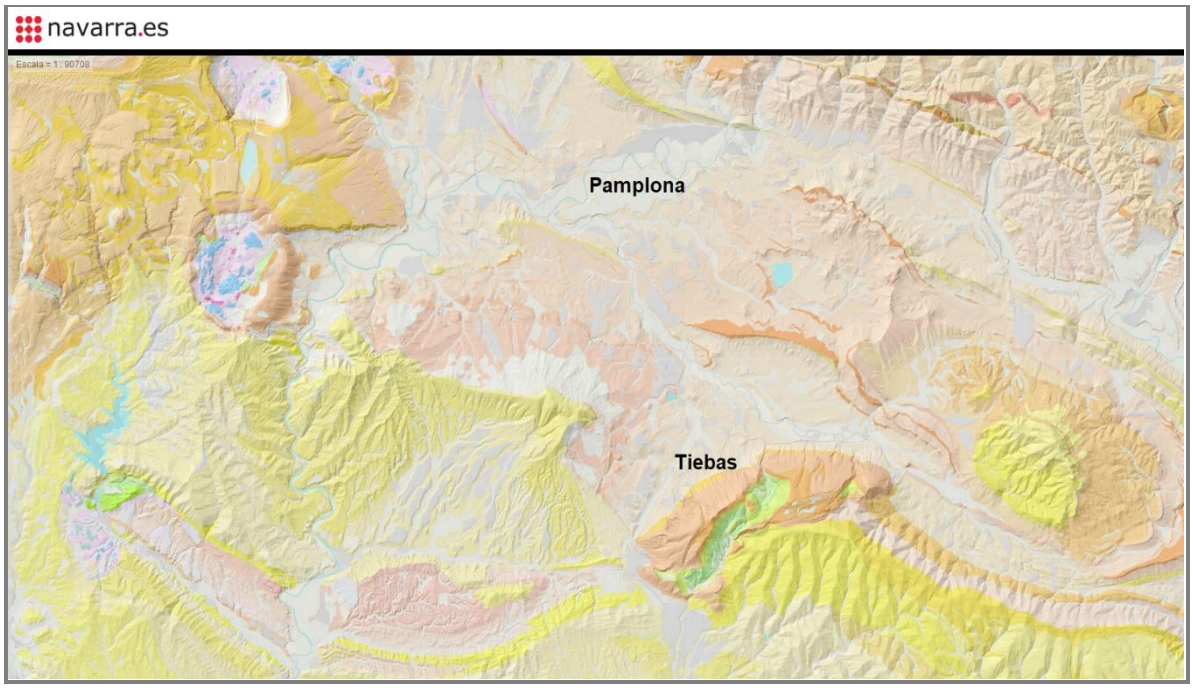


Figura 2.08. Situación geográfica y geológica de Tiebas al sur de Pamplona en la zona periférica de la formación de eocena.

Las vasijas hechas con cerámica tipo celtibérico a torno o algunos fragmentos de adobe de las paredes evidencian que el tipo de construcción, asentado directamente sobre los primeros tramos de las margas, se va a heredar incluso en épocas con construcciones más pesadas. También tras varias reconstrucciones el nivel de apoyo no cambia. Restos de carbón y pedazos de molinos barquiformes para la molienda del cereal e incluso uno incrustado en un muro y una fíbula de hierro dan pista de la importante actividad industrial y artesanal del enclave.

Figura 2.09. El castillo de Tiebas, acceso por el sur.

Entre las cimentaciones del castillo se pueden encontrar restos de un poblado del que es imposible determinar su extensión, tampoco su organización urbana ni la distribución de los elementos defensivos en relación a la geología. Y es que el antiguo poblado fue arrasado por las sucesivas obras de nivelación y acondicionamiento del terreno acometidas cuando se erigió el castillo-palacio de Teobaldo II, lo que parece ser, constituyó todo un cambio morfológico del área que ocupa hoy el castillo. Ahora los restos más antiguos conviven al ser aprovechados con los más modernos.

2.2.2. El estudio de patologías geotécnicas a través de la arqueología.

En Tiebas se puede perfilar lo que sea posiblemente la primera paleo-patología geotécnica descrita relacionada con las Margas de Pamplona en su estado E2. La describe Mikel Ramos Aguirre en *"Excavaciones en el castillo de Tiebas (Navarra), primer informe provisional, de 1998"* que nos deja un valiosísimo legado describiendo no sólo la cimentación, sino el asiento producido que determinó la caída de varios tramos de muro y la disposición inclinada hacia afuera de la sillería que transmitía las cargas al terreno:

> *"… la cimentación consiste en sillares bien escuadrados, labrados con talla a cincel en diagonal. Algunos presentan signos de cantería. El terreno se preparó de forma somera, ya que se talló una zanja de cimentación poco profunda en la tierra virgen (margas grises "de Pamplona"), a fin de crear una franja llana donde situar el cimiento…".* (Ramos, M. 1998).

La relativamente escasa entidad de la excavación ante las solicitaciones es, para este investigador, la causa de la caída de la pared en muchos tramos, pues aprecia perfectamente cómo *se ha volcado hacia afuera incluso el cimiento*. Por encima del cimiento se colocaron hiladas de sillarejo desbastado muy someramente, en ocasiones a manera de grandes lajas desgajadas. El monumento se encuentra sobre un cerro muy modificado, la roca predominante de apoyo es el macizo rocoso de Margas de Pamplona con grado de meteorización III (ISMR, 1981).

Otra de las experiencias que podemos extraer desde las inspecciones realizadas alrededor de estos monumentos, tanto en aquellos lugares con restos más o menos visibles o incluso conservados, como en los que se han volatilizado con la modernidad, así como de la bibliografía histórica y arqueológica consultada (como los comentados anteriormente en Tabar y Garítoain), es la relativa cercanía de los niveles de areniscas y calcarenitas de tránsito al Priaboniense (figura 2.10), e incluso los restos muy cercanos de canteras abandonadas, como en el caso del lugar desaparecido de Garítoain o en Tiebas, algo que solo pudimos entrever, pero no comprobar, en Tabar.

Figura 2.10. El castillo de Tiebas en la zona sur donde se pudo verificar la existencia de edificaciones cimentadas someramente en las tufas y que, probablemente, no soportaron las cargas a que se sometieron. Se puede observar en la sillería la abundancia de calcarenitas y areniscas de los niveles de transición.

2.2.3. Conclusiones. Disponibilidad de materiales y destreza tecnológica.

Lo observado en Tiebas corrobora lo comentado anteriormente y además, sugiere dos cosas remarcables: 1) que en la Edad Media ya se ha desarrollado un buen conocimiento tecnológico de los materiales de construcción disponibles cerca de localidades que crecen con modelos habitacionales más complejos y sofisticados que sus predecesores y 2) que desde los más sencillos poblados de la Edad de Hierro y de la Edad Media, se mantiene una relativamente fácil capacidad de acceso y disponibilidad de buenos materiales de construcción, también fácilmente extraíbles y trabajados. Los patrones urbanísticos y defensivos apenas cambian, se consolidan los modelos más eficientes. Se trataría de dos piezas clave en todo el sistema de desarrollo de núcleos urbanos (Castiella-Rodríguez, A. 1993). Por tanto, debe ser un ingrediente más a tener en cuenta de por qué muchas de estas poblaciones alcanzaron desarrollos notables antes de desaparecer o mudarse a lugares cercanos en tiempos de relativa paz o cuando las antiguas defensas ya no eran efectivas. E incluso también (como en el caso de Santa Lucía, que veremos a continuación), la lejanía de estos niveles de materiales durables, sumados a una limitada extensión geomorfológica, debieron ser claves en el abandono final de lo que pudo rivalizar con el lugar que parecía destinado a ser lo que finalmente fue Pamplona.

2.3. El caso del cerro de Santa Lucía. Similitudes geomorfológicas y geotécnicas con Pamplona.

El cerro de Santa Lucía se sitúa a unos 4 km al NO del centro de la capital, sobresale del paisaje pamplonés como una elevación de unos 50 m de altitud relativa perfectamente perfilada sobre la llanura que le rodea, hoy es un polígono industrial y comercial (figuras 2.11 y 2.12).

Ficha técnica de Santa Lucía:

- Cerro fortaleza y castro de unas 3 hectáreas con desarrollo urbano a 4 km al N de Pamplona.
- Edad: del Neolítico a la Edad Media con máximo desarrollo en la Segunda Edad de Hierro.
- Hasta el siglo I rivaliza con Pamplona en desarrollo y extensión.
- Mantiene una capa somera de terrazas cuaternarias P1, los márgenes y accesos son de Margas de Pamplona E.

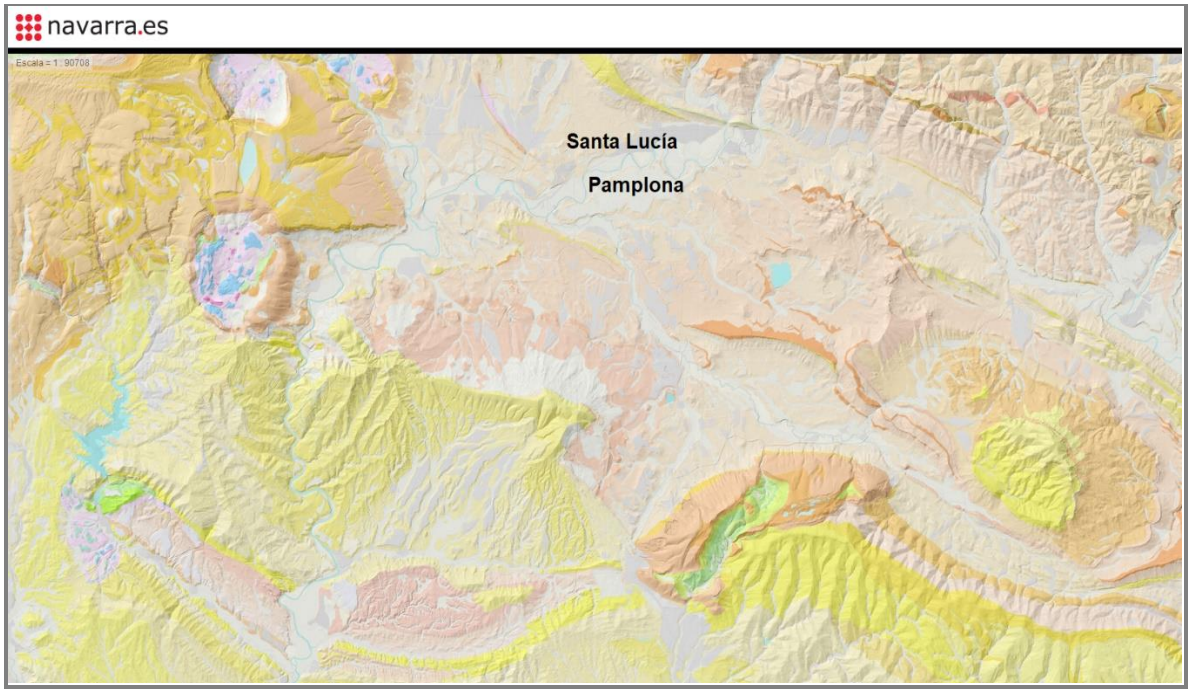


Figura 2.11. Situación geográfica y geológica del cerro de Santa Lucía, hoy inmerso entre polígonos industriales y áreas comerciales a unos 4 km al sur del centro de Pamplona, se sitúa en una colina muy bien perfilada sobre una zona llana donde se pudo verificar la existencia de edificaciones importantes.

En su momento estuvo poblado de forma discontinua desde los momentos finales del Neolítico hasta la época moderna. A partir del Bronce Final o el Hierro Antiguo, estudiando los restos arquitectónicos y arqueológicos, se cree que se había desarrollado un castro con caserío y edificaciones adheridas, agrupadas en su plana superior, aprovechando las ventajas defensivas y de control territorial que le otorgaba la geomorfología, tal y como hemos visto en los casos anteriores.

Todo apunta a que el desarrollo de la Segunda Edad del Hierro el castro culminó su era más relevante para pasar con la romanización de todo el territorio vascón a una época marginal paralela al desarrollo de la ciudad de Pompelo (a 4 km) que fue creciendo a costa, entre otras cosas, de las poblaciones circundantes como Santa Lucía, fenómeno que se hace especialmente significativo a mediados del siglo I a.C.

Las poblaciones indígenas de la comarca fueron paulatinamente desplazándose a las inmediaciones de la ciudad amurallada y con ellas la experiencia de un entorno geológicamente similar en ese mismo contexto histórico. Santa Lucía presenta hoy una conservación muy precaria y no se han impulsado investigaciones históricas con intervenciones arqueológicas que no sean, como en el caso de Garítoain, las de carácter vocacional. Por tanto, de momento, hacer cualquier tipo de reconstrucción espacial del poblado del Hierro es prácticamente imposible, aunque autores como Javier Armendáriz en *"De aldeas a ciudades. El poblamiento durante el primer milenio a.C. en Navarra"* (Javier Armendáriz Martija. Gobierno de Navarra, Departamento de Cultura y Turismo, Institución Príncipe de Viana, 2008) creen probable que pudiera haber sido ocupada toda la superficie del cerro a finales del Hierro y haberse desarrollado un núcleo urbano nada desdeñable, cercano a unas 3 hectáreas, lo que pudo ser también razón de sobra para frenar su prosperidad como lugar que aglutinase más población. En los momentos de refugio necesario por invasiones o por causas naturales, Santa Lucía se queda aislada.

2.3.1. El paulatino abandono de Santa Lucía y el crecimiento de Pamplona.

No pasa desapercibido para el investigador Javier Armendáriz que todas las actuaciones defensivas, urbanas, manufactureras, agrícolas y de distribución de accesos, cuentan con un cierto paralelismo en relación a la naciente ciudad de Pompelo. Al igual que Pamplona, el macizo rocoso de Margas de Pamplona aflora directamente en los accesos a Santa Lucía, si bien en la zona alta existen terrazas cuaternarias (P1), cuentan con un menor desarrollo vertical que en el casco viejo pamplonés.

De hecho, los accesos de hoy y las edificaciones e infraestructuras desarrolladas en épocas recientes alrededor de Santa Lucía, prácticamente no muestran un desarrollo edafológico remarcable y al no estar localizadas en la parte alta del cerro, ni siquiera han tenido relación geotécnica ninguna con los denominados "cascajos" en la cuenca (las terrazas cuaternarias P1).

Figura 2.12. Situación geomorfológica perfectamente definida del cerro de Santa Lucía. Puede verse al fondo sureste la nueva penitenciaría y al sur (arriba) la ciudad de Pamplona (barrio de San Jorge). Toma hecha con Google Maps desde el norte.

Dadas las características edafológicas del entorno, las posibilidades de desarrollo agrario del poblado son similares a las del ubicado en el casco viejo pamplonés al que precede en el tiempo, pero teniendo que salir de la fortaleza. No obstante, desde el punto de vista estratégico, o el del control territorial y defensivo, las condiciones de Santa Lucía eran más favorables hasta el primer desarrollo urbanístico defensivo de la ciudad de Pompelo. Santa Lucía disponía de mayor altura relativa y mejor visibilidad hacia los cuatro puntos cardinales que la ubicación que, finalmente, se convertirá en la moderna Pamplona. Pero de Santa Lucía no se podía salir en caso de peligro.

No obstante, esta semejanza de condiciones estratigráficas, geomorfológicas, geotécnicas, edafológicas y estratégicas, junto con su desarrollo urbano precedente y la cercanía al centro de la futura urbe, sugiere que Santa Lucía se quedó pequeña con sus 3 hectáreas cuando las condiciones globales, con periodos de paz más dilatados, permitieron mayores desarrollos urbanos.

Como otros enclaves alrededor de la naciente Pamplona, pudo suponer un trasvase no sólo de pobladores pasivos, sino también de experiencia y conocimientos de carácter constructivo, geotécnico y, al fin y al cabo, estratégico hacia un lugar que contaba con más espacio para poder multiplicar su tamaño.

Se fueron sus habitantes, con ellos se llevaron un conocimiento que se desarrolló en la ciudad de Pompelo. A falta de investigaciones históricas y arqueológicas, apenas podemos decir nada sobre el desarrollo de las murallas, fosos, cimentaciones, excavaciones y métodos constructivos de Santa Lucía para certificar una razón plausible para su abandono.

Seguramente fue en el siglo I a.C. cuando se produce el cambio a nivel global que no es exclusivo de la zona, un cambio en el que las condiciones geomorfológicas, propiciadas por una formación como las margas eocenas, quedan supeditadas a otros aspectos relacionados con la cercanía de una serie de recursos que garanticen el sano crecimiento de la comunidad. La situación estratégica por sí sola tiene sentido hasta un tamaño determinado que se supera en momentos prolongados de paz.

Según Armendáriz es más que probable que antes del siglo I a.C. Santa Lucía alcanzase un mayor grado de desarrollo espacial que el poblado ubicado en el actual solar de Pamplona, invirtiéndose la tendencia a mediados de ese mismo siglo en beneficio de la ciudad de Pompelo.

Coincide con una relativa pacificación dilatada en el tiempo en todo el territorio y los administradores romanos denominan ya al cerro que será Pamplona *"la principal ciudad de los vascones"* y quizás, a pesar de las condiciones menos favorables desde el punto de vista defensivo para tamaños pequeños, la geomorfología menos definida y más abierta del poblado que acabaría siendo Pamplona, en esas nuevas circunstancias más amables era óptimo.

Comparado con el cerro de Santa Lucía, la geología de Pamplona, gracias a la mayor extensión conocida de los terrenos cuaternarios P1, aprovecha una suave pendiente más extensa y abierta y la convierte en más espaciosa y moldeable. Este esculpido geomorfológico del cuaternario, confiere a la ciudad de Pompelo un potencial logístico por el sur y por el oeste mucho mayor y más abierto, con prácticamente las mismas condiciones de acceso a recursos, además de similares circunstancias geotécnicas y estratégicas. Esta circunstancia de un moldeado geológico singular para un urbanismo mucho más versátil, sugiere que pudo ser una de las claves para que, finalmente, la historia se decantase en el mayor desarrollo de Pompelo y la desaparición de Santa Lucía.

En el ámbito de esta etnia (los vascones), desde el punto de vista político, administrativo y, por ende, urbano, serían también clave un compendio de cambios culturales más fácilmente aplicables a las más óptimas condiciones geológicas de Pompelo, hablamos de la evolución estratégica militar y defensiva, así como la incorporación de nuevas modas constructivas, ya que el acceso a los materiales de calcarenitas y areniscas de los perfiles geotécnicos C para las nuevas arquitecturas más robustas son similares a otras localidades que desaparecieron, entre ellas estaría Santa Lucía.

Todo el desarrollo urbanístico de esa área industrial (donde hoy se encuentra Santa Lucía) en las últimas décadas se ha hecho a costa de los terrenos que hemos catalogado como perfiles exteriores (E) directamente en las Margas de Pamplona, por lo que su abundante experiencia geotécnica podría compararse con tres décadas de antelación al fabuloso cambio realizado en Sarriguren.

Sin embargo, y a pesar de tener restos arqueológicos como Santa Lucía, Sarriguren no presenta evidencias históricas de haber rivalizado con Pamplona. Hoy, situada en el área metropolitana de Pamplona, forma parte del Concejo del Valle de Egüés con 22.000 habitantes, el tercer lugar más habitado de Navarra después de Pamplona con 211.000 y Tudela con 37.250. En 2005 albergaba a cinco habitantes (tres mujeres y dos hombres).

2.3.2. El desarrollo definitivo de Pamplona.

Lo que finalmente catapultó el desarrollo de Pamplona sobre las terrazas cuaternarias es, por tanto, un conjunto de condiciones entre las que la geomorfología y la geotecnia son factores a considerar. Así, desde los poblados esculpidos directamente en margas o con apenas un ligero desarrollo de terrazas cuaternarias, se dio el salto a que éstas, las gravas P1, protagonizasen la mayor parte de la historia geotécnica navarra. La relación técnica y metodológica del área más próspera de Navarra, continuó siendo así durante siglos, para mucho más tarde, ya bien entrado el siglo XX, encontrarse nuevamente en su propia ubicación frente a las nuevas tecnologías que le ponían en contacto preferente con la formación eocena de Margas de Pamplona: el hormigón armado y la maquinaria con motor de combustión interna. Santa Lucía no pudo reunir simultáneamente todas las condiciones geológicas, geográficas y de accesos necesarias para el crecimiento derivado de las nuevas condiciones de organización social. Puede que se quedase pequeña, puede que se volviera vulnerable, ambas cosas parecen certezas históricas, pero de lo que no cabe duda es que, como sucedió con tantas otras poblaciones, incluso de menor entidad, los habitantes de Santa Lucía se fueron a Pamplona.

No obstante, al igual que en la futura capital del reino, se enfrentaron en sus construcciones e infraestructuras con dos factores clave que compartieron y posiblemente enriquecieron el posterior desarrollo de Pamplona: la existencia de rellenos de gravas previos a la aparición de las Margas de Pamplona y la relativa lejanía de una zona de explotación de los materiales más duros y durables del tránsito al Priaboniense.

El núcleo de Pamplona se convertiría con el tiempo en un destino más atractivo, y por tanto también en un centro de acogida de desheredados. En cualquier caso, Pamplona comenzó a ser el centro de gravedad navarro que atrae a miles de personas decididas a abandonar sus poblados, y esto sucede desde hace más de dos milenios. Esta tendencia ya nunca se detuvo.

Ni siquiera las guerras o las crisis lo invirtieron. Tan solo el episodio de la peste de 1348 fue capaz de mermar la población de Pamplona en un tercio aproximadamente mientras Navarra perdía a la mitad de su población. Navarra descubrió así que la concentración de la población, además de grandes beneficios comunitarios, tenía también algunos efectos desfavorables. Esto afectó a los nuevos modelos constructivos y el encuentro con nuevos especímenes geotécnicos fue inevitable.

2.4. Las pestes y la reducción de la población. Impacto en la construcción y expansión a nuevos terrenos.

La peste sigue siendo la mayor catástrofe ocurrida en el reino. Sucedió en 1348, pero los años anteriores ya estaban siendo claves para el abandono masivo del campo, los campesinos se morían de hambre cuando llegó la peste, ésta acabó con la mitad de los habitantes del reino en pocos meses. Para hacerse una idea de la catástrofe debemos imaginar que la influencia de Pamplona abarcaba un territorio que, además de más o menos el actual, incluía la Baja Navarra (sur de Francia) y las tierras de Laguardia (Álava y La Rioja) y que hasta ese momento nunca había aglutinado a tantas personas: en el año 1340 vivían entre 250.000 y 300.000 personas, cerraron la década entre 125.000 y 150.000. Los años previos a la expansión de la peste en Europa habían sido excesivamente húmedos en Navarra. Las lluvias en exceso que relataron los supervivientes acabaron con cosechas, infraestructuras, caminos y casas. Los navarros se morían por la falta de alimento; estaban muy debilitados. *"Para alimentarse, pagar las rentas o comprar simiente, los campesinos venden lo que tienen de valor, sus animales",* (Monteano, P. 1999). Muchos fallecerían de inanición, como en los valles de Ultzama y Santesteban.

Un oficial real escribe sobre un hombre de Eratsun que *"murió de hambre con todos los de su casa"*. Señala pueblos en los que ya no quedaba ni un solo vecino. Numerosas bandas de malhechores y un fuerte incremento de relatos en el número de crímenes llevan a Monteano a afirmar que el reino se fue volviendo más violento antes de la llegada de la peste. Pamplona recoge años antes a miles de excluidos, pobres, hambrientos y la ciudad se torna más caótica, la miseria se percibe en cada esquina; es entonces cuando la peste hace su aparición en la ciudad. El 24 de junio de 1348 Pamplona ya estaba infectada. Monteano cree posible que la peste estuviera ya presente a finales de mayo: uno de los recaudadores hace constar en sus cuentas que no se pudo cobrar el alquiler de las casas porque ni siquiera se habían podido alquilar, lo cuenta en su libro *"La ira de Dios"* (2002) y detalla aspectos económicos en *"Los navarros ante el hambre, la peste, la guerra y la fiscalidad Siglos XV y XVI"* Monteano Sorbet, Peio Joseba, 1999, UPNA. En su libro *"La ira de Dios"* (2002), Monteano relata cómo un recaudador de impuestos acude a un pueblo a cobrar los tributos y hace constar que *"todos los labradores de la dicha villa son de ellos muertos y de ellos idos por pobreza"*. Era una de las muchas aldeas navarras que ya nunca volverían a ser habitadas.

El recaudador de la futura ciudad de Sangüesa menciona en sus papeles que vio *"una gran mortandad, muy notoria... El pueblo está destruido y empobrecido".* En algunos valles como Anue desaparecieron ocho de cada diez familias. En Olaibar, Ultzama, Odieta, Ezcabarte, Aibar y Améscoa, seis de cada diez. En Cirauqui no se puede siquiera ir a segar los prados y en Los Arcos los muy escasos cultivos se quedan sin cosechar por miedo a lo que se veía como un castigo divino.

En Villafranca no funciona el molino pues *"no queda nadie vivo para tornar el agua"*. Se cierran los baños de Tudela. Los tribunales de Olite dejan sin terminar muchos pleitos porque ha muerto una de las partes. O las dos. El recaudador de la Ribera cree que se les está castigando por los pecados cometidos: *"La mortandad que este año aconteció por la ordenanza de Dios",* escribe. Por ello, como en el caso de los terremotos de Sangüesa de agosto de 1612, se trata de aplacar la cólera divina con misas, procesiones, sacrificios personales, ayunos y peregrinaciones. Pero no sólo no lo consiguen, sino que la peste se propagaba con más facilidad, lo que llevó al Papa a prohibir las peregrinaciones.

A finales de la primavera de 1348 la epidemia que entró por Francia, siguiendo el camino de Santiago se había convertido en la mayor catástrofe vivida en territorio navarro en cualquier momento de nuestra historia. Dada la rapidez con la que se extendió la enorme mortalidad, Berthe M. en *"Famines et épidémies dans les campagnes navarraises à la fin du Moyen Âge. Paris, Sfied, 1984, 2 vol"* habla de "hecatombe" en Navarra por *"l'impacable association, au cours de l'epidemie, de la faim et de la peste"*, afirmando que *"le bilan est très lourd. Tout près de 40% de feux anéantis et probablement des pertes globales de l'ordre de 50%, si l'on ajoute aux membres des familles entièrement détruites, les victimes enlevées aux foyers rescapés de la peste*".

Coincide así con Monteano en ese 50% que hizo de Navarra el lugar más castigado de Europa. El reino de Castilla y León, por ejemplo, había perdido al 20% de su población y el de Aragón, con Cataluña como más afectada, el 35%.

Finalmente, en Navarra la epidemia se fue debilitando a lo largo de aquel mismo año fatal hasta desaparecer con los primeros fríos del invierno. Algunos documentos reales redactados a finales de noviembre de 1348 hablan de la plaga como algo ya pasado. Los campesinos se vieron en la necesidad de transmitir a Juana II que era imposible pagar sus impuestos. Algo que tampoco pudieron hacer porque la reina se había ido a Francia y ya nunca más regresaría: la peste acabó con ella en Normandía. Sin embargo, la peste volvía como esas réplicas tardías.

En la segunda mitad del siglo XIV están bien documentadas en Navarra las epidemias de peste con rebrotes los años 1361-62, 1373-74, 1382-83, 1387 y 1395.

Durante los siglos XV, XVI y XVII hay rebrotes epidémicos que serán una constante en todas las localidades españolas desapareciendo la enfermedad a principios del siglo XVIII. El último brote epidémico en Europa tuvo lugar el año 1720-23 afectando a Marsella y a la Provenza. Durante esos 300 años las epidemias que brotaban y desaparecían sin aparente causa, provocaron una gran mortandad y múltiples problemas que siempre se intentaban corregir con oraciones y la intercesión de santos como San Roque y San Sebastián quedando San Fermín como guardián de la ciudad.

Entonces la actividad constructiva se reorienta en una medida destacable hacia estos santos. Las ermitas dedicadas a cualquiera de los tres se multiplicaron sobre todo en el siglo XVII. Después de la primera gran pandemia de 1348, la población no se recuperó; la enfermedad resurgió periódicamente. La vida tras los episodios de peste, especialmente tras la de 1348 no fue nada fácil en la ciudad, pero Navarra y en especial Pamplona, habían cambiado. Sus expectativas y necesidades constructivas habían vivido un golpe de timón forzado por las nuevas circunstancias. A partir de entonces, todas las generaciones, durante los siguientes tres siglos y algo más, vivieron la traumática experiencia de una o más epidemias. Durante más de tres siglos nuevas oleadas de peste llegarían a Navarra llevando a la tumba a miles de personas. *"Como las réplicas de un terremoto, sacudió estas tierras sin tregua, en 18 ocasiones*", comenta Monteano. Ninguna, no obstante, fue tan mortífera como la que trajo aquel "fin del mundo" de 1348.

Asegura Monteano que:

> *"Según nuestros cálculos, la población navarra sería en 1427 casi una cuarta parte de la de 1346. Navarra tiene así, en número de fuegos, el récord de todos los declives demográficos registrados en la Europa de la época. No es de extrañar, pues, que los animales llenaran el hueco dejado por los hombres y que después de la expansión agraria del pleno medievo gran parte de las tierras conquistadas fueran invadidas de nuevo por los bosques o los baldíos".*

2.5. La reconstrucción y la construcción enfocada a la salud.

A continuación, vinieron siglos de una cierta prosperidad con cambios radicales a la hora de comprender el medio natural y urbano. En ocasiones los administradores y líderes de Pamplona viven momentos de desesperación y también de un terrible endeudamiento, sobre todo por dar cobijo a los pobres. Se construyen ermitas y edificaciones a las afueras del núcleo urbano y se intenta evitar la aglomeración en la edificación, por lo que surgen edificios lejos de las murallas (extramuros) de un marcado carácter religioso, pero enfocado sobre todo a la salud. Pamplona se reencuentra con las Margas de Pamplona (perfiles geotécnicos E1y E2) y comienza a experimentar con las terrazas bajas (P2) de las llanuras de inundación. Entonces el mecanismo de ensayo y error pronto muestra su eficacia con una serie de medidas urbanísticas que hoy también se aplican.

Recordemos que todas las generaciones posteriores a la mortífera pandemia de 1348 —que acabó con la mitad de la población navarra— vivieron casi cuatro siglos más interiorizando el fenómeno, más de tres siglos viviéndolos y décadas posteriores a 1723 refiriéndose a él con temor, unas veces con más intensidad que otras, e incluso con falsas recurrencias que rayaron la histeria, pero la realidad es que cada una o dos décadas durante tres siglos brotaba una de verdad, por lo que hasta bien entrado el siglo XVIII y casi hasta el XIX la cuestión de la salud era motivo principal para el impulso de cualquier empresa y promoción constructiva.

Aparecieron los hospitales a las afueras y con ellos las cuarentenas, que se realizaron inicialmente en ermitas y chozas dispersas por el campo y alejadas de los núcleos urbanos, también los confinamientos en hospitales que se construyeron a tal efecto. Pero esos confinamientos afectaron también a casas, barrios, localidades e incluso a la totalidad de comarcas infectadas, se adoptaron limitaciones a la circulación de personas y bienes mediante cordones sanitarios y nuevas construcciones barrera a modo de cortafuegos.

Durante la primera mitad del siglo XVI se produce la expansión del culto a San Roque (Orta Rubio, 1981) abogado contra la peste. En las afueras de la capital se erigía la ermita hoy desaparecida en las inmediaciones de la antigua cárcel en el barrio de San Juan (sobre terrazas cuaternarias P1). Lo mismo ocurre con el culto a San Sebastián, también en otras zonas afectadas como Sangüesa. Ambos son *santos terapéuticos* y se suponía que eran protectores contra el contagio de las recurrentes olas pandémicas. El ejemplo de la ermita de San Roque que se ordenó construir con la peste de 1599 es muy significativo de la preocupación de la época, de la inversión económica y de los motivos urbanísticos que determinaban nuevas construcciones. Entonces enfermaron unas 350 personas de las que murieron unas 270. En un trabajo para el Gobierno de Navarra *"La ermita de San Roque de Pamplona y su necrópolis*", los autores M.ª Rosario Mateo Pérez y Alexandre Duró Cazorla comentan que:

> *"El coste de la edificación se estableció en 460 ducados, con obligación de entregar la obra en el mes de julio de 1600. Un documento que permite vislumbrar las características constructivas del santuario es el proceso judicial entre el regimiento de Pamplona y el adjudicatario de la obra por no haber cumplido este último las estipulaciones para la edificación. Dicho condicionado nos expone una construcción rectangular de 16,80 metros de largo por 7,28 de ancho, con una superficie de 122,30 m². Debía ser edificada en mampostería buena y piedra labrada en las esquinas, asientos de piedra labrada en el interior, suelo de ladrillo, paredes interiores revocadas con yeso y exteriores con cal. El diseño del acceso se propone cuadrado con piedra labrada a la romana".* (Mateo M.R. y Duró A. 2015).

El apoyo fue directo con cimentaciones corridas sobre las gravas cuaternarias P1. Con motivo del estudio del terreno para el nuevo Palacio de Justicia de Navarra (Sagastume M., Aretxabala, A. 1992) pudimos comprobar en 1992 la regularidad del espesor en la zona de entre 2 y 3 m para dar paso a las Margas de Pamplona.

En los *"Fondos del Archivo Diocesano de Pamplona para el estudio de la Historia de la Medicina"* (Jesús Ramos Martínez, 2004, 142) nos lo enfatiza; tras las epidemias vividas en los siglos XV y XVI que culminan con la de 1599-1600, la actividad constructiva en torno a la salud adquiere el papel relevante que, por diversas causas como la incorporación a Castilla, arrebató el protagonismo de la seguridad estratégica y militar ya consolidadas, entonces Pamplona comienza a salir de las murallas:

> *"Pamplona en el siglo XVI es una ciudad recién incorporada a la corona de Castilla, plaza fuerte, que presentará abundante movimiento de tropas con ocasión de contiendas o tensiones entre reinos fronterizos, extremo no carente de importancia en lo relativo a la sanidad pública. Desde el primer cuarto hasta mediado el XVI, tiene lugar un suceso trascendente cual fue la construcción y constitución de su hospital general, respondiendo a la coetánea tendencia a fundir la multitud de pequeños hospitales medievales de las ciudades en uno central, unión estimulada por las Cortes de Navarra, que afectaría a los existentes en Estella, Sangüesa y Tudela. En Pamplona, sin embargo, la creación de su hospital general no significó la desaparición de aquellos pequeños hospitales de peregrinos y asilo de pobres, los que siguieron hábiles, más para el asilo y hospedaje que para una propia asistencia sanitaria. Desde ese momento, el hospital general (predecesor del provincial y luego del hospital de Navarra que conocemos actualmente) se convertiría en la referencia para la asistencia de pobres enfermos y niños expósitos de la Diócesis de Pamplona".* (Ramos J. 2004, 142).

2.6. Una nueva experiencia para el sector de la construcción: la gran aceleración.

Rápidamente con los avances en la salud y el acelerado desarrollo de la civilización termoindustrial, la construcción terapéutica se añade como un factor más con todo su consolidado elenco de experiencias y cultura secular.

Aparece otra manera de evolución que pulveriza toda la lógica histórica anterior y da paso casi en un suspiro histórico a la revolución industrial y a la gran aceleración de las últimas décadas y concretamente el denominado desarrollo económico de mediados del siglo XX y principios del XXI con su modelo de expansión urbanística; se rompe con la lógica de aquel pasado, pero éste ya forma parte de la genética constructiva y los diferentes terrenos geotécnicos sobre los que se actúa ya están explorados y experimentados en una amplia variedad de contextos históricos y sociales.

El siglo XX, obviamente no cambia los terrenos, cambia radicalmente los contextos, fruto de nuevas necesidades y de un crecimiento poblacional nunca antes experimentado. Sin embargo, sí aparece un perfil nuevo a nivel de parcela: los rellenos antrópicos.

Todo lo comentado conlleva una nueva relación con la geotecnia de las Margas de Pamplona y sus terrenos asociados. En esta época se produce el mayor número de éxitos geotécnicos, pero también de desaciertos. Por si era poco el marcado contraste que dibuja el último siglo con respecto a los siglos de conflictos bélicos o pandemias, los inicios del siglo XXI propician unas condiciones para que nuevamente aparezcan lugares que puedan rivalizar con la vieja Pamplona, pero sin una cobertera cuaternaria de gravas. Está prácticamente ocupada. La cercanía relativa de buenos materiales de construcción ya no es una situación estratégica.

Realmente, cuando las instituciones se vuelven sensibles a la herencia patrimonial, las calcarenitas son un material más caro que el hormigón y valen para poco: resultan un recuerdo histórico, el patrimonio llega a considerarse muchas veces como un adorno social, como se hace con la dimensión vital de la cultura o el culto religioso. Y es que la Pamplona de los albores del siglo XXI ha crecido tanto que fagocita los núcleos que antaño vació en momentos de prosperidad, pero también de hambrunas, pandemias y guerras, ofreciéndolos, ya como periferia urbana, a decenas de miles de habitantes bajo edificaciones de hormigón armado que, a veces, recupera con diferentes grados de éxito geotécnico una parte del pasado histórico, como vivimos en Barañáin, Mendillorri, Gorraiz, Huarte, Villava, Sarriguren o Noáin.

En especial destaca un lugar donde las Margas de Pamplona aparecen directamente en la pequeña colina inicial que sería el embrión de lo que prácticamente desapareció durante dos mil años y en menos de dos décadas ha convertido al Concejo del Valle de Egüés en la tercera población de Navarra con más de 22.000 habitantes. En 2005 había censadas en Sarriguren cinco personas. La ecociudad de Sarriguren podría incluirse perfectamente entre los ejemplos de las nuevas dinámicas del Antropoceno.

2.7. Sarriguren, de necrópolis de la Edad de Hierro a ecociudad del siglo XXI.

Sarriguren se encuentra en el área metropolitana de Pamplona, a unos 6 km al este del centro de la capital (figuras 2.13 y 2.14). Las primeras referencias arqueológicas sobre este lugar son dadas a conocer por Blas Taracena y Luis Vázquez de Parga. Es en su trabajo sobre la romanización de Navarra donde hablan de *"cerámicas romanas y una anilla de hierro"* encontradas en Sarriguren (Taracena y Vázquez De Parga, 1946 c: 438).

Ficha técnica de Sarriguren:

- Cerro fortaleza y necrópolis a 6 km de Pamplona.
- Edad: de la Edad de Bronce a la I del Hierro, pero siempre habitada (5 habitantes en 2005).
- Primer desarrollo urbanístico del área de Pamplona que contó con microzonación geotécnica propia.
- No hay terrazas cuaternarias P1 y solo un leve desarrollo al norte de terrazas bajas P2, toda la superficie se trabaja en Margas de Pamplona en terrenos E1 y E2 y los nuevos rellenos antrópicos provenientes, sobre todo, de las excavaciones del desarrollo de Mendillorri y Gorraiz en los años 80 y 90 del siglo XX.

En los años noventa del siglo XX, en los campos de cereales que circundaban el núcleo en torno a la iglesia (figura 2.15), varios investigadores se encuentran con más cerámicas, un fragmento torneado de tipo celtibérico y un molino de mano, a los que se les adjudicó una cronología comprendida entre el Bronce genérico y el Hierro I. Con la entrada del siglo XXI se propone la construcción de la ecociudad de Sarriguren.

Las excavaciones arqueológicas de emergencia, previas a la urbanización de los campos de cereal, son realizadas por la empresa TRAMA promovidas por el Gobierno de Navarra. Con la iniciativa de la ecociudad, el Valle de Egüés al que pertenece la ecociudad de Sarriguren, se convierte con más de 22.000 habitantes, después de Pamplona y Tudela, en el tercer concejo más habitado de Navarra, habiendo adelantado a Barañáin en 2020.

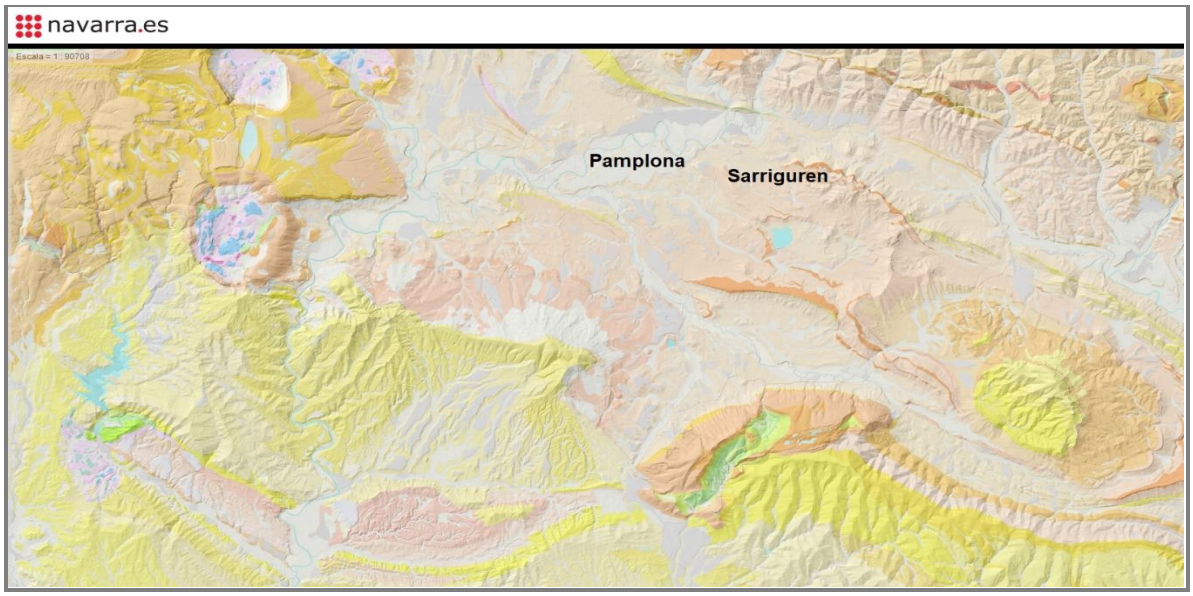


Figura 2.13. Situación geomorfológica, geográfica y geológica de Sarriguren, hoy una moderna ecociudad a unos 6 km al este del centro de Pamplona, se sitúa en una colina bien perfilada sobre una zona llana donde se pudo verificar la existencia de varias poblaciones de la Edad de Hierro.

TRAMA es una empresa especializada en estudios arqueológicos e históricos, desvelando que los lugares que en tiempos se habían denominado La Playa Grande II y Lezáun, situadas alrededor del núcleo prácticamente en ruinas del Palacio de Sarriguren e iglesia (figura 2.15), alrededor de los cuales se urbanizará en menos de una década toda una ciudad a partir de los restos medievales que se erigieron sobre lo que fueran no una, sino varias necrópolis (figura 2.19).

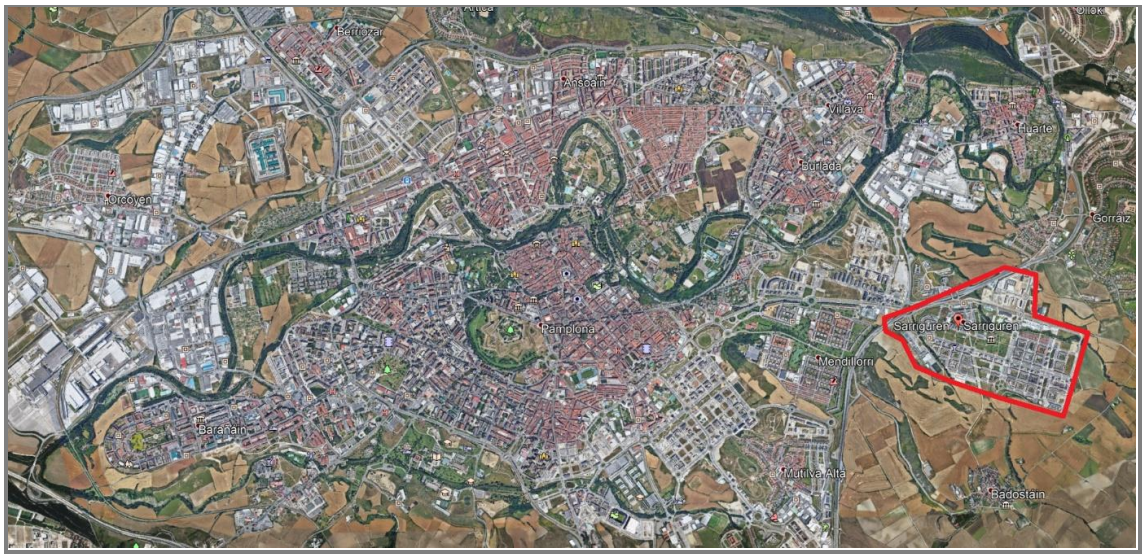


Figura 2.14. Situación de la ecociudad de Sarriguren al este del área metropolitana de Pamplona. Google Maps.

2.7.1. El mayor modificado del entorno de la historia de Navarra.

En el año 2005, según los datos del INE, vivían, en las inmediaciones de la colina inicial (figura 2.15), 5 personas (3 mujeres y 2 hombres). En tres lustros pasaron sólo en las inmediaciones del poblado de Hierro abandonado durante dos milenios a 16.000, lo que supone 3.200 veces más.

Los estudios arqueológicos de última hora —realizados antes de semejante despliegue constructivo, que supone el más denso e intenso relacionado con la edificación y urbanización visto en la historia de Navarra— apuntan a que los primeros asentamientos se relacionaban con necrópolis de incineración prácticamente destruidas por el continuo laboreo agrícola a través de los siglos. Se situaron los restos en la Edad de Hierro Media y Final.

El yacimiento quedó totalmente destruido por la superposición de la aldea medieval y la nueva urbanización hizo el resto, pero, comentan los arqueólogos que *"sin duda, habría estado convenientemente fortificado"* tal y como relata en *"De aldeas a ciudades, el poblamiento durante el primer milenio a.C. en Navarra. Catálogo de Yacimientos"*. Armendáriz Martija, J. 2009 págs. 141 a 144, algo que hemos podido prácticamente corroborar al estudiar las excavaciones de urbanización y las de carácter geotécnico.

No son habituales los lugares donde el acceso a la Formación de Margas de Pamplona sea tan directo como en la hoy ecociudad de Sarriguren. En general, para todas las parcelas que se estudiaron desde el punto de vista de la geotecnia previa al código Técnico de la Edificación (CTE 2006) y también alguna tardía cuyo proyecto ya fue posterior a la entrada en vigor del CTE, desde la Edad de Hierro no han cambiado las cosas.

En la nueva ciudad desarrollada en 15 años, el apoyo es completamente en las margas biarritzienses E1 —salvando los niveles previos de tierras de cultivo, rellenos de origen antrópico que proliferaron en los primeros crecimientos desbocados de los años ochenta y noventa del siglo XX, recibiendo los restos incontrolados, sobre todo de Margas de Pamplona excavadas en las vecinas Mendillorri y Gorraiz cuando la moda de los sótanos para el automóvil ya se había normalizado— y primer perfil de margas alteradas E2. Existe una pequeña área con algunas gravas al norte.

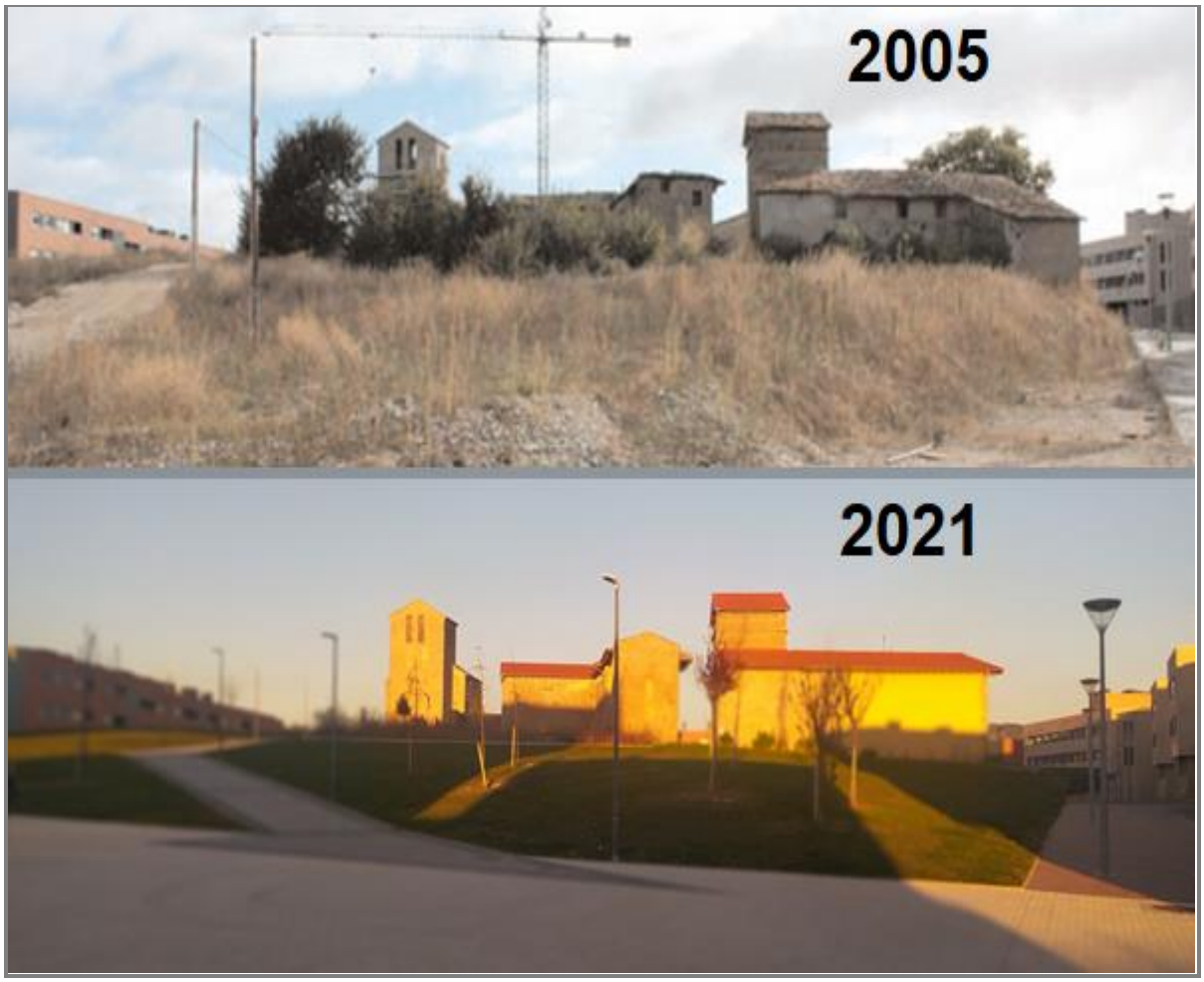


Figura 2.15. Núcleo inicial de Sarriguren en el verano de 2005 al comenzar las obras de restauración del conjunto palaciego medieval de Santa Engracia y en marzo de 2021, se puede observar la aparición de las Margas de Pamplona directamente en las primeras excavaciones.

Quizás fue aquí donde se consolidó entre los profesionales de la geotecnia local el nunca escrito convenio del ya comentado valor de apoyo con una tensión admisible menor de 7 kp/cm² para las Margas de Pamplona en estado sano (E1), apoyando directamente o por medio de pozos.

En Sarriguren hubo casos, cerca de los cursos fluviales o receptores de rellenos, en los que se pudo optar por una cimentación profunda con pilotes apoyados en roca, pudiendo ser éstos pocas veces hincados y habitualmente ejecutados in situ. En la mayoría de los casos se siguió la moda de los sótanos para el automóvil, por lo que la mayor parte de los esfuerzos estuvieron ligados a la excavación de las propias margas.

Es de destacar que las Margas de Pamplona habían desarrollado en Sarriguren un cierto perfil edafológico de escasa potencia relacionado con la agricultura milenaria, un contraste que hoy en día se puede vivir simplemente accediendo a los límites, tanto por el sur como por el este, de la ecociudad para ver el marcado contraste de pasar de un mundo urbano de negocios, restaurantes, avenidas iluminadas y centros de salud a enormes campos de hectáreas de cereal.

2.7.2. Sarriguren como un éxito de la actividad geotécnica en las Margas de Pamplona.

Los efectos del conocido cambio de volumen con hinchamiento y retracción del terreno ya sólo (y aún) se pueden observar en las antiguas edificaciones de apoyos someros, aunque también de manera muy leve en elementos modernos sin carga, tales como muretes, aceras o las típicas grietas de desecación estacionales entre los bordillos de jardinería para los que se optó por no dar demasiada relevancia al fenómeno. En esos casos concretos, o no se tuvieron en cuenta, o ya no se le dio la consideración que a la sazón se había afianzado en el sector, como tomar medidas concretas de trazado de juntas más densas y profundas en soleras o cierres, etc., más bien habría que decantarse por insignificantes fallos de ejecución de esos elementos que solo una mirada perspicaz o rigurosa percibe.

Para 2002 el cambio potencial de volumen de los niveles iniciales de las Margas de Pamplona hasta los 2-3 m de profundidad en la capa activa, ya era un fenómeno al que se hacía frente de manera generalizada en el sector, pues en esas fechas, además de estar implantada la obligatoriedad de los estudios geotécnicos previos, un buen número de publicaciones al respecto ya habían visto la luz, además de formar parte de los programas de educación en arquitectura, ingeniería y cursos y seminarios promovidos por escuelas técnicas y colegios profesionales.

Sarriguren supuso todo un laboratorio para el estudio desde la Edad de Hierro, pasando por la Edad Media, hacia la ciudad del siglo XXI, de las características geotécnicas más importantes a considerar en el futuro de nuestra interacción obligada con las Margas de Pamplona, su disposición, evolución y tecnología (figuras 2.15 a 2.18).

Figura 2.16. Núcleo inicial de Sarriguren y parte trasera (este) de la ermita de Santa Engracia en 2002 y en 2021. Obsérvese en la excavación de 2002 para varias acometidas cómo el cerro inicial de Sarriguren apenas presenta entre un metro y metro y medio de coluvial y margas alteradas en grado V-VI para pasar al macizo rocoso de Margas de Pamplona (I-II) inmediatamente.

Los ensayos de hinchamiento potencial Lambe en las zonas donde se han desarrollado potencias de suelos algo más importantes, dan en Sarriguren valores variables, algunos mayores de 0,05 MPa; si el nivel de arcillas o de margas alteradas se encuentra a merced de cambios bruscos de humedad, pueden darse pequeños hinchamientos y retracciones que siguen afectando a aquellas unidades que directamente apoyen en estos niveles. Como ya era conocido, las unidades ligeras como las comentadas aceras, muretes, etc., pueden sufrir movimientos estacionales de retracción e hinchamiento si apoyando sobre las margas alteradas o sus suelos residuales (perfiles E2), sus apoyos quedan inmersos, afectados o en contacto directo con la atmósfera. Este fenómeno se puede aún comprobar en las antiguas edificaciones en el cerro de Santa Engracia.

Figura 2.17. Núcleo inicial de Sarriguren. Parte trasera (este) de la ermita de Santa Engracia en 2002. Se puede determinar todo el espesor de alteración in situ de la formación en un corte geotécnicamente muy didáctico.

Figura 2.18. Margas de Pamplona mostrando el tipo de fracturas preferentes, que se desarrollan tras semanas a la intemperie, en tres familias bastante persistentes y regulares, una de ella es la que corresponde a la estratificación.

2.7.3. Primeras zonificaciones geotécnicas incluidas en proyectos.

En la figura 2.19 puede verse la distribución general de las restricciones geotécnicas a la construcción en que dividimos el área histórica central de Sarriguren en 2002 antes de iniciar la urbanización alrededor del núcleo histórico erigido sobre los poblados de la Edad del Hierro, la desaparecida fortaleza medieval y el conjunto palaciego y religioso del antiguo Palacio de Sarriguren. Lo hicimos en tres zonas: Zonas I, II y III.

La Zona I (en verde) sería aquella donde las restricciones son mínimas. Las condiciones de cimentación en roca facilitaron un apoyo directo en el macizo de Margas de Pamplona, las excavaciones que fueron las más dificultosas fueron también las más estables y la afluencia de agua a las mismas pudimos comprobar que fue prácticamente nula y siempre ligada a momentos de fuertes precipitaciones. Las conducciones e instalaciones urbanas tuvieron que ser excavadas en roca en numerosas ocasiones (figura 2.18) con ripadoras, hubo incluso que utilizar martillos neumáticos puntualmente. Como se puede intuir en la figura 2.17 observando las marcas dejadas por la maquinaria de obra, los valores de resistencia a compresión superaban los 200 kp/cm^2 con RQD>80 en zonas prácticamente superficiales tras la retirada de buena parte del terreno para alcanzar las cotas deseadas de urbanización.

La Zona II (en amarillo) suponía y supone que se trata de áreas donde los perfiles podrían ser erráticos, las margas son accesibles entre unos 2 a 6 m con perfiles bastante cambiantes en horizontal y vertical, aunque las excavaciones, fáciles y estables a corto plazo, vieron cómo se dieron afluencias de agua después de fuertes precipitaciones, ello provocó ocasionalmente acumulaciones estacionales de agua y encharcamientos de poca importancia. Sin embargo, en zonas excavadas que se inundaron provocaron inestabilidades localizadas con caída de paredes que fueron fácilmente corregidas.

La Zona III (en rojo) suponía áreas donde los perfiles pueden ser muy erráticos, las margas son accesibles a más de 6-8 m con perfiles bastante cambiantes en horizontal y vertical, aunque las excavaciones son fáciles y estables a muy corto plazo, se dieron afluencias de agua durante las épocas de lluvia. Se pudieron prever acumulaciones de agua y encharcamientos de relativa importancia; de hecho, tal y como se pudo advertir durante las obras, en zonas excavadas e inundadas se dieron inestabilidades localizadas con caída de paredes y flujos. En esta zona, las cimentaciones fueron semiprofundas o profundas.

Para más detalles ver la Tabla II y la figura 2.19 que datan de 2002 con la que fue la primera zonificación geotécnica realizada para un urbanismo de esta envergadura (16.000 personas) antes de acometer las obras de urbanización (figura 2.20) y acometidas, infraestructuras, algunos accesos, etc., realizada en un barrio o ciudad adosada a Pamplona. Todo Sarriguren fue geotécnicamente mapeado con criterios evaluados en conjunto.

Tabla II

ASPECTO GEOTÉCNICO	Zona I	Zona II	Zona III
Condiciones de cimentación	Superficial	Superficial-Semiprofunda	Semiprofunda-Profunda
Grado de Excavabilidad	Excavable-Ripable	Excavable	Blando-Excavable
Riesgo de inundación	Bajo	Bajo-Medio	Medio-Alto
Estabilidad de taludes	Estables, localmente cuñas de roca inestables	Estables a corto plazo, localmente inestables	Inestables, para definitivos < 25º
Empujes sobre contenciones	Bajos-Medios	Bajos-Medios	Medios-Altos

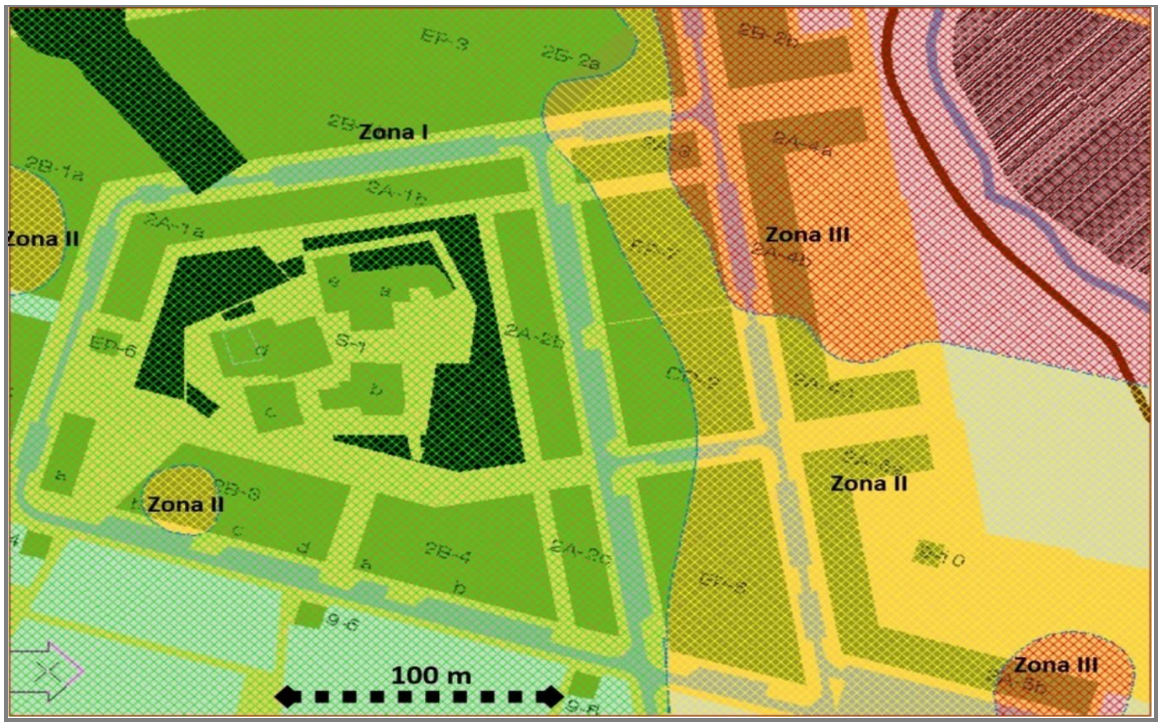


Figura 2.19. Sarriguren, núcleo inicial de la ecociudad con el cerro de Santa Engracia como centro histórico, cultual y cultural diferenciando tres zonas geotécnicas: I (verde), II (amarillo) y III (rojo) de acuerdo a sus dificultades geotécnicas tras la campaña de inspección y reconocimiento geológico y geotécnico, reflejadas sobre un mapa del proyecto de ecociudad facilitado por el Gobierno de Navarra previo a la urbanización.

Figura 2.20. Sarriguren, núcleo inicial de la ecociudad con el cerro de Santa Engracia como centro histórico, cultual y cultural en 2021. Google Maps.

En las siguientes gráficas (figura 2.21) se pueden ver las variaciones de algunos parámetros estudiados considerando los diferentes datos obtenidos de varios estudios en las zonas clasificadas como I, II y III. Vemos cómo la resistencia a la compresión, el peso específico, la resistencia a la penetración tipo Geotester (ST-308) o la humedad natural con la profundidad, muestran la enorme variabilidad previsible si se considera la geotecnia de Sarriguren de forma integral; las zonas topográficamente más elevadas, como el caso del núcleo histórico inicial donde se desarrolló la necrópolis de la Edad de Hierro, la fortaleza medieval y el conjunto palaciego con la ermita de Santa Engracia, muestran los parámetros geotécnicos más favorables, son las zonas bajas, ligadas a la actividad del curso fluvial intermitente denominado Barranco Grande, los menos favorables, debido a su mayor espesor de cobertera cuaternaria o edáfica.

Los valores de resistencia a compresión (2.21.A) se dividen en dos familias muy bien definidas, las de las rocas sanas prácticamente superficiales y las de las arcillas de alteración de las margas que se pudieron encontrar y sobre todo tallar hasta unos 4,60 m de profundidad. En el primer caso los valores medios están en el entorno de los 60 kp/cm² oscilando entre 28 y 220 kp/cm² y en el segundo caso alrededor de 2 kp/cm². Los pesos específicos (2.21.B) van de 2,24 g/cm³ para las zonas más alteradas hasta los 2,54 de las más sanas. La humedad natural (2.21.C) depende de las condiciones climáticas y de la profundidad, las muestras arrojan valores tanto más variables cuanto más superficiales son.

En general, por debajo de la capa activa, a unos 3 m de profundidad, se dan valores que van del 2 al 21%. Un valor interesante es la variación del valor de penetración ST-308 o Geotester (2.21.D) en las arcillas de alteración que aumenta ligeramente con la profundidad. Se trata de un valor semicuantitativo que da una idea de la compacidad o grado de consolidación de los residuales de alteración de las Margas de Pamplona.

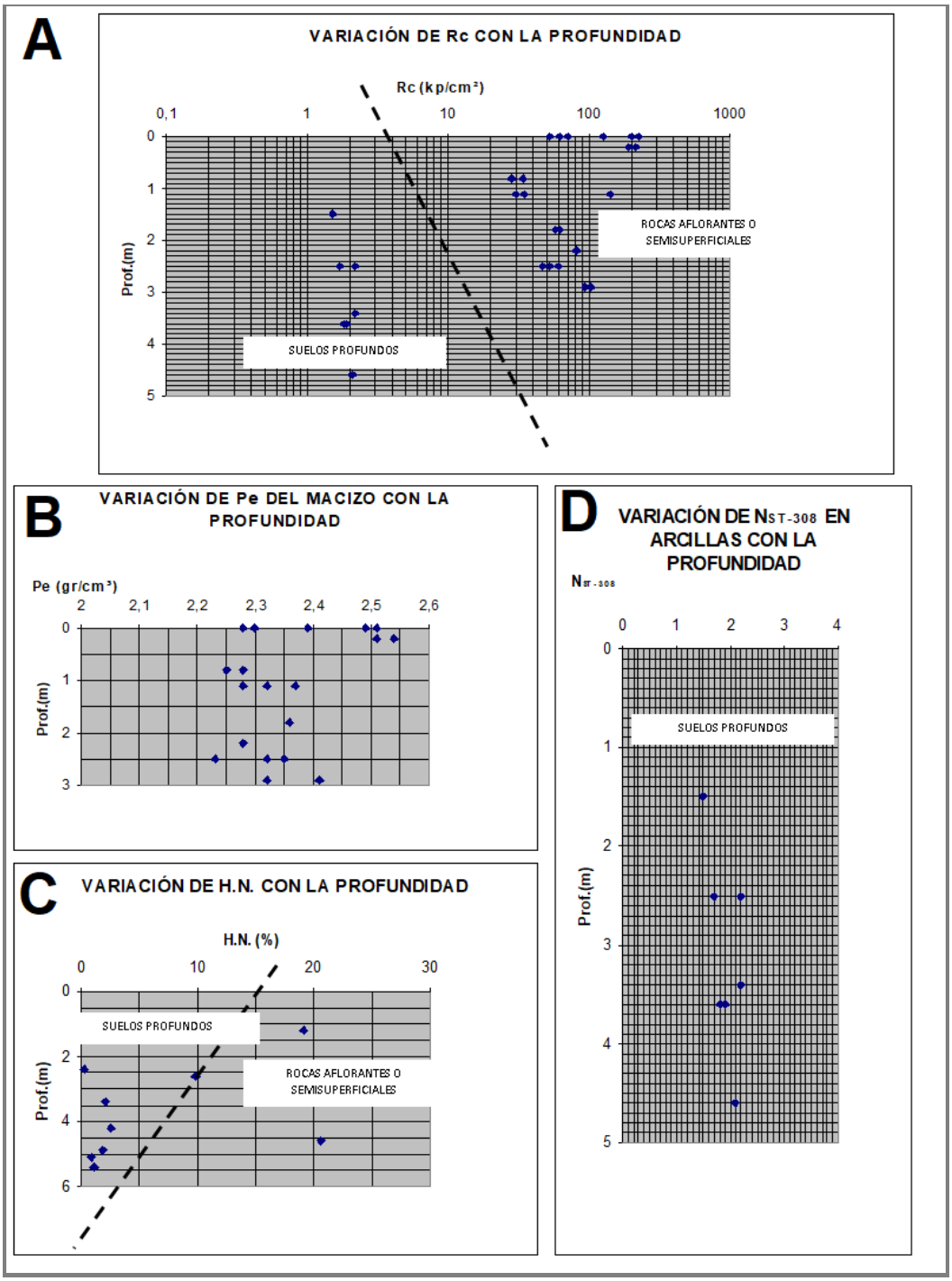


Figura 2.21. Sarriguren, datos geotécnicos del núcleo inicial de la ecociudad con el cerro de Santa Engracia como centro de referencia. Datos dependientes de la profundidad de: resistencia a la compresión (A), peso específico (B), humedad natural (C) y resistencia a la penetración Geotester en arcillas de alteración (D).

2.7.4 Conclusiones. Importancia estratégica de Sarriguren en el sector de la construcción.

La importancia de la experiencia de Sarriguren radica, sobre todo, en que se trata de la mayor campaña de cambio y modificado del entorno de la historia de Navarra en un intervalo de tiempo extremadamente corto, demostrando que el nivel de incorporación de la experiencia geotécnica a la expansión territorial estaba más que maduro, al menos en el área metropolitana de la capital. Dicha experiencia de trato con la formación eocena y la responsabilidad que recayó sobre los geólogos y expertos geotécnicos que aportaron su ciencia, supuso un enorme éxito para un sector que en ese momento batía todos los récords de actividad. A pesar del descomunal tamaño de la obra acometida y de la rapidez de ejecución, no se reportaron datos sobre problemas geotécnicos. Es oportuno recordar que de la misma manera que se incorporaron conocimientos geotécnicos previos al desarrollo de la ecociudad, facilitando en una medida pocas veces vivida anteriormente en Navarra las labores constructivas, también se hizo algún ejercicio bastante mejorable en ciertos aspectos que trataremos posteriormente. Tanto desde el punto de vista geotécnico relacionado con nuestra formación eocena, como referente a la restauración del contenido patrimonial fagocitado por la metrópoli debemos prosperar; y es que en Sarriguren, como todo buen vicio que las épocas de vacas gordas suelen imponer, muchos de los planes de expansión y distribución ya estaban trazados antes de la microzonación geotécnica que continuamos haciendo meses y años posteriores a la expansión desde el cerro de Santa Engracia mostrado en las figuras 2.19 y 2.20.

Ni otro Sarriguren (ni nada parecido) se va a volver a repetir en el futuro más cercano, al menos en décadas no se prevé que ocurra, como veremos al final en la parte octava. No obstante, la experiencia supuso por su tamaño y densidad de actuaciones y aportaciones, un antes y un después en el sector de la construcción en Navarra, y no sólo en el enfoque geotécnico, se dio un gran paso desde la propia ciencia geotécnica con sobradas razones para corroborar que se había abierto una reconocida línea de confianza en el sector. Y eso, a pesar de haber estado ciertamente marginada respecto de otras disciplinas dentro del sector de la obra pública o el urbanismo, más vistosos y valorados en la construcción y en las propias instituciones, como el diseño urbanístico, arquitectónico o paisajístico o la propia especulación inmobiliaria. No obstante, Sarriguren también se gesta y se despliega en un momento anómalo de la historia de la construcción en Navarra, se puede considerar la cima navarra de aquellos años de vorágine constructiva que el futuro juzgará, por ejemplo, a través del consumo de áridos. Navarra alcanzó antes de 2008 un consumo medio de 14,4 toneladas por habitante y año, siendo una de las comunidades con mayor demanda de áridos de Europa, muy por encima de la media nacional (10 t/hab.) o de la media europea (8 t/hab.) tal y como reflejan las cifras de la Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA) en su Informe de situación económica sectorial 2022. La caída española ha sido del 80%.

2.8. El caso de la iglesia de San Miguel Arcángel (S. XIII) de Noáin.

Resumen: el caso que vamos a analizar en la iglesia de Noáin es extremadamente llamativo, porque, aunque también hay restos tan antiguos como en otras circunscripciones estudiadas, como restos romanos que aguardan un estudio formal, la gran promoción de viviendas de 2005 llevada a cabo en un par de años en la zona, insertó el emblema icónico del patrimonio local, la iglesia medieval del siglo XIII, en pleno siglo XXI de un plumazo urbanístico, lo cual supuso un impacto traumático para el monumento con desarrollo de patologías importantes.

Ficha técnica de la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin:

- Iglesia inicialmente gótica del siglo XIII destruida y reformada en varias ocasiones a unos 5 km al sur del centro de Pamplona.
- Es la parte más alta de Noáin. Una elevación anticlinal recientemente urbanizada.
- El desarrollo urbanístico del área propició serias patologías que fueron debidamente estudiadas, indemnizadas y se arregló lo que se pudo.
- Se apoya con diferentes anchos de cimentación de mampostería a diferentes profundidades sobre Margas de Pamplona (E2) con grado de meteorización III-IV (ISMR, 1981).

Figura 2.22. La iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin (siglo XIII).

2.8.1. Contexto histórico.

Hemos visto que Sarriguren nació en una pirueta histórica posiblemente irrepetible, un salto que se produjo desde la Edad de Hierro al siglo XXI sobre la formación eocena de margas, pero lo hizo prácticamente desde la nada. Aquí en Noáin, las margas se vieron forzadas a un cambio radical en un intervalo de tiempo tremendamente corto con excavaciones y movimientos de tierra cercanas a 10 m en algunas áreas. Entonces la interacción secular del monumento que se vio inmerso en este tremendo cambio también reaccionó con ellas. Un conjunto de circunstancias ambientales, urbanísticas y geológicas se dieron cita para lo que pasaremos a describir como uno de los mayores impactos urbanísticos en el Patrimonio Histórico.

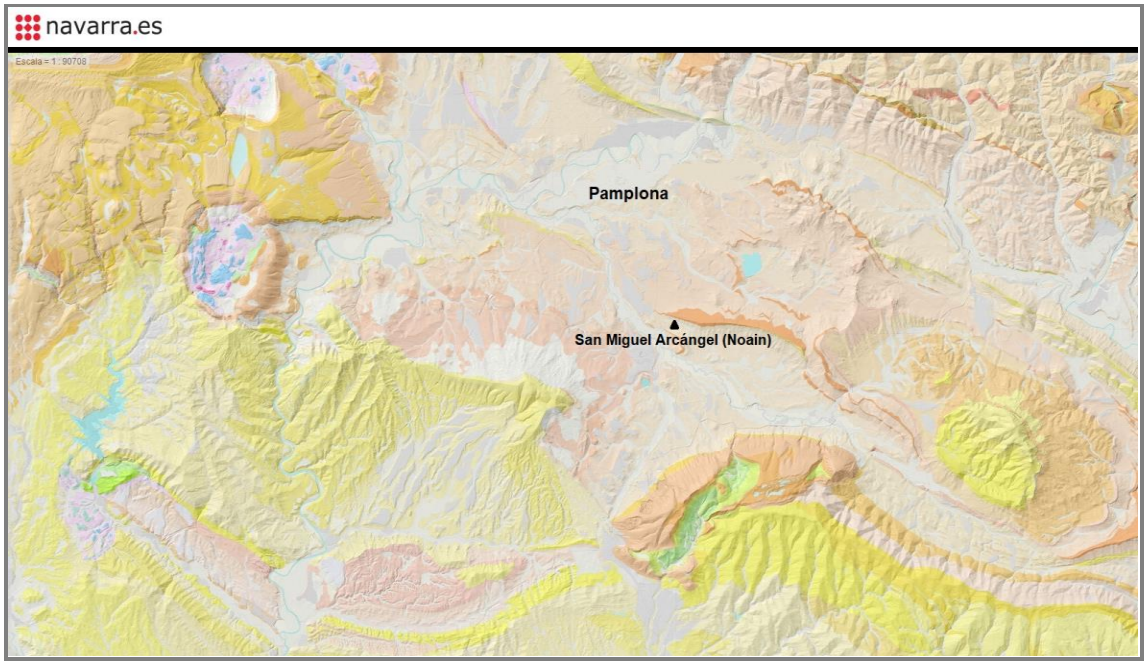


Figura 2.23. Localización geomorfológica, geográfica y geológica de la iglesia de San Miguel Arcángel. Se puede ver que la iglesia se sitúa en una suave colina que destaca en la traza de un anticlinal sobre una zona más o menos llana donde se pudo verificar la existencia de restos de la Edad de Hierro.

El Valle de Elorz fue una zona estratégica para los romanos, pues servía de enlace entre los Pirineos y el Ebro. El edificio histórico más emblemático y antiguo, además del acueducto, es la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin de estilo gótico del siglo XIII (figura 2.22).

Noáin está situada a 5 km al sur del centro de la capital. A pesar de encontrarse en la cuenca de Pamplona, pertenece a la Merindad de Sangüesa, por lo que comparte una buena parte de su historia con la ciudad de Sancho Garcés (figura 2.23).

El nombre de Noáin, según el lingüista Mikel Belasko, significa lugar propiedad de una persona llamada *No*. El segundo sufijo indica propiedad. Julio Caro Baroja llamó la atención sobre la relación de este nombre y el de la localidad de Juslapeña algo más al norte llamada hoy Nuin. Además, es una villa famosa por albergar el aeropuerto de Navarra o el acueducto que lleva el mismo nombre que la villa; Noáin tiene un importante papel en el desarrollo económico e industrial de Navarra, aquí está el principal centro de innovación de Navarra: el CEIN, Centro Europeo de Empresas e Innovación de Navarra, entidad pública perteneciente al Gobierno de Navarra.

La importancia de su estatus tecnológico e industrial se puede observar también en el hecho de haber cuadruplicado su población en los años de la aceleración económica, habiendo pasado de poco más de 2.000 habitantes en 1970 a más de 8.200 actualmente. Se han encontrado restos de cerámica y monedas romanas previas a la existencia del templo en los alrededores de la iglesia y la geomorfología sobre el cerro de suave pendiente nos retrotrae a las circunstancias geológicas y geotécnicas comunes de los casos anteriores, Tabar, Garítoain, Santa Lucía, Tiebas o Sarriguren.

En el exterior hay una torre gótica en la que está incluida la primitiva espadaña románica. Además, existe un pórtico del siglo XVIII bajo el que se encuentra una puerta gótica con un arco apuntado, arquivoltas y capiteles con hojas de roble a la derecha, y de vid a la izquierda. La nave gótica tiene tres tramos con una cabecera de forma poligonal (ver figura 2.22). La bóveda es de crucería. Durante el siglo XVI se construyeron dos capillas laterales, la sacristía y un coro decorado con cabezas, ángeles, racimos de uva, pájaros y jabalíes. La bóveda bajo el coro es estrellada con serafines en las claves. Durante la Guerra de la Independencia, los franceses instalaron una guarnición en Noáin, y hay constancia de que cometieron muchas atrocidades contra su población y sus bienes, entre las que destaca la quema de la iglesia que estudiamos con sus cuadros y retablos, de la cual solo se salvaron las paredes. La iglesia fue reconstruida.

2.8.2. Patologías repentinas.

Durante 2005 se detectan movimientos de elementos constructivos con la aparición de grietas por todo el monumento, se vieron en paredes, soleras, tabiquería, etc. Afectaban tanto al templo como a la vivienda adyacente del párroco, también en el perímetro se pueden todavía observar asientos del terreno con los accesos, soleras y aceras rotos, separados, hundidos, etc. Después de una restauración y pintado de la vivienda del párroco fue cuando más se notó la aparición de grietas y fisuras. Según las personas que viven en estrecho contacto con el edificio, la evolución de las deformaciones y grietas se aceleró tras la oleada de terremotos de 2004-2005 (figuras 2.24 y 2.25) correspondientes al enjambre inducido por el primer llenado de Itoiz con más de un millar de temblores. Inicialmente, fue por este fenómeno sísmico que nos requirió el Arzobispado.

Entonces decenas de temblores fueron sentidos en la cuenca de Pamplona, especialmente en los barrios y localidades del este y dos especialmente, los impactos principales en septiembre y octubre de 2004; también se fijaron en el avance en el deterioro (figuras 2.25 y 2.26) después de los temblores de esos años que fueron bajando en magnitud e intensidad, pero no cesaron del todo hasta 2011 (figura 2.24).

También se notaron con mucha intensidad, tanto dentro del templo como en la vivienda y vecindario, fuertes vibraciones cuando se ejecutó la urbanización adyacente, con obras de excavación en algunos enclaves superiores a 8 m en roca, terraplenados y compactados enérgicos entre 2002 y 2005. Incluso se notaron fuertes vibraciones, con las consiguientes quejas de varios vecinos, durante las voladuras producidas en la ejecución del Canal de Navarra que hizo desaparecer definitivamente el enclave de Garítoain.

A partir del reconocimiento geotécnico y de cimientos, de ensayos de laboratorio, de importantes entrevistas con las personas que fueron testigos de la última evolución del templo, el párroco, vecinos y trabajadores del Ayuntamiento, y también del seguimiento en los meses en que se observó la apertura de testigos en grietas, se esboza una explicación del posible comportamiento evolutivo del templo apoyado en la formación eocena de Margas de Pamplona en su nivel E2.

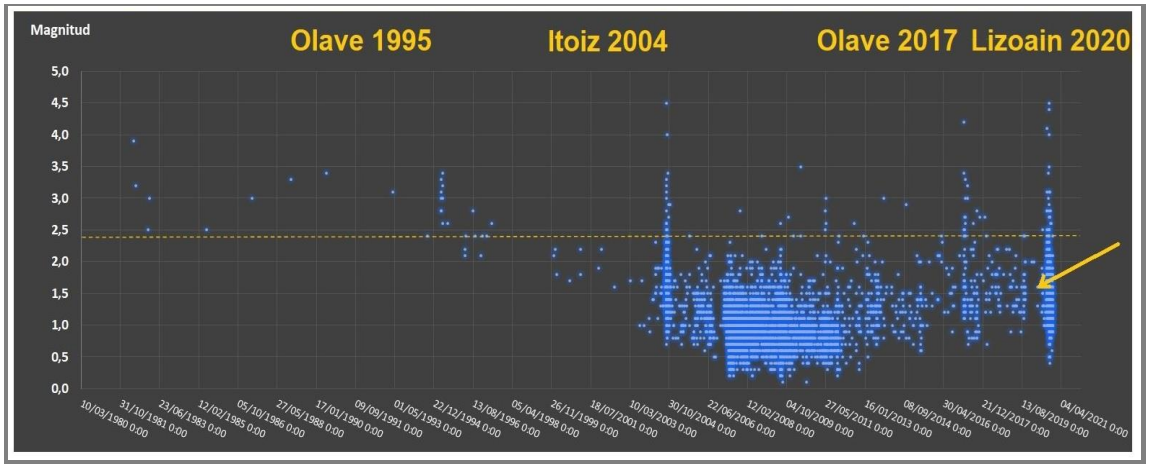


Figura 2.24. Enjambres sísmicos de Olave 1995, Itoiz 2004, Olave 2017 y Lizoáin 2020. La raya horizontal de M2,4 indica la magnitud media de los terremotos sentidos por la población (Aretxabala, A. 2017) aunque hay registrados eventos sentidos con M0,9 y otros M>3 sin respuestas en las encuestas. La flecha de la derecha marca el inicio del último enjambre en el área de Lizoáin-Egüés-Itoiz con más de 800 eventos, 94 sentidos por la población que no han supuesto un avance en las patologías descritas con valores de intensidad por encima de III-IV en áreas de la cuenca de Pamplona. La mayor existencia de eventos por debajo de la raya amarilla M2,4 con la entrada del siglo XXI será tratado en la sexta parte, responde fundamentalmente a la introducción de nuevos dispositivos de medición más sensibles a partir del año 2000.

Figura 2.25. Uno de los testigos de yeso en las grietas más llamativas que se abrieron durante los meses de primavera y verano de 2005 en la zona oeste; en toda la pared de la entrada principal sucedió lo mismo, también en el suelo delante de la sacristía. Obsérvese que la sillería está compuesta por las calcarenitas y areniscas que aparecen a techo de la formación de Margas de Pamplona, tal y como hemos visto en Tabar, Garítoain o en Tiebas. También la introducción, temprana e improvisada, en las fisuras más abiertas, de pequeñas piedras a modo de consolidación de la estructura.

En este caso de Noáin se evalúan las características geológicas y geotécnicas de los terrenos involucrados a la luz de datos cuantitativos y cualitativos sobre las características también evolutivas del terreno, su capacidad portante, y su afectación por cambios ambientales, urbanísticos y tectónicos.

Todas ellas sirvieron para llevar a cabo las actuaciones de restauración, descartando las soluciones más agresivas e ineficientes que llegaron a ser propuestas por algunas partes, entre ellas la ejecución de recalces, micropilotes o inyecciones de alta presión.

Las deformaciones avanzaban de manera heterogénea, siendo sensiblemente más agudas en la zona de la entrada (oeste) en la época de seguimiento (esto podría haber cambiado con las condiciones meteorológicas) que en las otras zonas sometidas a observaciones regulares.

Figura 2.26. Uno de los testigos de yeso que se abrieron levemente durante los meses de primavera y verano de 2005, en la parte del oeste en la entrada principal.

En efecto, para hacer un seguimiento del avance y desaceleración de las deformaciones, se colocaron testigos de escayola en diferentes zonas (figuras 2.25 y 2.26), tanto internas como externas del monumento, ello sirvió para observar si se producía un movimiento más acentuado en el periodo estival, coincidiendo —sin poder preverlo a principios de aquel año— que el año 2005 iba a incluir el período más seco de los últimos 65 años hasta ese momento, por encima de la denominada sequía de 1990-95.

2.8.3 Entorno geológico de San Miguel de Noáin, interacciones con el macizo rocoso.

La situación geológica de la zona corresponde a la parte superficial de un eje anticlinal en las Margas de Pamplona (figura 2.27) afectadas de erosión y sobre las que se han depositado una serie de materiales de origen antrópico y una parte residual por la acción de los agentes atmosféricos. Los materiales de aporte antrópico fueron depositados recientemente, fundamentalmente como consecuencia de la explanación, urbanización, y crecimiento en varias épocas de la iglesia.

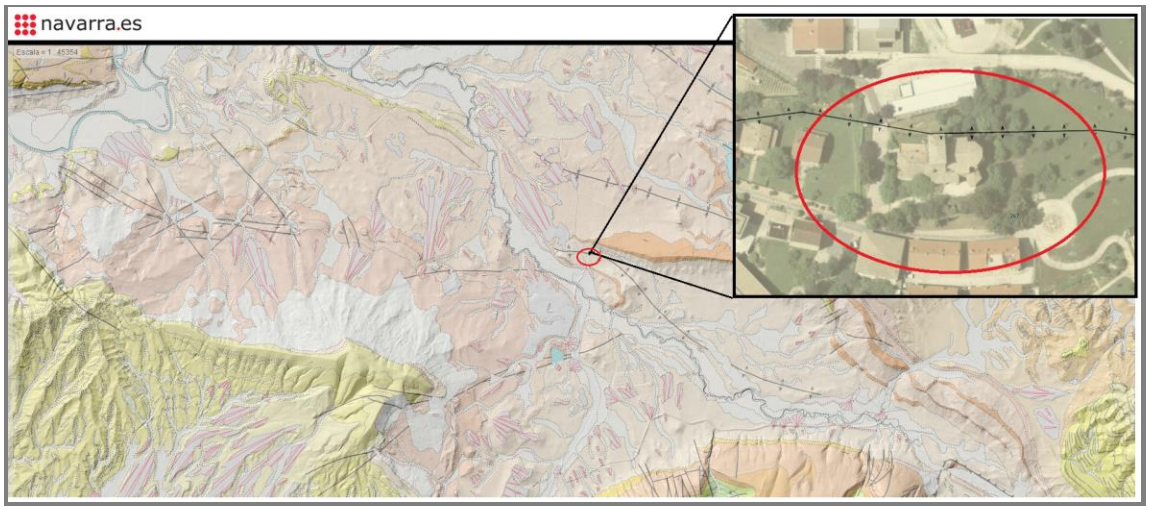


Figura 2.27. Localización geológica sobre el eje del anticlinal que cruza de este a oeste el área de la iglesia.

Al igual que en los casos anteriores, también se encontraron enterramientos, restos de huesos de varias épocas, restos cuyo origen cultual nos ponen en contacto con cultos pertenecientes a épocas antiguas, posiblemente necrópolis de la baja hasta la alta Edad Media y en otros casos, sin tener datos arqueológicos, vemos que se trata de enterramientos mucho más recientes: por una medalla encontradas en uno de los esqueletos, se podía ver que se trataba de principios del siglo XX, quizás de la época de la guerra civil española (son restos que salían en las calicatas geotécnicas).

En la zona más al sur de la iglesia existen rellenos de estas características relacionados con la construcción del templo, sillares, trozos de roca similar a la de la iglesia, etc., se encuentran a una profundidad similar a la de cimentación. En general, el origen de todos estos rellenos está ligado a la actividad humana y urbana desarrollada en la zona y que se ha llevado a cabo en los últimos siglos; excavaciones, rellenos de obras colindantes, rellenos incontrolados, materiales de excavaciones que se han ido acumulando durante varias épocas de crecimiento de la villa de Noain y cambios en la topografía y urbanización especialmente, como es lógico, debidos a la construcción del templo y al uso de algunas zonas como cementerio.

Varias prospecciones se realizaron a ras de cimiento, pues son muy valiosas a la hora de observar el tipo de cimentación y el contacto cimiento-terreno de apoyo, la morfología, profundidad y todo aquello que interese observar, medir, tomar muestras etc., (figuras 2.28, 2.29 y 2.30).

Figura 2.28. Situación del cimiento de sillería sobre las Margas de Pamplona E2 en grado III a -2,20 m. Se puede ver una ligera inclinación de los estratos hacia la excavación, estamos en el flanco sur del anticlinal.

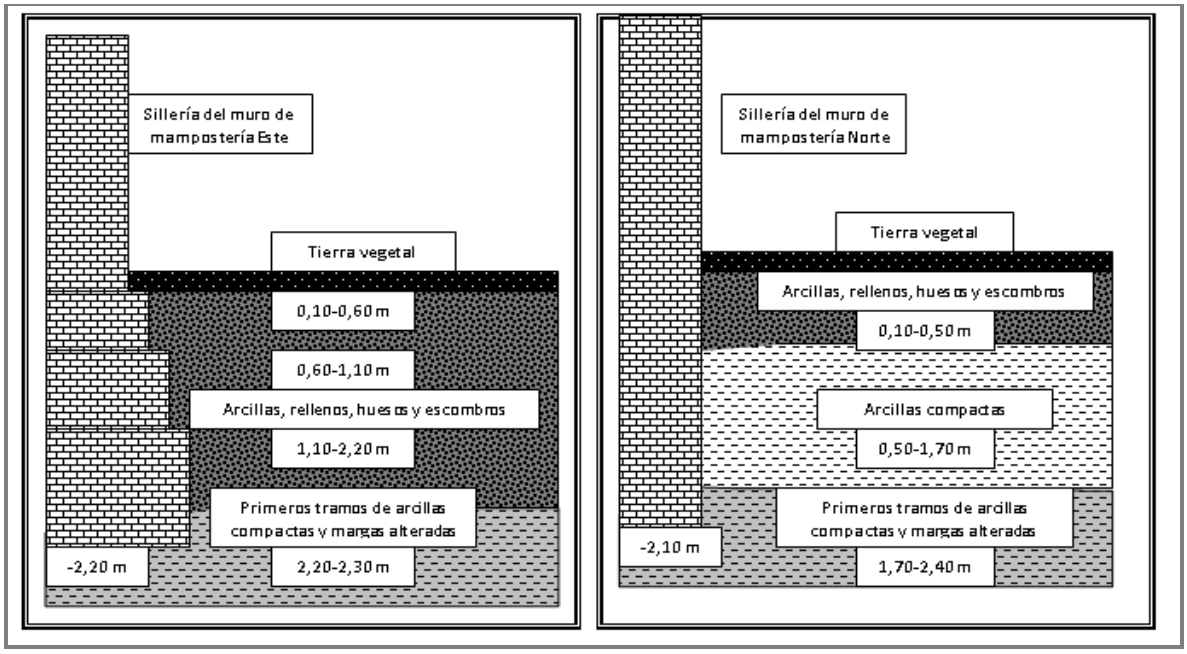


Figura 2.29. Situación del cimiento de sillería sobre las Margas de Pamplona en grado III, esquemas en la zona este, coincidiendo con la zona donde apoya la torre (se ensancha el cimiento) y en la zona norte con el ábside.

Figura 2.30. Un par de sondeos de 0,0 a 6,0 m muestran la aparición del macizo de Margas de Pamplona alterado (IV) a partir de 1,80 m aproximadamente y II-III hasta el final de la prospección.

En vertical, los terrenos atravesados y los materiales que los componen son:

Nivel A: Rellenos variados, huesos, escombros y terrenos con materia orgánica, algunos traídos de otras zonas, se extienden desde prácticamente el inicio de la excavación hasta poco más de metro y medio en las zonas más profundas, éstos son sobre todo arcillas que contienen escombros y huesos, también rellenos incontrolados, cascotes, trozos de hormigón anteriores a la última urbanización, etc. Van desde el inicio de la excavación hasta unos 1,5 – 1,7 m. Se ha encontrado un nivel de arcillas con gravas de unos 30 cm, este nivelillo está saturado, se trataría de un charco colgado; no se ha encontró agua en ninguna más de las prospecciones.

Nivel B: Margas de Pamplona (E2) muy alteradas (IV) a alteradas (II-III) de forma gradual. Se extienden desde 1,5 -1,7 hasta 2,2-3,5 m**.** Es en estos terrenos, en la parte inicial, donde apoya la iglesia. Este perfil de alteración es muy extenso en esta parte de la cuenca de Pamplona, pudiendo llegar en algunas partes de Noain y Beriain a más de 5 m y en casos localizados más de 10 m. No hay estudios que apunten a si este fenómeno está relacionado o no con el anticlinal sobre el que se encuentran estos materiales y por lo tanto con las condiciones tectónicas, incluso con la cercanía de los niveles potásicos.

Nivel C: Margas de Pamplona (E2) masivas algo alteradas (II-III). En calicata y sondeo presentan una humedad natural cercana al 6-7 % en esos primeros centímetros y presentan valores de resistencia a la compresión hasta unos 50 kp/cm².

La cota de cimentación se realizó de una forma mixta en niveles E2 con distintos grados de alteración de la formación alterada o semialterada de "Margas de Pamplona" (Nivel B descrito en el estudio geotécnico-forense), entre unos 2,0 y 2,3 m de profundidad. En las dos prospecciones, donde se observó el antiguo cimiento, se pudo testificar la distribución tanto de los niveles geológicos atravesados como de la tipología de cimentación (figuras 2.28 y 2.29); en la zona este, cerca de un contrafuerte, la cimentación no es mucho más profunda que en la parte norte, zona donde el muro de sillería apoya prácticamente sobre una misma cota del terreno, sino que es más ancha (figuras 2.31 y 2.32). De esta forma, los elementos que se consideraron más pesados se construyeron sobre apoyos más anchos (figura 2.31), transmitiendo cargas más repartidas, esto conlleva la ventaja de dicho reparto tensional y una cierta "homogeneización" en cuanto a la distribución superficial de las cargas.

Figura 2.31. El cimiento se ensancha en la zona de un contrafuerte que recoge las cargas de la torre.

Figura 2.32. El cimiento en la parte norte, donde no hay elementos pesados, no fue ensanchado como sí se hizo donde las cargas iban a ser mayores.

En caso de que el terreno fuera completamente incompresible, y en este nivel y en esta zona no lo es, se salvarían deformaciones no deseadas, pero este fenómeno tiene una desventaja: cuanto mayor sea la superficie interceptada de carga, mayor es también el volumen de terreno susceptible de alguna deformación en las mismas condiciones de carga, si éste presentase la apuntada susceptibilidad, y este es el primer fenómeno que desvelan las prospecciones: geometría, distribución de materiales y anchos de cimentación diferentes. Los asientos derivados, serían necesariamente diferenciales con diferentes anchuras de cimiento sobre el mismo terreno.

2.8.4. Condiciones geotécnicas de partida y cambios ambientales.

A partir de aquí, si el terreno presentase —y vamos a ver que así es si se le impulsa a ello— alguna posibilidad de deformarse, ésta no va a ser homogénea, sino que en aquellas zonas donde la cimentación es más ancha, el terreno, en las mismas condiciones que en otras más estrechas, se deformará más. La parte (o bulbo de presiones) afectada bajo un cimiento, viene a ser entre 1,5 a 2 veces el ancho del mismo, por esto, un cimiento de ancho 0,75 m afectará a unos 1,1 a 1,5 m bajo el mismo, sin embargo, con una carga idéntica, un cimiento de ancho 1 m afectará entre 1,5 y 2 m.

En el segundo caso y en las mismas condiciones tensodeformacionales, el asiento será mayor si antes no se intercepta un nivel totalmente indeformable, se ha visto en las prospecciones que bajo los cimientos aún quedan entre 1 y 2 m de margas alteradas E2 (figura 2.30), no compresibles de forma plástica, edométrica, puesto que el asiento ya habría tenido tiempo de sobra para manifestarse íntegramente, pero sí se podría desarrollar algún tipo de asiento que apareciera de forma brusca por alguna causa externa.

Si al terreno que se carga se le considera como prácticamente rígido y muy poco o nada compresible e indeformable, esta práctica de ensanchar los cimientos e incluso profundizar más, es práctica y solventa los problemas energéticos (de esfuerzo) que en el siglo XIII eran tremendamente costosos. Ello sugiere que esta ley era conocida por los antiguos constructores y arquitectos, y también parece que la relación que se observa entre la iglesia de San Miguel Arcángel y "su" terreno de Margas de Pamplona E2 (grado de alteración II-III) así lo corrobora y así se consideró. Se ha comportado durante siglos de manera predecible hasta que algún factor reciente o moderno traspasara el umbral tensional de lo que los antiguos pudieron prever.

Ahora se trata de desvelar cuál o cuáles son los procesos que originan tales movimientos diferenciales que se observaron en ese intervalo de tiempo tan pequeño en la vida secular del monumento.

La estabilidad de la iglesia está gobernada por una interacción que va a depender de tres factores fundamentales: el primero que ya hemos apuntado es la distribución de cargas en el terreno, y aunque no tenemos datos muy exactos, podemos afirmar que existe heterogeneidad en el reparto, y que, aunque esta heterogeneidad se minimizó por haberse ejecutado la cimentación del edificio con superficies distintas para cargas distintas, el volumen de terreno afectado es mayor en las zonas de mayor superficie cargada. Este primer factor puede considerarse como el más constante, un factor que prácticamente no ha cambiado con el tiempo, sigue siendo casi el mismo desde hace siglos; por ello, el ir a buscar una explicación de que los más recientes fenómenos de deformación del terreno dependen directamente de una distribución variable de las cargas, está condenado a chocar con un sentido común que así lo descarta, pues éstos ya habrían tenido tiempo de haberse desarrollado.

El segundo factor de estabilidad o inestabilidad hay que buscarlo en el propio terreno, este será el análisis del siguiente apartado, el comportamiento de las Margas de Pamplona E2 (II-III) depende así no solamente de la interacción del primer factor, es decir, la transmisión irregular de cargas, sino de su propia naturaleza, su capacidad portante, capacidad de evolución, densidad, porosidad, mineralogía, petrología, composición química, etc., y susceptibilidad de cambios en el marco de estas cualidades.

Así, el terreno de apoyo estudiado bajo la iglesia de San Miguel Arcángel no es un terreno estático, inactivo, muerto, es un terreno que presenta pequeños cambios cíclicos de composición y por lo tanto de propiedades mecánicas, en constante tendencia a un equilibrio cuyo umbral sería la máxima densidad alcanzable y que está marcado por las cargas que recibe, pero, sobre todo, por un tercer factor cuyo origen es puramente ambiental.

Este tercer factor ambiental es la humedad variable, viene dado fundamentalmente por causas externas, cambios importantes en las condiciones ambientales pueden producir cambios importantes en las condiciones del terreno, otra de ellas, por ejemplo —y que obviamente no ha cambiado—, es la fuerza de gravedad, pero que, aunque parezca de más decirlo, como vamos a ver, juega un papel a tener en cuenta a la hora de explicar una serie de movimientos secundarios que no son simplemente los relacionados con lo que es peso y masa en sentido estricto, sino que se combina con otros fenómenos químicos y mineralógicos para actuar: veremos que los cambios de humedad del terreno derivan en cambios de volumen y densidad y un movimiento gobernado por la gravedad. Pero tampoco este factor satisface por sí solo una explicación como la única causa de los acentuados movimientos del terreno de los años de aceleración de deformaciones, grietas, desplomes, especialmente de los del 2004 y 2005, puesto que contrastes de humedad ambiental se han dado muy fuertes en toda la historia del templo, por citar uno que produjo serios problemas en todo Noáin, está el de 1995-96 con patologías muy determinadas estudiadas por quien subscribe. Destacamos un edificio moderno situado a unos 100 m de la iglesia al que el fenómeno de retracción e hinchamiento afectó especialmente y a la sazón el problema acabó en el juzgado, quien escribe esto evaluó y peritó la incidencia de aquel fenómeno en este mismo terreno en 1995. Ese edifico aparece en la imagen 2.27 al NO de la iglesia. Ni que decir tiene que son conocidas más sequías importantes a lo largo del siglo XX, sin mencionar las históricas de mayor antigüedad como la de 1990-95.

Finalmente, el más importante de los factores ambientales que señalamos es en un grado mucho mayor, el responsable de la magnitud de las deformaciones observables desde hacía una década hasta el momento del estudio en 2005. Especialmente llamativas desde 2002 y muy acentuadas la temporada 2004-2005. Se trata de un fenómeno que sumado a los anteriormente descritos o más bien en clara interacción, como trataremos de explicar, provocó el fuerte incremento y una aceleración de la consolidación del terreno de forma artificial, este fenómeno fue un importante incremento de vibraciones en el entorno que produjo una compactación inducida, dichas vibraciones provocaron un "reajuste" a nivel molecular, como cuando se vibra un terraplén o se compacta un terreno que deriva en un incremento de densidad; las partículas de suelo y roca se acomodan a nuevas condiciones de estabilidad. Cimientos y monumento también.

Para hacerse una idea del radical cambio que sufrió el entorno, podemos ver la magnitud de los trabajos de urbanización que se reflejan en las fotografías adjuntas (figura 2.33) al este de la iglesia y en sus inmediaciones. Los movimientos de tierra, excavaciones, compactaciones y terraplenados alcanzan en algunas zonas los 10 m de profundidad por centenas en horizontal (figura 2.33).

Figura 2.33. En 2002 se estaban ejecutando las urbanizaciones con excavaciones cercanas a los 8 m de profundidad, en algunos casos a 10 m de la iglesia se retiró la roca eocena (unos 4-5 m) y se compactó la explanada con métodos de aplicación de la ingeniería civil como apisonadoras de rodillo vibrante de varias toneladas que debían alcanzar una compactación mínima correspondiente al 98% del Proctor Modificado, etc.

Las fotografías de la figura 2.33 del año 2002 muestran hasta qué punto las excavaciones ejecutadas habían bajado por debajo del nivel natural de aparición del macizo rocoso que muestra el eje del anticlinal sobre el que se asientan los cimientos de la iglesia y toda esa área de Noáin, y que incluso a unos 10-15 m del templo estuvieron provocando durante meses fuertes vibraciones, las cuales fueron muy bien transmitidas hasta el templo, dado que el módulo de elasticidad del macizo semisano afectado, como se puede ver en las fotografías de 2002, fue mayor cuanto más se excavó tal y como veremos más adelante, en la tercera parte, al relacionar cualquier factor de calidad del macizo de Margas de Pamplona (peso específico, resistencia mecánica, RQD, RMR) con la profundidad. Para que se produzca una compactación inducida del terreno éste debe ser susceptible de densificación y para ello debe presentar una disposición estructural capaz de retraerse o reajustarse. Cualquier persona mínimamente familiarizada con el mundo de la construcción sabe que esto se consigue cargando el terreno, humedeciéndolo (o en su caso secándolo) de manera óptima como se tantea con el ensayo de Próctor, además de vibrando el mismo, o como en el caso de las urbanizaciones, carreteras, autopistas, etc., las tres al mismo tiempo. Esta es la labor de las apisonadoras y rodillos actuales, también se consigue con un denso tráfico pesado, carros de bueyes con piedras antaño, o golpeos dinámicos con objetos manufacturados hace muchos más años, previa humectación o desecación del espacio que se quiere compactar.

También vibraciones de origen natural se cuentan entre las causas de compactaciones inducidas al terreno, tales son el paso en tropel de rebaños de animales, pero sobre todo una en especial, provoca compactaciones inducidas: los terremotos. La aparición del substrato de Margas de Pamplona, tal y como se ha visto, es muy constante; se han podido medir datos geomecánicos a pesar de la dificultad de delimitar planos de estratificación, las margas en esta zona han dado resistencias a la compresión en su tramo semi-alterado cercanas a los 50 kp/cm^2. Algo que, aunque actualmente es cuantificable dentro de la convención internacional en unidades internacionales como escalas de presión, fractografía, etc., antiguamente por métodos cualitativos más intuitivos, como dificultad de excavación, dureza, resistencia al golpeo con el martillo, tipo de rotura, etc., se llegaba a conclusiones parecidas e incluso más favorables. En efecto, la arquitectura está llena de ejemplos de ello que seguiremos viendo, e incluso muy cerca de la iglesia. En algunos se puede percibir que la alta tecnología muchas veces no suministra destreza proyectiva. Afirmamos esto para que se considere el buen hacer constructivo y arquitectónico que se desvela, viendo las decisiones que se tomaron en la iglesia de San Miguel Arcángel en cuanto a cimentación, es imposible que hace tantos siglos se pudieran prever los enérgicos sistemas de construcción actuales. Se han estudiado algunos parámetros geotécnicos en los niveles de arcillas iniciales previas a las margas E2 (niveles B en este estudio particular); en la siguiente tabla III pueden verse los resultados resumidos.

Tabla III

Parámetro estudiado	Margas alteradas III (B)
Ángulo de rozamiento interno	28 - 32 (*)
Cohesión (kp/cm²)	0,10 – 0,20 (*)
Humedad natural (%)	11,9-13,5
Peso específico (g/cm³)	2,03-2,42
Máxima densidad según Próctor normal (g/cm³)	2,11
Resistencia a la compresión (kp/cm²)	26-47
Índice de expansividad (MPa)	0,101-0,102
Contenido en iones sulfato	Negativo
N_{SPT} N_{DPSH}	12-R 13-R
ST-308	>4

(*) Datos extraídos de ensayos de campo, de laboratorio ST-308, RMR, DPSH, SPT, etc., del Grundbau Taschenbuch y contrastados con ensayos locales.

2.8.5. Deformaciones y actuaciones humanas

Los datos anteriores señalan el trato con un terreno esencialmente evolutivo y susceptible de cambios de volumen, densidad y comportamiento en función de cambios de humedad y compactación. Destacamos el elevado valor del índice de expansividad, algo muy conocido en Noáin como ya se ha explicado; se produce porque el terreno contiene pequeños porcentajes de minerales arcillosos de la familia de las esmectitas, éstos admiten moléculas de agua en la estructura cristalográfica; si ésta está disponible, la toman del medio, también la pierden si las condiciones son de extrema sequedad, este proceso suele ser cíclico, estacional y el terreno lo realiza simplemente admitiendo o expulsando moléculas de agua de la estructura cristalográfica, los minerales involucrados lo hacen sin dejar de ser esmectitas pero cambiando de volumen, el agua es así absorbida y adsorbida, todo ello con un cambio de volumen que afecta a toda aquella parte del terreno que intercambia esa humedad. Por otro lado, la densidad que presenta el terreno más directamente en contacto con la cimentación es de unas 2,03 t/m³ con una humedad del 13,5 % en la primavera de 2005, a principios de la fuerte sequía que vino aquel verano.

Esa misma muestra de terreno podría llegar a densidades de 2,11 t/m³ después de una enérgica compactación, como se puede comprobar en el ensayo de Próctor Normal, con una humedad óptima del 14,9 % para la compactación, donde ésta influye directamente en que la lubricación (disminución de ángulo de rozamiento y cohesión) sea la necesaria y óptima para que las partículas llenen los huecos. Los aspectos más interesantes estudiados en la formación de Margas de Pamplona (Nivel C en este trabajo) en esta zona de Noáin se resumen en la siguiente tabla IV.

Tabla IV

Ensayos	Margas de Pamplona (C)
Ángulo de rozamiento interno	29 – 36 (*)
Cohesión (kp/cm²)	0,50 – 1,50 (*)
Humedad natural (%)	8,6
Resistencia a la compresión (kp/cm²)	47-83
Peso específico (g/cm³)	2,42-2,54
N_{SPT} N_{DPSH}	Rechazo
Contenido en iones sulfato	Negativo

(*) Datos extraídos de ensayos de campo, de laboratorio ST-308, RMR, DPSH, SPT, etc., del Grundbau Taschenbuch y contrastados con ensayos locales.

Como hemos adelantado, se ha comprobado que el apoyo se realizó a cotas semejantes en las Margas de Pamplona alteradas y arcillas compactas (nivel B en este trabajo) a partir de unos 2 m de profundidad (figura 2.29). Esta configuración, en última instancia, no es responsable directa de las grietas y desplomes, como ya se ha explicado, ni siquiera sabiendo que la transmisión de cargas no es homogénea y que además algunas zonas de la iglesia abarcan más volumen de terreno susceptible de deformación, y por lo tanto más vulnerables que otras. Aunque el terreno que recibía las cargas presentaba unas características mecánicas y geotécnicas favorables, con resistencias a la compresión a unos 2 m de profundidad mayores de 20 kp/cm², hay que asumir que éstas son evolutivas y no son fijas; la densidad que presentaba de 2,03 g/cm³ con una humedad del 11,9-13,5 % no sería la máxima alcanzable si se remoldea o perturba; por métodos de la ingeniería civil como el ensayo Próctor Normal, se podrían alcanzar hasta 2,11 g/cm³ con una humedad cercana al 15 %.

Estos valores en seco rondarían los 1,73 g/cm³ para el terreno tal como está ahora y 1,83 g/cm³ con la compactación del Próctor Normal, lo cual significaría que esa parte del macizo alterado que recibe el peso de la iglesia se encontraría con una compactación de poco más del 94 % y a pesar de aplicar esta comparación de forma poco habitual, sirve como referencia más bien cualitativa, ya que al terreno se le podría realizar un ensayo de colapso, pero resulta que no es colapsable, sino hinchable. Ese cierto grado de esponjamiento del primer tramo de margas que recibe el peso de la iglesia, sugiere que ni espesores ni grado de compactación van a ser heterogéneos en todo el perímetro bajo los cimientos y que esa medida orientativa del 94% bajo la iglesia simplemente da una idea del pequeño, pero suficiente, grado de compactación posible que puede inducirse bajo nuevas condiciones; es lógico que el terreno haya ido consolidando durante los últimos años si se le ha impulsado a ello, y todo apunta a que ha sido así. Consideramos, como se nos contó y fuimos comprobando con los testigos dejados durante el año 2005, que hubo momentos puntuales en los que se generó una mayor aparición de grietas o apertura de las existentes. Este hecho se explica por tres causas fundamentales:

El terreno en septiembre de 2005 arrojaba datos de humedad que podrían ser cercanos al 10-13% a unos 1,5-2,5 m de profundidad (consideramos que, a partir de esa cota, de 2,5 a 3 m, la humedad es prácticamente constante y menor del 10 %)[2], valor por debajo de su humedad óptima de compactación que se sitúa en el entorno al 15 % (ver tabla V y figuras 2.34 a 2.37). Su humedad de saturación en las condiciones actuales es cercana al 19 % - 20 %, a partir de aquí no habría forma física de que el terreno admitiese más humedad (pero sí química).

En épocas más húmedas, en las que la humedad del terreno se acerque a ese 15 %, las condiciones de recompactación serían óptimas, y estas condiciones pueden darse como mínimo dos veces al año, recordemos que el límite del 20 % de humedad de saturación lo impone la porosidad del terreno y aquí se explica la segunda causa que hace que la sensación de deformación haya sido, a veces, muy puntual, como se nos iba comentando por las personas afectadas, ligadas al mantenimiento del monumento durante el período 2004-2005.

---

[2] Es precisamente una humedad cercana al 10% la que de forma natural provoca la mayor estabilidad de la estructura íntima del terreno, por encima de ese valor, ya hemos visto que el terreno se lubrica y se puede compactar de manera artificial además de hincharse levemente de forma natural, por debajo, el terreno carece de fuerzas de cohesión debidas a la tensión superficial del agua intersticial (semisaturadas), por lo tanto, estaría menos cohesionado, además, comenzaría la retracción natural.

Hay que apuntar que en los períodos óptimos de compactación que se dieron en la primavera de 2004, en el otoño de 2004 y la primavera de 2005 cuando el terreno entraba y salía de esa humedad ideal del 15 %, se observó mayor aparición de grietas. Al mismo tiempo se estaban llevando a cabo labores de urbanización, compactación y excavación de obras cercanas.

Tabla V

Profundidad (m)	Humedad Natural (%)	Peso Específico (g/cm^3)	Resistencia Compresión (kp/cm^2)
2,20	13,5	2,03	---
2,20	11,9	2,45	47
	11,9	2,45	26
2,80	8,6	2,51	52
	8,6	2,52	54
4,80	6,3	2,53	83
	6,3	2,54	76

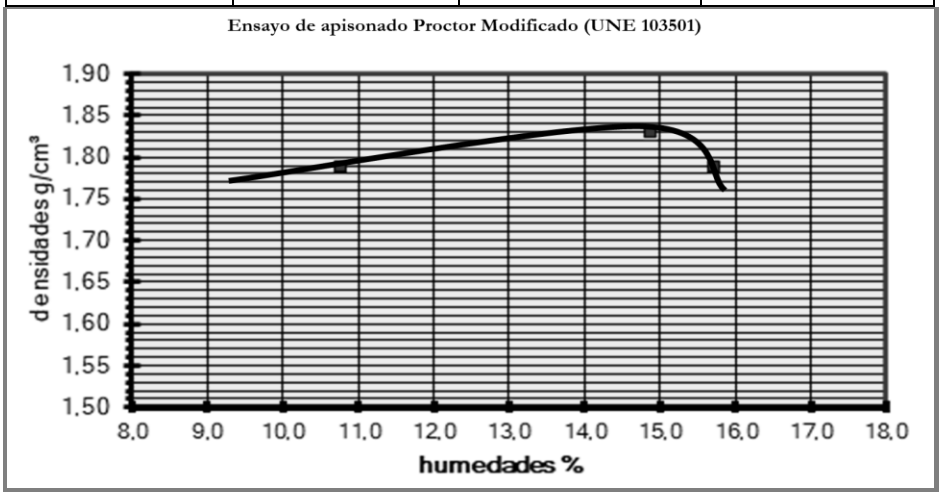


Figura 2.34. Ensayo de apisonado Próctor Modificado (UNE 103501) donde se muestra que la máxima densidad seca en los terrenos sobre los que se apoya la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin se alcanza con una humedad cercana al 15%.

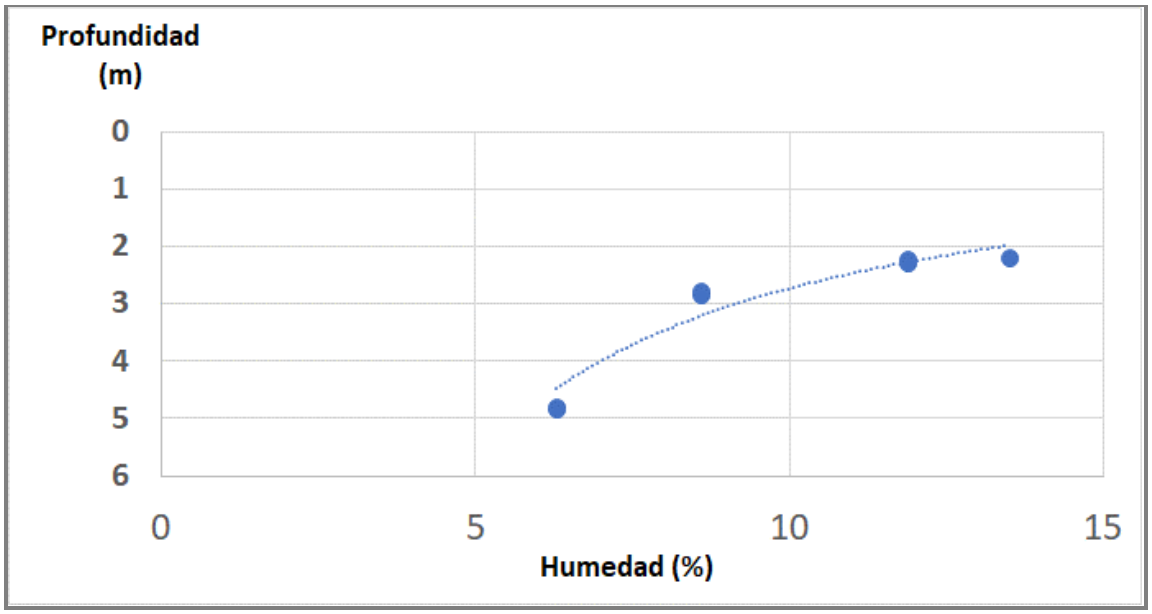


Figura 2.35. Variación de la humedad natural (%) bajo la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin entre 2,20 y 4,80 m en la primavera de 2005.

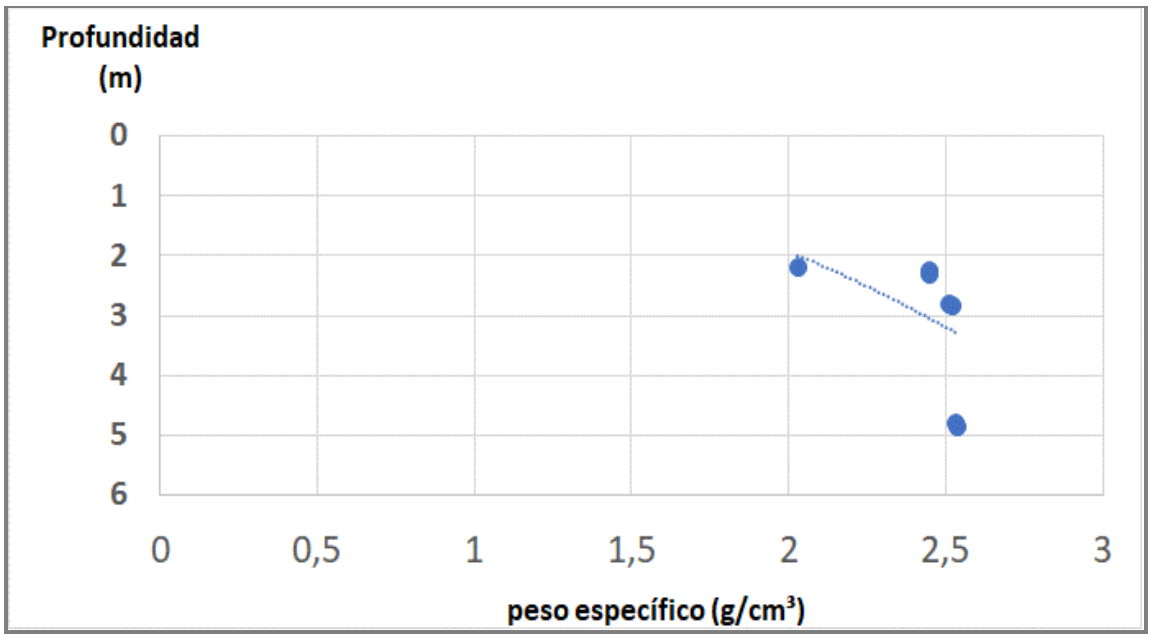


Figura 2.36. Variación del peso específico (g/cm³) bajo la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin entre 2,20 y 4,80 m en la primavera de 2005.

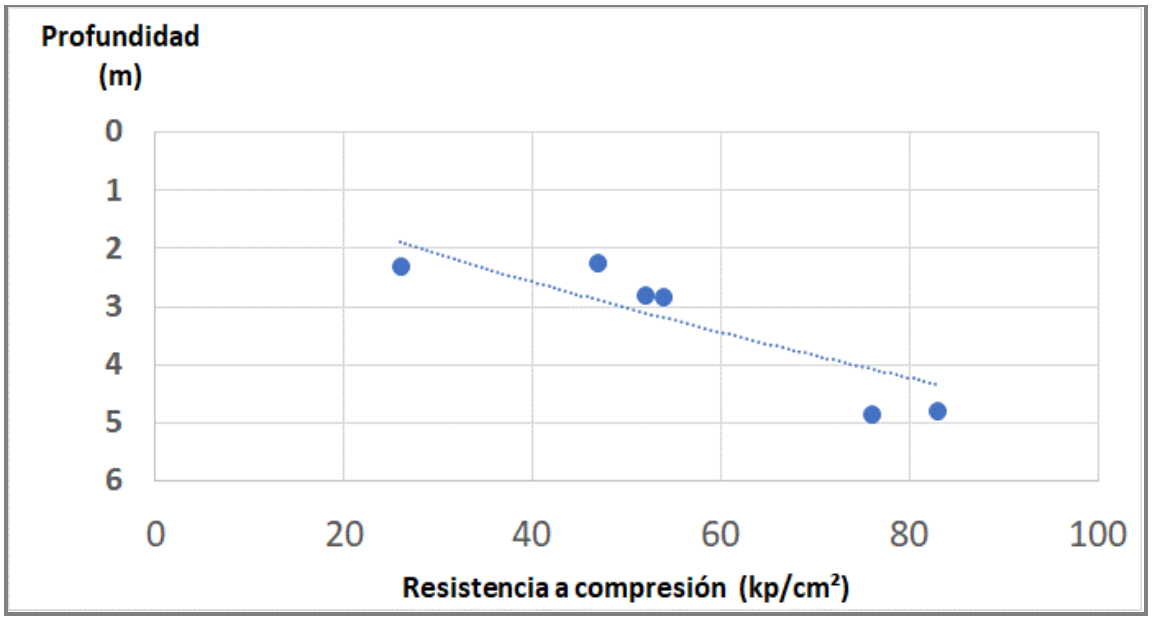


Figura 2.37. Variación de la resistencia a la compresión simple (kp/cm²) bajo la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin entre 2,20 y 4,80 m en la primavera de 2005.

2.8.6. Vibrado, compactado y deterioro del monumento y su entorno

Cualquier impulso exterior, tales como vibraciones, tráfico pesado, terremotos, etc., supondrá una compactación inducida, sobre todo si estos fenómenos entran en resonancia cuando el terreno está atravesando una época de humedad óptima de compactación (ya se ha comentado que estos valores cercanos al 14-15 % se han podido dar hasta 2 veces en el aquel año, y otras dos el anterior y así sucesivamente), algo que parece muy claro en primavera (11,9-13,5 %) y otoño (no tenemos el dato), en estas épocas si se producen fuertes vibraciones, la velocidad de aparición de grietas se acentúa.

Todo indica que, en aquellos días o semanas, cuando se estaba produciendo alguna deformación que no ha venido manifestándose de forma progresiva, sino repentina, en realidad el terreno estaba siendo compactado en parte de ese 6 % que teóricamente aún podría producirse en ese nivel de Margas de Pamplona E2. Las personas que vivieron el día a día de aquella evolución comprobaron que se producían movimientos, aparecían grietas, caían cascotes, etc., se asustaban, no asociaron tales movimientos con las fuertes y persistentes vibraciones que, como nos han contado, percibieron durante la ejecución de las obras cercanas, tampoco con posibles cambios de humedad del terreno, sino con un fenómeno mucho más espectacular por impactante que vivieron en el último año unas tres o cuatro veces: los terremotos de Itoiz. Así cuando hicimos este estudio y también años después, las personas que conviven con el templo hicieron hincapié en aquel fenómeno natural.

Pero aquel fenómeno también se dio en el pasado, como los fuertes cambios de humedad y se ha venido dando de forma puntual en todas las décadas pasadas varias veces con intensidades de III a V, cada 10 o 20 años, de hecho, los terremotos de baja magnitud que se registran bajo nuestros pies en la Cuenca de Pamplona se podrían contar mensualmente por docenas.

Otra causa que se apuntó desde el principio, y como ha sucedido en pueblos como Astráin, fueron no solo los terremotos, sino completos colapsos de las galerías de las antiguas potasas. En este caso preguntamos al departamento de Geología del Gobierno de Navarra y aunque nos dijeron que no hay muchos datos, descartaron la posibilidad de galerías bajo la iglesia de San Miguel Arcángel o sus inmediaciones que hayan podido afectar al templo.

Creemos que se deben descartar tales hipótesis ya que la existencia de galerías hubiera colapsado a los pocos meses de su abandono, como es habitual, o en casos muy puntuales a los pocos años, y desde la década de los 80 del siglo XX no se realizaron galerías cercanas. Si así hubiese sido la iglesia no sería la única edificación afectada en Noáin. Lo veremos con la crisis símica de 2013 en la sexta parte. Este fenómeno se sigue manifestando en algunas zonas a las faldas de El Perdón.

2.8.7. El papel de la reptación del terreno.

Los cambios cíclicos de humedad generan también movimientos críticos, cíclicos y que se puede ver como se manifiestan sobre todo en la parte alta del terreno, soleras rotas, aceras que se separan de los jardines, etc. Por eso, porque se producen en la parte cuyas fluctuaciones de humedad son muy extremas (figura 2.35), esta explicación no encaja como única causa de las patologías observadas. Pero aquí aparece el papel de la gravedad que adelantamos y que, en cierto modo, ejerce un pequeño impulso en la evolución del terreno favorecido por las vibraciones externas.

Los movimientos plásticos del terreno, si los hubo, al principio de la construcción del templo ya habían llegado a su fin, por ello, en un futuro, solamente pueden considerarse como pseudo-plásticos aquellos debidos a las fluctuaciones de humedad, ello provoca un movimiento vertical cíclico y otro horizontal a favor de la mayor pendiente, y la iglesia está en un alto, tiene una moderada pendiente en tres de los cuatro puntos cardinales y se encuentra en el eje de un anticlinal con las partículas orientadas en una predisposición favorable a la reptación (figuras 2.27 y 2.33).

El proceso de movimiento horizontal por ciclos de hinchamiento y retracción es un proceso extremadamente lento: las partículas de suelo que han sufrido un cierto hinchamiento no se dilatan de forma completamente perpendicular a la horizontal, sino que la gravedad, cuya componente a favor de la ladera es una fuerza a tener en cuenta para cada partícula individual, impulsa un pequeño movimiento a favor de la máxima pendiente.

Figura 2.38. Detalle de roturas originadas en una solera de hormigón en masa bastante mal ejecutada desde movimientos superficiales del terreno debidos a hinchamiento y retracción por ciclos de humedad-sequedad, pero favorecidos o amplificados por las vibraciones en los alrededores de la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin. También los bordillos presentan separación irregular y desplazamientos.

Este fenómeno es mucho más acentuado en el momento de la retracción en épocas secas, las partículas ya no vuelven a su posición inicial, sino que lo hacen en la dirección de dicha máxima pendiente; este fenómeno se conoce en la bibliografía geológica como *reptación* o *creep* y es el responsable principal de muchos de los movimientos acumulados en edificios históricos inmersos o cercanos a laderas, incluso con pendientes muy pequeñas.

Figura 2.39. Acera cercana a la vivienda del párroco, se pueden ver solapadas la acción de las vibraciones en el terreno en conjunción con los fuertes cambios de humedad.

Figura 2.40. En la vivienda del párroco aún hoy se pueden ver las grietas de las vibraciones de entonces.

El terreno de alrededor de la iglesia de Noáin, se "desparrama" de forma natural de una manera muy lenta (milímetros al siglo, por ejemplo), arrastrando en ese lentísimo viaje, parte del material superficial hacia las zonas más bajas. Así, esa forma de "vacantes" que se producen en los pequeños esfuerzos de tracción a nivel molecular o de partícula durante esos siglos, esperan a ser rellenadas cuando las condiciones sean óptimas. La más óptima: que el terreno se encuentre cerca de un 15% de humedad y en ese momento se produzcan terremotos o vibraciones de vehículos pesados.

2.8.8. Facilidades geotécnicas para desencadenar patologías.

La primera afectación (vibración sísmica) se ha dado durante siglos numerosas veces sin demasiada trascendencia, pero la segunda sí se ha sumado a los terremotos y especialmente durante la última década del siglo XX y primera del XXI (figuras 2.41 a 2.43). En el caso de la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin durante la ejecución de las urbanizaciones, cuando en varias épocas recientes el terreno atravesó el 15 % de humedad también, con y sin terremotos. Este "desparrame" al que aludimos es el que da la apariencia de que la iglesia se haya *partido por la mitad*. En la siguiente serie de fotografías extraídas de diversas páginas webs y épocas, puede verse una evolución territorial y urbanística de la zona desde aproximadamente 1998 hasta 2021. Hacia 1998 los alrededores de la iglesia de San Miguel eran terrenos de cultivo (figura 2.41), como probablemente lo hubieran sido durante los últimos siglos siete siglos que acompañaron al monumento, su dinámica vino siendo la misma desde antaño hasta prácticamente el año 2000.

Figura 2.41. Evolución urbanística de la zona alrededor de la iglesia de San Miguel en 1998, 2003, 2005 y 2021.

Durante todos esos siglos y hasta mediados del siglo XX, la mayor concentración de energía transmitida a través de las Margas de Pamplona fueron los terremotos, éstos no habían provocado patologías remarcables y el ganado o los carros de bueyes para la agricultura tampoco. Hacia 2003 los alrededores de la iglesia de San Miguel Arcángel fueron objeto de una potente y acelerada labor de urbanización que provocó un cambio brusco y radical, definitivo, desde unas condiciones que perduraron durante siglos e incluso milenios antes de la construcción del templo a un descomunal despliegue de maquinaria de obra civil que, actuando durante meses convirtió los ancestrales terrenos de cultivo de cereal en un entorno urbano (figura 2.41).

El tráfico pesado, la extracción de material, en algunos casos de casi una decena de metros (figuras 2.33 y 2.42), la compactación y la excavación para sótanos y viales cambiaron la topografía y el régimen hídrico, pero sobre todo produjo una perturbación importante por vibraciones inducidas en el monumento y edificaciones adyacentes. Sin embargo, la disposición vulnerable y desfavorable de la iglesia de San Miguel Arcángel que mostraron las inspecciones y los parámetros estudiados no se pueden tomar como una coincidencia. Los leves terremotos de intensidades III-IV de aquellos días pudieron sumarse en una medida muy relativa, pero no era la primera vez que sucedían. Las primeras y violentas voladuras de las obras del Canal de Navarra que los vecinos comentaron sentir de manera violenta, sin embargo, no afectaron a otras edificaciones. Como se ha comentado, cuando en primavera y otoño se alcanzan valores de humedad del terreno cercanos al 15 %, la afectación por estos fenómenos es máxima. Hacia 2004 prácticamente toda la zona del este, norte y sur de la iglesia, había sido ya transformada.

Figura 2.42. Tres fotografías, una de 2001 (arriba a la izquierda), otra de 2005 (abajo a la izquierda) y otra actual (2021) muestran la solución de contención que se le dio a un muro al descalzarlo después de casi 8 m de excavación en roca, dicho muro se encuentra a unos 30 m de la iglesia de San Miguel, la cual se puede ver en la fotografía de 2001.

2.8.9. Lo que no le sucedió a la iglesia de San Miguel de Noáin.

Así que por todo lo expuesto quedaron descartados los siguientes fenómenos, todos ellos fueron argüidos o aparecieron en algún momento en las reuniones previas y durante el estudio llevado a cabo, también por otros técnicos consultados que, en diferentes reuniones, los pusieron sobre la mesa en mayor o menor medida. Todos los fenómenos geológicos que se van a describir no son responsables de las patologías que se manifestaron a partir de la urbanización de la zona en 2003 y sobre todo en el período 2004-2005 en el conjunto arquitectónico de la iglesia de San Miguel Arcángel de Noain:

- Una deficiencia geotécnica del terreno, como baja capacidad portante: hoy en día al terreno estudiado se le podría estimar una presión máxima de hundimiento de unos 20 kp/cm², con una carga admisible para una edificación normal de unos 6-7 kp/cm². El monumento habría tenido siete siglos para asentar de manera súbita y no lo hizo.

- Un reparto heterogéneo de cargas: aunque no tenemos datos exactos de éstas, este fenómeno fue previsto como lo mostraron las prospecciones enfocadas a observar los apoyos y el sustrato que acogía las cargas; se ejecutaron cimentaciones algo más anchas en las zonas que recibían más peso. El mismo terreno presenta unas condiciones geotécnicas naturales favorables capaces de puentear tales heterogeneidades.

- Asientos plásticos de tipo edométrico por una relación de ajuste carga-deformación: el terreno no es típicamente plástico y por el tiempo transcurrido ya se habría culminado el proceso.

- Movimientos de ladera de tipo inestable, tales como roturas circulares, planares, etc.: no se dan tales condiciones, no hay evidencias de esos fenómenos.

- Terrenos colapsables: no hay un grado de colapsabilidad que no sea el puramente debido a compactaciones inducidas en terrenos que se clasificarían como ligeramente expansivos. El terreno estudiado no se puede catalogar como colapsable, sino al contrario, de manera natural (sin artificios) sería un terreno típico hinchable de la cuenca de Pamplona derivado de la alteración "in situ" de formaciones margosas (E2), en este caso de los residuales de las Margas de Pamplona.

- Lavados selectivos con arrastre de finos: este fenómeno se daría en un terreno que no fuera una roca, un terreno granular con finos rellenando huecos, además se presuponen movimientos de agua en el terreno y esto no se ha observado.

- Oquedades cársticas: el terreno es de margas, no se conocen este tipo de fenómenos por disolución en estas rocas, tampoco se han detectado en las prospecciones realizadas.

- Ciclos de humedad sequedad y por lo tanto de hinchamiento-retracción: aunque el terreno presenta estas características, solo se puede aplicar a aquella parte del mismo que sufre cambios bruscos de humedad, es decir, el primer par de metros y poco más; las cimentaciones —seguramente porque el fenómeno era conocido— se llevaron a una zona competente donde la afectación está muy disminuida (más de 2 m) y en la que durante muy largos períodos de tiempo en condiciones climáticas normales dicha afectación es prácticamente nula. Es probable que sequías tan acentuadas como las vividas sobre todo en 1995 y 2005, tuvieran un papel importante en la retracción del terreno; en épocas muy puntuales podrían considerarse tales fenómenos como muy amplificados, incluyendo una mayor velocidad y volumen de reptación del terreno alrededor del monumento, pero los datos son muy escasos a nivel regional, no se cuenta con estudios serios que puedan avalar estas hipótesis, pero insistimos en que deben considerarse.

- Colapso de galerías profundas, debidas a los trabajos de minería: éstos ya se habrían dado hace una o dos décadas y habrían afectado a más edificaciones. Las fuertes vibraciones derivadas de voladuras de las obras del canal de Navarra están lo suficientemente lejos como para haber tenido un papel diferencial, de forma que han podido solaparse al fenómeno que a más abajo describiremos.

Así, los asientos plásticos iniciales estimados en varios milímetros o a lo sumo uno o dos centímetros, ya se dieron durante la construcción de la iglesia y edificios contiguos, el terreno alcanzó su equilibrio hace muchos siglos, los apoyos con superficies diferentes han funcionado como una solución estable también durante siglos. La susceptibilidad al cambio de volumen y su consiguiente movimiento vertical y horizontal han afectado solamente a la parte más superficial de las Margas de Pamplona. En efecto, esto es así puesto que, a las profundidades de cimentación investigadas, las fluctuaciones no llegan a los 5-6 puntos porcentuales, aunque es probable que, en épocas de sequías intensas, como las que se atravesaron en 2005 mientras desarrollábamos el estudio, las fluctuaciones alcancen los 10 puntos o más y parte de la retracción sufrida entonces por el terreno se deba a este fenómeno, pero insistimos que, por sí solo, no justifica todas las deformaciones y roturas observadas. En las zonas superficiales, que sí sufren grandes fluctuaciones, pudiendo llegar a más de 30 puntos, el fenómeno se manifiesta en aceras, soleras exteriores, separación de jardineras. Esto también provoca un mínimo y casi inapreciable movimiento gravitacional hacia las zonas de máxima pendiente en las partes altas del terreno.

La iglesia se encuentra en una cresta en el eje de un anticlinal que ha podido favorecer un gradiente preferente de movimiento hacia el sur, algo que podría ser interesante de investigar, pero cuya trascendencia no alcanza al papel de la actividad humana. Bajo las cimentaciones, tanto por la reptación en un porcentaje muy bajo, como por el sistema fractográfico y de discontinuidades del macizo, pero, sobre todo, por la propia porosidad abierta de la roca alterada, no se deberían haber dado movimientos bruscos como no se dieron durante siglos. Toda la configuración estructural estudiada ha sido estable durante siglos, aunque se muestre vulnerable a las enérgicas intervenciones que le impactaron, ha sido estable en el tiempo. Con la interacción terreno-cimiento observada, se presenta una disposición que no explica la aparición repentina, en pocos meses o años, de grietas y asientos tan importantes.

2.8.10. La rotonda de la calle San Miguel.

Existe un detonante repentino que desbaratara un equilibrio estable incluso durante siglos y cientos de épocas atravesadas con sequías y con excesos de humedad, incluso con la humedad óptima de compactación, y éste comenzó a desatarse cuando se recibieron las primeras vibraciones, sobre todo de las labores constantes de urbanización y posiblemente, en una medida puntual e insignificante, también terremotos y voladuras lejanas.

Los últimos fenómenos descritos, voladuras y terremotos, significan una parte prácticamente despreciable del problema creado. Las labores de excavación de hasta más de 8 m en roca son las responsables más directas del origen intenso y continuado de vibraciones en el terreno, y las que en casos puntuales podrían haber amplificado aquéllas.

Por lo tanto, esas fueron las responsables directas: las vibraciones debidas a las obras adyacentes. Las manifestaciones de tales perturbaciones no son instantáneas, sino que deben pasar unos días, semanas o meses, para que incluso las de menor intensidad, pero más persistentes, se perciban como deformaciones y grietas. Desde que el detonante actúa hasta que se manifiestan los síntomas, el terreno equilibra su estructura ante nuevas condiciones impuestas de forma externa.

La distribución irregular de las cargas después de los cambios en las condiciones descritas ahora sí juega un papel importante en la distribución irregular, de forma que, una vez producida la perturbación, sí que se le puede achacar al terreno el hecho de haberse deformado más por aquellas zonas bajo la cimentación cuyos anchos son mayores, pero se trata de un fenómeno forzado a posteriori. No será posible cuantificar la incidencia de cada causa (unas dependen de otras) que en una zona determinada de la iglesia juegan el papel más importante, tampoco cuál el secundario, cuál el terciario y así sucesivamente, menos aun cuando no se percibe una linealidad en el desencadenamiento de cada una de las compactaciones inducidas.

Pero sí se puede afirmar que, durante la vida del edificio, solamente en una época se han unido todas las causas que pudieran hacer tambalear el equilibrio del terreno en su interacción con las cimentaciones, clima, humedad, cargas, usos, agricultura, crecimiento de la villa, terremotos, etc., y esa época tuvo también su momento álgido en el inicio de las obras de urbanización y sus extraordinarios movimientos de tierras y compactaciones. En línea recta, desde muy cerca y a través de un medio elástico, se transmitieron fuertes vibraciones que fueron muy intensas y persistentes, como nos corroboraron los vecinos y el párroco; literalmente "vibraron" el terreno y el monumento durante varios días. Para la ejecución de la rotonda de la figura 2.43 se utilizaron rodillos vibrantes de 10-20 toneladas de los que habitualmente se usan para compactar de forma muy enérgica carreteras, autopistas, aeropuertos, etc.

Figura 2.43. Dos fotografías muestran la solución urbanística con, quizás el peor de los momentos que sufrió la iglesia. Por las entrevistas con las personas afectadas sabemos que remató una de las más intensas perturbaciones y compactaciones inducidas al terreno ("me vibraban los pantalones" decía un afectado), aunque inmediatamente estas personas no lo relacionaron con lo que comenzaron a observar semanas y meses después. Lo que se produjo durante la ejecución de esta rotonda situada solamente a unos 15 m de la iglesia, y directamente por debajo de su cota de cimentación, fue el cenit de la inducción de las patologías. Se puede ver en la imagen 2.33 que toda el área alrededor de la iglesia y la rotonda había sido previamente excavada. Lo que sufrió la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin no fue otra cosa que un largo terremoto de baja intensidad, pero a cámara lenta. Duró días y tuvo un intenso pico de horas desde un foco situado tan cerca (15 metros) que estuvo transmitiéndose directamente por el mismo terreno que la sustentaba.

2.8.11. La reparación y el ideario del sector.

Las actuaciones de reparación que se pudieron llevar a cabo con las actuaciones que se considerasen necesarias fueron presentadas al Arzobispado y al Ayuntamiento y, aunque el edificio no se fuese a recalzar, no se previeron posibilidades de grandes desplomes o asientos de magnitud preocupante. La cimentación sobre roca alterada, sin más discontinuidades que las debidas a su sistema de diaclasado, fractografía, estratificación y porosidad natural, a más de 2 m de profundidad sin oquedades cársticas, aparece como estable a muy largo plazo.

Así vino siendo durante toda la historia. Sin embargo, la mentalidad dominante era (y sigue siendo) la de la utilización de alguna tecnología de recalce en la creencia de poder rigidizar un monumento de mampostería. Conocer que ciertas actuaciones en el terreno pueden ocasionar serios daños a edificaciones patrimoniales, especialmente cuando los terrenos involucrados mantienen unas características evolutivas como las de las margas eocenas y otros especímenes similares abundantes en Navarra y otras regiones, será una de las claves para preservar el buen cuidado de áreas con abundante densidad patrimonial. En Navarra hay un buen número y sobre margas, unas cuantas.

Antes que tomar medidas urbanísticas adecuadas para cada entorno geológico, en aquellos días se volvieron a escuchar opiniones enfocadas a la utilización de recalces, inyecciones, etc. Aunque el terreno continuó con la inercia de las perturbaciones sufridas unos años más, y aunque éstas se puedan repetir en configuraciones urbanas similares, volverán los terremotos de intensidades medias, las sequías o los periodos de lluvias fuertes, pero no debemos temer por la estabilidad a largo plazo del monumento. Las investigaciones científicas suministran diagnósticos complejos pero fiables que desglosan las anomalías que provocan las actuaciones humanas cuando son agresivas.

Aquí hemos investigado lo sucedido en un monumento que ya había vivido siglos con terremotos, sequías o épocas con récord de lluvias como las vividas en el Valle de Elorz en 2013, también en el casco urbano de Noáin. Aquí, al igual que en toda la geografía de Navarra se produjeron deslizamientos importantes ese año, en zonas aledañas al menos dos y también uno de menos entidad en zona urbanizada. Sí pudimos observar en los años posteriores cómo algunas grietas ya abiertas se siguieron abriendo en la iglesia de San Miguel Arcángel, e incluso en invierno vimos que algunas se cerraron, mientras otras previamente inapreciables se volvían visibles.

También debemos ser conscientes de que se pueden dar pequeños desprendimientos de materiales superficiales como lucidos, escayolas e incluso sillería previamente cuarteada en las zonas más afectadas. Pero ni se pensó ni se debe pensar en una ruina inminente; es más, las necesarias labores de arreglo de la cubierta pudieron perfectamente realizarse antes de decidir ningún recalce o tecnología que finalmente puede ser más agresiva, y no solo son factibles, sino que pueden ser favorables.

No se descarta tampoco que algunas de las grietas observadas en las zonas más altas se deban a empujes que se produjeron desde la techumbre, algo habitual en este tipo de construcciones cuando las tensiones se relajan, un ejemplo muy parecido al nuestro se dio en la cercana iglesia de Astráin después de soportar las vibraciones de los trabajos en las galerías cercanas de Potasas, terremotos, bruscos cambios ambientales, etc. (figura 2.44), pero también es necesario considerar este tipo de empujes provenientes de las viejas techumbres descuidadas o las nuevas sobredimensionadas.

Más adelante hablaremos del caso concreto de la iglesia de Artaiz, Monumento Histórico-Artístico desde 1983 al que se coronó con una cubierta de hormigón que resultó ser una calamidad ante el impacto de los terremotos de 2004, 2017 y 2020. Aspectos que serán analizados con más detalle en la parte sexta con ejemplos claros en el Patrimonio Histórico en que los terremotos históricos, especialmente los de finales del siglo XX y principios del XXI, han sido más dañinos en nuestros monumentos por cuestiones relacionadas con decisiones arquitectónicas y reparaciones no demasiado afortunadas. Entre ellas parece oportuno destacar la ejecución de cubiertas muy pesadas de hormigón pretensado o armado sobre monumentos de mampostería o fábrica de ladrillo, incluso del siglo XII, que se pensaron para cubiertas mucho más ligeras de madera y teja.

Obviamente no es por cuestiones geotécnicas que el monumento se mantenga años e incluso décadas en un equilibrio inestable y con el primer terremoto de intensidad superior a V se desencadenen deformaciones importantes y roturas, lo hemos estudiado recientemente en Artaiz tras las reparaciones de 1980 y los terremotos con epicentros cercanos a ella, e incluso el colapso, como el sucedido en la iglesia de Santiago Apóstol de Lorca, tocada tras el primer terremoto M4,5 y hundida con el M5,1 un par de horas después[3] (figura 2.44).

Analizaremos casos en que, como hemos visto en Noáin, inicialmente se le culpa al terreno de una reacción desmesurada en un nuevo contexto histórico de soluciones constructivas que no cuentan con ciertos acontecimientos naturales, como son los terremotos; menos aún con las agresivas urbanizaciones que proliferaron a partir de las dos últimas décadas del siglo XX, que de momento están siendo más dañinas que la actividad sísmica siempre ligada a Navarra.

Tanto desde la perspectiva urbanística como desde la puramente arquitectónica, a las Margas de Pamplona o sus acompañantes cuaternarios o en tránsito (sobre todo al Priaboniense), se les ha culpado de ser generadoras de patologías que prácticamente nacen en la modernidad con la aparición del motor de combustión y el despliegue de una enorme cantidad de energía de compactación desde maniobras pensadas para la ingeniería civil. Pero hay que ser ambiciosos y poner en valor el estudio histórico de la geotecnia. Muchas de las patologías que se han achacado a las gravas cuaternarias P1 y P2 o a los perfiles geotécnicos circundantes de carácter estructural C no cuentan con precedentes históricos remarcables, como sí sucede con otras formaciones geológicas.

---

[3] Esto fue lo sucedido el día 11 de mayo de 2011 con el único edificio histórico que se desplomó en Lorca con el terremoto M5,1 de la tarde: la iglesia de Santiago fue restaurada en 1994, recibió sobre su fábrica de ladrillo barroco una pesada cubierta metálica y de hormigón de resistencia "tendiente al infinito" muy por encima de la fábrica que la sustentaba. La fábrica de ladrillo no la pudo aguantar y colapsó (ver figura 2.44).

Figura 2.44. El colapso de la cubierta de la iglesia de Santiago de Lorca, único edificio histórico que se desplomó y al que se le había forzado a soportar una rígida y pesada cubierta metálica y de hormigón armado nada adecuada para un templo barroco de fábrica de ladrillo.

Como hemos visto en Noáin, y vamos a ver en otros aspectos de la geotecnia histórica, el desconocimiento del carácter evolutivo y las características peculiares de la formación eocena puede llevar a desenlaces indeseados e incluso a la ruina. Atajar estos procesos de una vez para siempre es posible, siempre nos quedan las posibilidades de los recalces, que en este caso de la iglesia de San Miguel Arcángel podrían realizarse bien por micropilotes apoyando en la marga sana a partir de unos 5 m de profundidad o bien con inyecciones de alta presión del tipo "jet grouting". En su momento se presentaron anteproyectos de recalce que finalmente no se vieron en la necesidad de ser ejecutados porque el terreno simplemente era inocente.

Ahora bien, antes de acometer el estudio sobre el origen de las repentinas patologías sobrevenidas a la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin, tanto desde el sector de la obra pública como en el de edificación o Patrimonio Histórico, a través de publicaciones en medios de comunicación o en gabinetes de arquitectura e ingeniería, se le adjudicó al terreno de Margas de Pamplona (E2) una deficiencia geotécnica injusta: no eran los terremotos de Itoiz ni las galerías de las antiguas minas de potasa o las voladuras del Canal de Navarra detonantes de nada. Y es que experiencias previas en este último caso, como en el caso de los terremotos, no faltan en el ideario colectivo de todos estos sectores. En un recorte del diario DEIA Nafarroa del 6 de marzo de 1981 (figura 2.45) se desvela que Potasas S.A. es la causa de muchas de las patologías observadas en edificios de varios pueblos navarros que se encontraban sobre las galerías. No se ha podido recortar mejor el artículo, pero puede leerse lo que se comentaba hace 43 años al respecto, un cuarto de siglo antes del estudio realizado en San Miguel Arcángel.

Tras varias réplicas de terremotos y deterioro de edificios, el Gobierno de Navarra encargó un estudio sobre las causas a Euroestudios S. A. (figura 2.46), los técnicos demuestran la implicación del colapso de galerías en el deterioro de los edificios y como origen de vibraciones y temblores localizados, finalmente en la primavera de 1982 se presenta un informe en el que queda un apartado especial para el problema de la iglesia de Astráin, la cual sufre no solamente los efectos de colapsos de galerías, vibraciones, temblores y terremotos, sino empujes debidos al deterioro de la techumbre. Como se puede ver, cerca de donde estudiamos un fenómeno como el de Noáin, se han dado similares condiciones por diversas causas también muy similares.

Un recorte del Diario de Navarra el día 24 de junio de 1982, después de uno de los terremotos que analizaremos en la sexta parte y el consiguiente colapso de galerías de las antiguas Potasas, "*por unas causas o por otras", la iglesia parroquial se hunde*. Durante la crisis sísmica de 1982 hubo varios terremotos entre mayo y julio localizados en las inmediaciones de Uterga y Erice (figura 2.47).

Realmente lo que sufrió la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin fue un terremoto a cámara lenta que duró varios días con un foco a 15-20 m de distancia actuando durante horas, transmitiéndose directamente desde la apisonadora por el terreno y cimientos a toda la estructura. Ese fue el peor de los episodios, una serie de procedimientos constructivos pensados en el ámbito y aplicación de la ingeniería civil (autopistas, aeropuertos, soleras de naves industriales) se aplicaron durante la ejecución y compactación de la rotonda contigua directamente por debajo de la cota de cimentación de un edificio del siglo XIII (figuras 2.43 y 2.48).

DEIA Nafarroa

DEIA

PROTESTAS DEL AYUN

Potasas "rompe" las

construido en el siglo XII
mpliado el XVI

de la iglesia de
o, agrietada en
vertical

as tres
de Zi-
movi-
na, en
nás se-
o pre-
oncre-
ponde
tenece
ico del
sobre
l, pre-
es de
ical, y
la pri-
hubo
es por

No obstante, y como puede comprobarse en la fotografía inferior, los revoques recientemente aplicados sobre las aberturas se han desprendido en poco tiempo. Ello hace pensar que en la iglesia de Undiano, como en otras edificaciones de Astrain. Zariquiegui o el mismo Undiano, la explotación subterránea de Potasas de Navarra ha agudizado la especial condición del subsuelo y aumentado el deterioro en edificaciones que anteriormente no se registraban de forma tan alarmante.

En los últimos años, aproximadamente desde 1975, coincidiendo con la explotación subterránea de Potasas de Navarra, S. A., se han detectado grietas en los edificios del casco urbano de Astrain y hundimientos de terreno en su término municipal. En la actualidad, estas mismas anomalías se pueden observar también en las localidades cercanas de Undiano y Zariquiegui, según se hace constar en un extenso informe que va a ser presentado a Diputación por los tres concejos mencinados y el Ayuntamiento de la Candea de Cizur al que pertenecen.

Una rápida y corta visita a estas tres localidades es suficiente para comprobar inumerables grietas en viviendas; graneros, almacenes, así como en las iglesias o las escuelas. Al parecer, las condiciones del subsuelo de la zona son conocidas por sus características propensas a ciertas mutaciones. Pero parece claro, que la apertura de las galerías de Potasas y las vibraciones producidas por los explosivos en la zona de explotación han ocasionado deterioros en los edificios y en la superficie del terreno que nunca se habían detectado.

El informe elaborado por los concejos y el Ayuntamiento de la Cendea denuncia la situación ante la Corporación Foral de Navarra y señala que "obran en nuestro poder documentos desde 1975 de los contactos mantenidos en torno al tema entre Potasas, por un lado y el concejo de Astrain y particulares, por otro". "Nada se ha aclarado sobre el tema —añade el informe—. La empresa Potasas de Navarra se ha hecho cargo de los daños registrados fuera del casco del pueblo, como depósito de aguas, pentecillos, etc., pero no sobre las viviendas y almacenes del pueblo". El informe se completa con la relación de daños localizados en los concejos de Undiano y Zariquiegui, igualmente afectados.

Un pueblo "señalizado"

Las casas de Astrain están señalizadas con clavos colocados en las esquinas a un metro sobre el suelo como indicadores del posible hundimiento del terreno y los campos están también marcados mediante pilones metálicos sobre base de hormigón con la misma finalidad.

Reiteradamente, la empresa Potasas ha asegurado a los vecinos de Astrain que el pueblo permanece sobre un pilar natural que no ha sido socavado para salvaguardar, precisamente, la seguridad de los edificios.

Por esta razón, los deterioros registrados sobre la zona de explotación subterránea, en el exterior del casco urbano, han sido costeados por la empresa. Pero la realidad indica que las viviendas agrietadas han sufrido las consecuencias de una explotación que si no se realiza directamente bajo los edificios, si se lleva a cabo a escasos cien metros de los mismos.

De cualquier forma, en Astrain, caserones de bella estampa, con fachadas de piedra de sillería, se encuentran con unas raras comunicaciones de luz y ventilación que en muchos casos cruzan verticalmente una pared maestra de más de 80 centímetros de espesor, desde el alero del tejado afectadas afirma con claridad que "dicen que esta tierra es propensa a movimientos pero lo que está claro es que antes las casas estaban llenas de grano y ahora que tienen mucho menos peso, se agrietan como nunca habíamos conocido".

En la estación de servicio "Nuestra Señora del Perdón", Marcos muestra una arqueta con el cemento rajado en circunferencia con una grieta en la que caben tres dedos de la mano. "Los inspectores de Campsa ya lo han visto —dice el señor Labiano— y han tratado el tema de Potasas. Han puesto una especie de pasta adhesiva para tapar la grieta, pero no hace nada. Si el terreno sigue descendiendo, el hormigón puede presionar sobre el tanque de la gasolinera".

En muchas casas de Astrain se han tapado grietas y huecos pero los vecinos se han cansado por muy pronto se vuelven a ab "Nunca habíamos tenido que cer tantos apaños —dice la du de casa Labiano— y ahora ce mos por un lado y se abre otro".

La tierra se hunde y se mueve

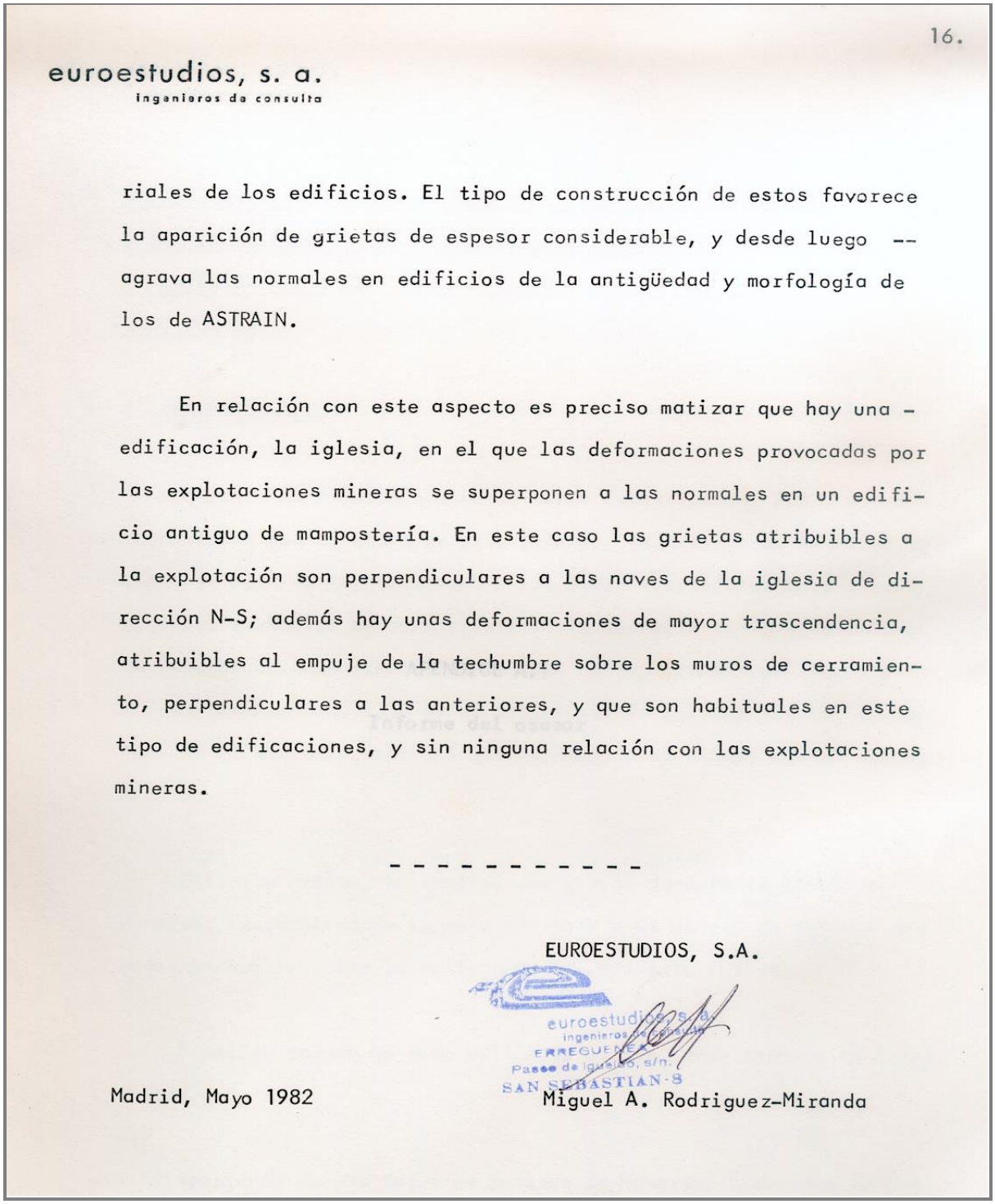
Una de las cosas curiosas los vecinos de Astrain están acostumbrados a observar qu terreno cede y al mismo tiemp mueve, se traslada de posición

Este fenómeno se comprueb las grietas de los edificios que un determinado espacio de tiem aumentan y disminuyen de es sor. Por otra parte, en una t cercana a un socavón que se producido ya en dos ocasiones los cuatro últimos años, se c prueba también que la pared bloques de cemento, construida cientemente, se ha abierto en dirección determinada.

El socavón se ha producido las dos ocasiones mencionadas el camino de parcelación conoc como de Alzuberri que quedó talmente impracticable para t clase de vehículos y hubo de ser llenado con unos 200.000 kilos grava. Aquí el terreno cedió 2 metros en la primera ocasión recubrió y volvió a abrirse, co puede comprobarse en las fotog fías, cuando las nevadas del pas mes de enero.

Jesús Ayerra, propietario d finca afectada, ha recibido dos s venciones de 34.000 y 28.000 setas, respectivamente, que no ponen ni la mitad de lo que rec en una cosecha normal, en c mismos metros de tierra. "Est una de las mejores fincas del mino —dice Jesús Ayerra— y a se recogen del orden de 10.(kilos de trigo por hectárea y las demnizaciones que nos han d no pasan de ser un símbolo". mujer, con más vehemencia, gritaba que "le están quitando el valor a Astrain porque aquí nadie va a querer construir en

Figura 2.45. Los efectos de una techumbre abandonada, galerías de potasa abandonadas, terremotos y urbanizaciones agresivas también han sucedido cerca de Noáin. Es quizás por este tipo de precedentes que se culpó a las galerías de potasa y a los terremotos de haber provocado las patologías observadas en la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin. DEIA Nafarroa, 6 de marzo de 1981.



16.

euroestudios, s. a.
ingenieros de consulta

riales de los edificios. El tipo de construcción de estos favorece la aparición de grietas de espesor considerable, y desde luego -- agrava las normales en edificios de la antigüedad y morfología de los de ASTRAIN.

En relación con este aspecto es preciso matizar que hay una - edificación, la iglesia, en el que las deformaciones provocadas por las explotaciones mineras se superponen a las normales en un edificio antiguo de mampostería. En este caso las grietas atribuibles a la explotación son perpendiculares a las naves de la iglesia de dirección N-S; además hay unas deformaciones de mayor trascendencia, atribuibles al empuje de la techumbre sobre los muros de cerramiento, perpendiculares a las anteriores, y que son habituales en este tipo de edificaciones, y sin ninguna relación con las explotaciones mineras.

- - - - - - - - - - -

EUROESTUDIOS, S.A.

euroestudios, s.a.
ingenieros de consulta
ERREGUENA
Paseo de Igueldo, s/n.
SAN SEBASTIAN-8

Madrid, Mayo 1982

Miguel A. Rodriguez-Miranda

Figura 2.46. Conclusiones del estudio sobre las patologías de la iglesia de Astráin de 1982 de EUROESTUDIOS, S.A. Los efectos de la subsidencia se solapan con los de una techumbre abandonada durante décadas, o tras reparaciones poco o nada adecuadas como en Artaiz o Lorca: son un factor de primer orden a la hora de considerar el cuidado del Patrimonio Histórico. Fuente: Ayuntamiento de Astráin.

DE NAVARRA, JUEVES, 24 DE JUNIO DE 1982

Oficialmente tuvo una intensidad de 5,0 en la escala de Richter

El epicentro del terremoto del martes se sitúa entre Esquíroz, Esparza de Galar y Salinas de Pamplona

Una magnitud de 5,00 en la escala de Richter (y no 4,9 como se dio ayer como provisional) es la que alcanzó el terremoto de las 9,51 de la noche del martes, según informó ayer el Observatorio Geofísico de Toledo que depende del Instituto Geográfico Nacional. Por otra parte, y según datos facilitados por el mismo Observatorio, fueron registradas desde la citada hora hasta las 8,30 de la mañana de ayer seis réplicas o movimientos sísmicos de muy poca intensidad, siendo los mayores los ocurridos a las 3 horas, 23 minutos y 8 segundos de la madrugada (magnitud 3,2 en la mencionada escala) y a las 8 horas, 16 minutos y 37 segundos de la mañana (magnitud 3). En cuanto al epicentro del terremoto, según datos de la Sección de Sismología del Instituto Geográfico Nacional, se situó en las coordenadas 42 grados 46 minutos latitud Norte y un grado 41 minutos latitud Oeste, a 385 kilómetros de Toledo y a unos 10 o 12 al noroeste de Pamplona. En base a estos datos, hay que señalar que el epicentro se situó en el centro del triángulo formado por los pueblos de Esquíroz, Esparza de Galar y Salinas de Pamplona.

● Seis movimientos de réplica hasta las 8,30 de la mañana de ayer, siendo los más fuertes los de las 3,23 de la madrugada y 8,16 de la mañana (de intensidades 3,2 y 3,0 respectivamente)

Cascotes de yeso en la ermita de Esparza

En los tres pueblos señalados como equidistantes del epicentro, el terremoto se sintió con mucha fuerza, si bien donde mayor efecto produjo fue en Esparza de Galar.

En esta localidad, donde, según nos dijeron ayer, **«se sintió el doble de fuerte que la otra vez»**, cayeron algunos cascotes de yeso de la ermita. Muchas familias, ante el miedo que el seísmo había provocado, pasaron la noche fuera de sus casas, durmiendo en automóviles. **«Después del terremoto, en poco tiempo, se sintieron otros cinco muy pequeños, pero a las tres y media de la madrugada ha habido uno fuerte»**.

En Esquíroz la impresión general fue de que era **«mucho más fuerte»** que el de hace un mes, destacando **«el ruido sobre todo»**. Llegaron a notar un par de movimientos de réplica muy pequeños, así como el de las 3,23 de la madrugada. No se produjeron daños de ningún tipo, ni siquiera pequeñas grietas.

En lo que respecta a Salinas de Pamplona, pueblo en el que el movimiento telúrico fue sentido con mayor intensidad que hace un mes, llegó a ensancharse alguna pequeña grieta en la escayola de una vivienda; grieta que se había abierto en el anterior terremoto.

Medio turno de noche abandonó el pozo de Esparza en la mina de Potasas

Si ya el turno de tarde abandonó sus puestos de trabajo en el pozo de Esparza de la mina de Potasas tras el terremoto del martes, aproximadamente la mitad de los del turno de noche hizo lo mismo cuando se produjo el movimiento de réplica de las 3,23 de la madrugada. Algunos de los mineros, según un trabajador de la empresa, «salían espantados».

No hubo problemas para la salida a la superficie ya que el encargado del turno había dado orden de poner en marcha el telesilla inmediatamente «si sienten algo y piden salir». La orden se cumplió inmediatamente.

En cuanto al pozo de Undiano, y según el mismo trabajador, **«estaban comiendo el bocadillo y salieron al exterior»**.

Asträin, un pueblo agrietado en el que la iglesia parroquial se hunde

La piedra que se desprendió del techo de la iglesia parroquial de Astráin sobre el coro tiene un peso de unos veinte kilos. — (Foto MENA).

Dos familias de Astráin pasaron la noche del martes en una tienda de campaña y lo mismo iban a hacer en la noche pasada, estando dispuestas a continuar así mientras durasen los temblores. — (Foto MENA).

Astráin era ayer un pueblo que continuaba bajo la conmoción producida por el terremoto de la noche anterior. Ha sido, probablemente el más afectado, ya que dejó sus efectos negativos en numerosas viviendas, en forma de nuevas grietas o de agrandamiento de las ya existentes desde el anterior terremoto o de las producidas por los barrenos que antes explotaban en la mina de Potasas, en el subsuelo del pueblo. Así, por unas causas o por otras, Astráin es un pueblo lleno de grietas en sus edificios, tanto al exterior como en el interior de los mismos.

La iglesia parroquial se hunde

Debido a su situación de grietas, el templo parroquial está cerrado al culto desde hace aproximadamente un año, salvo en casos concretos como funerales en que acude mucha gente. Los actos religiosos se celebran en el edificio de las antiguas escuelas, edificio que también muestra [illegible] que afectan uno de los nervios del techo, está colgando. Todo ello como consecuencia del terremoto de la noche del martes.

Como decía ayer el alcalde del pueblo, Jesús Ciriza Lizarraga, **«se han hecho más grietas y algunas de las que había se han hecho mayores, y el techo se va a venir abajo. Con otro terremoto se puede venir abajo. Basta con ver las pintas que tiene para ver que esto se viene abajo en cualquier momento. Hace estos días se ha venido el techo más abajo»**. Se lamentaba también de que en Diputación no dan solución al problema y de que parece que esperan a que sea el pueblo quien corra con las obras necesarias. **«Hemos ido a Diputación y ni siquiera se han molestado en mandar a un técnico a que compruebe cómo está la iglesia. Parece como si no creyeran lo que decimos, pero el día que se hunda dirán que no creían que se iba a hundir. Y, desde luego, si no se apuntala bien todo el edificio, se hundirá»**.

En el interior, la dependencia con daños más graves ha sido la cocina, donde una de las maderas de la tarima se rompió, abombándose el suelo hacia abajo, al tiempo que se abrían grietas en las paredes. **«Yo estaba aquí y mi hermana estaba haciendo la cena. Un momento antes noté que la mesa se movió un poco. Pero con el terremoto, las paredes cedieron hacia la ventana** (hacia el lado norte, en dirección a Pamplona) **y salieron las grietas. Por toda la casa ha caído mucha cascarilla y se han abierto hasta** cama, tiró vasija y adornos, arrancó los clavos que sujetaban un colgador de pared y a éste lo lanzó a un metro aproximadamente de distancia de la pared, y derribó unas sillas que estaban colocadas sobre una mesa.

Después del susto, la familia se acomodó para dormir en la cocina, situada en la planta baja (el resto de habitaciones ocupan el primer piso).

Dos familias en una tienda de campaña

Figura 2.47. Un recorte del Diario de Navarra del día 24 de junio de 1982, después de un terremoto M5 y el consiguiente colapso de galerías de las antiguas Potasas: "*la iglesia parroquial se hunde*". Durante la crisis sísmica de 1982 hubo varios terremotos entre mayo y julio localizados en las inmediaciones de Asträin y Noáin.

2.8.12. Discusión final y conclusiones.

Las Margas de Pamplona, en la parte alta de Noáin, coinciden con el eje de un anticlinal y precisamente por tratarse de la zona más elevada de la villa, apenas han desarrollado una cobertera de un par de metros de alteración natural o rellenos provenientes de la actividad humana. Estos datos —y lo desvelado en la investigación realizada en 2005 sobre la interacción con la maquinaria moderna— deben pegar el salto al sector del urbanismo, de la arquitectura y la ingeniería, a fin de conocer que ciertas actuaciones en el terreno pueden ocasionar serios daños a edificaciones patrimoniales, especialmente cuando los terrenos involucrados mantienen unas características evolutivas como las de las margas eocenas y otros especímenes similares abundantes en Navarra y otras regiones. Por ello, no estaría de más incluir en los programas de los estudios universitarios enfocados al cuidado del Patrimonio Histórico este tipo de experiencias.

Figura 2.48. Detalle de las reparaciones recientes que han consolidado parte de la sillería y cerrado las grietas con morteros. Se pueden observar desplazamientos en la sillería de la parte alta de la ventana del ábside.

2.9. Pamplona, orígenes y evolución urbana.

Los primeros restos de la población indígena sugieren que el núcleo originario de la ciudad llamada Iruña se dispuso a partir de la protoestructura urbanística que se llamaría Navarrería: una agrupación de edificios e infraestructuras ordenadas. Parece que cuando se consolidó el uso de ese nombre la expansión ya se estaba realizando aprovechando restos de la ciudad romana que se había desarrollado a su vez sobre una de tantas poblaciones indígenas de la cuenca. Con el paso del tiempo se constituyó como eje de una calle mayor (actual calle Curia) con un centro marcado por la catedral. La mayor parte de la historia constructiva de Pamplona consiste en que una población básicamente labradora, cimenta y construye sus edificios e infraestructuras en terrenos de gravas heterométricas P1 de titularidad episcopal que yacen sobre las Margas de Pamplona (E). Con el tiempo se construyeron barrios con pobladores muy variados, muchos era campesinos francos.

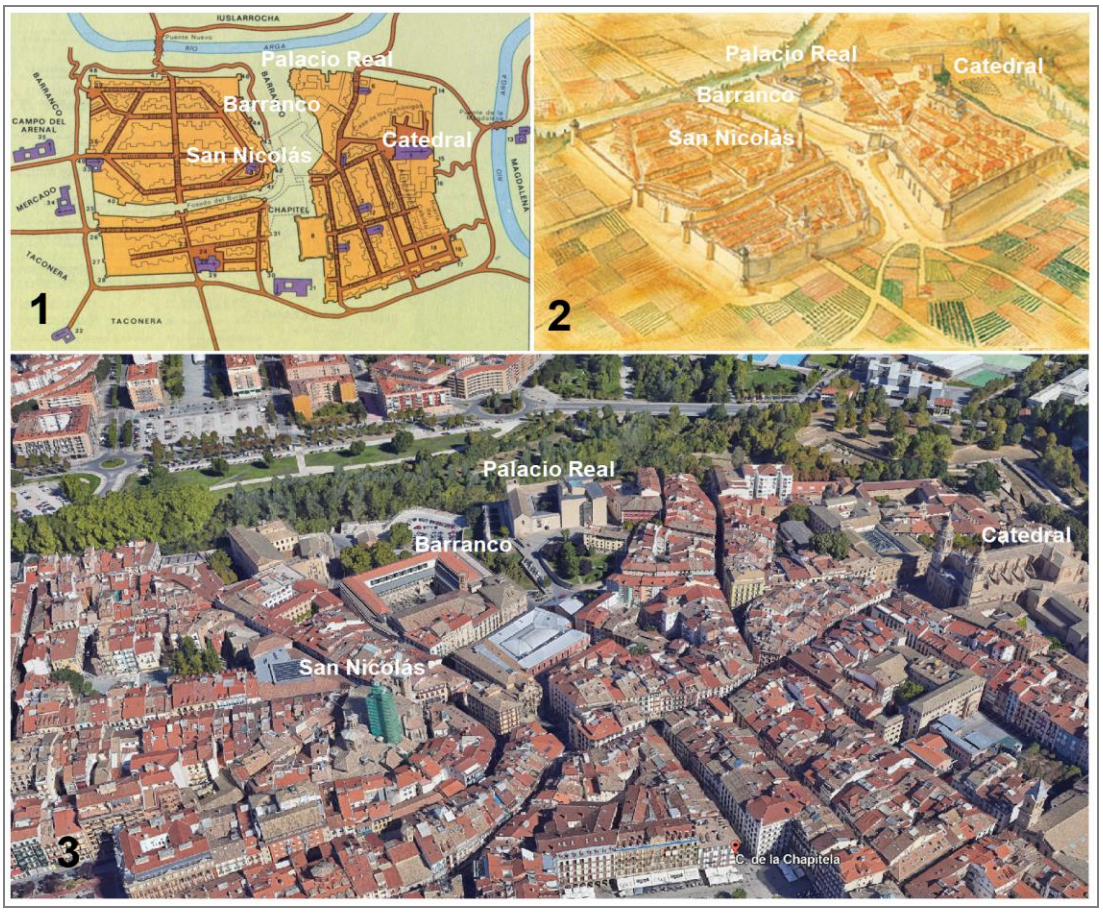


Figura 2.49. 1. Los Burgos de Pamplona hacia 1360-1423. Imagen del Atlas del Patrimonio Histórico Cultural, Fundación Lebrel-Blanco. Imagen del Atlas de Navarra Ed. Diáfora (1981). 2. Misma época (hacia 1400), obsérvese la disposición geomorfológica del barranco Chapitel que determina la separación de los burgos, los conflictos y las primeras normas o leyes urbanísticas y geotécnicas (web del Ayuntamiento de Pamplona). 3. Toma de Google Earth (2024) en que solo la parte norte del Barranco Chapitel es visible.

2.9.1 Pamplona y los materiales cuaternarios P1 y P2.

Los nuevos pobladores amoldaron su hábitat a una geomorfología determinante para el trazado urbanístico, destacando el barranco Chapitel que bajaba al río Arga como frontera divisora de los burgos (figura 2.49). Si sometemos al área metropolitana de Pamplona a un filtrado del tipo térmico infrarrojo, suponiendo que todos los materiales antiguos, sobre los que no se ha desarrollado una cobertera cuaternaria de cierta entidad, pudiesen ser captados desde satélite, pero los materiales cuaternarios, fundamentalmente terrazas P1 y P2, no permitiesen el paso de un determinado espectro (por ejemplo "rojo geotérmico"), tendríamos una imagen como la de la figura 2.50. La mayor parte del área visible corresponde en unos 2/3 a dichas formaciones quedando 1/3 para aquellas zonas (en negro) que sellan el acceso a la roca, destacando una franja NE-SO sobre la que se erige Pamplona. Los cursos fluviales son los responsables y destaca sobre todo el material que corresponde a la actividad presente y pasada del río Arga (en azul). Sus materiales no permitirían captar la existencia de antiguas formaciones rocosas, en particular las Margas de Pamplona.

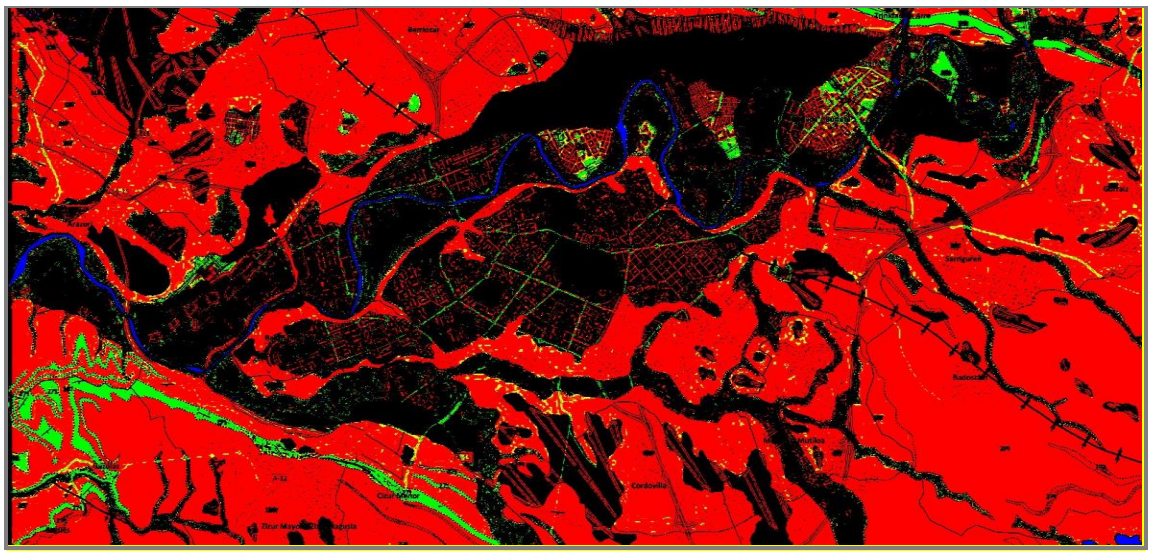


Figura 2.50. Idealización espectral en que las terrazas cuaternarias P no permiten el paso de espectros de onda provenientes de las formaciones rocosas antiguas (explicación en el texto). En el centro de la imagen se pueden ver las calles y los barrios de la ciudad. La imagen está manipulada de manera digital sobre el Mapa Geológico 1:25.000 del IDENA del Gobierno de Navarra.

En esa imagen vemos las terrazas medias y altas P1 de los cursos de agua que atraviesan la zona metropolitana. La mayor parte pertenecen a la actividad presente o pasada del río Arga (en azul) con alturas variables de 10 a 15 m, de 15 a 25 de 35 a 40 y de 50 a 70 donde se forman los altos replanos escalonados como el que dio origen a Santa Lucía o a la vieja Iruña (figura 2.52) y que se puede distinguir en la imagen 2.50 con sus barrios y calles.

Figura 2.51. Variación lateral entre 1,5 y 5 m de la terraza alta P1 en apenas 100 m. Obras donde se ubicaban los antiguos Salesianos, al sur de la plaza de toros y fuera de las antiguas murallas. Se trata de la promoción de un grupo de viviendas (la foto de abajo está hecha en agosto de 2021) con nuevos criterios urbanísticos no exentos de polémica por altura y estilos. Se puede ver que en la parte este se ha ejecutado un sistema de contención a base de pilotes excavados en las terrazas con espesor que crece hacia el sur (a la derecha), desde 1,5 m al norte hasta algo más de 5 m al sur; las Margas de Pamplona también se excavan hasta unos 10 m de profundidad. Se pueden observar también un par de metros de transición desde el final de las terrazas P1 al inicio del nivel de roca sana E1, este terreno alterado E2 puede adquirir perfiles de hasta 10-12 m en algunas zonas. En la parte alta se ve una viga anclada reforzando el conjunto, a media altura no se ha considerado ejecutar otra similar en el macizo rocoso. La imagen de arriba es una toma hecha con Google Maps.

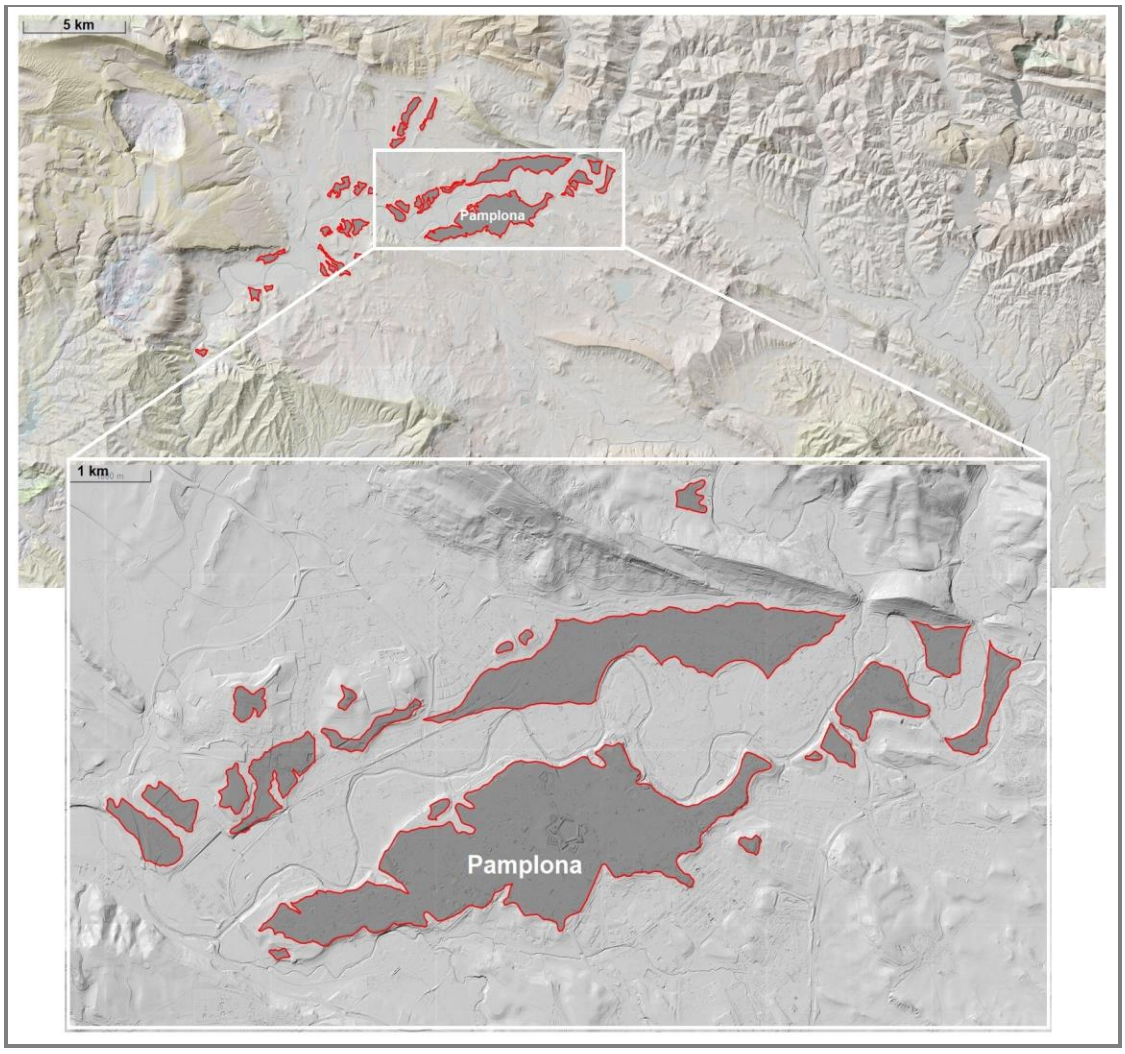


Figura 2.52. Las terrazas medias y altas P1 (con las variantes geotécnicas P11 y P12) a ambos lados del curso del río Arga. En el replano del sur se puede distinguir la estructura de la fortaleza militar. Es una fortificación renacentista de antiguo uso militar, construida entre los siglos XVI y XVII unos 300 m al SO de la vieja Iruña sobre estos materiales. La mayor extensión de estos replanos es la que contiene a la ciudad de Pamplona, que creció a costa de otras que se desarrollaron en la Cuenca de Pamplona y alrededores en espacios similares de menor entidad, como el caso de Santa Lucía (una de esas terrazas situadas al norte).

Esos materiales que se ven en negro en la figura 2.50 manipulada digitalmente, están formados por gravas redondeadas y subredondeadas de composición cuarcítica y calcárea mayoritariamente, los tamaños medios van de 5 a 8 cm con máximos de 30 cm. La mayor parte del material proviene de las sierras del norte y de la resedimentación de los conglomerados de El Perdón; yacen con colores marrones y rojizos por oxidación. Rara vez sobrepasan los 6 m de profundidad, siendo lo habitual en la capital entre 1,5 y 5 m (figuras 2.51 y 2.52). A veces se pueden distinguir estructuras típicas fluviales, lentejones de arena, estratificaciones cruzadas, rellenos de fondos de canal, cicatrices erosivas, imbricación de cantos, etc.

Las terrazas bajas P21 y P22, con las llanuras de inundación, aparecen a alturas variables entre 3 y 7 m. Se pueden ver las líneas del resto de cauces principales, río Sadar y Elorz, los fondos de valle de arroyos y cursos de agua de menor importancia y se pueden apreciar algunos canales abandonados del río Arga. Dominan las arcillas, limos y arenas que se intercalan con cantos dispersos y niveles de gravas. En las terrazas bajas predominan los términos de cantos y gravas con una matriz limoarcillosa. Los depósitos endorreicos son fundamentalmente de limos y arcillas. Los espesores no suelen superar los 8 m. También se pueden distinguir fondos de valle, depósitos abandonados, fondos endorreicos, etc.

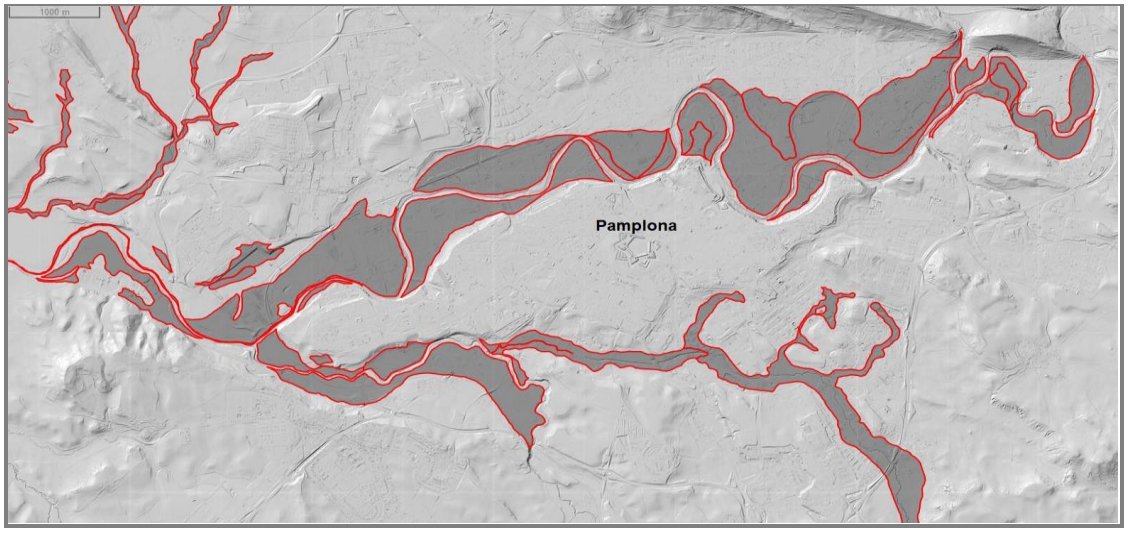


Figura 2.53. Las terrazas bajas P2 (con las variantes geotécnicas P21 y P22) a ambos lados del curso del río Arga y afluentes.

2.9.2. Primeras normativas constructivas y urbanísticas

Desde el principio de la actividad constructiva de la vieja Pompaelo, pero sobre todo con la aparición de los burgos frecuentemente en contienda, también se desarrollaron tanto normas como técnicas que influyeron en la cimentación de edificios de viviendas, conjuntos arquitectónicos religiosos, militares o infraestructuras y murallas estratégicas. Es destacable lo sucedido en 1216 bajo el pontificado del obispo franco Guillermo de Santonge que, por diversos conflictos con la apropiación de tres castillos y varias casas censales por parte del Rey Sancho, excomulgó al monarca, pero tras la temprana muerte del pontífice, el rey puso al frente del obispado a su hijo, lo que dio lugar a revueltas y a la destrucción de buena parte de las edificaciones preexistente y de la población que habitaba la zona de San Nicolás (figuras 2.49 y 2.54). En la iglesia aún pueden verse sillares de los niveles de la calcarenitas (que dan paso al Priaboniense) calcinados. Entonces, con el cambio parcial de modas constructivas de la mano nuevos órdenes militares, religiosos y económicos, se reutilizan en la mayoría de los casos los cimientos preexistentes.

El rey Sancho (y su hijo el obispo) instauraron una concordia con los vecinos bajo varias condiciones de uso del territorio, entre ellas que los cimientos de piedra de mampostería en las edificaciones sitas frente al foso y valladar del Burgo no podrían pasar de *"tres codos de altura"* (hasta unos 1,4-1,6 m de profundidad en las gravas P1), debiendo ser el resto de los muros de madera, sin ventanas, troneras, orificios ni vertido de aguas al foso de San Cernin. Además, no podrían alzar fortaleza frente al burgo, debiendo ser derruidas las existentes; sí podrían alzar y armar libremente el resto de fortificaciones del perímetro exterior. El obispo cedió a su padre (el rey) los castillos y contenciosos el 28 de julio de 1222 y ese año se determinó que ya todas las casas que miraban al burgo tuviesen, además de la citada base de piedra máxima de tres codos, únicamente estructura de madera y sólo hasta la altura de una lanza militar, pero sin puertas ni ventanas al foso. En la carta de avenencia de 1266 y posterior unión de 1287 se modificaron aquellas condiciones en favor de cierta creatividad constructiva-urbanística, permitiendo la edificación por encima del basamento hasta una altura máxima de 15 codos, pudiendo hacer las construcciones de tapial como pudimos comprobar en las obras de rehabilitación del Palacio del Condestable (figura 2.54), de hecho, a partir de entonces, cada paso histórico se solía acompañar con un aumento de la superficie de cimentación y a veces, de la profundidad. Se autorizó por primera vez una ventana o hueco hacia el foso.

Figura 2.54. Entrada a la iglesia de San Saturnino (izquierda) y Palacio del Condestable al fondo. En este edificio histórico, hoy centro cultural Civivox, se conservan las alturas desde la Edad Media. Los muros del edificio estaban hechos de gravas heterométricas del nivel P1 compactadas con algo de cal (tapial) y sobre ellas hasta dos forjados y la cubierta. Al descubrir esta configuración tomamos todas las medidas posibles de soporte y refuerzo, pues la sorpresa de la estabilidad fue mayúscula, el edificio viene a ser una prolongación moldeada hacia el exterior de las terrazas cuaternarias.

En 1390, por orden de Carlos III, se permitió que sobre el basamento de cuatro codos de piedra pudiesen *"edificar de gisso et de fusta tan alto como les plazdrá, sin fazer gramanchones, baillesteras, garitas ni otras cosas que pertenezcan a fecho de fortaleza et de guerra"* (Archivo Municipal, caja 23, núm. 170). Este caso, como otros de marcado carácter normativo, ejemplifican que los criterios geotécnicos no fueron prioritarios, lo cual subraya también que los problemas geotécnicos derivados del terreno de apoyo eran fácilmente solventados o prácticamente inexistentes para el tipo de edificación o infraestructura habitual. Esta observación es importante por lo que vamos a relatar en el caso de la adecuación del Parlamento de Navarra (antigua Audiencia) al siglo XXI. Este tipo de problemas se comenzaron a considerar hasta bien entrado el siglo XX y aún, a día de hoy, no han permeado completamente muchas de las normativas constructivas, edificatorias o urbanísticas locales. Se trata de una lectura histórica: los problemas geotécnicos aparecen con la modernidad, la complejidad constructiva y obviamente, se articulan normas al respecto.

Tras la unificación de los tres burgos gracias al Privilegio de la Unión, otorgado por Carlos III el Noble 27 años después de permitir cimientos de piedra tan anchos y profundos que garantizasen la estabilidad de las construcciones con las alturas deseadas y que se dejan a elección del promotor, en 1423, los recintos amurallados de cada uno de los burgos también se unificaron para crear uno solo. Para conseguirlo se levantaron tres nuevos lienzos de muralla, que dotaron al conjunto amurallado de una planta rectangular al unir de forma lineal los diferentes recintos (Echarri, 1998). La sección por el este se unía al costado sur del burgo de la Navarrería. Quedaba así protegida por el torreón sobre el molino de Caparroso y por cuatro torres más.

A comienzos del siglo XVI se erige un nuevo castillo, era el Castillo de Santiago, que fue mandado construir por Fernando el Católico en 1513. Se trataba de un castillo fortaleza con función artillera, sin embargo, su cometido enseguida quedó obsoleto ante los revolucionarios avances de la propia artillería. Como vemos, impulsado fundamentalmente por ese carácter militar, se dio un paso muy rápido en el desarrollo de la ingeniería y de la arquitectura de los nuevos sistemas defensivos con la necesidad de renovar constantemente el tipo de defensa. Se planteó entonces la construcción de una ciudadela y una reforma casi completa del perímetro fortificado. Para 1529, el virrey Conde de Alcaudete, prohibió promover obras en los solares de las murallas en los puntos en que hubiesen sido derruidas, obligando incluso a reparar lo arruinado para volverlas a construir.

Lo cierto es que, por diversas fuentes históricas, se conoce que a mediados del siglo XVII aún se mantenían en pie diversos tramos y vestigios de las murallas medievales. Por ejemplo, dice un testigo en un proceso de 1651 para describirlo: *"Y en el día de hoy se ven muchos pedazos de murallas en diferentes partes y calles de la dicha ciudad de Pamplona",* (*Las fortificaciones de Pamplona a partir de la conquista de Navarra* F. Príncipe de Viana, 1954).

Sin embargo, los tiempos cambiaban y la ciudad crecía, así que en algunos sectores se derribaron las murallas medievales para facilitar la fusión urbana. En 1571 irrumpe un nuevo diseño que se encargó a Jacobo Palear. Se basó en el modelo de Amberes, de Paciotto de Urbino (1568). Entonces cumplía una doble función, la defensa a ataques exteriores y la contención interior para controlar una posible sublevación, en el trasfondo de esa decisión, creen algunos historiadores, tras la anexión a la corona de Navarra, todavía se desconfiaba de la fidelidad de los navarros.

Estos avances provocaron también que, muchos tramos de las antiguas defensas, que quedaron dentro de la nueva fortaleza, se reutilizasen para otras construcciones y zonas que habían sido tierra de nadie, fosos, escombreras, etc., entrasen en un proceso de urbanización que incluía las diferentes zonas de la antigua ciudad. También se tiene constancia de la reutilización de los materiales e incluso la desaparición de barrios enteros como el de las Burullerías que en tiempos medievales se conocía como la Pobla Nova del Mercat con un marcado carácter rural, cerca del hoy parque de la Taconera. Al convento de los Carmelitas Descalzos le acompañó a mediados del XVII el de Recoletas que se hizo en ladrillo y ya en estilo barroco castellano. Se apoyó a diferentes niveles sobre las gravas heterométricas y rellenos cuaternarios que pudimos observar con motivo de varias obras.

La transformación de esa parte oeste de Pamplona fue decisiva y la muralla exterior occidental del Burgo de San Cernin desapareció; la piedra se utilizó para hacer los cimientos del convento y otras obras cercanas. De esta manera se abría una puerta a la edificación en terrenos que durante siglos habían sido evitados, y aunque las razones militares, las contiendas entre los burgos y las tradiciones fueran decisivas, la necesidad de crecimiento supuso ir abandonando el pesado carácter defensivo en pro de la reurbanización de localizaciones intocables durante siglos. Muchas de ellas eran vertederos de todo tipo desde la época indígena, por eso los huesos de bestias de tiro o restos de cuadras siguen apareciendo en algunas obras de la vieja Iruña. Tampoco olvidemos que los burgos nacieron por una manera muy clara de exclusión con respecto a los francos y otros pobladores. Dice Juan José Martinena Ruiz (1996) en su *"Reseña de la evolución urbana de Pamplona. Desde el siglo XI hasta el derribo de las murallas en 1915"*:

> *"… El caso no es exclusivo de Pamplona. Pirenne señala que los comerciantes se vieron obligados a instalarse, por falta de sitio, en el exterior del antiguo perímetro, constituyendo burgos extra-murales, que por oposición al núcleo ya existente son llamados por los textos burgos nuevos. Así sucede en el caso de Pamplona, si bien aquí posiblemente más que en una falta de espacio en la Navarrería, haya que pensar en un problema de asimilación, de choque de razas y mentalidades, y desde luego en una cuestión de Status, ya que la Navarrería, como hemos visto, era esencialmente un dominio de titularidad episcopal…".* (Martinena J.J. 1996)

Posiblemente el primer edificio que empezó a construirse en los tan evitados y manipulados terrenos comprendidos entre las murallas de separación interna de los antiguos burgos, pues son zonas que aún generan cierta preocupación geotécnica, fue la Casa Consistorial (ver figura 2.49), todo un icono de ciudad unificada ya en esa época. Se materializaba con él la fusión urbana, siendo en cierto modo el pionero de la unificación de la villa murallas adentro, de la que por otra parte, se hizo todo un símbolo o icono de ciudad internacional que alcanza nuestros días.

Esa primitiva Casa Consistorial terminada en la segunda mitad del siglo XV se encuentra en el mismo lugar que la actual. En 1752 el Ayuntamiento de Pamplona decidió derribarla y construir un edificio más grande conforme con los gustos de la época. En 1759 se inauguró. El Ayuntamiento actual, construido entre 1953 y 1954 ha conservado la fachada barroca de aquella segunda intervención municipal del siglo XVIII que todo el mundo conoce (Martinena Ruiz, J. J. 1996).

Justo al borde del barranco hacia el oeste sería difícil apuntar a qué etnia o qué sociedad de todas las descritas puso la primera piedra de lo que enterró el edificio o conjunto que conocemos como el Palacio del Condestable, una edificación singular que hoy es el centro neurálgico de la cultura de la vieja Iruña. Es palacio de congresos, conciertos, conferencias, seminarios, exposiciones, en el casco antiguo: Civivox Condestable (figuras 2.54, 2.57 y 2.59). Amoldado en planta a las calles Mayor y Jarauta, el edificio fue construido entre 1548 y 1562 como casa-palacio renacentista por Luis de Beaumont, IV Conde de Lerín y Condestable del Reino, sobre un conjunto medieval de diferentes confesiones que durante las labores geotécnicas y arqueológicas acogimos con fascinación. Desde 1590 a 1752 había sido la residencia oficial de los obispos de Pamplona y a partir de ese año fue la sede provisional del Ayuntamiento, aunque fuera propiedad del Duque de Alba hasta finales del XIX. Durante el siglo XX perteneció a la familia Górriz, hubo locales comerciales y algunos salones de la planta noble fueron sede de instituciones privadas tan variopintas como el Círculo Carlista, el Centro Aragonés, el Hogar del Productor o los Amigos del Arte. Esta arquitectura civil del siglo XVI, la mejor conservada de Pamplona, nos deparaba una sorpresa para entrar en el siglo XXI.

2.10. El Palacio del Condestable.

El Palacio del Condestable se hallaba en un estado de conservación bastante calamitoso con partes prácticamente en ruinas a la entrada del siglo XXI. Un primer estudio de carácter geotécnico orientativo se realizó en el año 2002 aprovechando las catas arqueológicas y realizando alguna otra extrapolación con edificaciones colindantes o zonas accesibles de, no más de 3 m de profundidad. En 2005 se amplió con varios sondeos y ensayos geotécnicos.

Ficha técnica del palacio del Condestable:

- Palacio de tres plantas del siglo XVI. Bien de interés cultural desde 1997.
- Superficie de 6.819 m² sobre gravas heterométricas (P1). Este material se usó como tapial en la confección algunos de los muros que soportaban forjados.
- Se apoya con diferentes anchos de cimentación de mampostería a diferentes profundidades sobre materiales de P1 que también formaron parte de los muros del edificio.

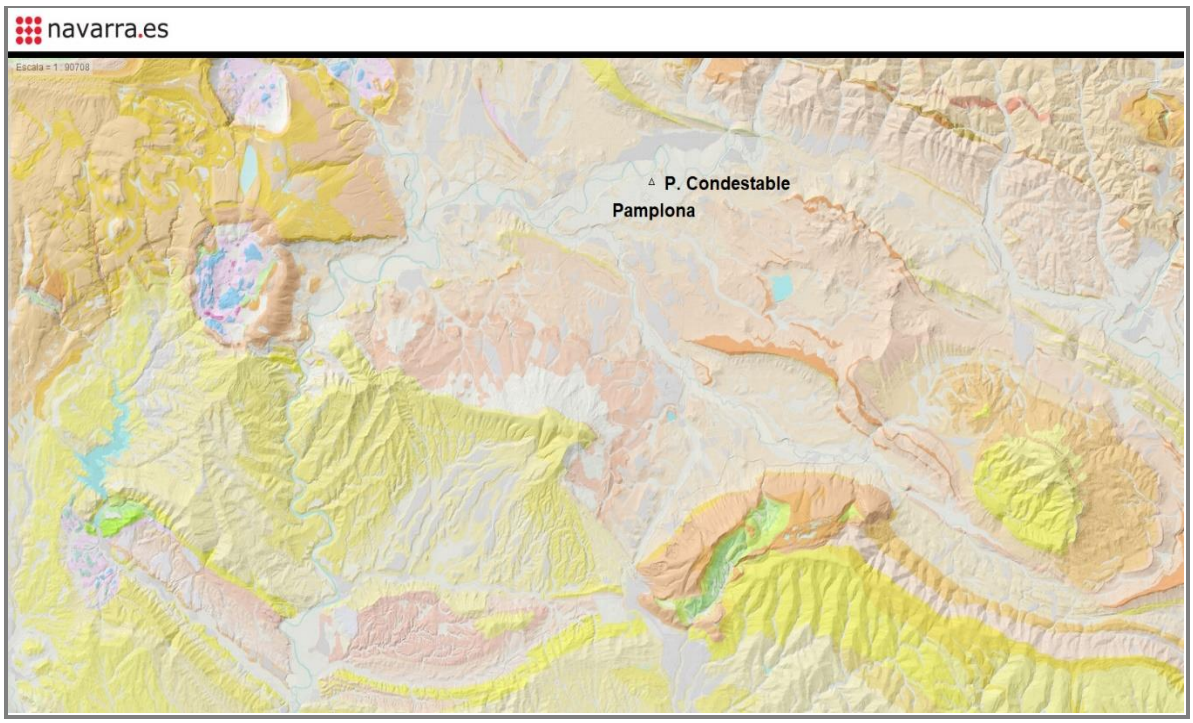


Figura 2.55. Sobre la suave meseta de sonde se encuentra la vieja Iruña y al oeste del Barranco Chapitel se encuentra el Palacio del Condestable sobre los terrenos cuaternarios de gravas heterométricas desarrolladas muy recientemente en el tiempo geológico y utilizadas en los propios muros del edificio.

Lo más importante, cuando comenzamos a trabajar en su rehabilitación, era conocer o, mejor dicho, estimar la profundidad de aparición de las Margas de Pamplona, pero el proyecto de restauración y reforma fue cambiando según avanzaban las investigaciones y varias estructuras se dejaron descansar sobre las gravas (figuras 2.55 a 2.59) como antaño. Para la década del 2000-2010 ir al encuentro de las margas para apoyar cualquier clase de infraestructura se había vuelto en el sector de la edificación pamplonés casi una obsesión. Muchas veces no había una justificación clara del porqué, pero, sobre todo desde los años 80 del siglo XX con las grandes promociones de viviendas de una tacada y la moda de los sótanos, se dio por sentado que toda cimentación tendría que bajar sus cargas a la roca biarritziense (perfil geotécnico E). Se podía, se hacía y se normalizó. Rara vez, si no era en un lugar patrimonial, se respetaba la herencia de la sana práctica de cimentar en el cascajo o kaskallueta P1. Obviamente los criterios económicos tenían mucho peso y entonces, la energía necesaria para ejecutar esa práctica era abundante y más que nada, era barata.

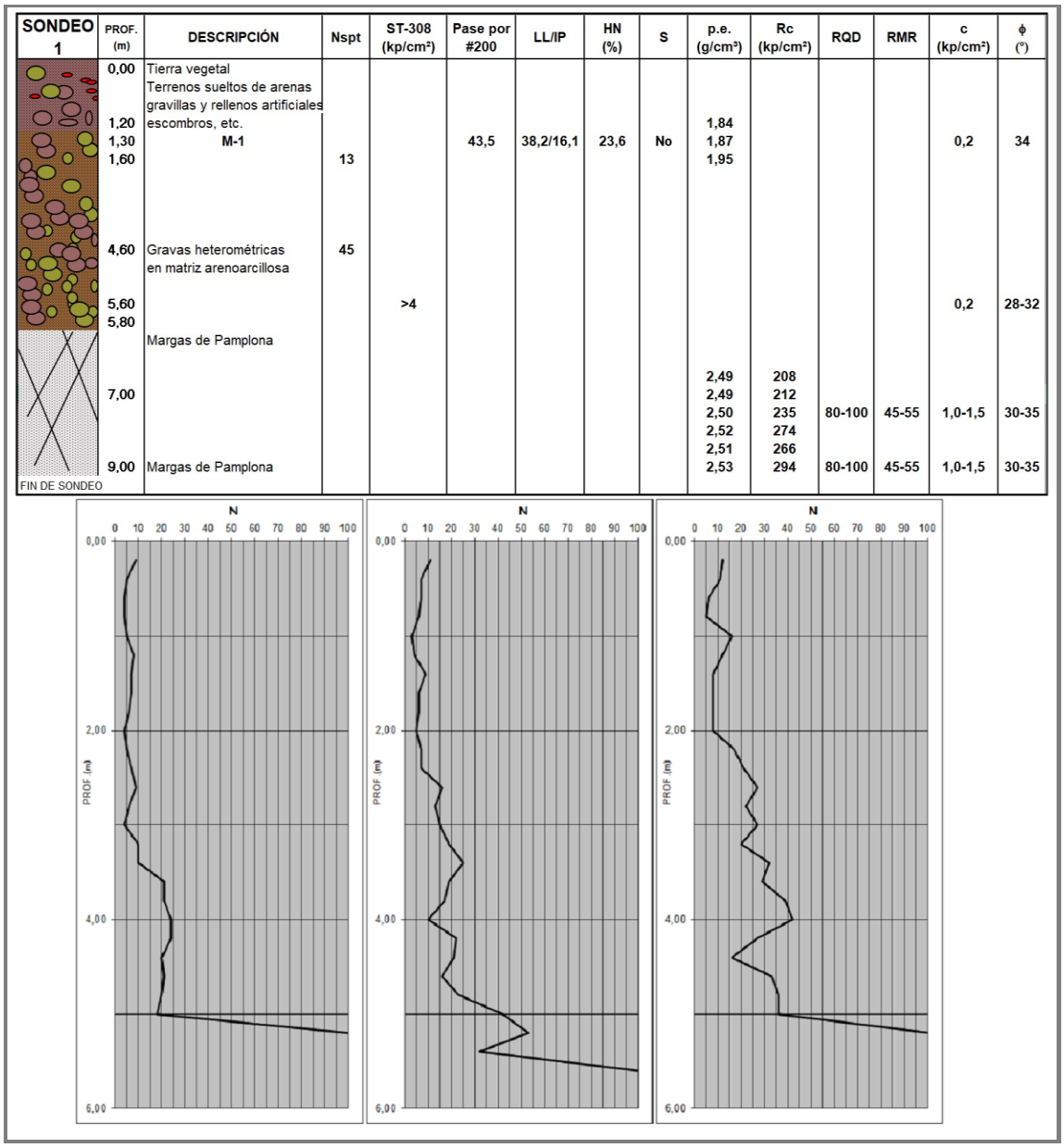
2.10.1. El acceso a las Margas de Pamplona.

Sin entrar en demasiados detalles, en 2002, mientras los trabajos de arqueología descubrían verdaderos tesoros de la historia de Navarra, se realizaron ensayos de penetración dinámica DPSH hasta rechazo y prácticamente la investigación geotécnica se enfocó a comprender la complicada estructura arquitectónica que aún se mantenía en pie tras las sucesivas ampliaciones y añadidos de las diferentes épocas históricas. No fue fácil ubicar este tipo de ensayos, las figuras 2.57 a 2.59 dan una idea de por qué.

Los rechazos de los ensayos DPSH coinciden muy bien con lo que tres años más tarde (2005) se pudo corroborar como el nivel de base de las Margas de Pamplona (figura 2.56). En los apenas 250 metros cuadrados de superficie excavada para los estudios arqueológicos de aquellos años, apareció una necrópolis con un total de 30 enterramientos, la mayoría con pertenencias de los difuntos: armas, adornos, recipientes cerámicos y anillos de escritura cúfica propia del islam (figura 2.59). Este hecho que sitúa el uso del suelo de esa zona a la salida de la vieja ciudad con la influencia geomorfológica hacia el SO, corroboró la diferenciación étnica comentada anteriormente, por ejemplo, Juan José Martinena Ruiz (1996) cree que las razones étnicas y religiosas estaban por encima del espacio disponible.

Al menos entre los siglos VI y VIII se contrasta la influencia de la cultura islámica entre los cristianos de la época. En las excavaciones se localizaron además objetos desde la época romana hasta nuestros días; llamaron la atención los pozos para extraer agua que aún hoy se pueden visitar (figura 2.57) y una noria de sangre, un ingenio hidráulico introducido por la cultura islámica que solucionaba la extracción de agua de los pozos profundos usados en aquellos siglos.

Lo curioso del caso de palacio del Condestable es que estamos fuera de las murallas anteriores al siglo IX, al otro lado del barranco de Santo Domingo que seguirá siendo una zona no urbanizable durante siglos. Allí mismo junto a la necrópolis, encontramos la iglesia de San Cernin, remontable hasta el s. XI, pero que pudo erguirse sobre, o en la cercanía, de la antigua basílica de este cementerio visigodo.



SONDEO 1	PROF. (m)	DESCRIPCIÓN	Nspt	ST-308 (kp/cm²)	Pase por #200	LL/IP	HN (%)	S	p.e. (g/cm³)	Rc (kp/cm²)	RQD	RMR	c (kp/cm²)	ϕ (°)
	0,00	Tierra vegetal												
		Terrenos sueltos de arenas gravillas y rellenos artificiales												
	1,20	escombros, etc.							1,84					
	1,30	M-1			43,5	38,2/16,1	23,6	No	1,87				0,2	34
	1,60		13						1,95					
	4,60	Gravas heterométricas en matriz arenoarcillosa	45											
	5,60			>4									0,2	28-32
	5,80	Margas de Pamplona												
									2,49	208				
	7,00								2,49	212				
									2,50	235	80-100	45-55	1,0-1,5	30-35
									2,52	274				
									2,51	266				
	9,00	Margas de Pamplona							2,53	294	80-100	45-55	1,0-1,5	30-35
FIN DE SONDEO														

Figura 2.56. Arriba: aparición del macizo rocoso de Margas de Pamplona sobre los 5,80 m de profundidad a partir de la testificación de un sondeo. Abajo: tres gráficas DPSH realizadas en el Palacio del Condestable evidencian la aparición del macizo rocoso de Margas de Pamplona sobre los 5,50-5,80 m de profundidad.

Figura 2.57. La densidad y calidad de aparición de elementos de diferentes épocas y del macizo rocoso de Margas de Pamplona sobre los 5,80 m de profundidad, se evidencia en esta fotografía facilitada por TRAMA en 2005. Obsérvese la dificultad que hubo que solventar para la cimentación de la grúa.

Figura 2.58. Detalle de una zona de tapial de terrazas P1 que durante siglos sustentó un forjado.

Figura 2.59. Un enterramiento en las gravas heterométricas P1 (izquierda) y una cata contigua mostrando el nivel de gravas embebidas en una matriz arenoarcillosa teñida de óxidos de hierro. En prácticamente toda la meseta que forma la parte alta de Iruña, excepto en sus bordes inclinados, aparece este nivel que presenta más cantos rodados y es más rojiza que las terrazas P2 cercanas al río, el periodo interglaciar más cálido que el actual, antes de la última glaciación, oxidó el hierro presente en estos materiales y en su matriz arcillosa.

Poco se sabe de cualquier organización del territorio previa al poblado romano en los alrededores e incluso en las inmediaciones delo Palacio del Condestable, pero tampoco las construcciones, dadas sus características primitivas entonces, debieron atender a cuestiones geotécnicas complejas. Por un lado, la moderada facilidad para excavación y por otro, el acopio de material para llevar a cabo las modificaciones, supone que hayan sido las partes sur y oeste de la ciudad, las que mayor tasa de movimiento de tierras y transformaciones hayan experimentado. Algo muy evidente en el Palacio del Condestable, donde el substrato de margas se encuentra a casi 6 m de profundidad.

2.10.2. Importancia de las técnicas reveladas en el Palacio del Condestable.

El Palacio del Condestable muestra que, desde diferentes culturas, algunas locales, y diferentes corrientes arquitectónicas, había una confianza absoluta en la capacidad portante de las gravas heterométricas P1 (cascajo, kaskallueta) que durante siglos —y hasta bien entrado el siglo XX con las nuevas y potentes tecnologías basadas en el motor de combustión interna—, fueron sistemáticamente utilizadas como terreno de cimentación.

El acceso a las Margas de Pamplona en la vieja Iruña no fue secularmente una práctica habitual como comenzó a ser con la era de los sótanos y el vehículo a motor a partir de mediados del siglo XX; pero no solo eso, las gravas de P1 también cumplieron una función estructural: se excavaron de zonas cercanas, se transportaron y se mezcladas con cal y otros aglomerantes hidráulicos para jugar el papel de un muro de carga como tapial, sosteniendo varios forjados durante siglos y ampliaciones sucesivas como una prolongación escultórica a la vez que estructural del subsuelo, algo que se adelanta en siglos a la maleabilidad de los modernos hormigones.

Concluimos por ello que, sobre todo en los últimos años, han sido demasiadas veces relegadas a un papel geotécnico secundario sin mucha justificación, simplemente porque con las potentes tecnologías de obra pública pudieron ser puenteadas gracias a ingentes excedentes de energía fósil, versátil y barata, lo cual plantea si la falta de dichos excedentes volverá a dar protagonismo a los terrenos P1 en lo que se refiere a soporte de cargas geotécnicas. El Palacio del Condestable aparece entonces como una excepción entre muchas de las rehabilitaciones que optaron por cimentar en el sustrato eoceno E1, bien por la ejecución de aparcamientos subterráneos o bien por la confianza de apoyar con cargas más elevadas en roca, pues el consumo energético era algo que prácticamente no se tenía en cuenta, este aspecto lo analizaremos en la parte ocho. No obstante, veremos un caso curioso en que incluso con estos precedentes se les acusó de ser un terreno deficiente para la cimentación: la antigua Audiencia Provincial, hoy el Parlamento de Navarra. Este edificio también fue objeto de un brillante proyecto integrador entre historia, tecnología y geotecnia, pero las prisas en la era de la aceleración termoindustrial ya habían permeado todos los sectores económicos, incluido el cuidado del Patrimonio. Las prisas geotécnicas en aquellos días de los albores del siglo XXI desembocaron en un accidente, afortunadamente sin daños personales. No obstante, nos legó un buen número de lecciones de historia de la arquitectura y su adecuación a los terrenos de uso secular. Y, sobre todo, que las gravas P1 tienen memoria, solo hay que comunicarse con ellas.

Lo realizado en el Palacio del Condestable se ve hoy como uno de los mayores aciertos urbanísticos, arquitectónicos y geotécnicos de la Pamplona del siglo XXI. Se integraron con solemnidad las construcciones e infraestructuras de épocas muy variadas en un presente que muestra un encomiable respeto por las condiciones históricas heredadas. A pesar del estado de ruina o amenazante de muchos de los elementos constructivos, no hubo que lamentar accidentes ni desviaciones relevantes en el proyecto. Las gravas continúan soportando buena parte de la estructura. El diálogo continuo entre las personas proyectistas, historiadoras, arqueólogas, geólogas, ingenieras, fue decisivo para culminar una brillante transformación en la que el subsuelo marcó el itinerario de proyecto y construcción. Gran parte de la cultura de Navarra es proyectada hoy a través de dicha renovación: Civivox Condestable.

2.11. Nueva construcción. Rehabilitación. Mañueta. Capitanía. Paseo del Obispo Barbazán.

Resumen: los tres enclaves que vamos a analizar a continuación tienen una importancia especial porque son tres edificaciones apoyadas sobre antiguos cimientos de edificaciones preexistentes o compartían y comparten diferentes tipologías de cimentación e incluso de estructura. Reflejan juntos, prácticamente todo el espectro problemático en el ámbito de la geotecnia con que se va a encontrar el profesional en el casco histórico de una ciudad medieval que no salió con determinación de sus murallas hasta finales del siglo XIX y principios del XX, por lo que, como hemos visto ya en otros casos, se añadieron plantas. En el primer caso se empieza desde cero tras eliminar los restos de edificaciones antiguas, en el segundo, se rehabilita un edificio histórico que fue Palacio de los Reyes de Navarra y hoy es Archivo General de Navarra (Moneo R. 2003) y en el último caso vemos un edificio que presenta patologías que posiblemente avancen con el tiempo.

Fichas técnicas. La Mañueta, Capitanía y Paseo del Obispo Barbazán

- Un edificio de nueva construcción de cuatro plantas micropilotado hasta las Margas de Pamplona (E1) detrás del Ayuntamiento en la calle Mañueta.
- Antiguo Palacio Real, luego edificio de Capitanía y actualmente Archivo General de Navarra rehabilitado desde la ruina con nueva cimentación en Margas de Pamplona (E1).
- Edificio histórico aledaño a la Catedral de Santa María apoyado sobre cimientos en las gravas P1 de edificaciones antiguas con estructuras mixtas, diferentes anchos de cimentación de mampostería a diferentes profundidades y actuaciones parciales con hormigón en el terreno en el siglo XX.

2.11.1. Nueva construcción. Edificio micropilotado en c/La Mañueta

El edificio de las figuras 2.60 (el del centro) y 2.61 en el número 11 de la calle Mañueta, se sitúa a unos 200 m de la parte trasera de la Catedral donde está el edificio del Paseo del Obispo Barbazán, a unos 140 hacia el sur del Palacio de los Reyes (hoy Archivo General de Navarra) y a unos 50 m del edificio del Ayuntamiento de Pamplona (figura 2.60). Se trata de un edificio de nueva construcción (año 2000) sobre los restos de edificaciones preexistentes en un pequeño solar de apenas 6 m de ancho con muy poca capacidad de maniobra para las labores de cimentación y construcción en general. Si algo llama la atención es el hecho de que, al inspeccionar el terreno de apoyo, las cimentaciones adyacentes se apoyaban sobre los rellenos preexistentes formados por restos históricos como ladrillos, sillares y desechos, huesos de animales, trozos de madera, etc., mezclados con residuales de margas y terrazas cuaternarias provenientes de actuaciones históricas.

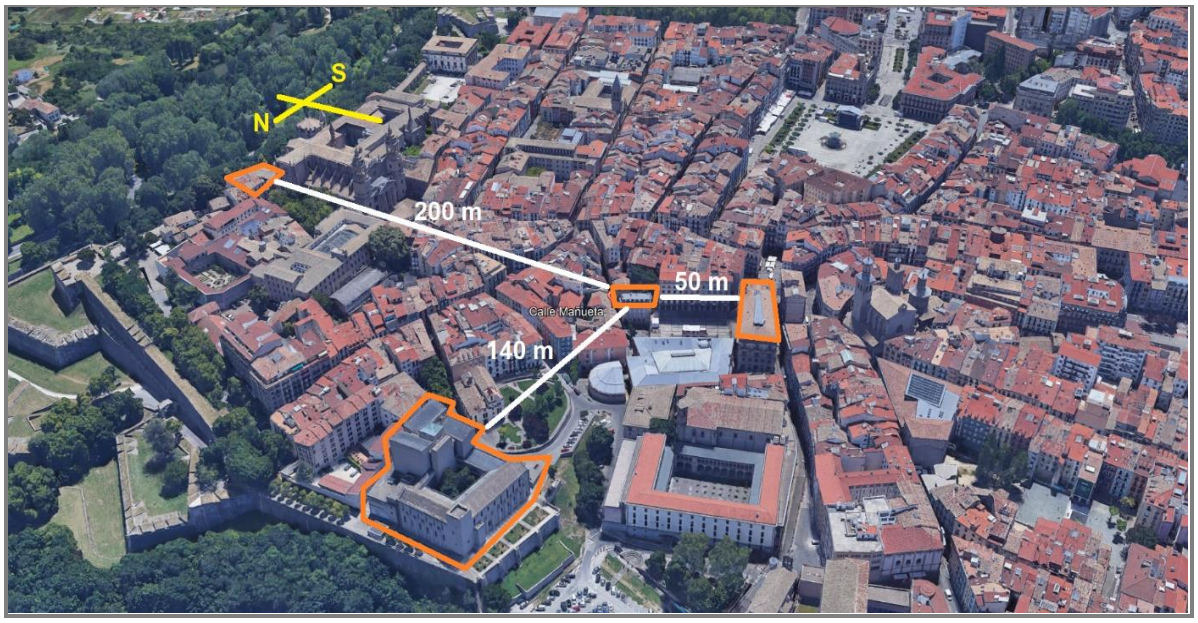


Figura 2.60. El edificio de La Mañueta en el centro de la imagen. Se encuentra a unos 200 m de la catedral, 140 m de Capitanía (Palacio Real) y 50 m del edificio del Ayuntamiento de Pamplona. Se puede ver el edificio de la c/Obispo Barbazán entre el conjunto catedralicio en forma de cruz a la izquierda de la imagen bajo los puntos cardinales. Abajo el Palacio Real, Capitanía y hoy Archivo General de Navarra (Moneo, R. 2003).

Figura 2.61. El edificio del número 11 de la calle de La Mañueta de reciente construcción apoyado sobre Margas de Pamplona (E1) a través de micropilotes.

El edificio de tres plantas (baja más dos) que se ve en la parte de atrás de color verde pálido (parte izquierda de la imagen 2.61) con una entrada en arco, se apoyaba directamente sobre el terreno a unos 20-30 cm de profundidad, ni siquiera alcanzaba las gravas de P1. Este edificio se ubica en la zona terminal oeste del antiguo burgo de la Navarrería, que asomaba a una zona de barranco vertiente hacia el río Arga en dirección S-N (figuras 2.49 y 2.60). Así es como se separaban a la sazón los burgos fortificados; en este caso se trata del ya desaparecido Barranco de Chapitel, receptor de los residuos de prácticamente todas las épocas históricas coincidiendo además con la hoy conocida Plaza de los Burgos.

El estudio de las prospecciones, las deficientes características geotécnicas del terreno inicial, las cimentaciones adyacentes a un par de decímetros de profundidad, en parte sobre rellenos históricos o aprovechando apoyos previos de diferentes épocas históricas, además del poco espacio disponible, llevaron a dimensionar una cimentación que apoyase, esta vez sí, por cuestiones de deficiencias geotécnicas en las fincas adyacentes, directamente en las Margas de Pamplona. Sin embargo, la formación eocena aparecía en sus primeros tramos a unos 6-7 m de profundidad, de los rellenos históricos y las gravas naturales, por lo que era primordial, en un entorno de espacio tan reducido y de marcado carácter histórico, evitar cualquier apoyo sobre los restos seculares interceptados, la mayoría eran desechos y escombros de todo tipo y naturaleza. La decisión se tomó atendiendo a varias causas. En un principio se pensó en cimentar el edifico de nueva construcción con vigas corridas, al comprobar las características del terreno para un edificio de planta baja más tres, se desechó la opción y se planteó una losa con una carga en torno a los 0,5 kp/cm^2, que también fue rechazada debido, por un lado, a la dificultad de realización de los trabajos y por otro, a que parte de la cimentación del edificio adyacente quedaría prácticamente en el aire, además los asientos estimados en unos 2-3 cm provocarían deformaciones en el edificio colindante. Antes de comenzar las obras se visitaron los inmuebles cercanos y con la presencia de un notario se testificaron las grietas existentes. Finalmente, se ejecutaron micropilotes empotrados al menos 2 m en la formación eocena de Margas de Pamplona. Resultó ser la solución más eficiente, económica, segura y de menor impacto. No se denunciaron desperfectos o deformaciones. Sin embargo, años después, en noviembre de 2009, toda la calle Mañueta y buena parte de otras calles cercanas, denunciaron la aparición de abombamientos con numerosas y llamativas grietas coincidiendo con la ejecución de las nuevas obras subterráneas de acometidas y conducciones que suponían la modernización y reurbanización del Casco Antiguo de Pamplona. Fueron portada de los diarios locales durante una buena temporada y finalmente objeto de apuntalamiento y posteriores arreglos. El edificio del número 11 de la calle Mañueta, micropilotado, no se vio afectado.

Pero este tipo de actuaciones llevando las cargas al sustrato de Margas de Pamplona por medio de cimentaciones profundas o recalces, ha sido casi anecdótica en el casco histórico de Pamplona (Aretxabala, A. 2012). Las actuaciones en los cascos históricos han tendido, por cuestiones culturales, a comprender mejor que el patrimonio es un valor importante para las ciudades históricas. Por eso se han priorizado más trabajos de restauración y adecuación de los nuevos espacios arquitectónicos a la herencia histórica. Al menos en los últimos tiempos van por delante en número e inversiones sobre la nueva construcción tras un derribo, como acabamos de ver, por ejemplo, en el Palacio del Condestable. La mayor parte de las veces lo que se ha venido haciendo es conservar especialmente las fachadas, la sillería y parte de la estructura, reforzada o adecuada a los nuevos usos.

2.11.2. Rehabilitación. De Palacio Real a Archivo General de Navarra.

El antiguo edificio de Capitanía se conocía como Palacio Real y Episcopal en los siglos XII-XIII, estas estructuras se han conservado principalmente en los sectores norte y oeste del conjunto arquitectónico, siendo el sector sur durante los siglos XIX y XX residencia del gobernador militar que le dio el nombre local de "edificio de Capitanía". Hoy alberga al Archivo General de Navarra, una restauración liderada por el arquitecto Rafael Moneo. Tras una caótica historia relacionada con conquistas, guerras y cambios de regímenes políticos y administrativos, fue en el siglo XX cuando se retomó la labor de archivo de la historia de Navarra.

En 1981 el Archivo General de Navarra se adscribe a la Dirección General de Cultura/Institución Príncipe de Viana del Gobierno de Navarra, en el marco de la gran reforma administrativa acometida por el primer Gobierno democrático tras la aprobación de la Constitución y el Amejoramiento del Fuero. En 1995 se realizaron los primeros trabajos de arqueología y en 1997 una ampliación arqueológica con los primeros estudios geotécnicos dirigidos por quien suscribe.

En 2003 los entonces reyes Juan Carlos I y Sofía inauguran la nueva sede en el antiguo Palacio de los Reyes de Navarra o antigua Capitanía, rehabilitado y reformado para este fin por el equipo de Rafael Moneo. Entonces el Archivo queda adscrito a la Dirección General de Patrimonio Cultural del Departamento de Cultura y Turismo, como una sección del Servicio de Archivos y Patrimonio Documental. El trabajo más importante de carácter histórico y arqueológico se titula *"Intervención arqueológica en el Palacio Real"* escrito por M.ª Ángeles Mezquíriz, y M.ª Inés Tabar, en el que se resumen las excavaciones arqueológicas tras el rescate por parte del Gobierno de Navarra del edificio abandonado y en ruinas (imagen 2.64). Se decidió dedicarlo a sede del Archivo General después de un periodo de tres décadas sin intervenciones en un estado de abandono muy avanzado con restricciones de acceso (imágenes 2.63 y 2.64).

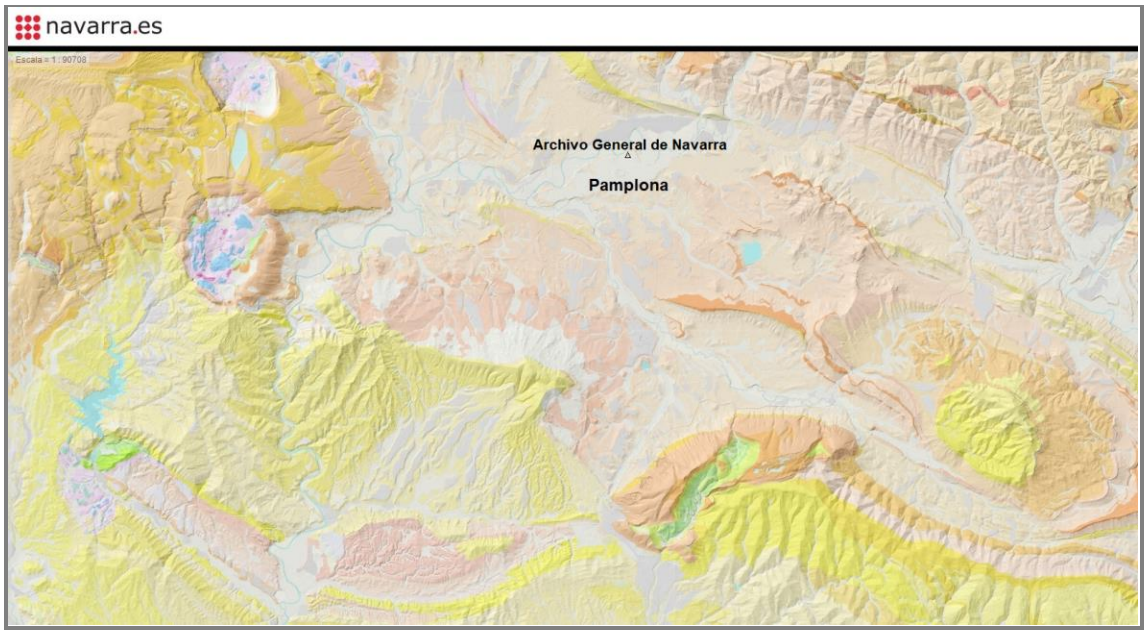


Figura 2.62. Situación geológica del Archivo General de Navarra al borde del acantilado de margas (ripa) del río Arga sobre los últimos tramos de gravas cuaternarias P1. El edificio de la Calle Obispo Barbazán asoma al acantilado este al lado del conjunto catedralicio en las mismas condiciones geotécnicas y el de la calle Mañueta de nueva construcción, asoma al antiguo barranco Chapitel que delimitaba geomorfológicamente los burgos.

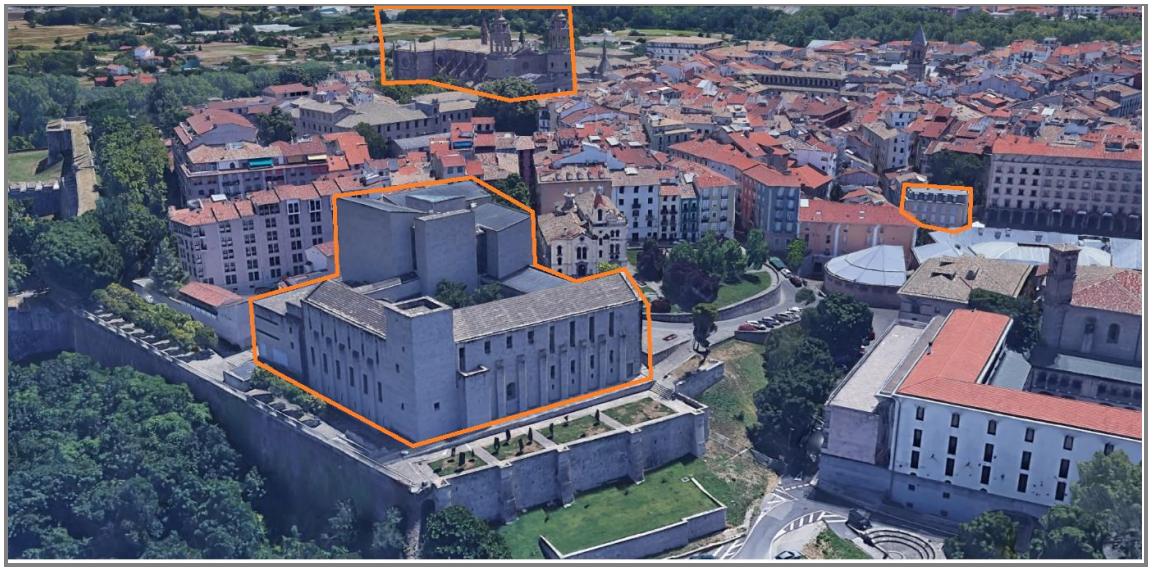


Figura 2.63. El viejo edificio de Capitanía reconvertido (según un proyecto de Rafael Moneo) en Archivo General de Navarra. Al fondo la Catedral y el edificio de la plaza San José-Obispo Barbazán y a la derecha el edificio de la calle Mañueta de nueva construcción en la trasera del edificio del Ayuntamiento de Pamplona.

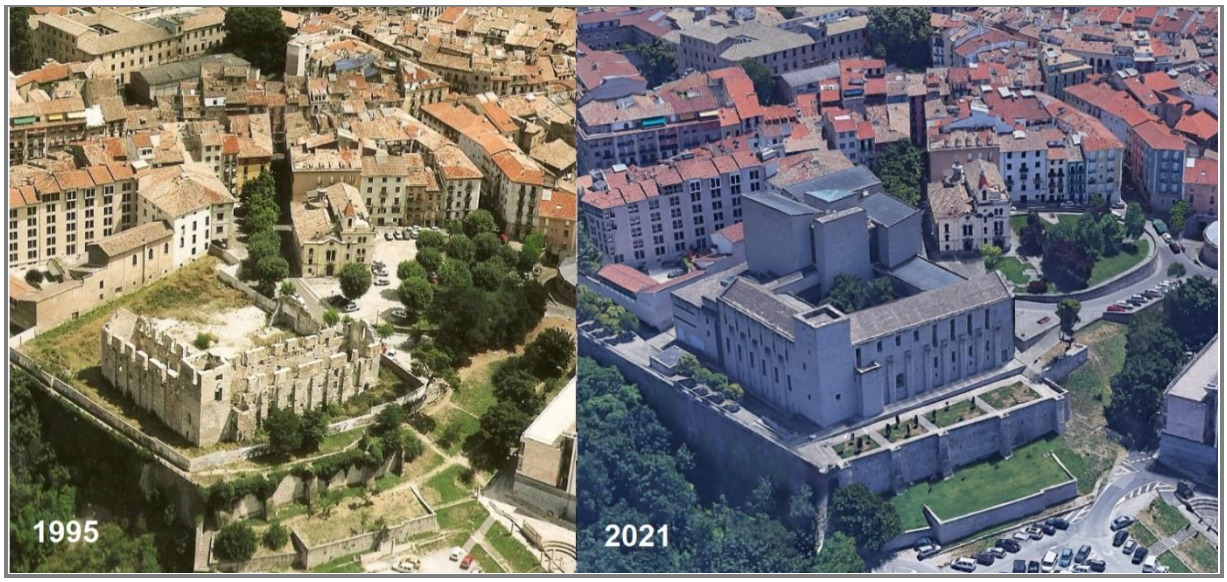


Figura 2.64. Las ruinas del edificio de Capitanía en 1995 (foto de pamplonahistórica.com) y el Archivo General de Navarra en 2021 en una toma similar a la de 1995 desde Google Maps.

Podemos destacar que, en los trabajos geotécnicos, descubrimos enterramientos y los estratos arqueológicos prerromanos, romanos y medievales sobre los que se apoyó el edificio medieval. También las arqueólogas citadas comentaron que una obra de 1987, en el adyacente convento de los Padres Corazonistas, se encontró un mosaico romano junto con estructuras de una vivienda del siglo II, un pequeño compartimento construido con argamasa hidráulica y una tubería de plomo, perteneciente a un sistema termal. Los resultados obtenidos en las áreas excavadas corresponden, en su momento más antiguo, a estructuras de época romana, principalmente unos tramos de calle de distintas orientaciones asentados directamente sobre la terraza cuaternaria, con una anchura máxima de 3,50 metros y realizados con cantos rodados extraídos de las terrazas. Como vimos en el Palacio del Condestable, las gravas de P1 son muy versátiles desde el punto de vista constructivo.

En un momento tardío de época romana se construyó una edificación de planta cuadrada también apoyada en el cascajo o terraza cuaternaria P1, aprovechando cimientos previos. Lo reconocemos como una constante, pues la costumbre de apoyo en las terrazas cuaternarias no se perderá hasta bien entrado el siglo XX. Podríamos localizar ese punto de inflexión en los años 70-80 del siglo XX. A efectos geotécnicos, durante toda la historia del edificio, se han depositado materiales de origen antrópico fundamentalmente. En algunos casos su origen está ligado a la actividad descrita, militar, calle romana, fábrica de cañones y hasta el cultivo de champiñones que se hizo a finales del siglo XX. Hay que destacar el alto grado de destrucción de los estratos arqueológicos, tanto medievales como romanos, pero el apoyo siempre se llevó a la terraza cuaternaria de gravas P1.

La terraza presenta una fuerte inclinación hacia el nordeste y se aprovechó esta pendiente como continuo drenaje del patio durante siglos, en las diversas etapas cronológicas de su utilización se usaron los diferentes tipos de conducciones y tuberías que se iban desarrollando paralelamente a las labores de urbanización; el drenaje era obligado por las constantes filtraciones de agua, más notables en la zona de acceso a la sala protogótica.

Las cimentaciones de las distintas construcciones han afectado a todos los niveles previos; el avance de la historia supuso en general un aumento de las cargas geotécnicas de las construcciones y, por tanto, un aumento de la superficie del cimiento. El apoyo en las Margas de Pamplona ya como Archivo General de Navarra, sin embargo, se realizará por primera vez a finales del siglo XX, y no solo en este edificio histórico, la mayoría de las nuevas restauraciones o recalces así lo harán.

De épocas recientes se distinguen excavaciones, rellenos de terraplenado, rellenos incontrolados, basuras y un sinfín de materiales que se fueron acumulando durante varias épocas de crecimiento de la ciudad y cambios de urbanización. Estos depósitos, la mayoría a modo de vertedero, pueden llegar a potencias de más de 7 m de profundidad en algunas ocasiones y se pueden ver los antiguos horizontes de tierra vegetal y actividad orgánica enterrados y sellados varias veces.

En la estratigrafía también se encuentran épocas en que se destacan los huesos de animales por debajo de los depósitos anteriormente descritos, lo que también lleva a pensar que se trataba de zonas donde se depositaban los restos de animales de tiro o provenientes de la ganadería. Bajo estos depósitos erráticos, se encuentran finalmente los materiales de origen cuaternario, comprenden una serie de depósitos escalonados provenientes de aportes ligados por la red fluvial de la Cuenca de Pamplona durante el Holoceno y también por la alteración del substrato Biarritziense que los soporta actualmente. La potencia de estos depósitos oscila entre los 2,60 m hasta los 6,80 m.

El paquete de materiales al completo podemos encontrar en esta área limítrofe de la vieja Iruña que ya asoma al río Arga por el norte son:

Nivel A: Tierra vegetal, materia orgánica y restos de actividad muy reciente de las obras adyacentes, ladrillos, cables, áridos, etc. (hasta 0,40 m).

Nivel B: Rellenos artificiales provenientes de la actividad humana, excavaciones de obras colindantes tanto actuales como de hace varios años y otros residuos de plásticos, maderas, metales, trozos de ladrillos, etc. En una calicata realizada dichos rellenos se detectaron hasta los más de 5,90 m de profundidad, siendo de más de 6,80 m en un sondeo; en zonas cercanas, se pudo ver la existencia de rellenos similares muy recientes relacionados con las obras realizadas en distintas épocas históricas.

Nivel C: Terrazas cuaternarias en matriz limoarcillosa con niveles de cantos rodados de areniscas y calizas y a veces de ofita y cuarzo P1. También contienen fracciones de arena, limo y arcilla con menos grava; ésta última en proporciones suficientes para darle una cohesión que permitió la estabilidad de la formación ante excavaciones. Son las arcillas cuaternarias de color marrón con cantos y gravas de terraza y posteriormente se entremezclan para pasar a las arcillas de color gris de alteración de las Margas de Pamplona con una humedad natural cercana a la del límite plástico. Estos depósitos se alargan en la zona del Archivo General de Navarra, en el borde de la pequeña meseta que dio lugar a Pamplona hasta los más de 4,90 m y hasta unos 7,50 m contando con los materiales artificiales de todas las épocas históricas previas.

Nivel D: Las Margas de Pamplona E1 aparecen por debajo de esas cotas con la humedad natural cercana al límite plástico en los primeros centímetros y prácticamente masivas o muy ligeramente fracturadas; los RQD medidos fueron mayores de 90 en la práctica totalidad de los tramos rocosos.

La detección de diferentes actuaciones para drenaje tiene una justificación desde el punto de vista hidrológico, se detectó la presencia de agua en todas las observaciones realizadas, se han encontrado zonas saturadas a diferentes profundidades, estos niveles parecen tener relación con los materiales que componen las arcillas y los sedimentos que se engloban al nivel de gravas, dándose la acumulación por encima de niveles impermeables de las Margas de Pamplona E1. Este fenómeno de movimiento de agua en el encuentro entre los niveles de terraza P1 y E1 es habitual en la parte terminal o al borde del acantilado que asoma al río Arga, también lo veremos al lado del conjunto catedralicio y anuncia la aparición de *las tufas* que ya son visibles en los acantilados sobre los que asoma el edificio, algo que se repite en prácticamente todos los perfiles susceptibles de ser descritos y agrupados en grupos de conducta (geotécnica) análoga y que dio pie a la creación de lugares de culto como nínfeos donde arrojar monedas y zonas de suministro de agua, tanto para el ganado como para los habitantes humanos a través de los numerosos pozos que se van descubriendo.

En los últimos años hemos vivido la progresiva recuperación de algunos de estos espacios históricos, no obstante, observando la figura 2.57, nos podemos hacer una idea de lo que podría depararnos la búsqueda por métodos geofísicos (por ejemplo, con georradar) de estos enclaves patrimoniales. Sin duda aparecerán más pozos y posiblemente lugares de culto. Nuestra interpretación de la presencia de abundante agua en el antiguo Palacio Real, luego de Capitanía y hoy Archivo General de Navarra, es que la marcada erraticidad observada en tan poco espacio físico responde a actuaciones humanas, sobre todo debidas a movimientos de agua subterráneos relacionados con pérdidas de las conducciones más recientes y también con la formación de charcos colgados localizados a diferentes profundidades entre el universo de rellenos históricos depositados a su suerte.

También se detectaron encharcamientos en zonas muy localizadas a profundidades variables debido a la acumulación natural y a que el trabajo se realizó después de lluvias, coincidiendo con la acumulación de la misma sobre los terrenos de Margas de Pamplona E1 más impermeables. Los niveles de agua medidos en los diferentes días que siguieron a los trabajos de campo realizados en 1997 pueden verse en la tabla VI. Las profundidades están referidas a la cota de inicio de cada sondeo dentro del solar de Capitanía (en metros) en aquel año y se localizan de sur a norte (figura 2.60), aquí el agua apareció en la zona más profunda (7,7-7,9 m).

En este caso, como apuntamos arriba, son las Margas de Pamplona E1 las que hicieron de nivel de base impermeable durante siglos, acumulándose el agua sobre las mismas una vez abierta una salida con los sondeos realizados en 1997. Este es un detalle que ha adquirido importancia sobre todo desde los años ochenta del siglo XX. Varias circunstancias históricas como el auge de la tecnología basada en el motor de combustión favoreciendo el acceso a zonas profundas, así como la generalización del uso del automóvil y la creación de aparcamientos subterráneos, llevaron a interceptar estos niveles de agua o charcos colgados que antes prácticamente no se atravesaron ni en edificación ni en obra pública, ni en la era de la estrategia militar, ni en la de las construcciones religiosas y hospitalarias.

Tabla VI

Sondeo	05-IX-1997	10-IX-1997	18-IX-1997	2-X-1997
(Sector norte)	7,70	7,90	7,84	7,68
(Zona central)	5,00	5,00	4,94	5,20
(Sector sur)	2,50	2,80	2,65	2,80
	Profundidades (m)			

Desde un punto de vista geotécnico, los niveles de relleno y materia orgánica de los primeros tramos sólo iban a afectar a las estructuras en cuanto a empujes sobre contenciones, ya que a finales del siglo XX cimentar sobre rellenos era una práctica totalmente erradicada del sector, como también apoyar en las antiguas cimentaciones. Precisamente el antiguo edificio de Capitanía presentaba potencias máximas de rellenos cercanas a los 7 m. Algunos de esos niveles eran muy recientes, como estratos de desechos, basuras y vertedero de animales que iban muriendo en épocas anteriores. Por lo tanto, en la era de la maquinaria potente y de bajo costo del gasoil, la propuesta fue evitar terrenos que se encontraban en proceso de consolidación.

Además, en algunos casos yacían sobre o con arcillas plásticas y acumulaciones históricas de agua que habían sido detectadas por geólogos y arqueólogos, la cota de cimentación se recomendó entonces en el nivel E1 de Margas de Pamplona (Nivel D en aquella investigación), saneando o atravesando en lo posible los niveles anteriores. La creación de sótanos favoreció la retirada de los rellenos históricos deteriorados tras recuperar las piezas más valiosas. Sin embargo, dada la erraticidad de los terrenos naturales de terraza en relación a las manipulaciones más superficiales y que el contacto con las Margas de Pamplona en estado sano no era neto, sino que se encontraba precedido por los rellenos cuaternarios comentados anteriormente y los primeros tramos centimétricos de marga algo alterados al haber sido una zona de movimiento de agua, propusimos que la cimentación apoyara en niveles sanos, sin tener en excesiva consideración el hecho de que había unos centímetros ligeramente afectados por fenómenos atmosféricos indirectos no sólo actualmente, sino en otras épocas antes de depositarse los niveles de sedimentos y rellenos.

El fenómeno de cambio de resistencia de las Margas de Pamplona en función de los rellenos cuaternarios que soportan era bien conocido, especialmente desde la publicación del mapa geotécnico para ordenación territorial y urbana de Pamplona (IGME, 1988). Los ensayos de resistencia a compresión de las probetas extraídas en el seno de la formación arrojaron valores de 99,8 - 135,2 kp/cm². Todas las excavaciones realizadas fueron estables durante las obras y en condiciones de poca humedad y una vez drenada la zona no se reportaron ni siquiera desprendimientos superficiales. Los rellenos artificiales y naturales con los niveles de gravas heterométricas P1 se mantuvieron estables debido a la cohesión que les proporciona la fracción de matriz arcillosa. Se tomaron medidas durante las obras para casos de encharcamientos de la excavación. Las Margas de Pamplona son estables en cortos intervalos de tiempo, dando fragmentación superficial y caída de bloques si permanecen en contacto con la atmósfera por intervalos de tiempo que pueden ser de meses, dependiendo de las condiciones atmosféricas, lo que se tuvo en cuenta a la hora de la realización de las excavaciones, limpieza y ejecución de cimentaciones. Ello propiciaba también que los empujes sobre contenciones se considerasen bajos y sólo en caso de masivas presencias de agua, éstos podrían ser preocupantes, se tomó en consideración en relación a la seguridad de los trabajadores; dada la no existencia de un nivel freático, sino de charcos colgados por lo que hemos comentado, los drenajes fueron sencillos a favor de la fuerte pendiente al norte, como se hizo antaño. La presencia de iones sulfato en las aguas interceptadas desde todos los frentes descritos, naturales, escapes, acumulaciones en charcos colgados o en el encuentro entre las terrazas cuaternarias y las Margas de Pamplona no fue significativa en todo el muestreo realizado a diferentes profundidades. Para la confección del nuevo material que formaría parte del apoyo del antiguo Palacio Real y de Capitanía: el moderno hormigón armado de las cimentaciones, no fue necesaria la utilización de cementos especiales.

La cimentación de las estructuras presentaba otro problema: el de la erraticidad, variabilidad, heterogeneidad y falta de consolidación de los materiales de relleno. Como se iba a ejecutar una excavación para disponer de sótano, las cimentaciones se apoyaron directamente sobre la formación rocosa de Margas de Pamplona E1. Por ello los módulos proyectados en la zona colindantes con la cuesta de la calle del 2 de mayo pudieron ser cimentados directamente sobre las Margas de Pamplona previa excavación en roca. El módulo más conflictivo del nuevo edificio para el nuevo Archivo General de Navarra fue el de servicios, situado en la zona norte cuya previsión de sótanos estaba a la cota -6,00 m, pues se encontraba directamente encima de la antigua vertiente y el substrato de apoyo presentaba un fuerte buzamiento hacia el norte (-5,30 en S-1 y - 10,50 en S-2).

El apoyo de parte de la estructura en roca indeformable y la otra parte en rellenos sin consolidar y sin una compactación adecuada, provocaría sin duda asientos diferenciales inadmisibles en zonas periféricas, incluso si se aligeraba la transmisión de cargas a base de cimentaciones mixtas de media y baja carga, como se conoce en estructuras cercanas en las que en un momento dado, en épocas históricas previas a la segunda mitad del siglo XX, se decidió realizar esta solución debido a la práctica inexistencia material o económica de potente maquinaria de combustión interna.

El fenómeno de deformaciones prolongadas en el tiempo debido a ciclos de humedad-sequedad en horizontes de arcillas y margas alteradas comenzó a ser incluido en las recomendaciones constructivas de Navarra en los dos años previos a esta actuación. Los fuertes cambios de humedad del terreno anteriores (1995 uno de los años más secos del siglo XX y 1996 uno de los más húmedos) pusieron de manifiesto la necesidad de tomarlo en cuenta tras el estudio de serias patologías, tanto en edificación como en obra civil. El antiguo edificio de Capitanía ya incluyó esas recomendaciones. Por ello se recomendó que el apoyo se realizase completamente en el nivel de Margas de Pamplona en estado sano E1, pudiendo acceder a ellas por medio de pozos pila de hormigón pobre o ciclópeo que era el lenguaje que se utilizaba en la época previa al Código Técnico de la Edificación (CTE).

A partir de los ensayos realizados y de los datos recogidos de zonas cercanas, así como la disposición que ofrecía el sistema fractográfico del macizo rocoso, la cimentación de los edificios pudo calcularse a partir de una tensión admisible del terreno menor de 8 kp/cm² siempre y cuando el apoyo de las cargas de la edificación se realizase sobre el substrato de Margas de Pamplona E1, no recomendándose hacerlo en ninguno de los niveles de rellenos ni de arcillas, ni gravas y arenas cuaternarias P1 que requerirían un estudio adicional de la deformabilidad y de la magnitud de los asientos que se pudiesen derivar si se diese una continuidad estructural de los diferentes módulos, como fue el caso.

2.11.3. El edificio del Paseo del Obispo Barbazán.

En el año 2003 la comunidad de copropietarios de la plaza San José Nº6, comenzó a preocuparse por su edificio de viviendas adyacente al conjunto catedralicio y a la misma la Catedral de Pamplona asomando a las antiguas murallas (Paseo del Obispo Barbazán) desde la cara norte del edificio histórico y sobre el acantilado este que asoma al río Arga. Mostraba asentamientos y grietas y pudimos testificar antiguas cimentaciones de edificaciones previas. Estamos situados precisamente en el núcleo inicial de la vieja Iruña. Destacaban desde el punto de vista geotécnico la existencia de antiguos vertederos y restos de sillería de diferentes épocas, en los que también encontramos restos cerámicos, de maderas, huesos y restos de actividad antrópica de las diferentes épocas descritas anteriormente, entre ellos los sillares de antiguas edificaciones romanas y medievales.

Figura 2.65. Situación del edificio de la calle San José Nº6 hacia el oeste y en el borde de las antiguas murallas (este) adherido a la parte norte de la catedral, Paseo del Obispo Barbazán.

La finca en el Paseo del Obispo Barbazán de Pamplona, donde se encuentra la parte más afectada del edificio, fue reconocida en colaboración con los vecinos, el Ayuntamiento de Pamplona y el arquitecto encargado de asesoramiento. Desde esa colaboración se planificó una campaña de reconocimiento geotécnico acorde con el conocido pasado histórico. La decisión final del estudio de las patologías observadas se tomaría descubriendo el subsuelo ejecutando dos sondeos a rotación con extracción continua de testigo y toma de muestras en zonas representativas (en la zona de la esquina oeste más afectada se ejecutó un sondeo oblicuo a 30º, ver figura 2.66) de la edificación, de esta manera se determinó y caracterizó la estrategia siguiente para acceder a una profundidad de aparición de un substrato geotécnico competente y observar cuáles son los terrenos involucrados en las deformaciones profundas.

Los sondeos alcanzaron 7,20 y 8,40 m coincidiendo con la aparición del nivel de roca del substrato eoceno de Margas de Pamplona E1, los ensayos de penetración estándar mostraron que previamente a dicho nivel se encuentra un potente nivel de relleno de más de 7 m. Se vio que estaba compuesto por arcillas, tierras removidas, restos de actividad orgánica y antrópica y hasta huesos, también restos de materiales cerámicos, maderas y restos de sillería romana o medieval.

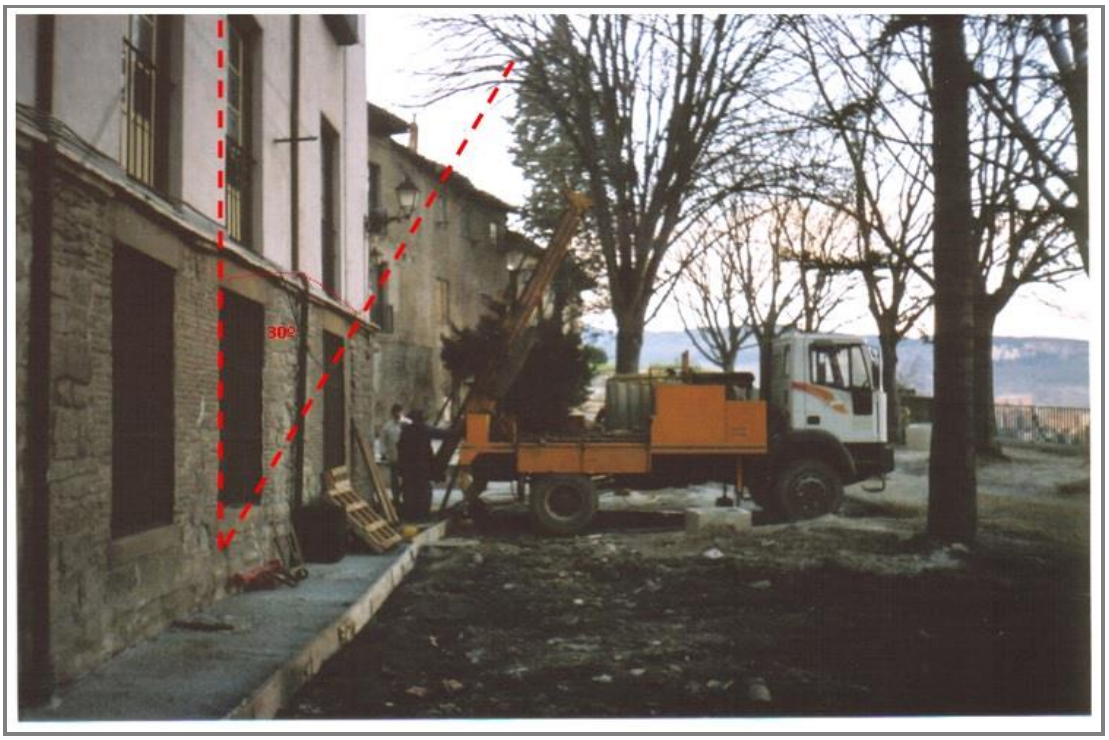


Figura 2.66. Sondeo a 30º realizado en la zona más afectada en el Paseo del Obispo Barbazán para interceptar el substrato de Margas de Pamplona y cotejar los datos de cimentación, arqueológicos y geotécnicos.

Todos los materiales han sufrido una fuerte degradación debida a filtraciones y a la evacuación de redes de drenaje artificiales durante los últimos siglos (bajo el edificio existe una mineta que vierte hacia la zona más baja de la calle), por ello, es difícil distinguir entre aquellos episodios depositados de forma natural y los que han sido depositados por la actividad humana, tanto por encima como por debajo unos de otros.

En vertical, los terrenos atravesados y los materiales que los componen son un nivel A inicial de trozos de roca, rellenos y préstamos traídos de otras zonas; se extienden desde prácticamente 0 m hasta entre 5 y algo más de 7 m en el caso más potente según nos acercamos al balcón sobre las murallas del Paseo del Obispo Barbazán (figura 2.67). Son rellenos heterogéneos erráticos formados a partir de excavaciones y movimientos de tierra de las obras que se llevaron a cabo, restos de cerámicas, restos de arcillas, de sillería, huesos, etc.

Bajo el edificio, a partir de los datos del sondeo inclinado 30º (figuras 2.66 y 2.67), encontramos varios niveles de sillería que corresponden a la cimentación del propio edificio y que, sin duda, dio soporte a otros anteriores, restos de rellenos de origen antrópico y restos de hormigón de un recalce que se ejecutó en 1986 en la esquina más afectada (ver figura 2.72).

Se detectaron los restos de ese hormigón desde el inicio hasta unos 4 m de profundidad. Otros restos de sillería se encuentran por debajo de esas cotas, posiblemente se trata de antiguas construcciones sobre las que se ha apoyado el edificio estudiado. Un segundo Nivel B de arcillas plásticas, consiste en arcillas provenientes de la descomposición de las margas y de la remoción y aporte gravitacional en lo que fue una ladera con vertiente hacia el este, existen trozos de grava como terraza y glacis, pueden conformar parte de una terraza que, en esta zona, precisamente por la pendiente natural que tuvo el terreno antes de los sucesivos amurallados, es muy poco potente. Aparecen estos terrenos entre 5,5 m y poco más de 6 m. A partir de esta cota los datos indican la aparición neta del nivel de Margas de Pamplona conformando una morfología en pendiente que conserva su caída en dirección a las murallas y acantilado.

Figura 2.67. El edificio estudiado en el Paseo del Obispo Barbazán se apoya en el encuentro entre las terrazas cuaternarias de gravas heterométricas en matriz limoarcillosa P1 (cascajo, kaskallueta) abundante en toda el área de la vieja Iruña (en color claro) y el acantilado de Margas de Pamplona E1. Las terrazas cuaternarias holocenas de características geotécnicas variables, típicas del casco antiguo, en esta zona fueron muy manipuladas e incluso sustituidas, la misma catedral se apoya sobre ellas, están prácticamente ausentes bajo el edificio estudiado, fueron sustituidas por rellenos variados en el trasdós de las antiguas murallas. No obstante, parte de los rellenos encontrados en esta zona contienen los restos de estas terrazas preexistentes.

En su momento detectamos la presencia de agua, también zonas más saturadas a diferentes profundidades. Pero estos niveles parecen tener relación con los materiales que componen las arcillas y los sedimentos que se engloban en los niveles de relleno y no dejarían de catalogarse como meros charcos colgados de la misma naturaleza que los descritos en el antiguo Palacio Real, también aguas de infiltración de tuberías, fecales, pérdidas de la mineta, antiguos cursos de agua y conducciones que quedaron en desuso, etc.

Aquí toda la actividad hídrica está relacionada con la fuerte pendiente existente y con la naturaleza del substrato impermeable eoceno E1, es decir, cuando se han dado fuertes lluvias, entre los huecos del terreno y los antiguos sillares se desarrolla un rápido drenaje, la fuerte pendiente y los canales de evacuación son favorables para ello. En aquellas investigaciones se dejaron tuberías piezométricas y en diferentes ocasiones se ha medido el nivel de agua que oscila entre los 6,80-7,00 m coincidiendo con el substrato de Margas de Pamplona E1. Este dato es importante puesto que se trata de una constante que se observa en toda construcción, infraestructura o modificación y puede provocar diferentes situaciones de inestabilidad, tanto en laderas como en terraplenados e incluso cimentaciones, es también similar al detectado en el cercano Palacio Real o Archivo General de Navarra en la vertiente de la zona norte.

Los materiales iniciales encontrados tanto en el sondeo inclinado como en el vertical, aunque de varias naturalezas y con distribución heterogénea, son todos ellos rellenos provenientes de la actividad humana en la zona; si hoy se hubiera realizado este estudio previo a la construcción del edificio, habrían sido desechados como terreno de apoyo de cualquier carga de una edificación moderna, por ejemplo, bajo las directrices del Código Técnico de la Edificación (CTE, 2006). Realizamos ensayos de laboratorio, de clasificación y mecánicos a una parte de las zonas granulares y también moderadamente cohesivas de estos rellenos iniciales que aún sustentan al edificio, mostrando que el grado de consolidación histórico habría alcanzado niveles importantes bajo la edificación, pero no asegurarían su estabilidad desde criterios geotécnicos modernos.

La naturaleza heterogénea del terreno y toda la evolución histórica reflejó una cierta disparidad de resultados (lo cual es también una buena información). Se debe a la convivencia de tipos de terrenos muy diferentes en relativamente poco espacio. En algunos casos, la manipulación de la muestra para poder ser ensayada ha consistido en retirar trozos de cerámica, carbonilla o piedras y maderas inmersas en el testigo. No obstante, los datos indican una notable heterogeneidad, como es de esperar al hacer geotecnia en lugares de marcado carácter histórico, lo cual, atendiendo precisamente a ese aspecto puramente geotécnico, no es poca información.

En la siguiente fotografía (figura 2.68) puede verse una maniobra de intento de extracción de muestra que se perdió debido a la dificultad de hacer esas labores entre sillares, huecos, hormigón inyectado décadas atrás *"para evitar asientos"* (sic) y varios materiales de relleno. El material de apoyo carecía de un conglomerante resistente, los trozos de roca del cimiento que aún sustenta el edificio no resistían la acción de las coronas.

Figura 2.68. Una maniobra fallida de extracción de cimiento compacto con sonda inclinada 30º.

La disposición del macizo rocoso de Margas de Pamplona E1 presentaba un claro buzamiento en dirección a las murallas y al acantilado (al fondo de la imagen 2.68 y a la izquierda de la 2.69), coincidiendo con la caída natural que tuvo la ladera antes de la construcción de los sucesivos amurallados y de rellenos del trasdós. Como se puede ver en las fotos y figuras, existe un desnivel vertical en la superficie de roca bajo el edificio de unos 2 m en solo 4 m de avance horizontal, además los rellenos antrópicos descansan directamente sobre la roca, de forma que la capa previa de alteración está ausente o es muy escasa, asimismo faltan los restos de terraza holocena P1 que suele aparecer en esta zona de la vieja Iruña, por lo que si nos aventuramos a afirmar que hubo labores de excavación antes de los rellenos de diferentes épocas históricas no estaremos muy alejados de la realidad.

No se ha podido comprobar si la parte delantera (oeste) del edificio, hacia la plaza de San José, apoya directamente en la roca o lo hace sobre las terrazas como la Catedral, pero esto último parece más que probable, como en todo el conjunto catedralicio. También se corrobora la inexistencia de deformaciones en la parte delantera del mismo.

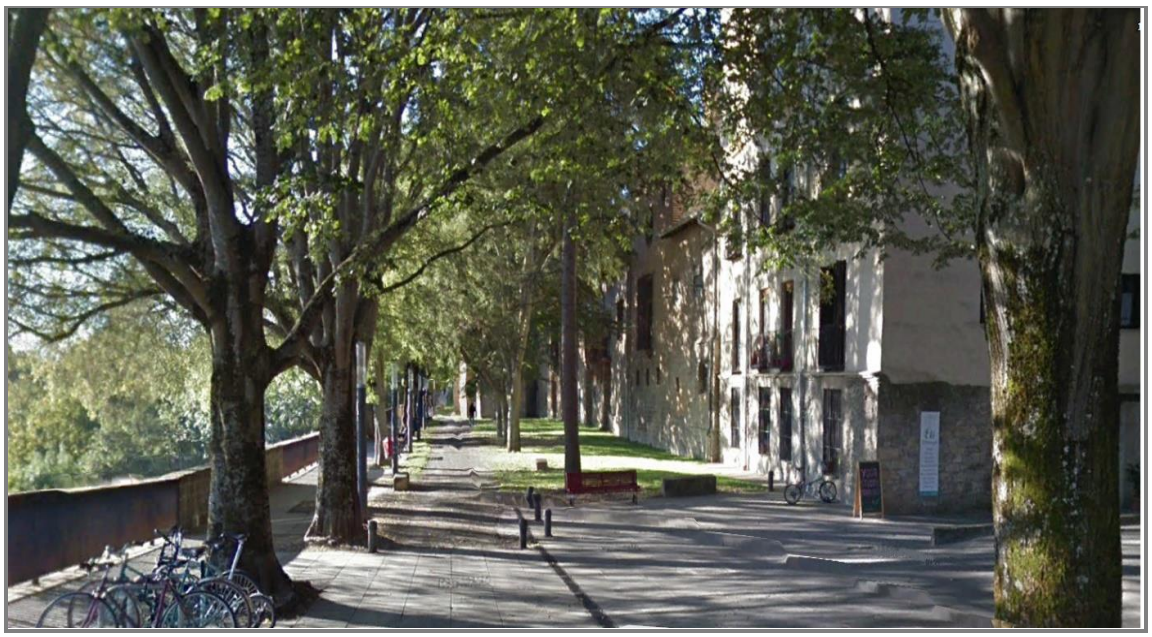


Figura 2.69. Paseo del Obispo Barbazán en mayo de 2021. A la derecha la esquina oeste donde se hizo el sondeo inclinado a 30º.

El edificio se encuentra —al igual que el Palacio Real, de Capitanía o Archivo General de Navarra— en el límite geomorfológico, geológico y geotécnico de la meseta que propició el desarrollo de Pamplona. La cimentación del edificio es la sillería que apoya en la parte delantera oeste (Plaza de San José) en un terreno bastante más homogéneo y que no ha sufrido deformaciones: probablemente las terrazas cuaternarias P1. Sin embargo, como hemos comprobado, la parte estudiada del edificio (este) que ha sufrido asientos por deformación, apoya sobre varios tipos de rellenos, todos ellos de origen antrópico y relacionados con la historia de expansión del núcleo inicial prehistórico de Pamplona hasta su límite físico.

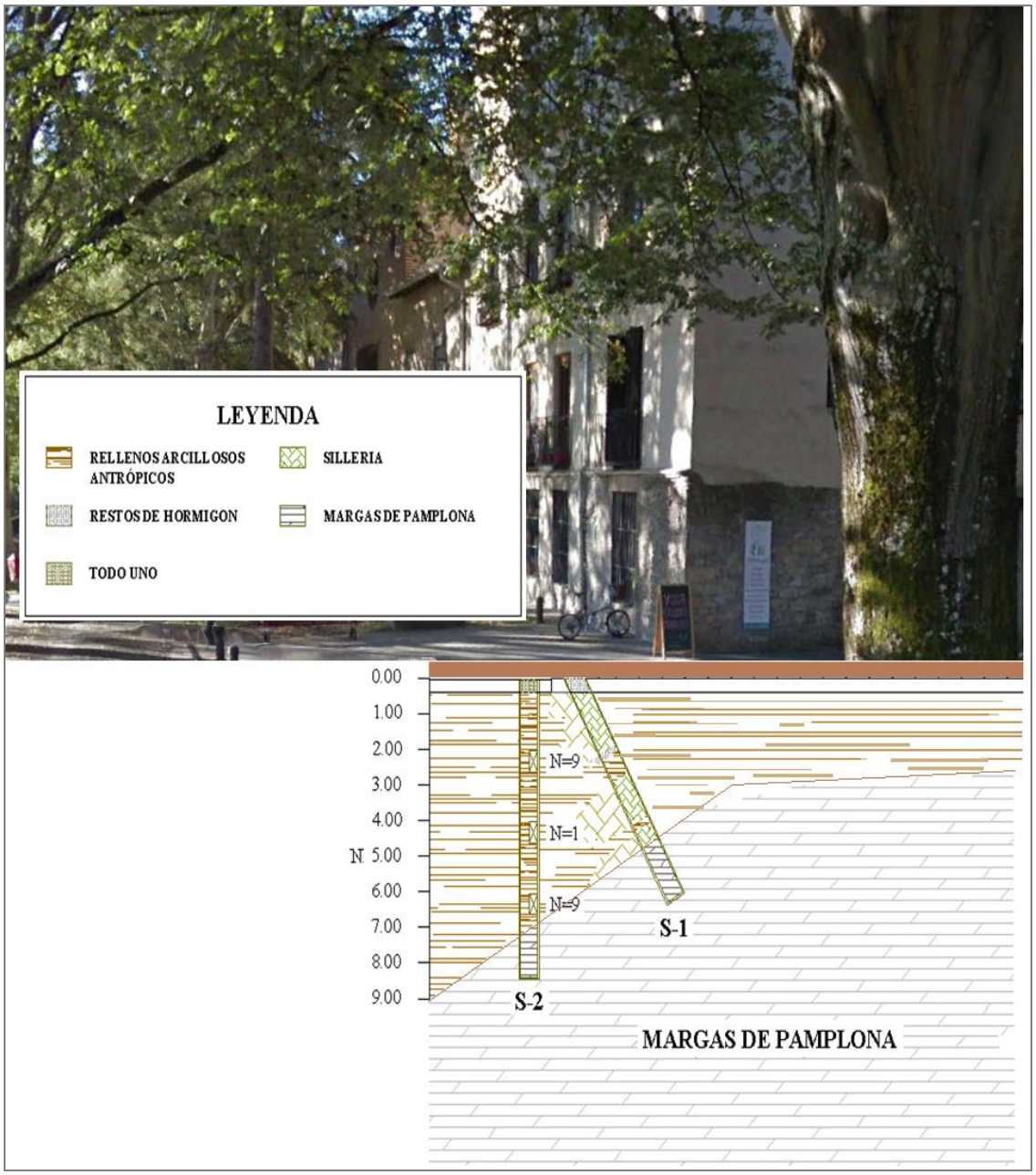


Figura 2.70. Croquis mostrando la disposición de los materiales bajo el edificio del Paseo del Obispo Barbazán.

El asiento producido por estos rellenos proviene del problema de la erraticidad, variabilidad, heterogeneidad y falta de consolidación de los materiales iniciales ante las cargas impuestas en las últimas décadas por la modernidad, especialmente la ampliación en vertical de la vieja Iruña, el edificio del paseo es un buen ejemplo de cómo Pamplona creció en vertical[4] con plantas añadidas, nuevos materiales, la revolución de los electrodomésticos, nuevas conducciones, etc.

Parte de la sillería encontrada a cotas profundas, a unos 4-5 m, pertenece a otras edificaciones anteriores a la estudiada y es posible que se trate de alguna zona relacionada con un antiguo cementerio o una zona de retirada de cadáveres de animales o desechos de la actividad social a juzgar por la cantidad de huesos encontrados; en cualquier caso, son este tipo de materiales y sillerías de varias épocas los que soportan el peso del edificio en la zona estudiada, bien porque se aprovecharon muros o estructuras previas, bien porque se construyó después de su derribo sobre antiguos cimientos.

En cuanto a la aparición de deformaciones, éstas han venido acompañando la historia del edificio desde su construcción; a partir de los datos obtenidos del terreno concluimos con tres tipos de asientos que se han manifestado superpuestos a lo largo de la vida del edificio: en primer lugar se han dado episodios más llamativos que han podido coincidir con momentos de más carga, tales como la ampliación de plantas y por lo tanto más peso, a ello se suma la introducción progresiva en el edificio de mayores cargas debidas a los nuevos hábitos de vida: lavadoras, frigoríficos, cambios en baldosas, cocinas, etc.

---

[4] Pamplona no salió de las murallas hasta los albores del siglo XX. Por eso llama la atención que una ciudad histórica muestre edificios de tantas alturas. Es por ello que las cargas geotécnicas pensadas para épocas pretéritas comenzaron a ser excesivas con la entrada de la modernidad y el añadido de más plantas. Fue el 22 de agosto de 1888 cuando se aprobó el Primer Ensanche. Se abría la ciudadela perdiendo el baluarte de la Victoria y San Antón, los revellines de Santa Teresa y Santa Lucía. Los científicos, algunos urbanistas y los primeros naturalistas de la época argumentaban que las murallas provocaban malas condiciones de salubridad con elevada mortandad por exceso de población intramuros. Nunca se olvidaron en la vieja Iruña los siglos de las pandemias. La apertura fue celebrada con clarines, gigantes, música y dulzainas. En 1894, el consistorio pamplonés comenzó a tramitar la derogación de las zonas donde estaba restringida la construcción. Pamplona iniciaba el siglo XX con la esperanza de una expansión urbanística horizontal tras siglos de haber vivido encorsetada. En 1901 se autoriza el derribo de las murallas para la construcción del ensanche hacia el sur a costa de un nuevo recinto de seguridad más amplio. El 6 de abril de 1969 el Casco Antiguo de Pamplona fue declarado Conjunto Histórico-Artístico.

2.11.3.1. Deformación del terreno al reformar y ampliar edificios históricos en vertical.

Todo lo expuesto conlleva un incremento en las cargas según avanzaba el siglo XIX, XX y XXI con el consiguiente asiento de tipo plástico por consolidación. El coeficiente de consolidación en una zona cohesiva a 6,60 m de profundidad con LL / IP = 35,5 / 9,4 es de Cc = 0,256 lo que corresponde a un terreno de compresibilidad media. Los arquitectos colaboradores nos facilitaron los cálculos de las cargas del edificio cuando comenzó a plantearse el estudio tras la expansión de patrologías, indicando que ahora, la presión ejercida en el terreno por el edificio se encontraría en el entorno de los 4 kp/cm².

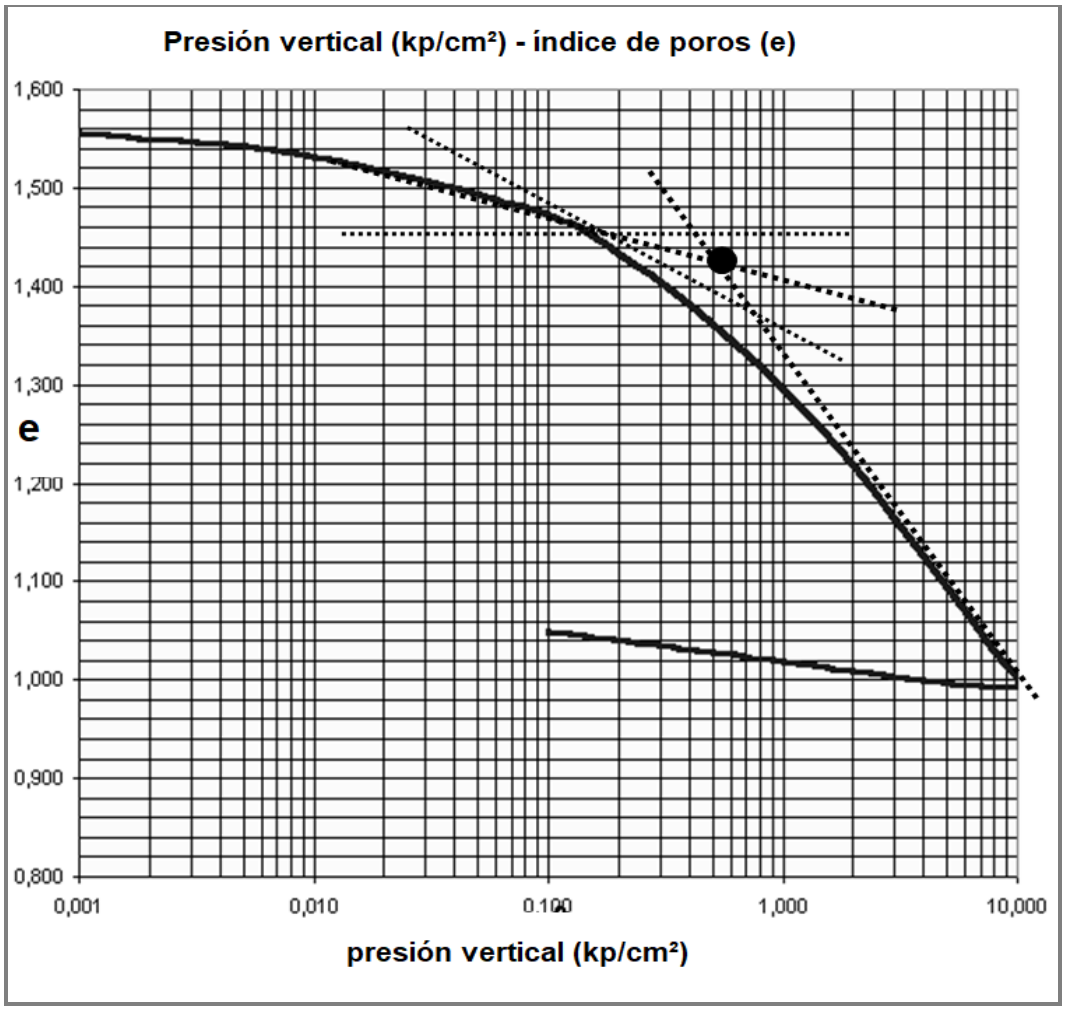


Figura 2.71. Gráfica de consolidación unidimensional para una muestra arcillosa tomada a 6,60 m de profundidad en el perímetro del edificio del Paseo del Obispo Barbazán. *"Geotecnia. Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro (UNE 103405:1994)".* Se puede ver que la presión de preconsolidación estaría en el entorno de los 0,5 kp/cm². Sin embargo, el terreno natural que tiene por encima ejerce una presión del doble sobre esa profundidad. En este caso, sabemos, por tanto, que el terreno más plástico que recibe cargas naturales y de edificación se encuentra en proceso de consolidación.

La muestra sometida a un ensayo de consolidación (figura 2.71) está tomada a 6,60 m de profundidad, lo que significa que con un peso específico de 1,72 gr/cm³ soporta una carga aproximada de 1 kp/cm² de forma natural. Sin embargo, si dirigimos nuestra mirada a la presión de preconsolidación que podemos inferir del ensayo edométrico, aunque no es de una fiabilidad extrema por lo comentado sobre la irregular calidad de las muestras, rondaría los 0,5 kp/cm² como se puede observar en la figura 2.71 del ensayo de consolidación unidimensional que se pudo realizar en ese nivel arcilloso.

Todo esto significa que el terreno aún estaría en proceso de consolidación adecuándose a las cargas impuestas cerrando sus poros, y aunque las muestras son muy heterogéneas e irregulares, es bastante probable que se produzcan más asientos de este tipo en el futuro si continúan las condiciones actuales. Podemos aventurarnos a cuantificar que aún le quedaban al terreno unos 5 mm por asentar debido al peso de todos los rellenos comentados.

Además, una vez que se consiguiese alcanzar en los años venideros un índice de poros acorde con la presión que el terreno soporta bajo la cimentación, aún quedarían del orden de otros 10 mm por asentar para alcanzar el equilibrio final con una carga adicional de 4 kp/cm². Es muy difícil apuntar en cuánto tiempo podría concluir el proceso debido a lo comentado sobre las muestras, pero hablar de varias décadas no es demasiado arriesgado para que el edificio asiente todavía entre 1 y 1,5 cm solo por asientos plásticos y de consolidación.

Es obvio que todo lo descrito anteriormente vendrá determinado por las condiciones climáticas e hidrológicas, además de depender de si se realizan nuevas obras en la zona en el futuro. Sin embargo, aunque pequemos de "actualismo" y cierta inexactitud, al extrapolar las condiciones estudiadas en 2003 proyectándolas hacia un futuro más o menos lejano, era ilustrativo el dar unos valores orientativos sobre lo que podría pasar si no se actuaba y si no se daban colapsos localizados en momentos de vibraciones fuertes, impactos sísmicos, etc., algo que por lo observado parecía difícil y hasta el momento no se ha producido.

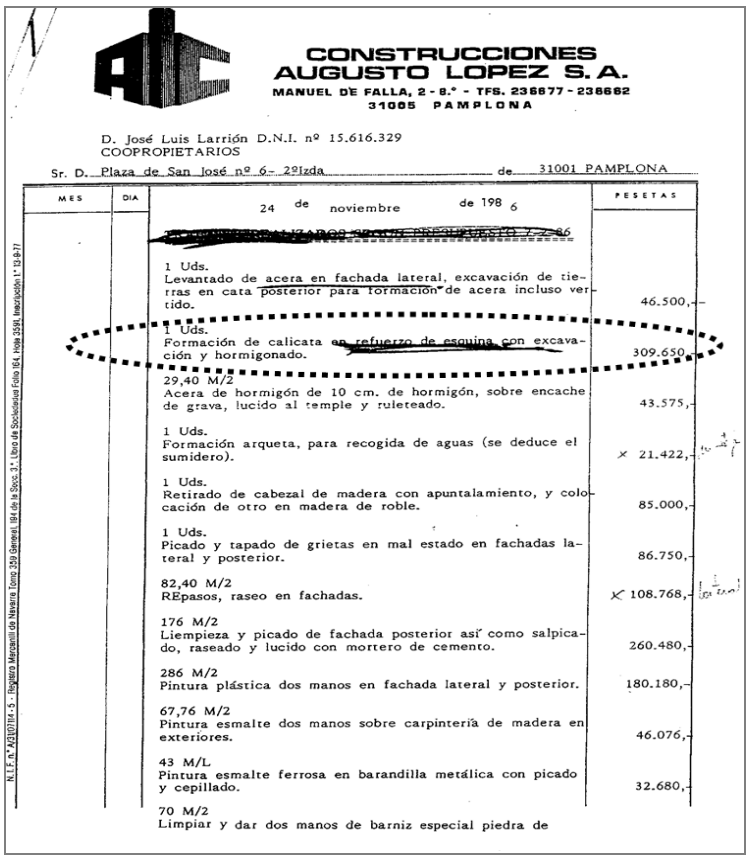
Visitamos la zona pasados unos días tras el terremoto M4,2 (intensidad V-VI) del 10 de marzo de 2017 con aceleración básica medida en el acelerógrafo de Pamplona ab=0,16g y no se vieron efectos de ningún tipo en los testigos que dejamos. Con la crisis sísmica de 2020-21 tras la madrugada del 1 de octubre de 2020 con varios impactos M4,6 (intensidad V) M4,4 (intensidad IV-V), M4,1 (intensidad IV-V) y hasta más de 80 eventos sentidos por la población volvimos a comprobar que no se habían producido avances en la fisuración de 2003.

Por lo tanto, el segundo tipo de asiento por colapso que se pudiese dar en el futuro es, si cabe, mucho más difícil de predecir.

A lo comentado sobre la consolidación, se suman también momentos de fuerte actividad hídrica y de influencia de maquinaria de obra con lavados selectivos del terreno y colapsos localizados, tanto por pérdida de cohesión temporal debida a incrementos de humedad y lavado del terreno como a colapsos por vibraciones como las sucedidas al reurbanizar y modernizar las acometidas y conducciones (ver el caso de la calle Mañueta); este segundo tipo de deformación se pudo corroborar con un seguimiento por parte de los vecinos y técnicos que estudiamos la evolución del edificio, observando los testigos dejados en la fachada. Dichos testigos se mantuvieron intactos durante más de medio año, una vez pasado el invierno de 2003. Una lluviosa primavera coincidiendo con el movimiento de maquinaria de urbanización de la zona supuso la observación de nuevas fisuras en dichos testigos, antes de los impactos de los terremotos de Lizoáin y Nagore de otoño de 2004 M4,5 y M4,0 (intensidad V-VI). Estos eventos sísmicos inducidos por el primer llenado de Itoiz parece que tampoco dejaron huella. Sin embargo, además de las deformaciones del tipo plástico por consolidación (que tienen un final cada vez que se estabiliza el peso y se equilibra y reajusta el índice de poros del terreno, figura 2.71), existe esta tercera familia de deformaciones repentinas derivadas de factores externos. Se investigó el valor del coeficiente de colapso en una zona limosa y arcillosa a 6,70 m de profundidad con algo de arena, tratando de conservar un peso específico de *1,72 g/cm³*, el resultado fue de *Ic = 0,46 %*. Se trata de un valor bastante respetable para una zona con tanta arcilla, es probable que este valor sea más elevado en las zonas de rellenos granulares con lavados selectivos, allí donde los finos hayan sido retirados de la estructura íntima del terreno.

En cualquier caso, arriesgándonos a cuantificar el proceso, bajo el edificio estudiado, considerando un colapso de esa magnitud en 1,5 m de espesor, desde el final de la última sillería a unos 5 m, y como media hasta los 6,5 m donde el terreno es incompresible y no colapsable, en la zona media de la esquina más desfavorable, añadimos otros 7 mm de asiento por esta causa. El total del asiento que se podría esperar por los tres procesos descritos de *consolidación, asiento plástico y colapso localizado* llegaría a ser del orden de 2 cm si se diesen todos juntos, lo cual parece improbable. En este análisis quedó descartado el asiento por retracción e hinchamiento del terreno, lo investigamos en el subsuelo del edificio de del Paseo del Obispo Barbazán a unos 2 m de profundidad, que es el límite de la profundidad crítica para este proceso, además contamos con muchos datos de zonas cercanas. Es bien conocido en la comarca de Pamplona. Rellenos naturales arcillosos provenientes de la alteración de los sustratos margosos mantienen la capacidad de intercambio de moléculas de agua dependiendo de las condiciones meteorológicas en niveles por encima de la capa pasiva a unos 3 m de profundidad. Sobre los materiales, como los estudiados en este edificio adyacente a la Catedral de Pamplona con cimentaciones antiguas apoyando con cargas cercanas a los 4 kp/cm² a las profundidades observadas, no cabe esperar este tipo de deformaciones.

Los ensayos de hinchamiento potencial en aparato Lambe dan resultados demasiado bajos (I.Exp.=0,037 MPa) para considerar que este fenómeno haya contribuido siquiera en un mínimo porcentaje al problema manifestado únicamente por ese edificio. Lo que sí se pudo afirmar es que las patologías observadas no parecen estar en relación alguna con la supuesta juventud o madurez de este edificio sino con apoyos diferenciales en terrenos geotécnicamente deficientes y heterogéneos sometidos cada vez más cargas con el avance de la historia. Se conoce un intento de frenar el avance de las deformaciones durante el siglo XX, concretamente los vecinos nos facilitaron un documento de 1986 en que ese intento de atajar el problema, que venía de años antes, ya era considerado en esa época. Los arreglos generales realizados al edificio vienen desglosados en una factura emitida por Construcciones Augusto López S.A. (figura 2.72); véase que, junto con una serie de reparaciones y arreglos realizados al edificio, encontramos una partida con una calicata de refuerzo en la esquina que se rellenó de hormigón, el coste de la operación ascendió a 309.650 pesetas de aquel año que, contando con la inflación según los datos de la OCDE para España, corresponderían a unos 6.000 € de hoy. Ese hormigón es el que se ha encontrado en los sondeos bajo el edificio.



CONSTRUCCIONES
AUGUSTO LOPEZ S. A.
MANUEL DE FALLA, 2 - 8.° - TFS. 236677 - 238662
31005 PAMPLONA

D. José Luis Larrión D.N.I. nº 15.616.329
COOPROPIETARIOS
Sr. D. Plaza de San José nº 6 - 2ºIzda. de 31001 PAMPLONA

MES	DIA	24 de noviembre de 198 6	PESETAS
		1 Uds. Levantado de acera en fachada lateral, excavación de tierras en cata posterior para formación de acera incluso vertido.	46.500,-
		1 Uds. Formación de calicata en refuerzo de esquina con excavación y hormigonado.	309.650,-
		29,40 M/2 Acera de hormigón de 10 cm. de hormigón, sobre encache de grava, lucido al temple y ruleteado.	43.575,-
		1 Uds. Formación arqueta, para recogida de aguas (se deduce el sumidero).	21.422,-
		1 Uds. Retirado de cabezal de madera con apuntalamiento, y colocación de otro en madera de roble.	85.000,-
		1 Uds. Picado y tapado de grietas en mal estado en fachadas lateral y posterior.	86.750,-
		82,40 M/2 REpasos, raseo en fachadas.	108.768,-
		176 M/2 Liempieza y picado de fachada posterior así como salpicado, raseado y lucido con mortero de cemento.	260.480,-
		286 M/2 Pintura plástica dos manos en fachada lateral y posterior.	180.180,-
		67,76 M/2 Pintura esmalte dos manos sobre carpintería de madera en exteriores.	46.076,-
		43 M/L Pintura esmalte ferrosa en barandilla metálica con picado y cepillado.	32.680,-
		70 M/2 Limpiar y dar dos manos de barniz especial piedra de	

N.I.F. N.º A/31010114 - S - Registro Mercantil de Navarra Tomo 259 General, libro de la Socs. 3.º - libro de Sociedades Folio 164, Hoja 2636, Inscripción 1.ª 13-8-77

Figura 2.72. Documento acreditativo de un intento de recalce en la esquina más afectada en 1986.

Tenemos que dar las gracias al aparejador que participó en las obras en esa época, nos ha dado una imagen bastante clara de qué es lo que, a la sazón, se hizo para evitar el deterioro progresivo en lo que a avance de grietas se refiere. La esquina afectada, muy bien detectada por las personas vinculadas a la constructora, fue excavada y rellenada de hormigón en masa a unos 3 m a cada lado de dicha esquina y hasta unos 4 m de profundidad, cota en la que se detectan los últimos restos de aquel hormigón. Este tipo de operaciones se realizó en la vieja Iruña en más ocasiones a finales del siglo XX, pero es muy difícil conformar un catálogo de ellas en la ciudad.

El objetivo era una especie de recalce que trabajara por rozamiento y mejorase el terreno de apoyo; esto fue conseguido en parte, pero además se rellenaron algunos de los huecos preexistentes o lavados por el agua previos a la inclusión de este hormigón. Sin embargo, este arreglo no solucionó el problema definitivamente y por eso se nos encargó esta investigación. Cierto es que la mejora parcial del terreno de las inmediaciones de la cimentación mejoró sensiblemente y amortiguó durante un tiempo el avance de las deformaciones, pero no todos los huecos fueron rellenados, además de no haber llegado hasta un nivel de apoyo homogéneo, a unos 5-7 m de profundidad.

Otros huecos han podido evolucionar posteriormente debido a nuevas condiciones hídricas, es decir, algunos de los espacios o huecos que eran lavados o afectados por el agua antes de echar el hormigón fueron neutralizados, pero a partir de la nueva configuración subterránea de la distribución de permeabilidades, se formaron otros que han seguido su propia evolución de microcolapsos después de ser lavados.

Detectado el problema, dimos una serie de recomendaciones sobre las actuaciones a seguir. Como se ha visto en nuestra exposición, el problema estudiado sobre todo en la esquina más sobresaliente de la trasera del edificio, viene de asientos del terreno debidos al apoyo de parte del mismo sobre rellenos inestables y heterogéneos, asientos tanto de tipo plástico y de consolidación como asientos por colapso de huecos preexistentes y lavados por el agua. Existen varios métodos para que el apoyo del peso del edificio pueda llevarse a las Margas de Pamplona E1 como se hizo en edificios de la calle Mañueta o en el solar del antiguo Palacio de Capitanía entre unos 5 y 7 m de profundidad.

Las inyecciones tradicionales, así como las de alta presión (por ejemplo, de jet grouting), tienen como objetivo la consolidación del terreno y la cohesión de todo el material heterogéneo, como una especie de suelo cemento, convirtiendo todo el conjunto bajo el edifico en una hilera de pilotes de baja resistencia (20-50 kp/cm^2), desde la profundidad de empotramiento hasta la zona a recalzar en sentido ascendente. El problema que le vimos a estos métodos es que, al existir antiguos sillares dispersos, las columnas de suelo cemento podrían perder continuidad con cierta facilidad.

Además, el régimen hídrico subterráneo sería afectado nuevamente, pero esta vez mucho más que con las intervenciones anteriores, así el agua de infiltración debería buscar nuevos canales de desagüe que podrían afectar a edificios colindantes, tampoco descartaríamos la posibilidad de que se pudiese dar un efecto "presa" bajo algunas zonas del edificio que pudiera tener consecuencias que se nos escapan. Por ello, dada la geometría de aparición del macizo rocoso, la inexistencia de actividad kárstica en la formación de Margas de Pamplona y la distribución heterogénea de rellenos, hormigón y sillares, la solución de recalce por micropilotes se vio como adecuada. Un recalce profundo por medio de pilotes tradicionales tanto ejecutados "in situ" como prefabricados apoyados en las margas sería costosa, difícil de ejecutar dadas las dimensiones del solar y del sótano (existen zonas con margen de maniobrabilidad de un par de metros de altura o de menos de 5 m de espacio), no obstante, una solución por medio de micropilotes evita este inconveniente, la maquinaria es mucho menos voluminosa, más manejable y menos perturbadora.

Este caso tiene la ventaja de evitar las deformaciones inducidas a edificaciones contiguas, se evita el apoyo sobre los materiales deformables y todos los anteriores inconvenientes, ya que todo el micropilote apoya y se empotra sobre el macizo rocoso. Se suministraron valores orientativos de la resistencia en toneladas de un micropilote que apoyase en el macizo sano a partir de 8,5 m en el que se consideraron tanto la resistencia por punta como la resistencia de fuste de la zona de roca y rellenos, y aunque el terreno no parece estar consolidado, no consideramos a la sazón (en los alrededores de la Catedral de Pamplona) con estos empotramientos, un hipotético rozamiento negativo (tabla VII). Los micropilotes se ejecutarían en hileras tanto interiores como exteriores y se dispondría de un encepado entre parejas de micropilotes a la manera habitual, no obstante, deberá realizarse por parte de un arquitecto o ingeniero un proyecto de recalce acorde con las cargas que se prevean transmitir al macizo rocoso.

Tabla VII

Diámetro del micropilote	130 mm	150 mm	170 mm	Longitud del micropilote (m)
2 m empotrado en roca	24	28	33	10.5
3 m empotrado en roca	34	40	46	11.5
4 m empotrado en roca	44	52	60	12.5
5 m empotrado en roca	55	64	73	13.5

2.11.4. Conclusiones y lecciones aprendidas al borde de las murallas

Después de haber revisado parte de la estructura del edificio, tanto en la zona del sótano como en el exterior, se pudo comprobar la existencia de elementos estructurales de madera conviviendo con otros de hormigón y también metálicos (ver figura 2.72), de esta forma se ha corroborado que la heterogeneidad manifiesta del subsuelo se despliega también en sentido ascendente por todo el edificio, algo que es bastante común y endémico de los edificios de la vieja Iruña. Lo hemos visto en casos anteriores y probablemente vuelva a la luz, por lo que el estudio estructural de este tipo de edificaciones, que han recorrido siglos, debe ser contrastado con la realidad del terreno que los sustenta. Haremos hincapié en este aspecto en la sexta y séptima parte, puesto que existen leyes en otras comunidades autónomas que contemplan catálogos inmobiliarios con inspección técnica de edificios, tales como el *Decreto 241/2012 del País Vasco.*

Apoyados en su mayoría sobre cimientos preexistentes, directamente sobre rellenos removidos o las terrazas cuaternarias P1 situadas sobre las Margas de Pamplona E1, o varias de esas circunstancias, o todas a la vez, la resistencia de la ciudad a salir del entorno amurallado mientras crecía la población y se modernizaba la vida llevó a un aumento de la altura de los edificios, al añadido de nuevas formas constructivas conviviendo con las más antiguas aún en pie, a la introducción de nuevos materiales, instalaciones, modas y tecnologías. Todo esto trajo con la modernidad el aumento del peso y las cargas sobre el terreno en condiciones pensadas para otras épocas y usos.

Las nuevas tecnologías de refuerzo, los recalces, también vinieron con los nuevos modos de vida y acabaron concediendo un papel protagonista a la formación de Margas de Pamplona en edificios históricos que, hasta épocas más o menos recientes, no tenían relación con ellas. Sin embargo, a finales del siglo XIX y sobre todo a mediados del XX, Pamplona se vio obligada a crecer en horizontal, algo que pudo hacer, entre otras cosas, gracias a la aparición de una nueva tecnología que revolucionó la edificación, la obra pública y la ingeniería civil no solo en Navarra, sino en todo el planeta, hablamos del hormigón armado.

2.12. Pamplona a punto de salir de las murallas.

Como acabamos de ver, durante buena parte de la historia de la ciudad de Pamplona, la formación eocena E1 de margas jugó un papel secundario como elemento de uso geotécnico en el proceso constructivo, debido, sobre todo, a las características geotécnicas favorables de las terrazas cuaternarias que sustenta, su baja compresibilidad y el moderado desarrollo vertical de éstas. Pamplona seguía dentro de las murallas y comenzaba a interactuar con sus límites físicos.

Hemos comprobado que, incluso en los casos de edificaciones más pesadas como pudo ser la Catedral u otras iglesias de mampostería, no se llegó nunca a bulbos de presión con deformaciones peligrosas, eran en muchas ocasiones las propias margas, aun sin aflorar, las que suponían su neutralización. Con valores de espesor entre 2 y 7 m, las terrazas cuaternarias en el casco histórico, pudieron soportar los bulbos de presión de cimentaciones corridas de ancho B, que alcanzarían profundidades de entre 2B y 2,5B por lo que existen perfiles de cimentaciones de hasta 2 m cuya influencia vertical teórica a más de 4 m ni siquiera existió. El encuentro entre las terrazas P1 y las margas eocenas E1 es, en la mayor parte de las observaciones, un encuentro casi neto.

Realmente tampoco se puede hablar —desde la perspectiva histórica— de una incorporación gradual en el proceso constructivo de la importancia arquitectónica o protagonismo de las margas. Más bien se trata de una irrupción, casi una imposición, hasta que en épocas contemporáneas se convierte prácticamente en el terreno con el que hay que contar para todo: cargas, excavaciones, concavidades, préstamos, etc. Y este fenómeno se produce tanto en las nuevas edificaciones como en aquellas de carácter histórico que van a sufrir una transformación hacia nuevos usos, bien sea de manera forzada, como hemos visto en el caso del edificio del Paseo del Obispo Barbazán o en otros casos, como el convento de la Visitación de María conocido como Salesas, debido a un cambio exigido por la sociedad a la que sirve. En este caso, un antiguo convento se transforma en un edificio administrativo que albergará la futura sede de la Mancomunidad, aguas, residuos, transporte, atención ciudadana, etc. Pamplona, con su aspiración de ser una ciudad saludable, había comenzado a salir tímidamente de las murallas tras las persistentes pandemias, construyendo edificios religiosos y terapéuticos para paliarlas. En el siglo XIX era un clamor popular, algunos urbanistas hablaban de una *olla a presión* y ciertos edificios nuevos encontraron lugares casi fuera de ellas, tanto de nueva construcción como rehabilitando y ampliando los que ya habían dado el paso en épocas anteriores. Esa tendencia continuó en el siglo XX y su inercia perdura. Si hay algo saludable es una buena gestión del agua y los desechos. La Mancomunidad de la Comarca de Pamplona se preparó para unificar los servicios a la ciudadanía de una urbe del siglo XXI que sigue queriendo ser saludable y decidió apostar por un futuro más sostenible.

2.13. Una rehabilitación histórica: el convento de Salesas.

Resumen: el convento de Salesas es uno de los edificios más emblemáticos del casco histórico de Pamplona. Se ubica en el extremo SO del Burgo de San Cernin, entre la calle San Francisco y el Rincón de la Aduana con unos 3.000 m². Desde el siglo XI este solar ha albergado edificaciones de importancia en la historia de Pamplona: la Aduana o Tabacalera, los huertos del parcelario medieval, una parte del complejo de la Torre del Rey, los palacios de Cruzat y del Barón y virrey de Armendáriz, la Casa del Reino donde se reunía la diputación y alguno más. La actividad geotécnica en este tipo de edificios que ha sido tantas cosas queda muy limitada por accesos y superposiciones constructivas, por lo que veremos lo adecuado de encontrar soluciones analíticas desde datos sencillos para garantizar la seguridad estructural que comienza en el terreno de apoyo.

Ficha técnica de Salesas:

- Conjunto palaciego y conventual de unos 3000 m² y hasta cuatro plantas con iglesia, sucesivos derribos parciales y reconstrucciones.
- Cimentado sobre gravas heterométricas P1, las Margas de Pamplona E1 aparecen entre 2,5 y 5 m de profundidad.
- Se apoya con diferentes anchos de cimentación de mampostería a diferentes profundidades. Existe un claustro con un pozo que aún almacena agua.

Figura 2.73. Situación del edificio de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (MCP), antiguo Convento de Salesas en el límite OSO de la vieja Iruña. Perspectiva con Sentinel-1, 2024.

2.13.1. Historia reciente

El antiguo edificio fue derribado con la entrada del siglo XX mientras en una parcela muy cercana (apenas 170 metros) se comenzaba a construir la Audiencia Provincial (hoy Parlamento de Navarra que será nuestra próxima y última exposición de geotecnia histórica forense en los terrenos eocenos y sus asociados). Como veremos en ambos casos, se aprovechan cimientos y otras estructuras para construir tanto la Audiencia Provincial (hoy Parlamento de Navarra) como el convento de las Salesas, actual sede de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona MCP desde el 25 de agosto de 2023.

En el caso del convento de las Salesas no disponíamos de trabajos arqueológicos o históricos que nos aclarasen el grado de aprovechamiento de las diferentes cimentaciones. Investigamos los apoyos por nuestra cuenta excavando los muros de cimentación que sostenían al último edificio con varias calicatas que fueron terminadas manualmente hasta un máximo de 1,70 m de profundidad en terrenos cuaternarios P1. La imposibilidad de introducir en el interior una retroexcavadora con cierta potencia y longitud de brazo no nos permitió avanzar más en profundidad. Fue en 1905 cuando se consagró el convento de Salesas y se decidió reconstruirlo completamente en varias fases desde el proyecto de 1900 de Florencio Ansoleaga. Ese año comenzaron las obras, en 1901 se había avanzado por encima de lo previsto, en 1902 se trasladaban las monjas al nuevo edificio construido ya en gran parte y en 1904 tomaron posesión de la segunda parte del monasterio. Todo el proyecto fue del arquitecto de la diócesis don Florencio de Ansoleaga, al igual que la iglesia que se inauguró en 1905 en un estilo neogótico.

Desde 1902 hasta 2003 fue convento de esa comunidad de clausura de las monjas Salesas y desde agosto de 2023 alberga la nueva sede de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, MCP. El cometido de esta última entidad es el de agrupar los servicios administrativos y de atención ciudadana, tales como la gestión del agua, transporte o residuos. Hoy se ubica justo en la zona periférica del casco histórico, pero sin duda en su tiempo, sin llegar a extramuros, supuso uno de los límites físicos desde los que Pamplona se vio obligada a traspasar para poder crecer, algo que, sin contar con las huidas terapéuticas de la Edad Media, empieza tímidamente a finales del siglo XIX y se acelera con el siglo XX. Bajo Salesas hubo un barrio dedicado a la industria metalúrgica.

Si los episodios de peste de los siglos XIV a XVIII supusieron una tímida salida de aspiraciones terapéuticas, con construcciones de carácter religioso y hospitalario a los que poder acudir mientras se vivían las recurrentes pandemias, nada es comparable a lo sucedido a finales del XIX y principios del XX por cuestiones tan obvias como los efectos de la revolución industrial y la aparición del hormigón armado de la mano de los combustibles fósiles (Aretxabala, A. 2016).

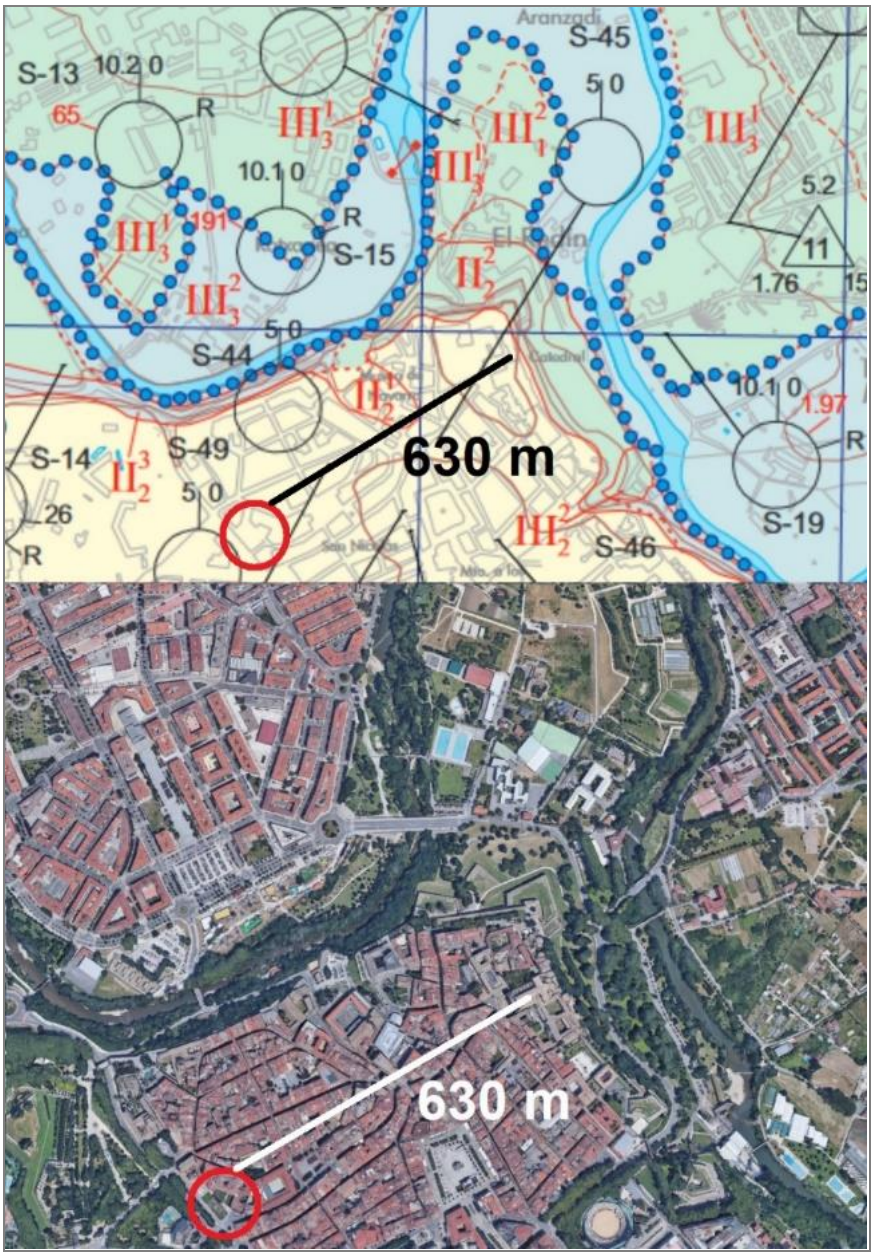


Figura 2.74. El Convento de Salesas marca el límite de la vieja Iruña en el extremo OSO a unos 630 m de la Catedral de Pamplona. Arriba, vemos que los materiales sobre los que se cimentaron los edificios que se iban alejando del núcleo inicial de la ciudad seguían siendo las terrazas cuaternarias P1 como las que se encuentran bajo el solar de Salesas y ya se clasifican en la publicación del *MAPA GEOTÉCNICO PARA ORDENACIÓN TERRITORIAL Y URBANA DE PAMPLONA E.: 1:20.000* (Gobierno de Navarra 2002) como de tipo Q_T III_1 y se extienden por la práctica totalidad de la Pamplona más antigua, corresponden a las gravas heterométricas que presentan golpeos en el ensayo de penetración dinámica DPSH entre 15 y 50 (en amarillo en la figura 2.74). Abajo: la misma toma con Google Maps en 2021 ya empezadas las obras para acoger los servicios unificados de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona.

Pero recordemos que la contracción de la población de hasta un 50% con la primera irrupción pandémica supuso la ralentización y el abandono durante periodos de tiempo de décadas (e incluso de siglos en algunas zonas) de los ritmos de la actividad constructiva, que bien fue abandonada por el miedo de cada episodio pandémico o simplemente los trabajadores murieron sin terminar y décadas después se retomaban o se demolían.

Tanto el convento de Salesas (hoy viviendo su última metamorfosis como MCP) como la Audiencia Provincial (Parlamento de Navarra), contemporáneos y límites en la expansión física y temporal de finales del XIX y la llegada del XX, son los últimos vestigios de transformación urbana antes de la revolucionaria irrupción del hormigón armado que cambió para siempre el sector, la geotecnia y el paisaje urbano del planeta (Aretxabala, A. 2021). Tal como se señala en el Plan Estratégico 2017-2030 de la Mancomunidad, la nueva sede ha sido diseñada con criterios de funcionalidad para la atención a la ciudadanía y cuenta con la certificación energética "A" que indica el mayor grado de eficiencia en la que los materiales geológicos juegan un papel protagonista. La climatización del edificio se resuelve mediante una instalación híbrida de geotermia y aerotermia. A partir de los datos de la geología local que veremos en la parte octava, se optó por la integración de la salud y las nuevas tecnologías, se trata de un edificio con características de cero emisiones.

Como es habitual, a la hora de enfocar una investigación de carácter geotécnico en edificios históricos, en primer lugar, se recopilan trabajos geotécnicos y bibliografía especializada, histórica, arqueológica, etc., sobre la zona a estudiar. Las visitas al solar y las inspecciones visuales del estado de los elementos estructurales son simultáneos al diseño de campañas de reconocimiento geotécnico acorde con la realidad geológica existente, el tipo de construcciones pasadas y la adecuación proyectada futura. También el tipo de maquinaria para las labores geotécnicas debe ser optimizado por las limitaciones de movimiento, cierta sensibilidad al tratar con edificaciones históricas y accesos (a veces imposibles) para las tecnologías de obra pública actuales (algo que afecta incluso a la investigación geotécnica).

El objetivo siempre es el de tomar las muestras más representativas en calicatas y sondeos realizados en el solar con el fin de observar el terreno directamente, el cimiento, el apoyo, estimar cargas y posibles afectaciones, etc. La situación geológica de Salesas sigue siendo la de los siglos anteriores (gravas cuaternarias sobre Margas de Pamplona) ya que a la irrupción generalizada de la maquinaria de obra basada en el motor de combustión y a la moda de los sótanos que llevaron a la Pamplona del siglo XX a redescubrir en obra el nivel del macizo rocos eoceno, aún le quedaban dos o tres décadas (figura 2.74). La situación urbana, a unos 630 m del extremo que dio lugar al nacimiento de Pamplona, como se puede ver, es ya límite (figura 2.74).

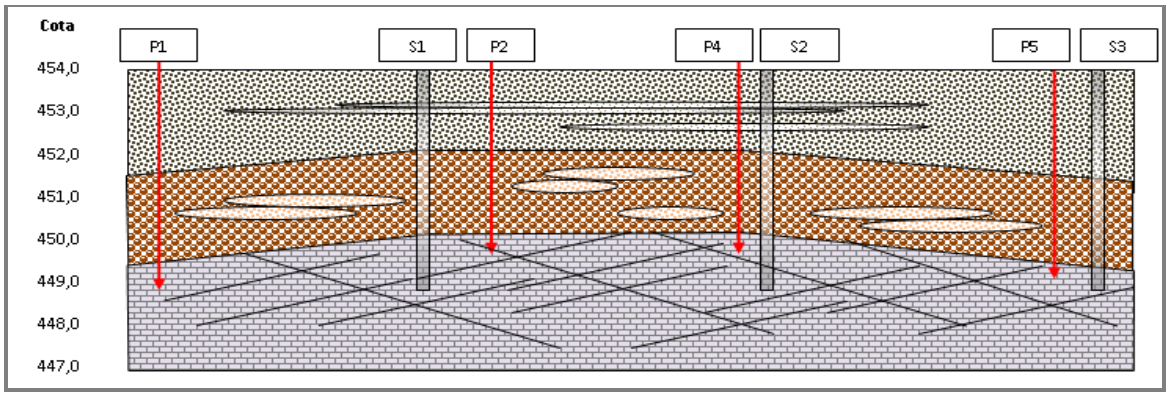


Figura 2.75. Corte transversal del terreno A-A' de la figura 2.76 mostrando unos 2,0-2,5 m de rellenos históricos (trama blanca y gris) otro tanto de las terrazas altas de Pamplona (marrón), estrato de apoyo de la mayoría de la edificación histórica de Pamplona y finalmente la formación eocena de Margas de Pamplona como base de todo el paquete de materiales. Por primera vez en la historia del edificio histórico (siglos XI-XXI) la formación rocosa tendrá un papel protagonista en la geotecnia del lugar.

Aquí también los materiales que se incluyen en esta zona están constituidos por rellenos de origen antrópico en sus primeros tramos (2,0 a 2,5 m), la mayoría fueron depositados durante la ejecución de las obras del convento y en épocas anteriores, aunque también existen materiales de construcción de reformas posteriores.

Estos niveles, se ha podido observar que son variables en todo el solar. Las terrazas cuaternarias de gravas P1 van desde las cotas mencionadas anteriormente al traspasar los rellenos (entre 1 y 2 m) hasta los 3 a 4 m aproximadamente, algo menos ya que en la parte más histórica y central de la ciudad, dando paso al nivel de margas azules de la formación biarritziense Margas de Pamplona a esas cotas.

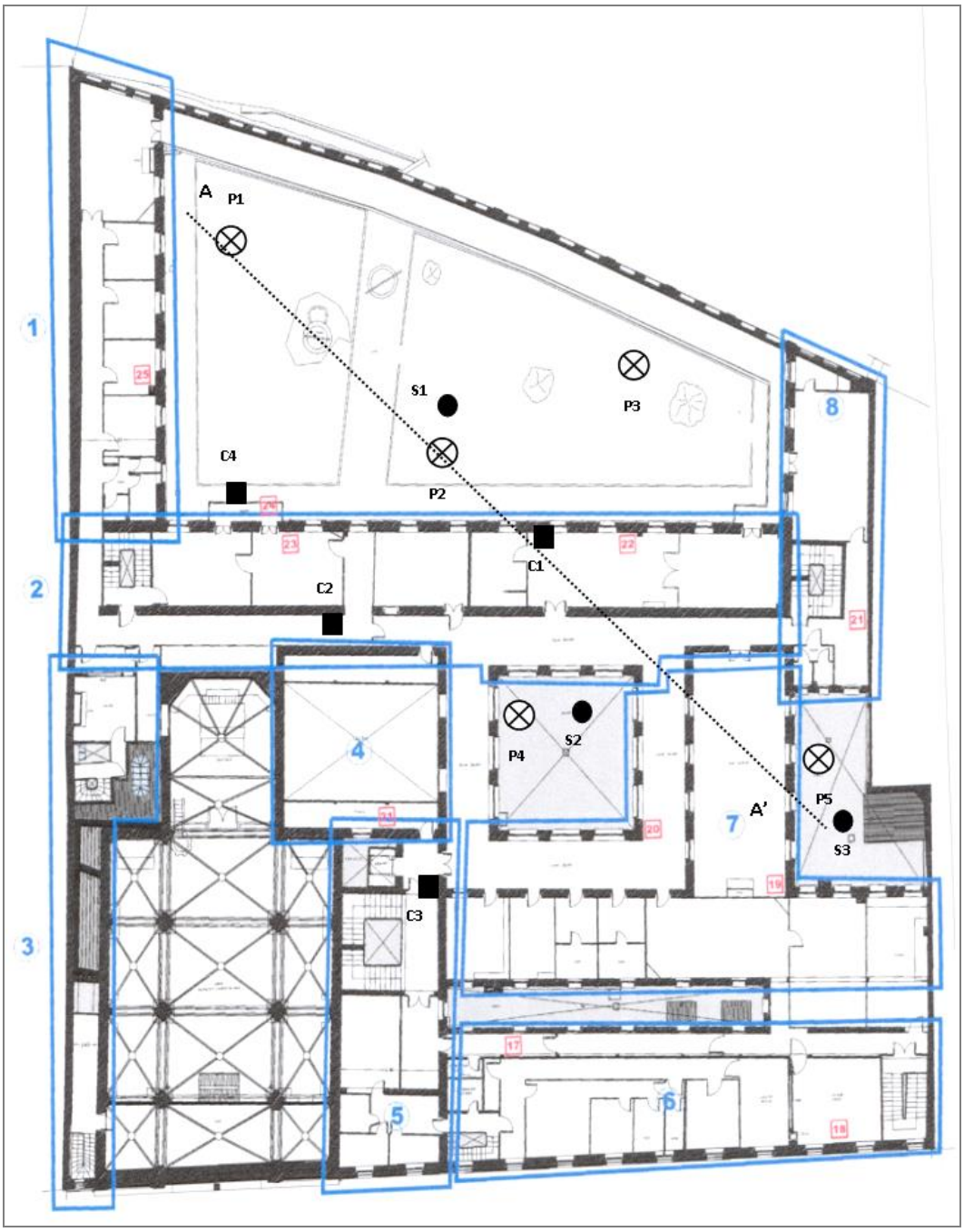


Figura 2.76. Plano del convento de Salesas y prospecciones realizadas: C: calicata, S: sondeo y P: ensayo de penetración DPSH. La línea A-A' representa un corte transversal NO-SE que se puede ver en la figura 2.75.

En la siguiente tabla VIII podemos ver detalles de profundidad y terreno histórico o geológico encontrado en un resumen de las prospecciones realizadas en diferentes épocas y que aparecen reflejadas en las figuras 2.75 y 2.76. Los materiales de los primeros tramos presentan granulometrías variables debido a la actividad de las obras colindantes en los primeros niveles y los distintos tamaños de las partículas allí depositadas, desde huertas hasta jardines o escombreras.

En general, y refiriéndonos a los depósitos naturales de las terrazas bajo escombros y antiguas huertas, se trata de suelos en límite GM-GC, en los que las arcillas son de baja plasticidad.

Tabla VIII

Prospección	Profundidad (m)	Tipo de terreno
C-1	1,70	Rellenos históricos
C-2	1,70	Rellenos históricos
C-3	0,60	Rellenos históricos
C-4	1,30	Rellenos históricos
P-1	5,20	Margas de Pamplona
P-2	3,80	Margas de Pamplona
P-3	4,18	Margas de Pamplona
P-4	5,10	Margas de Pamplona
P-5	5,40	Margas de Pamplona
S-1	4,80	Margas de Pamplona
S-2	4,80	Margas de Pamplona
S-3	3,20	Margas de Pamplona

Las gravas cuaternarias P1 sobre la meseta de Pamplona guardan una regularidad geotécnica destacable, lo que permitió durante la historia su aprovechamiento tecnológico además de geotécnico que, como hemos visto por ejemplo en el Palacio del Condestable, formaron parte de las paredes. Las gravas aquí no se utilizaron, al menos en las estructuras que estudiamos, quizás porque aparecen en este solar a una profundidad mayor. Aparecen con los habituales parámetros geotécnicos que se detallan en la tabla IX y almacenan un nivel de agua que pude localizarse en el encuentro con las margas eocenas E1. Este nivel se usó para dar de beber a los caballos de los carruajes y diligencias en el cercano Paseo de Sarasate. La permeabilidad por porosidad intergranular en los niveles altos y también en los niveles centimétricos de margas más alteradas inicialmente es la que continúa garantizando el aporte, siendo prácticamente nula en los niveles inferiores E1.

El nivel de agua en el pozo histórico excavado en el patio que sirvió a las monjas durante décadas; en varias mediciones continuadas mostró regularidad en los niveles sobre los -5,40 m de la rasante. No se espera la aparición de un nivel freático a las profundidades de ejecución de las obras que excavarán las Margas de Pamplona (en el momento de escribir esta tesis estaban comenzando las labores de restauración y adaptación del conjunto de edificios) pues no se dan las características litológicas ni morfológicas para que esto se produzca.

Tabla IX

Tipo de ensayo	Resultados
Pase por tamiz 0,08 mm (200)	34,3%
Tamaños mayores de 25 mm	25,5%
Límite plástico	23,6
Límite líquido	36,0
Índice de plasticidad	12,4
Contenido de iones sulfato	No
Humedad natural	8,3%

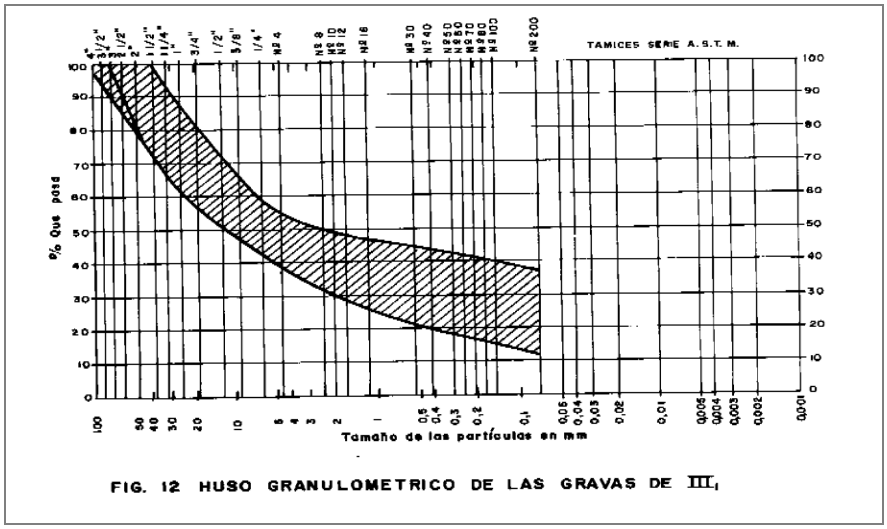


Figura 2.77. Huso granulométrico de las gravas de III1 sobre la meseta de Pamplona recopiladas en el trabajo del Gobierno de Navarra y el IGME (figura 12 de aquel trabajo). Extracto del "*Mapa Geotécnico Para Ordenación Territorial y Urbana de Pamplona escala 1:20.000 y 1:5.000"* IGME, 1988.

La unidad geotécnica P1 suele presentar poca variabilidad a la hora de mostrar esos parámetros de clasificación y estado. Uno de los husos granulométricos en los que encajan los estudios históricos realizados durante el siglo XX fue publicado por el IGME y el Gobierno de Navarra (figura 2.77). Las gravas heterométricas P1 de las terrazas de Pamplona aparecen en más del 50% de la superficie de la última ciudad amurallada, el Gobierno de Navarra recopiló en varias ocasiones datos sobre los parámetros geotécnicos más representativos de esta unidad geotécnica.

Podemos visualizar el espectro granulométrico de las terrazas altas de Pamplona dentro de unos límites bien definidos como el recopilado en 1988 por el IGME en la anterior figura 2.77, corresponde a la figura 12 de su publicación de ese mismo año *"Mapa Geotécnico Para Ordenación Territorial y Urbana de Pamplona escala 1:20.000 y 1:5.000"*. Las Margas de Pamplona E1 bajo Salesas, arrojaron resultados muy distintos, debido a su estado de alteración y fisuración.

En la siguiente tabla X se detallan los muy variables resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión realizados. La información extraída se complementa con la estructural, diseño de forjados, elementos de carga, muros, etc. Las máximas tensiones admisibles estimadas para rehabilitar este nuevo edificio dependen del terreno sobre el que se apoyó en su momento el convento, y éste sería con casi total seguridad el nivel de gravas heterométricas[5].

[5] Es probable, sin embargo, que en alguna zona cercana a los sondeos 1 y 2 el apoyo se hiciese también sobre roca antes de la acumulación de tantos rellenos iniciales. Así fue como algunos edificios que iban saliendo del recinto de la vieja Iruña comenzaron a interactuar cada vez más estrechamente con el nivel de Margas de Pamplona en cuanto a excavaciones y apoyos, simplemente por el hecho de que las terrazas en ocasiones presentaban menores espesores que en las zonas de intramuros, si exceptuamos las que se encontraban al borde de la meseta de la vieja Iruña, como el antiguo edificio de Capitanía, hoy Archivo General de Navarra o en el edificio pegado al conjunto catedralicio en el Paseo del Obispo Barbazán. Este hecho, no obstante, tiene más que ver con la evolución histórica del sector, la irrupción del hormigón armado de la mano del motor de combustión interna y la consiguiente expansión vertical (hacia abajo y hacia arriba) que con la expansión horizontal de la ciudad.

Tabla X

Probeta	Sondeo	Características	Color	Peso específico (g/cm^3)	Resistencia a compresión (kp/cm^2)	RQD	RMR
1	S-1	fisurada, ligeramente alterada	gris, tonos marrones por óxido	2,55	107	50-80	45-55
2	S-2	homogéneo	gris	2,59	123	50-80	45-55
3	S-3	homogéneo	gris	2,56	11	50-80	45-55

2.13.2. Correlaciones para cimentaciones en las terrazas P1

No es difícil discriminar los niveles de terraza en los ensayos de penetración DPSH en toda el área de Pamplona con sus típicas gráficas en dientes de sierra y golpeos que aumentan con la profundidad (N=10-30 golpes) hasta que son rechazados por las Margas de Pamplona tras una penetración costosa que no suele superar un metro de espesor; esto ha sido comprobado excavando una calicata o un sondeo y ejecutando un ensayo de penetración al lado para observar el grado de penetración en la formación eocena E1 y rara vez supera el metro y medio. En la siguiente figura 2.78 podemos ver una gráfica de penetración (P-4) cercana a un sondeo (S-2) con una buena correlación que valdría para cualquier lugar del área metropolitana.

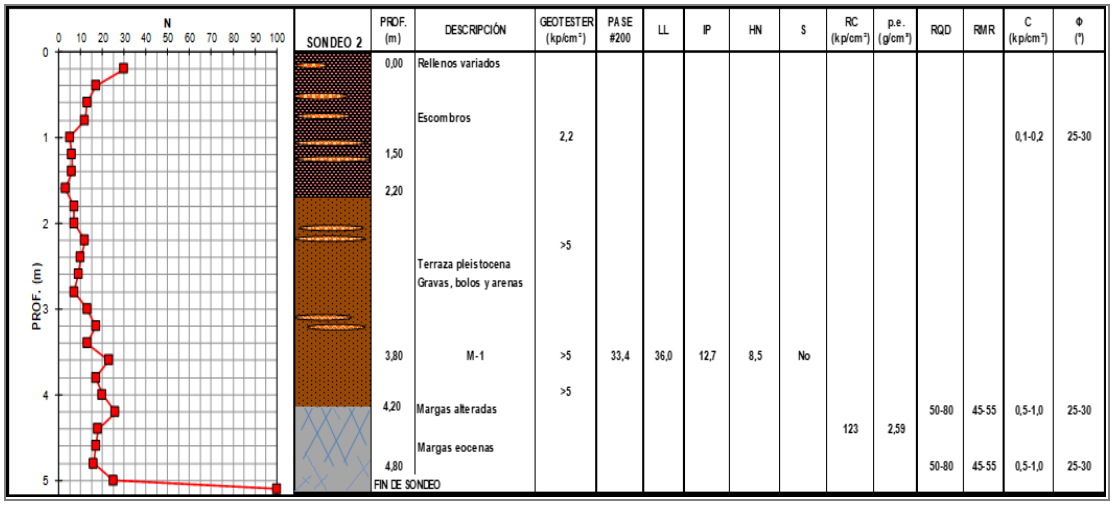


Figura 2.78. Gráfica de penetración dinámica DPSH (P-4) cercana a un sondeo (S-2) con una buena correlación que valdría para cualquier lugar del área metropolitana.

En la siguiente figura 2.79 vemos varias de las correlaciones más conocidas CPT-SPT: en la parte superior una de las más modernas conocidas: la de Burland y Burbridge (1985); en la inferior puede verse un resumen de varios autores al respecto, entre ellas, la de Meyerhof (1956), que fue pionera en los años 50 y 60 del siglo XX y en la que se basan las recomendaciones de varios organismos internaciones con más o menos modificaciones, así como algunas normas tecnológicas y CTE, (aparece con el nº2 y línea azul en la figura 2.79) también con serias advertencias de precaución sobre todo para materiales cohesivos y de alta plasticidad.

Si realizamos la conversión N_{SPT}-N_{DPSH} de 1:1 estaríamos siendo excesivamente conservadores, pero todo lo que sea ponerse del lado de la seguridad, aunque parezca excesivo, se considera una buena práctica cuando se encadenan varias de ellas.

En la figura 2.79 se pueden ver también los límites granulométricos de las terrazas cuaternarias de Pamplona resaltados en naranja, suponen los extremos granulométricos de la recopilación de 1988 realizado por el IGME que se puede ver en la figura 2.77. Cuando vimos todos los ensayos realizados y cotejamos los datos estructurales, fuimos conscientes de la potencialidad de los terrenos superiores de origen antrópico para generar asientos, ya que los colapsos potenciales por entradas de agua, vibraciones, etc., podrían generarse si esos rellenos fuesen utilizados como apoyo de cualquier cosa, por muy ligera que fuese. Así que también podría comportarse el terreno como ligeramente colapsable si las maquinarias son muy agresivas, cuestión que solamente afectaría a nuevas construcciones, el edificio actual descansa sobre terrenos consolidados.

Por lo tanto, la cimentación de unidades nuevas (y viejas que se quisieran aprovechar) deberían apoyar en los terrenos compactos que aparecen a partir de 2,4 a 3,5 m. El acceso directo o por medio de pozos de hormigón, contemplaría una tensión admisible estimada en menos de 5 kp/cm² en los módulos históricos más pesados una vez vistos los cimientos de mampostería y el espesor de los muros, forjados, cubiertas, etc.

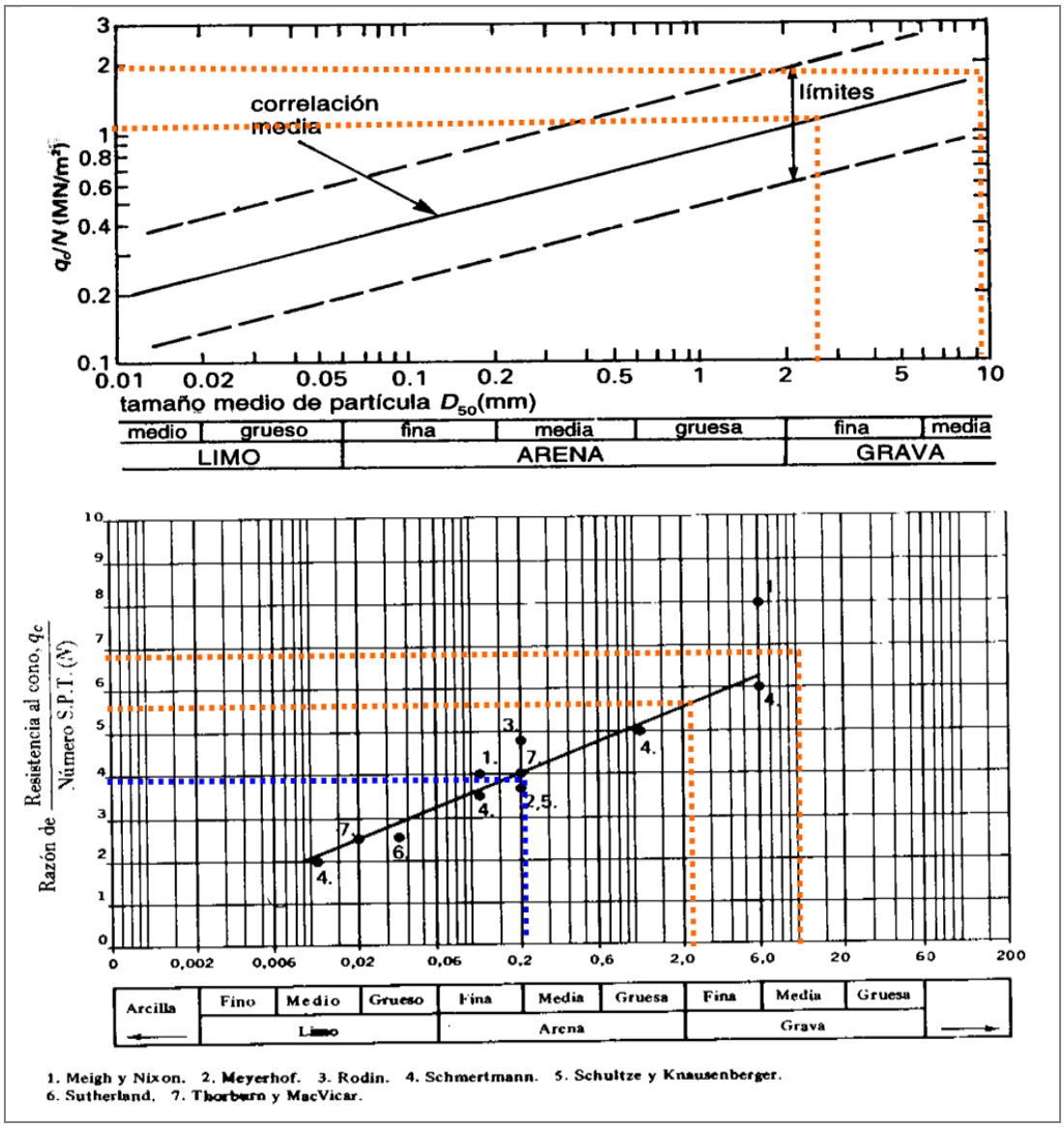
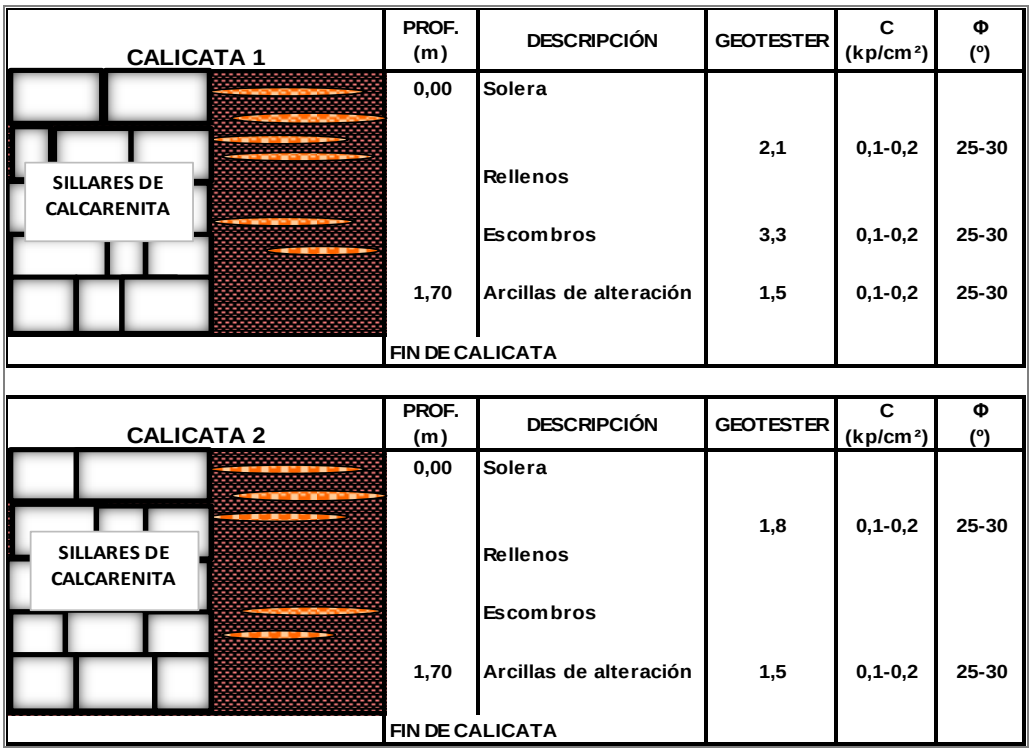


Figura 2.79. Correlaciones del golpeo de penetración dinámica N con la resistencia estática de penetración q_c para varios tipos de terrenos y espectros granulométricos considerando el tamaño medio de la partícula D_{50}, desde limo hasta grava gruesa (en naranja los límites granulométricos de las terrazas P1). Arriba: Burland y Burbridge (1985). Abajo, recopilación de varios autores entre la que se encuentra la citada de Meyerhoff de 1956 con el número 2 (en azul).

Debido a la imposibilidad de introducir en el edificio histórico una retroexcavadora, se excavaron a mano hasta 1,70 m dos calicatas para observar el cimiento hasta esas cotas, se pudo comprobar que se trataba de sillería unida con cal de los niveles de calcarenitas que dan paso al Priaboniense, material ampliamente utilizado en toda el área metropolitana de Pamplona, no sólo como cimentación o muro de mampostería, también como solera, adoquinado, etc.



CALICATA 1	PROF. (m)	DESCRIPCIÓN	GEOTESTER	C (kp/cm²)	Φ (º)
	0,00	Solera			
		Rellenos	2,1	0,1-0,2	25-30
		Escombros	3,3	0,1-0,2	25-30
	1,70	Arcillas de alteración	1,5	0,1-0,2	25-30
	FIN DE CALICATA				

CALICATA 2	PROF. (m)	DESCRIPCIÓN	GEOTESTER	C (kp/cm²)	Φ (º)
	0,00	Solera			
		Rellenos	1,8	0,1-0,2	25-30
		Escombros			
	1,70	Arcillas de alteración	1,5	0,1-0,2	25-30
	FIN DE CALICATA				

Figura 2.80. Dos calicatas excavadas pico y pala hasta 1,70 m mostraron el tipo de cimentación de sillería de calcarenitas de los niveles intercalados entre las Margas de Pamplona, unidos con cal. No se pudo alcanzar el final de la cimentación. No hubo manera de introducir una retroexcavadora en el edificio histórico.

Considerando las hipótesis contrastadas y las correlaciones vistas más arriba, pueden estimarse los módulos de deformación del terreno a partir de ensayos de penetración dinámica. Se tomó un N (número de golpeo) medio de diferentes capas extrapolado a toda la superficie estudiada. Obtenemos una capa teórica de media 3 m que se excava para labores de cimentación, obra, etc., y otra de otros 3 m de gravas heterométricas P1 mezcladas con otros materiales.

Para el cálculo de asientos de las cargas se usaron las hipótesis de Webb, Schmertmann y Steinbrenner:

Hipótesis de Webb. El asiento viene dado por: $S = \Sigma i = 1...n \, (\sigma zi/E)\Delta Hi$

Donde σzi es la presión vertical producida en el centro de la capa i por la presión q aplicada en superficie y Hi el espesor de cada capa involucrada.

$\sigma zi = Iz \, q$, siendo Iz un factor dependiente de la profundidad y de la forma de la cimentación.

Hipótesis de Schmertmann. En el método de Schmertmann se supone que los asientos quedan limitados a una profundidad zlim = 2B, siendo B el ancho de la cimentación cuadrada de lado B o a 4B en el caso de zapatas corridas. Se han calculado a partir de las siguientes premisas:

$S = C1\ q\ \Sigma i = 1...n\ (Izi/Ei)\Delta zi$

Siendo C1 un factor que depende de la profundidad de empotramiento de la zapata de valor: 1 – 0,5 q0/q.

Hipótesis de Steinbrenner. Este autor considera no solamente la geometría de la cimentación sino también la relación z/b y a/b siendo z la profundidad de la capa afectada y a y b largo y ancho de la cimentación. $S = b\ q\ (\xi 1/E1) + ((\xi 2 - \xi 1)/E2) + ((\xi 3 - \xi 2)/E3))...$

Donde ξi son los coeficientes que dependen de a, b y z, y del coeficiente de Poisson v. Cada Ei, vi y zi depende de la capa determinada que se vea afectada. Consideramos un cimiento entre 1 y 2 m de ancho.

En los tres casos se consideraron las siguientes observaciones:

1. En el terreno estudiado bajo el convento de Salesas convivían dos estratos geotécnicos diferentes, cualquier cálculo o posibilidad de actuación geotécnica deberá tener en cuenta este hecho siempre. Aunque ya se ha comentado que la génesis de los terrenos involucrados definidos confiere una cierta variabilidad geotécnica, relacionada con la actividad en el cuaternario reciente, aparecen cuerpos también compactos como bolos y gravas gruesas.

2. Dado que el ensayo de referencia fue el de penetración dinámica porque era imposible el acceso a lugares importantes del monumento, se tomó una N media de una capa extrapolando a todo el paquete, quedando así una capa de media de 3 m de gravas con arcillas, arenas y limos, posteriormente el grado de compactación aumenta y es prácticamente incompresible, se le asigna una media al golpeo de N=20 aunque los rechazos se habían producido sobre los 5 m.

3. El módulo de deformación E en las gravas y arenas se toma como $E = 2,5\text{-}3,5\ qc\ (kp/cm^2)$, 2,5 para zapatas cuadradas y 3,5 para corridas, tomando la relación qc/N de la figura 2.79, siendo N el golpeo medio en una capa determinada para penetrar 20 cm, correlacionando los ensayos del tipo DPSH con los SPT en sondeo (1/1).

4. El coeficiente de Poisson se toma de forma general para estos materiales v = 0,3.

5. Se tomó una cota de apoyo general de 3 m de profundidad, el terreno es incompresible a partir de los 5 m (aunque ya muestra desde el inicio que no es compresible ante magnitudes de cargas como las que habitualmente se barajan en geotecnia por ejemplo < 20kp/cm²).

En la siguiente tabla XI se resumen los resultados aproximados a los que se llega siguiendo estas pésimas hipótesis de trabajo apoyadas en los ensayos de penetración, todo ello en el marco de la filosofía de cada uno de los autores que han suministrado sus métodos de cálculo.

Tenemos que añadir que no existían indicios de asentamientos anteriores en el edificio, tampoco los vimos en su momento en otros edificios cercanos de épocas similares cuyas cargas descansan con las mismas tipologías de cimentación sobre las mismas gravas heterométricas, con parecidas cimentaciones, por ejemplo la antigua Audiencia Provincial de Navarra de la que hablaremos más adelante, hoy Parlamento de Navarra, por lo que concluimos que el edificio estuvo geotécnicamente seguro durante su vida útil y perfectamente cimentado para las solicitaciones que se le exigieron.

Tabla XI

Tipo de cimentación	**Zapata aislada** **Q = 500 kN/m²**	**Zapata corrida** **Q = 500 kN/m²**
Webb	1,0	2,1
Schmertmann	0,5	1,1
Steinbrenner (B = 1 – 2 m)	0,2 ~ 0,3	0,4 ~ 0,5
Media	0,6	1,2

Los asientos calculados vienen dados en cm.

Sin embargo, al margen de los cambios estructurales que se determinen en los diseños que miran al futuro cercano, el terreno podría ver incrementada la carga recibida por efecto de dichos nuevos diseños, por eso el análisis anterior en condiciones pésimas concluye con un pequeño reajuste del mismo que se daría de forma inmediata en las gravas que se extienden bajo la ciudad.

2.13.3. Discusión geotécnica de la adecuación de un edificio histórico sobre gravas o margas.

En la figura 2.77 se mostraba el área de ocupación de una gráfica granulométrica de los ensayos recopilados por el IGME para la elaboración del *MAPA GEOTÉCNICO PARA ORDENACIÓN TERRITORIAL Y URBANA DE PAMPLONA* en 1988. Si tomamos de la infinitud de ensayos, un diámetro representativo, por ejemplo, D_{50} (diámetro correspondiente a la mitad de la distribución de partículas del material) en la figura 2.79 se pueden ver en naranja las líneas correspondientes al término más grueso 10 mm y el más fino 2,5 mm, veremos cuál sería la conversión SPT-CPT más aproximada para estos terrenos, y cuáles sus valores extremos realizando como hemos hecho la conversión N_{SPT}-N_{DPSH} de 1:1. Operando así nos quedaría una tensión admisible siguiendo la conversión anterior, pero de forma mucho más aproximada, para 20<N<50, q_{ad} = 4 - 12 kp/cm², algo que se aleja por exceso a nuestros cálculos más pesimistas. Los elementos de fachada, transmitieron al terreno una carga que sería de 280 kN/m² (2,8 kp/cm²) y se vería incrementada hasta unos 380 kN/m² con nuevas solicitaciones en la nueva propuesta de edificación. Un incremento de 100 kN/m² (1 kp/cm²). Para los muros del coro, la carga existente sería de 320 kN/m² y la carga nueva de 470 kN/m². Un incremento de 150 kN/m² (1,5kp/cm²). Por todo ello, habría que partir de una carga inicial ya consolidada que simplemente se incrementa en esas magnitudes, una cuarta parte del análisis final hecho según esos autores (100 y 150 kN/m²) por lo que la deformación final para cimentaciones ya existentes sería muy pequeña. Aun conociendo las magnitudes de las nuevas solicitaciones las tensiones admisibles estimadas para los distintos terrenos atravesados en el antiguo convento de Salesas serían las presentadas en la siguiente tabla XII:

Tabla XII

Tipo de terreno	Máxima tensión admisible kN/m² (kp/cm²)
Gravas en matriz limoarcillosa	500 (*5*)
Margas semialteradas	600 (*6*)
Margas sanas o semisanas	800 (*8*)

El tipo de cimentación es de mampostería, apoya directamente sobre el substrato de gravas y es probable que en algún caso lo haga sobre margas, las solicitaciones del terreno interior del edificio se verían ligeramente incrementadas por los nuevos diseños en unos 100 kN/m² en prácticamente toda la obra y en la zona del coro unos 150 kN/m².

Esto suponía alcanzar cargas finales cercanas a los 500 kN/m² (5 kp/cm²), pero el terreno ya está consolidado, esa magnitud no supondrá ningún problema de asientos o reajustes preocupantes, aunque se analizó la pésima configuración anterior que pudiera reajustar el terreno de forma inmediata con magnitudes menores a 1,2 cm.

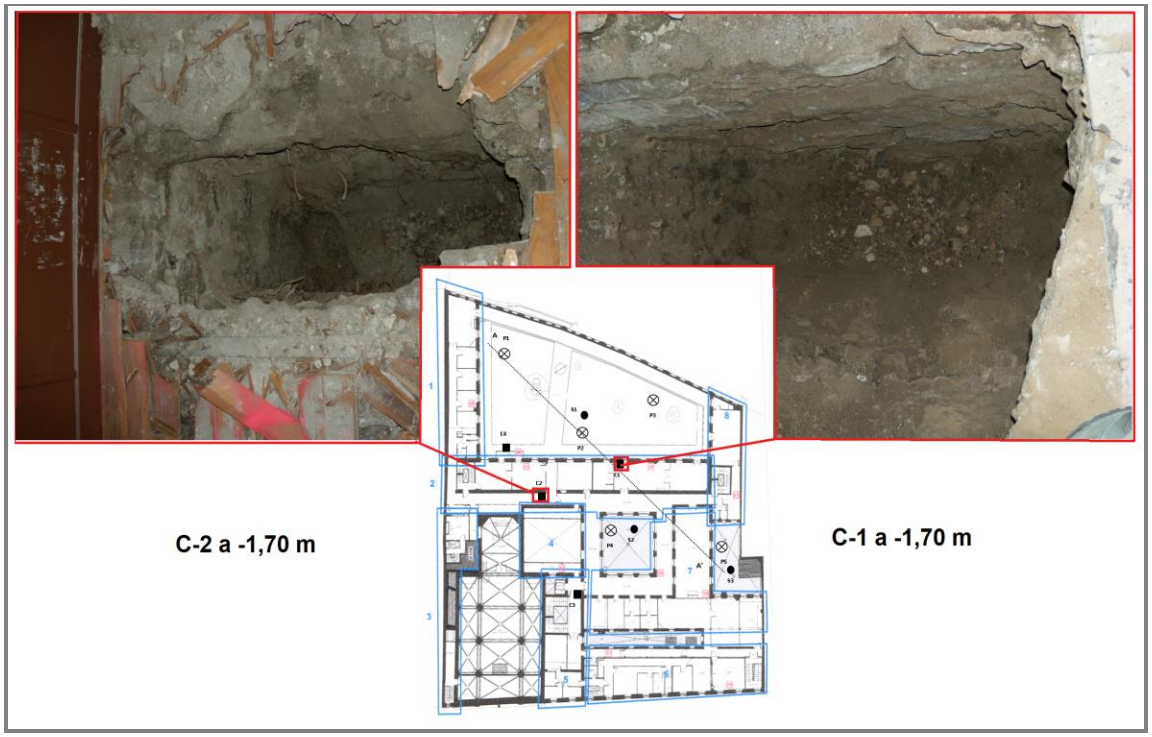


Figura 2.81. Calicatas realizadas en el módulo 2 del edificio histórico mostrando la cimentación de mampostería más allá de los 1,70 m de profundidad.

2.13.4. Conclusiones: Patrimonio Histórico y cambios en las cargas de las cimentaciones.

Los cambios de presión a que se somete al terreno cuando se actúa sobre el Patrimonio Histórico, para su rehabilitación y adecuación a nuevos usos, suelen ser variables y constan normalmente de dos movimientos, uno inicial que consiste en una bajada temporal de las cargas (vaciados que guardan las fachadas) y otro que suele incrementarlas (nuevos elementos).

El primero se produce por el vaciado, previa demolición de elementos antiguos como forjados y cubiertas para eliminar el esqueleto del viejo edificio histórico. El segundo, suele conllevar un incremento que supera al de las estructuras previas, ya que habitualmente se utiliza estructura de hormigón armado o metálica y si la sillería o las fábricas de ladrillo —o ambas— dan señales de buena salud, se evitan los aligeramientos excesivos o se opta por refuerzos.

Hasta ahora en Pamplona no se habían conocido problemas relacionados con el terreno por estas extendidas prácticas, tanto si las cimentaciones continúan en las gravas —ya que las cargas prácticamente nunca superan valores críticos, algo que se suele tener muy en cuenta— como si se recalzan las estructuras previas para alcanzar el sustrato de Margas de Pamplona. En este caso, las cargas pueden ser elevadas y se han venido utilizando habitualmente tensiones máximas de 3 a 5 kp/cm² en el horizonte más alterado (III-IV) y hasta 7 e incluso 12 kp/cm² en el macizo rocoso sano. Pero esta práctica responde más a la moderna preferencia de hacer sótanos que a la de asegurar las estructuras arquitectónicas.

Realmente fueron muy pocas las veces en que los recientes cambios de uso de los edificios históricos no acarrearon la construcción de nuevos sótanos y, por tanto, la obligatoriedad de encontrarse con las Margas de Pamplona, sobre todo después de la década de los 80 del siglo XX en que se valoró mucho más evitar demoliciones y conservar el legado arquitectónico histórico. Sin embargo, el acelerado ritmo de ejecución de la modernidad se impuso muchas veces por encima de lo previsto desde el conocimiento referido a la historia de la geotecnia local y las características peculiares de los materiales geológicos de Pamplona. A veces se quiso culminar un salto de un siglo en un año o incluso en meses y ello requería una cierta destreza adquirida desde el conocimiento profundo de esa historia de la geotecnia local.

En el proyecto de rehabilitación de Salesas, para su reconversión en el edificio de la MCP, se tuvo en cuenta la relevancia de aspectos históricos icónicos, tales como los tres patios interiores (claustro, esclusa y medianero) con los forjados de vigas y tableros de madera, que resultó uno de los materiales decisivos de la intervención en la actividad constructiva de la tercera década del siglo XXI. El valor histórico del edificio ha sido el pilar sobre el que se ha actuado, tanto desde las primeras labores geotécnicas como hasta el último detalle decorativo, contando para ello con la continua supervisión de la Institución Príncipe de Viana.

Es de destacar la reutilización de materiales para la construcción de diferentes estructuras. Se han reutilizado vigas de madera del antiguo convento para espacios habilitados en la planta tercera, se han reaprovechado tejas para la cubierta y la estructura del suelo del salón de reuniones se rehabilitó con madera reutilizada. Durante las labores de excavación arqueológica se localizaron restos que van desde el siglo I hasta el XX, monedas, mármoles tallados y una de las necrópolis de la ciudad romana. También un barrio artesanal medieval dedicado a la metalurgia desde el siglo XI hasta el XIV, un hallazgo sorprendente con fragmentos de moldes de campana, restos muy poco conocidos hasta la fecha (Zuazúa, N. 2021).

En el sector constructivo y en la inercia histórica que éste heredó, y que estamos analizando a la luz de la geotecnia, la utilización de las terrazas de gravas para las mayores obras de edificación de la ciudad ha sido la norma y las estructuras históricas con más o menos valor patrimonial se proyectaron y ejecutaron para una interacción armónica con ellas. Lo hemos visto en las sucesivas catedrales, desde la prerrománica, románica o gótica, hasta la actual, aprovechando incluso los antiguos cimientos. También en el Palacio Real o de Capitanía, el Palacio del Condestable o los sucesivos usos dados al convento de Salesas como sede de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, MCP.

No obstante, sí existió un caso reciente en que se recibieron buenas lecciones, aunque no exclusivamente de carácter geotécnico, sino de lo que puede suponer una cierta ejecución apresurada de un edificio histórico con mentalidad termoindustrial. Como decimos, una gran lección es reconocer que, a la hora de dar el salto desde un edificio histórico cimentado en las gravas a otro de nuevo uso del siglo XXI, obviamente con novedades entre las que se van a encontrar los sótanos, vamos a someter a los materiales geológicos a nuevas solicitaciones.

Pero también veremos cómo, rompiendo la cadena de previsiones (y órdenes) de manera accidental, se llevó a las terrazas cuaternarias al límite, algo que probablemente sólo puede suceder fortuitamente en la era de los combustibles fósiles con la posibilidad de poner en la mano de los profesionales del sector ingentes cantidades de energía en muy cortos espacios de tiempo.

La antigua Audiencia Territorial de Navarra —que nació vecina y melliza del convento de Salesas— pasó en un par de años a ser el actual Parlamento de Navarra y se puede ver en primer plano en la figura 2.73. Su rápida metamorfosis fue un verdadero éxito de la optimización de la ingeniería del terreno con otras disciplinas de la arquitectura, el cuidado del Patrimonio Histórico y el diseño, pero nos dejó unas cuantas lecciones para interiorizar. Y es que el conocimiento histórico y la consideración de la geotecnia en las diferentes épocas dieron como fruto cimentaciones, edificios e infraestructuras bien adecuados a sus momentos y sus modas, algo que no siempre fue un camino fácil para un sector que creció en unos pocos años a velocidades nunca vistas en la historia.

2.14. El Parlamento de Navarra.

Resumen: el edificio que hoy alberga el Parlamento de Navarra (figura 2.73 en primer plano) es un buen exponente del avance de las necesidades geotécnicas y las prácticas constructivas derivadas en un intervalo histórico de apenas un siglo, pero que, sin embargo, coincide con la peculiaridad tecnológica de la gran aceleración que despega en los años sesenta del siglo XX y cambia la manera de concebir el terreno de apoyo y su esculpido desde la arquitectura y la ingeniería. Es especialmente notorio a partir de los ochenta del siglo pasado. Este cambio de paradigma geotécnico acarreó algunas desavenencias constructivas. Aunque operar directamente en el macizo de Margas de Pamplona fue una práctica conocida históricamente en la cuenca y alrededores de la antigua ciudad, el hacerlo en la ciudad histórica o sus aledaños gobernados por la presencia de las terrazas cuaternarias P1, requería del acceso a zonas más profundas, es decir, de mucha energía.

2.14.1. La irrupción de la concavidad.

Las necesidades de uso y las modas que vinieron con el motor de combustión interna y la potencia de la nueva maquinaria de obra pública abrieron nuevos horizontes en los diseños de la edificación, incluso donde desde la prehistoria los terrenos protagonistas en la vieja villa habían sido las accesibles terrazas cuaternarias P1. La irrupción de los sótanos, parkings subterráneos, vaciados y nuevas concavidades, tanto en edificios de viviendas como para las nuevas propuestas comerciales o culturales, aprovecharon espacios urbanos vacíos como aparcamientos superficiales. También se recuerdan demoliciones históricas en la ciudad. Adyacentes al Parlamento de Navarra están El Corte Inglés y Baluarte o Palacio de Congresos-Auditorio de Navarra. Fueron las primeras concavidades más profundas de Pamplona. La repentina facilidad de disposición de maquinaria pesada arrojó al sector a la conquista vertical de la profundidad y, por tanto, de la formación biarritziense de Margas de Pamplona en pleno centro de una ciudad que apenas las había experimentado de manera directa. Aquí se dan cita dos circunstancias: un poco menos de espesor de las terrazas de gravas P1 fuera de la ciudad amurallada con las nuevas y enérgicas tecnologías de obra pública. Parece extraño afirmar que, precisamente en la ciudad de Pamplona, la tradición constructiva en las Margas de Pamplona que además de darle nombre, las localiza en los mapas geológicos, fue algo marginal en la historia intramuros. Pero así fue. Desde la Edad de Hierro al menos, fue en las localidades periféricas donde la interacción fue directa con accesos, fosos, murallas, fortificaciones, etc., que siempre interactuaron a lo largo de los siglos con la formación biarritziense, algo que, sin embargo, en la ciudad de Pompelo no sucedió, y además no se desarrolló hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XX, pues las terrazas cuaternarias, durante este 98% del tiempo transcurrido desde el siglo I d.C. hasta los años de la segunda mitad del siglo XX, fueron los terrenos a los que se enfrentaron los estrategas, arquitectos, ingenieros, constructores…

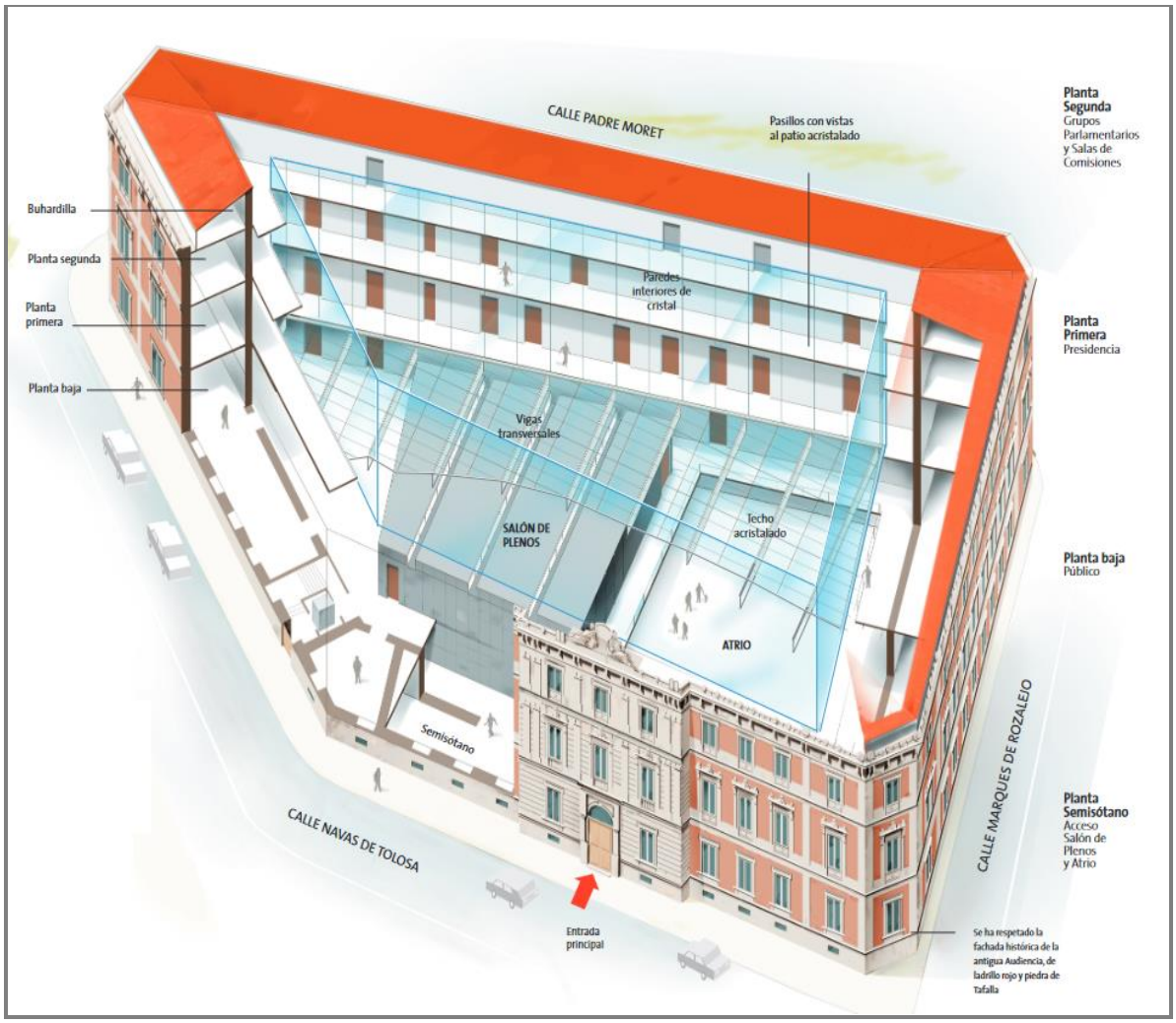


Figura 2.82. Imagen del Proyecto del Parlamento de Navarra en el antiguo edificio de la Audiencia Territorial de Navarra (año 2000). Fuente: Parlamento de Navarra (http://parlamento.eleaweb.com).

Tan solo en las últimas décadas (el restante 2% del tiempo) en la nueva y ampliamente extendida zona metropolitana y de influencia de Pamplona, exhaustivamente desplegada tanto en horizontal como en vertical (aquí ya se incluye además del hacia arriba, el hacia abajo), el sector interactuará en la vieja Iruña con las Margas de Pamplona. En relación a los anteriores episodios históricos previos a los siglos de las pandemias (XIV-XVIII) y el par de siglos de transición con la influencia de la revolución industrial (XVIII-XIX), la actividad constructiva e industrial traspasó el umbral vertical del subsuelo y comenzó una nueva andadura al incluir a las Margas de Pamplona E1 y E2 como un elemento o material más del proceso edificatorio y de infraestructuras. Fue un cambio extraordinariamente rápido. Sin duda, el más acelerado en la actividad geotécnica de la ciudad.

Este cambio prácticamente fulminante se convirtió en norma en el momento de su nacimiento y desde entonces es raro el edificio o infraestructura que confía cargas o solicitaciones a las terrazas cuaternarias P1, y si lo hace es tras una rehabilitación en que partes valiosas del monumento o edificio patrimonial prácticamente no se tocan (Palacio del Condestable, Catedral, partes de Salesas y pocas intervenciones más).

Es paradigmático, bajo este prisma, el ejemplo del viejo e icónico edificio que alojaba la Audiencia Territorial de Pamplona desde su construcción a finales del siglo XIX, hasta que en el año 2002 comenzara su andadura como centro neurálgico para albergar a la máxima institución autonómica: el Parlamento de Navarra. Su construcción se llevó a cabo entre los años 1890 y 1897 como uno de los exponentes más notables con que cuenta la ciudad de Pamplona de la arquitectura ecléctica.

La rehabilitación del año 2000 contaba en primer término con la consideración del edificio existente como un contenedor y así valorar el vaciado interior de la manzana hasta cotas donde las Margas de Pamplona hacen su aparición y ya habían sustentado a las terrazas cuaternarias que serían retiradas o, en las zonas que aún sostenían parte del edificio, reutilizadas bajo nuevas condiciones geotécnicas mixtas, una parte en las gravas y otra en las margas. Ello llevó a conservar la crujía exterior del volumen, prescindiendo de la crujía interior y de los elementos que cerraban el patio. Un edificio carismático de Pamplona, sin duda, pero que, hasta el último año del siglo XX no había tenido ninguna interacción directa con las Margas de Pamplona.

Esto fue debido sobre todo al cambio paradigmático de concebir el entorno urbano y el subsuelo que se produjo en la última mitad del siglo XX. Entonces comenzó a ser prácticamente obligado el interactuar con esta formación geológica eocena. Obviamente, el actual Parlamento de Navarra no fue el único inmueble que vivió este cambio, sin embargo, resaltamos su importancia ya que el calamitoso comienzo de este proceder, aunque rápidamente solventado, tuvo un precio y abrió nuevos caminos de aprendizaje. Hubo que pagar con el colapso de una parte del edificio: el muro interior sur. Afortunadamente los daños sólo fueron materiales, pues como es habitual, todo material cuaternario llevado al límite, muestra avisos previos a una deformación importante.

Comentaba Mariano González-Presencio en su trabajo *"La nueva sede del Parlamento de Navarra: la transformación de la antigua Audiencia de Pamplona"* (2009), uno de los autores del proyecto, que:

> *"… En el espacio central se excavó una concavidad que alojaría el Salón de Plenos y el vacío del Atrio; sobre ellos, una piel ligera —un muro-cortina de vidrio— cierra el volumen interiormente, a modo de vasodiafragma que contiene el espacio del nuevo intersticio que se genera entre el aire libre del patio interior y la masa construida preexistente: contra el suelo y la crujía del edificio que se mantiene."* (González-Presencio, M. (2009).

Los autores del proyecto para la reconversión a Parlamento de Navarra fueron Mariano González Presencio, Juan M. Otxotorena Elizegi, Javier Pérez Herreras y José V. Valdenebro. La totalidad del edificio se sustentaba —como vino siendo habitual desde tiempos pretéritos en la ciudad de Pamplona hasta finales del siglo XX— sobre las gravas heterométricas cuaternarias P1, así como un semisótano que guardaba archivos, objetos perdidos, robados o que finalmente nunca llegaron a subasta o reclamación. Si bien este edificio ecléctico ya había salido de los encorsetados márgenes de la ciudad histórica, definidos casi en su totalidad por las murallas defensivas, con el primer efecto ensanche de la ciudad, el terreno de acogida siguió siendo el mismo, hasta la restauración y el nuevo uso. Pero no olvidemos que los terrenos tienen memoria, y es lo que vamos a explicar.

2.14.2. Consideraciones sobre las reacciones a un colapso parcial.

Fue durante las obras del año 2000 cuando se excavó hasta la formación eocena E1. La noche del 12 de junio de ese año se produjo con gran estruendo el colapso de la fachada interior sur, una buena parte de la ciudad pensó que se trataba de uno de los relativamente habituales temblores que se sienten en la ciudad. Entonces comenzaron una serie de acusaciones y malentendidos que culminaron en la consulta geotécnico-forense para determinar cuáles habían sido las causas del accidente. Afortunadamente, como comentamos, el colapso se vio venir y, sobre todo, se escuchó su avance (crujidos en la fábrica de ladrillo y mampostería durante las horas previas al desplome mientras el terreno cedía). No hubo daños personales.

Se realizó un estudio detallado del nivel de gravas heterométricas y de las Margas de Pamplona. Se recrearon in situ con ensayos de carga las trayectorias tensionales históricas a que se vieron sometidas las gravas para determinar si un fallo de estabilidad de éstas había sido el causante de la caída de dicha fachada sur. Las descripciones geológicas y geotécnicas, así como sus análisis, son en estos casos bastante más amplias que aquellas típicas orientativas, o basadas en las interpolaciones geotécnicas conocidas como se hace en un informe geotécnico habitual por necesidades que, a la sazón, consideramos de capital importancia, pues se hacía referencia a una posible inestabilidad estructural, un fallo de diseño e incluso a la deficiencia del terreno.

En efecto, no fueron pocos los técnicos que calificaron el terreno de gravas como de poseer unas *características geotécnicas deficientes*. Actuando así, desde semejante simplicidad, se estaba obviando el papel secular de las gravas cuaternarias P1 apoyadas en las Margas de Pamplona E1 que a su vez sustentaron nuestra ciudad durante siglos sin ningún contratiempo. Particularmente no se estaba descartando la estabilidad que le propició el conjunto de margas-gravas al edificio de la antigua Audiencia Territorial de Navarra durante toda su vida útil de más de un siglo, sino a toda la ciudad.

Primera lección: apuntar con datos limitados a un fallo del terreno es especialmente aventurado sin el estudio histórico y científico que se exige a cierta profundidad de análisis y reflexión. El sentido crítico, libre de prejuicios, y cierta experiencia profesional en lo que a conocimientos de la geología, geohistoria y geotecnia local se refiere es el gran consejo de los padres de la geotecnia.

Si los técnicos que trabajan en un determinado aspecto de estabilidad geológica caen en la incomprensión de poder juzgar sin conocer la historia del material involucrado ni la realidad geohistórica o geotécnica con que trabajan, surgirán necesariamente modelos de interpretación de la naturaleza que podría contradecir la observación histórica de una relación secular. Sin embargo, ello no modifica en lo más mínimo la dinámica de esos procesos geológicos naturales o de interacción que se dieron en el pasado y seguirán su curso histórico. En otras palabras, se pueden malinterpretar parámetros geotécnicos y afirmar que determinada excavación que permanece estable *"tiene un factor de seguridad (FS) de 0,80"* porque lo dice un programa informático.

También cabe lo contrario: un programa informático puede decir que una excavación es ampliamente estable porque con un FS mayor de 1,5 ésta se encuentra por encima del 50% de margen de estabilidad, mientras vemos cómo se desliza en la vida real. Desde el siglo XX y la introducción de la computación en la geología aplicada a la construcción, este tipo de razonamientos se han dado en más ocasiones de las deseadas. Con las cimentaciones en las terrazas cuaternarias P1 que preceden a las Margas de Pamplona E21 y E2 también ha sucedido.

En ocasiones, el sector de la construcción ha visto cómo programas de cálculo por ordenador, basados, por ejemplo, en golpeos de penetrómetros, arrojaban valores de tensión admisible del terreno de las terrazas cuaternarias de 1,0 a 1,5 kp/cm², dentro de intervalos de deformación prácticamente nulos, cuando el edificio que apoyaba en ellas desde hace siglos no mostraba ni un solo signo de inestabilidad, pero quintuplicando e incluso multiplicando hasta por ocho esos valores sin presentar deformaciones. Éstas, una vez calculadas, como vamos a ver, son además de inmediatas, prácticamente irrelevantes.

Confiar en el saber hacer de los que nos precedieron, o al menos considerar que sus decisiones y actuaciones fueron las mejores posibles con la tecnología de que disponían, es una fuente de información importante para nosotros. El acceso al conocimiento de la tecnología constructiva de cada momento histórico, aplicada a los terrenos que se estudian, es un hecho tan histórico como científico. Se trataría de comprender la adecuación o no de las nuevas y potentes tecnologías a contextos históricos y arquitectónicos pasados para no dañar e incluso destruir nuestro patrimonio. Realmente nos hemos convertido en un proceso geológico más, pero apenas conocemos el medio sobre el que actuamos y menos aún lo podemos controlar.

La sostenibilidad de las edificaciones históricas supone algo más que afirmar, a la vista de una gráfica de un penetrómetro, que el terreno aguanta un kilo por centímetro cuadrado a 1,20 metros de profundidad para pasar a cuatro kilos a 1,40 metros y volver a bajar a cero kilos a 1,60, etc., y cosas por el estilo que tan desafortunadamente se extendieron en los años del ladrillo y la especulación inmobiliaria y a veces costó muy caro. El problema no estaría entonces en algún fallo de los programas informáticos, sino entre el ordenador que los ejecuta y la silla.

La mayoría de los daños infligidos al Patrimonio Histórico son consecuencia de esa falta de visión geohistórica que, desafortunadamente tanto cuesta erradicar del sector de la construcción, somete —en demasiadas ocasiones— a las edificaciones de nuestros antepasados a impactos indeseados. Algunos de ellos tienen finales muy dañinos e incluso destructivos (Aretxabala, A. 2012). "*La tormentosa relación de menosprecio cultural, científico, técnico y geotécnico entre España y su patrimonio histórico*". Tierra y Tecnología Nº42. ISSN 1131-5016. Págs. 45-58.

Los enormes despliegues de potencia y energía alcanzados con la maquinaria de obra pública a finales del siglo XX fueron utilizados muchas veces en entornos históricos incapaces de encajar los impactos de su utilización, el mejor ejemplo visto hasta ahora en esta recopilación académica es el de la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin, pero obviamente no es el único.

El edificio de adecuación de la antigua Audiencia Provincial para albergar el Parlamento de Navarra fue una variante de esta inadecuada manera de imponer tecnologías modernas y agresivas en entornos que no estaban (y nunca estarán) preparados para ello. Paralelamente a este hecho histórico, a lo largo del siglo XX, también las tecnologías de auscultación pudieron alcanzar mayores posibilidades de penetración y estudio gracias a ese excedente de energía barata y versátil.

En los terrenos que durante más de un siglo sustentaron el actual Parlamento de Navarra, se pudieron realizar cuatro ensayos de carga hasta presiones impensables hace unas décadas, dos de ellos hasta 7 kp/cm² con placa de 60 cm de diámetro por limitación del contrapeso utilizado y otros dos hasta tensiones de 13,5 kp/cm² con 30 cm de diámetro, las máximas conocidas en las gravas de Pamplona a las que se ha podido llegar con este dispositivo estándar de auscultación.

Se recrea de esta manera (y se sobrepasa con creces) el modelo tensional real colapsado del muro sur interior del edificio de la antigua Audiencia Territorial de Navarra. Se le trata al subsuelo a escala real como a un verdadero ensayo in situ, lo que además de propiciar un conocimiento geotécnico importantísimo, da una idea de la irreparable pérdida histórica del conocimiento geotécnico atesorado por el sector tras siglos de experiencia y que aquí también intentamos recuperar.

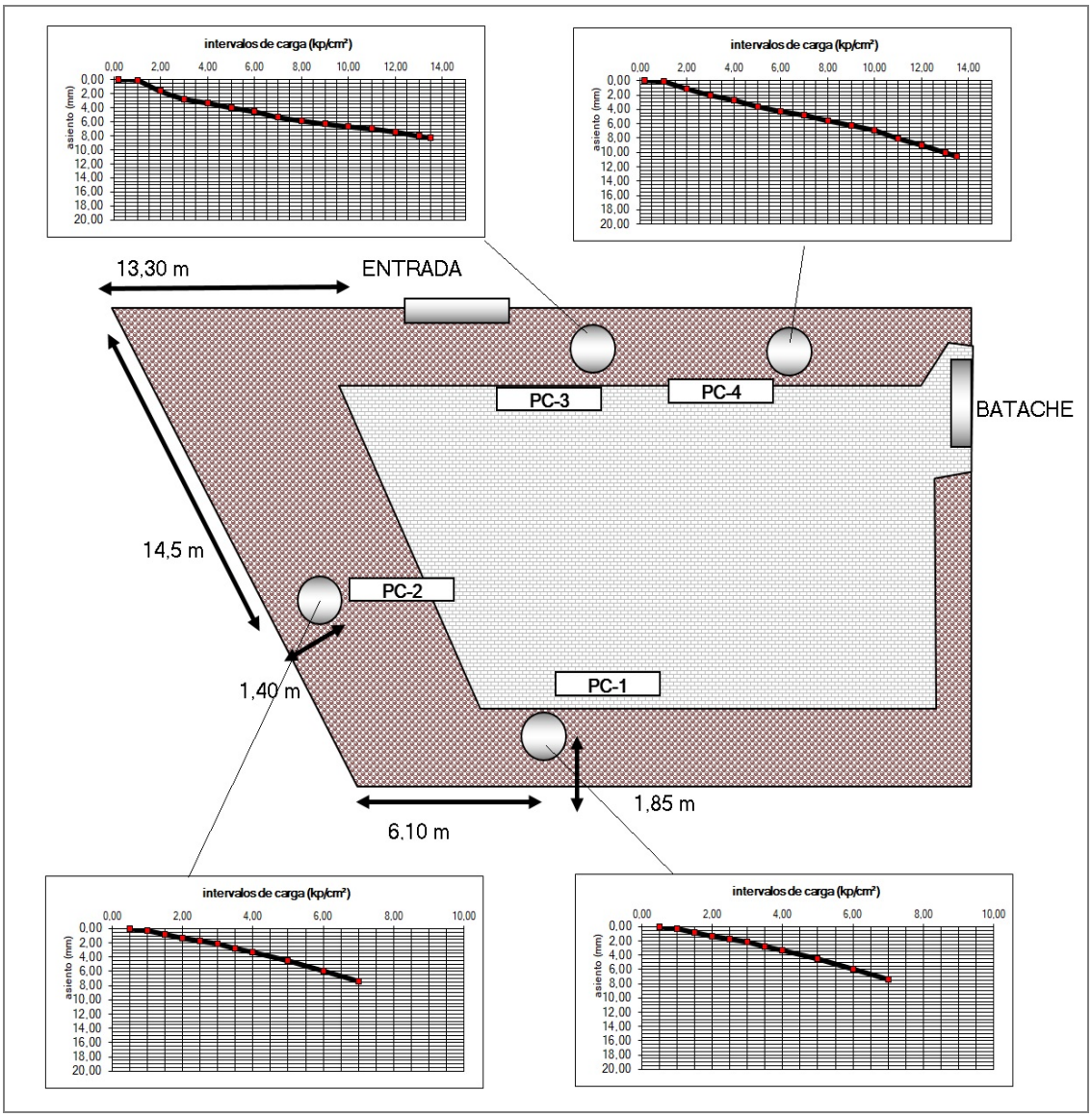


Figura 2.83. Localización y gráficas tensión-deformación de cuatro ensayos de carga con placa hasta 7 kp/cm² (PC-1 y PC-2) y 13,5 kp/cm² (PC-3 y PC4); estos dos últimos adyacentes al muro interior sur que colapsó la noche del 12 de junio de 2000.

Con la irrupción de la potente maquinaria de obras públicas se esfumó parte de esta sensibilidad. Pero también, gracias a su despliegue, el fenómeno del derrumbe se pudo investigar desde dos frentes: el tensodeformacional directo de las cagas de cimentación y el de la estabilidad de las excavaciones que también mostraremos. En ambos casos es la memoria de las gravas la que se expresa. En el proceso de investigación, realización de ensayos, cálculo de hipótesis y redacción de un informe, afloraron por encargo dos informes de las constructoras y contratas. Se sumaron al enriquecimiento de los puntos de vista sobre la resistencia de las terrazas, su estabilidad y el papel de base geotécnica competente de las Margas de Pamplona.

La descripción geológica de los terrenos que sustentan al hoy Paramento de Navarra es la siguiente:

a) Una capa de rellenos de obra provenientes de excavaciones contiguas que incluyen materiales pétreos de marga, así como trozos de sillares, hormigón, ladrillos, etc. (1,50–3,60 m).

b) Posteriormente y con potencias que van hasta los 5,10–5,70 m de profundidad, los rellenos cuaternarios P1 compuestos por gravas redondeadas inmersas en una matriz arenoarcillosa aparecen con colores rojizos. En algunas zonas el primer tramo decimétrico —de no más de un metro— presenta granulometrías más finas, incluso está exento de tamaños grava. Se trata de lentejones dispersos que no son muy habituales, pero sí conocidos y se han clasificado como suelos de tipo ML.

c) A partir de estas cotas, el macizo rocoso de Margas de Pamplona E1 aparece ligeramente alterado los primeros centímetros y sano —rechazando el cazo de las retroexcavadoras de obra— inmediatamente.

Se hace notar que, como mucho, el primer metro de la terraza cuaternaria (nivel geotécnico P1) está exento de gravas en dos de las zonas estudiadas, pero en la zona del muro sur que colapsó, este subnivel no aparece; aunque no es habitual su aparición, es conocido en Pamplona. Históricamente se ha evitado cimentar sobre él, popularmente esta saludable actividad geotécnica y constructiva se conoció y se conoce como *"apoyar en el cascajo", "bajar hasta el cascajo", "ir a por el cascajo"*, etc., una buena tradición constructiva que cualquier encargado en obra navarro y más concretamente, en Pamplona y hasta Olite donde comienza a denominarse *Almendrón*, aún puede corroborar.

Esta buena costumbre se viene transmitiendo de generación en generación de constructores, incluso hasta la llegada del motor de combustión y la irrupción simultánea del protagonismo geotécnico de las Margas de Pamplona en la actividad constructiva y edificatoria del área metropolitana de la capital de Navarra.

En el actual Parlamento de Navarra, esta práctica pudo ser corroborada en los frentes abiertos para los bataches en este edificio de 1890-1897 durante las obras del año 2000, especialmente en la fachada oeste, donde este subnivel intermitente adquiere una mayor notoriedad, pues en las zonas en las que aparece pudimos comprobar que el constructor, a la sazón, se cuidó muy mucho de *"bajar hasta el cascajo"*: todo el edificio se apoya sobre el nivel de gravas heterométricas P1 y allí donde no aparecían inmediatamente por este subnivel con arena y limo, se excavó hasta las gravas.

Ello repercutía no solamente en la capacidad portante del conjunto cimiento-terreno, sino que mejoraba sustancialmente la estabilidad de las excavaciones realizadas en el año 2000 cuando la moda (o necesidad) de los sótanos hasta el macizo rocoso eoceno E1 de Margas biarritzienses ya se había implantado en la vieja Iruña.

Las sospechas sobre el papel jugado por el nivel de limos, recogidas en el informe de la constructora, entregado a la Dirección Facultativa con fecha 6 de julio de 2000, después de observar golpeos N_{DPSH} $5<N<15$, decidiendo hacer calicatas, estuvieron muy bien para certificar que este nivel intermitente no era el culpable, sobre todo por su ausencia bajo el muro que colapsó. Al realizar dichas calicatas (como ensayos adicionales) la empresa concesionaria se dispuso a intentar corroborar la "existencia de rellenos de origen antrópico".

Gracias a esas aportaciones tuvimos mayor información para explicar por qué los primeros tramos de los ensayos de penetración presentan unos parámetros geotécnicos menos favorables a la par que falsos rechazos coincidiendo con sillares, rellenos antiguos, etc., informando de la presencia somera de un antiguo muro que rechazaba algunos ensayos de penetración dinámica y de unos supuestos "niveles cohesivos" (se trataba del subnivel de limos ML detectado en la zona oeste y norte) que lo hacían "más bajo de lo normal".

Nuestras investigaciones nos llevaron a contrastar que los bajos golpeos detectados en el seno de las gravas se debían a los típicos lentejones que pudimos testificar en la zona oeste y además también ensayamos, es decir, cotejamos los ensayos, las alturas de golpeo, las gráficas golpeo-profundidad, con la propia estratigrafía al descubierto. En un informe encargado por la constructora a una consultora geotécnica se detectó asimismo este fenómeno de bajadas en el golpeo y falsos rechazos, pero al explicarlo surge una contradicción, pues no se acierta plenamente en el origen de tales irregularidades, porque también se le achacó a "niveles cohesivos".

Este punto se analizó mientras se continuaba con las obras del edificio que albergaría el Parlamento de Navarra y fue motivo de una reunión especial de las partes involucradas para aclarar una interpretación con manifiestas contradicciones que a la Dirección Facultativa no le podía satisfacer: no se puede afirmar la existencia de niveles cohesivos cuando, en primer lugar, no están presentes en la zona afectada sino en zonas adyacentes; y segundo y más importante: si se habla de niveles cohesivos no se le puede achacar al terreno cohesión nula, que es lo que se hizo.

2.14.3. Contradicciones detectadas en las interpretaciones geotécnicas en el siglo XX.

Este es un punto muy importante, rescata el conocimiento geológico referido a la historia de la geotecnia en la ciudad de Pamplona, representada fundamentalmente por la unidad cuaternaria de terrazas de gravas P1 sobre las Margas de Pamplona E1 y le dota de una mirada técnica y un lenguaje acorde con la actualidad.

Desde que tenemos conocimiento, allá por la Edad de Hierro, de las interacciones humanas con esta disposición geológica a la hora de crear espacios urbanos, reiteramos que hay una experiencia inapelable: un determinado terreno, en este caso las gravas heterométricas de las terrazas de Pamplona P1, no tienen comportamientos contradictorios al estudiar un parámetro determinado desde de dos o más métodos distintos, afirmar tal cosa sería absurdo en la Edad de Hierro y ahora mismo en 2024.

Es siempre la persona que interpreta la que cae en contradicción. Para la empresa concesionaria, en el año 2000, era este nivel de gravas *"lo más importante a estudiar"*, pues es a este terreno al que le hacía responsable del fallo, aun cuando tradicionalmente se ha reconocido como un buen terreno desde la Edad de Hierro hasta nuestros días, pasando por las reutilizaciones parciales de las cimentaciones visigóticas y prerrománicas en el románico, y completamente en el gótico y barroco, por ejemplo, en la Catedral de Pamplona, edificio de Capitanía, Salesas, Palacio del Condestable...

El profesional de la geotecnia sabe que la naturaleza no suele presentar terrenos ideales, formados por elementos térreos que se ajusten a curvas parabólicas o que tengan un comportamiento perfectamente lineal. Estos son la excepción, no la regla, pero para poder entender y trabajar con terrenos naturales, la experiencia de los técnicos, su familiaridad con un terreno determinado y, sobre todo, el legado histórico y el sentido común pesan de forma decisiva. Por ello, si se fuerza a un suelo a explicaciones modelizadas matemáticamente para terrenos de otras naturalezas, surgen necesariamente contradicciones, de las cuales solo es responsable la persona que modeliza, no el terreno. La elección de un modelo u otro de explicación de la naturaleza de un suelo o una roca no modifica en lo más mínimo su comportamiento geotécnico. Así que buscar una explicación de por qué ante diferentes maneras de ensayo obtenemos respuestas contradictorias, es una labor tan científica como histórica.

Es por ello necesario, que un trabajo antes de técnico debe ser científico, es decir, para explicarnos el comportamiento de unas gravas heterométricas en matriz arenoarcillosa con niveles de limos semisaturados, no es adecuada la aplicación de métodos de cálculo y comportamiento de una arena homogénea, por ejemplo, como tampoco es necesario un artificio como la presencia de "niveles cohesivos" a la par que se le confiere cohesión nula a la formación; la técnica exige algo más.

Las gravas heterométricas de Pamplona son bien conocidas y han sido valoradas geotécnicamente innumerables veces, por ello, los datos históricos sumados al buen sentido común, también pesan de forma decisiva. Es oportuno subrayar que la contradicción sobre la idoneidad o no de las gravas heterométricas como garantes para soportar solicitaciones ante nuevos usos arquitectónicos aparece en un momento histórico importante. Durante todo el siglo XX se crearon normativas y procedimientos basados en estudios empíricos en formaciones homogéneas tales como arenas o gravas de granulometrías muy específicas (Terzaghi K., Peck R., Meyerhof G., Jiménez Salas J. A., Sanglerat G., etc.). Éstos fueron aplicados con el tiempo a terrenos que han sido utilizados desde la prehistoria, como es el caso que nos concierne, mucho antes de la aparición de cualquier técnica de auscultación. Más tarde, se aplicaron a prácticamente todo el espectro granulométrico como vimos en la figura 2.79 anteriormente al analizar la geotecnia en el caso del edificio de Salesas, hoy MCP.

El bajo valor de N en los ensayos de penetración dinámica en los citados niveles limosos de baja plasticidad ML (con bajadas en diente de sierra) no es achacable a unos supuestos *"niveles cohesivos"* que no se detectan y ni siquiera son descritos en los estudios dedicados a esclarecer lo ocurrido en el edificio de la Antigua Audiencia Territorial de Navarra ni en la bibliografía. Lo que sí hemos detectado muchas veces en las terrazas de gravas que yacen sobre las Margas de Pamplona y hemos analizado en varias ocasiones, es un nivel limoso y arenoarcilloso, a veces no plástico, de menor cohesión que los niveles de gravas en matriz arenoarcillosa, en estado de semisaturación, exento de material grueso o excesivamente fino, que se puede repetir o no a varias alturas, aparece en pequeños lentejones decimétricos y rara vez superan el metro.

Este nivel, bajo el suelo del Parlamento o la Antigua Audiencia, se repite a varias alturas y es, además, una parte de la explicación para las típicas gráficas en diente de sierra de las terrazas cuaternarias en Pamplona y en otras circunscripciones que, sumadas a los golpeos más altos de los propios granos de grava embebidos en la formación, satisfacen una explicación para las gráficas golpeo-profundidad de los penetrómetros continuos en la propia terraza cuaternaria.

Por un lado, los golpeos iniciales, se achacan a rellenos antrópicos que se ha visto que fueron traspasados a la hora de apoyar las cimentaciones, es decir, que en la cimentación del edificio histórico que se bajó al "cascajo", los apoyos no son superficiales y la existencia de rellenos antiguos es irrelevante a efectos de carga, puesto que fueron evitados ya a finales del siglo XIX, este hecho fue observable en la zona norte y oeste durante la ejecución de las obras del año 2000 y redunda en unos valores obviamente más elevados de estabilidad y capacidad portante de todo el edificio. Por otro lado, si del bajo golpeo (N) a la penetración dinámica se le hacía responsable a supuestos niveles cohesivos con *"abundante matriz arcillosa"* debería haberse introducido dicha cohesión, aparentemente tan importante, en los cálculos de estabilidad y, sin embargo, se consideró nula.

Una mirada sin prejuicios a la naturaleza del terreno lleva a considerar que la solución a semejante contradicción no hay que buscarla en unos posibles niveles inferidos, extraídos de un campo de experiencia limitado a la demasiado extendida dualidad "cohesivo-granular", sino que el mismo nivel geológico descrito tiene la clave de su propio comportamiento, y ésta, se halla en esos niveles limosos y arenoarcillosos semisaturados, niveles muy poco comprendidos en lo que a comportamiento geotécnico se refiere para las personas que opinan que solamente los elementos cohesivos pueden "disminuir" algunos parámetros geotécnicos de terrenos granulares.

Existen ciertas disposiciones minerales que pueden conferir propiedades no usuales (como el de ser ligeramente colapsables) al material que los contiene si se producen fuerzas exógenas como vibraciones o terremotos. Para más información ver el análisis detallado de la iglesia de San Miguel en Noáin en esta misma tesis o el de los procesos mecánicos que se producen en el entorno de la puntaza del penetrómetro en estos terrenos y su repercusión sobre el golpeo N en suelos semisaturados navarros *("Algunas aclaraciones sobre estudios geotécnicos en suelos colapsables en Navarra"*. RE: revista de edificación, ISSN 0213-8948, Nº 31-32, 2002. INGEOPRES, Nº. 142, ISSN 1136-4785 2005, págs. 48-53 1998. INGEOTER. Vol. 8. Cap. 6. ISBN: 9798493129292. Aretxabala, A. 2002); asimismo se dio una explicación precisa en esa publicación que ayuda a entender por qué se hace necesario acudir a ensayos de carga para obtener una información adecuada de la capacidad portante de terrenos que realmente de cohesivos tienen poco o nada. La posibilidad de juzgar el comportamiento de este terreno requiere exactitud en la comprensión de los procesos evolutivos que muestra, y la prudencia, en este caso, se apoya, entre otras cosas, en el conocimiento de estos procesos. Cuando se llevó a cabo el estudio sobre las causas del colapso parcial del edificio, en los terrenos que sustentan el actual Parlamento de Navarra, se trabajó con cuatro fuentes de información sobre los parámetros geotécnicos más importantes que dieran luz sobre lo ocurrido.

Fuentes de información para explicar el colapso del muro interior sur:

1- Mapa Geotécnico Para Ordenación Territorial y Urbana de Pamplona (MGP).

2- Ensayos y análisis realizados por el Laboratorio del ICT (ICT).

3- Ensayos y análisis realizados por Laboratorios Proyex y presentados por ACS (ACS).

4- Ensayos y análisis realizados por INTEMAC (INT).

La siguiente tabla XIII compara algunos de los parámetros utilizados, los cuales debieran ser los mismos tanto para el caso de la estabilidad de una cimentación como de un talud, dado que ambas unidades constructivas se realizan sobre idéntico terreno.

Tabla XIII

Parámetro estudiado por:	Tipo de terreno	peso específico (g/cm^3)	ángulo de rozamiento interno (º)	cohesión (kp/cm^2)	Fuentes:
1-MGP	Grava	2,10	28-35	0,00-0,89	Ensayos de corte y compresión
2-ICT	Grava	2,10	22-32	0,08-0,35	Ensayos de corte y ST-308
3-ACS	Grava	2,10	35	0,05	---
4-INT	Grava	2,10	22-35	0,05-0,15	---

En la siguiente tabla XIV se resumen los datos estudiados relacionados con la capacidad portante de este nivel de gravas sobre el que se apoya aproximadamente la mitad de la ciudad.

Tabla XIV

Parámetro estudiado por:	Capacidad portante	Características geomecánicas	Ensayos realizados	Método de calculo	Observaciones
1-MGP	2,5-3,5 (kp/cm^2)	compactos a muy compactos (NTE-CEG)	Penetración, carga y de lab, sondeos, etc.	Terzaghi-Peck	Datos históricos publicados por Gob. de Navarra para Pamplona (ISBN 84-235-0816-1)
2-ICT	< 3,5 (kp/cm^2)	firmes a muy firmes (NTE-CEG)	carga y de labº	Terzaghi-Peck	Incluyen análisis de estabilidad de una cimentación corrida
3-ACS	"baja"	suelto a compacto	penetración dinámica	Meyerhof-Sanglerat	De N se pasa a qc y de qc a qad
4-INT	sin definir	sin definir	sin definir	sin definir	sin definir

2.14.3.1. Penetrómetros y capacidad portante en las gravas cuaternarias de Pamplona.

Tal y como se explica, el estudio general que aporta 1-MGP, utilizó las tesis de Terzaghi y Peck para la elaboración de esta publicación que abarca la ciudad de Pamplona y su área metropolitana. El método Sanglerat informa también de una muy extendida costumbre para el cálculo de la tensión admisible, en él se propone una fórmula directa para pasar desde Rd (Resistencia dinámica) a q_{ad} (tensión admisible) sin pasar por q_c (Resistencia estática en punta), esta es la conocida fórmula q_{ad}=Rd/20. Un laboratorio suministró estos valiosos diagramas de Rd que la empresa constructora presentó acompañando a su informe.

Si introducimos esta fórmula directa, las tensiones admisibles oscilaban entonces entre valores de 1 a 9 kp/cm², algo que el mismo método Sanglerat advierte debe acompañarse con otros ensayos. Además, esta transformación directa nos hablaba prácticamente del doble de la capacidad portante definida en el informe de la empresa constructora. Guy Sanglerat indica que los valores que vienen a ser la mitad, coinciden con la cohesión aparente, según la fórmula $c_u=q_c/2$, es decir, que los valores suministrados por los penetrómetros podrían acercarse perfectamente a los de la cohesión, algo que parece no casar muy bien con el valor de c=0,05 kp/cm² (columna 5 de la tabla XIV).

La figura 2.79 que vimos en el convento de Salesas situado a unos 170 m del Parlamento sobre las mismas gravas, se mostraron los valores para pasar de N (golpeo dinámico estándar) a q_c (resistencia a la penetración estática) realizados por Burland y Burbridge en 1985, en función de la granulometría del terreno, estos autores ampliaron los estudios de Meyerhof de 1956 para las arenas, a otros espectros granulométricos. Se trata de una de las conversiones más amplias a la manera de trabajo de este investigador de que disponemos hasta la fecha.

En la figura 2.79 de Salesas mostramos también el área de ocupación de la gráfica del huso granulométrico (figura 2.77) de los ensayos recopilados por el IGME y retomados por 1-MGP para la elaboración de la mencionada publicación de 1988 aplicada a estas gravas P1. Si tomamos de la infinitud de ensayos, un diámetro representativo, por ejemplo, D_{50} (diámetro correspondiente a la mitad de la distribución de partículas del material; en la figura 2.79 se pueden ver en rojo las líneas correspondientes al término más grueso 10 mm y el más fino 2,5 mm), veremos cuál sería la conversión SPT-CPT más aproximada para estos terrenos, y cuáles sus valores extremos y si realizamos los mismos pasos que en el vecino convento de Salesas tenemos que: nos quedaría una tensión admisible siguiendo la conversión seguida por ACS, pero de forma mucho más aproximada, para 4<N<8, q_{ad} = 2,0 – 8,0 kp/cm², algo que se acerca mucho más a nuestros cálculos y a los de la publicación del Gobierno de Navarra.

Pero, incluso con aproximaciones tan afinadas, esta forma de calcular tensiones admisibles en las terrazas de Pamplona sustentadas por la formación biarritziense de margas, guarda muchas incertidumbres; hemos pasado del golpeo del ensayo DPSH al NSPT, de éste a la Resistencia estática q_c y de ésta a la tensión admisible q_{ad}; creemos más lógico cuantificar directamente, por medio de algún ensayo normalizado, la relación "tensión–deformación", sin extrapolar datos. Así dicha relación "tensión–deformación" del terreno será la misma que bajo las cimentaciones, para ello, introducimos al técnico que lea estas líneas al objetivo perseguido con los ensayos de carga: obtener una relación real "tensión–deformación" del terreno y una lectura contextual.

2.14.3.2. Carga con placa y capacidad portante en las gravas cuaternarias de Pamplona.

Preparamos una pequeña introducción a la interpretación de estos ensayos. Las posibilidades de interpretación de estos procedimientos directos tensión-deformación son mucho más ricas que las del penetrómetro habitual. Ofrecen la relación real tensión-deformación y una imagen 3D.

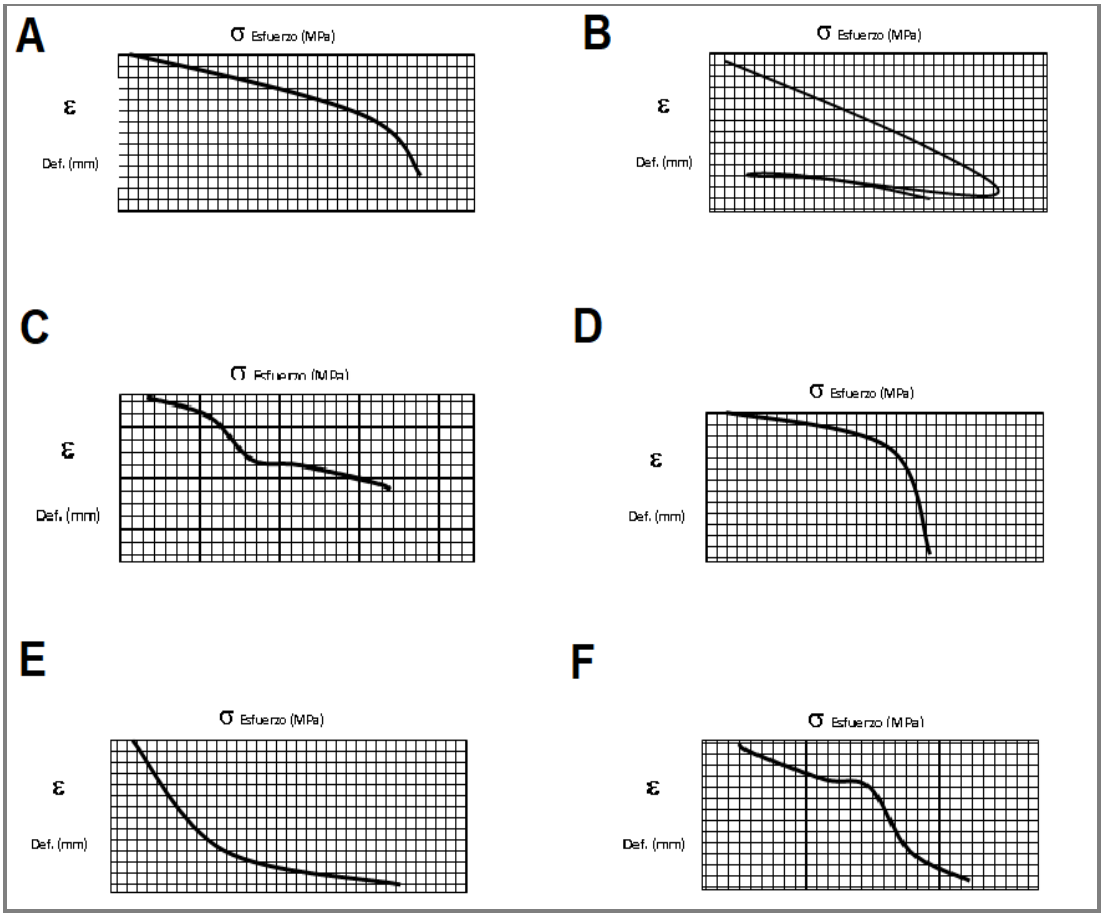


Figura 2.84. Gráficas típicas de carga convencional y deformación con o sin rotura del terreno y diferentes disposiciones que se explican en el texto. En horizontal se representa la carga sobre el terreno de un dispositivo de geometría conocida y en vertical se representa la deformación de dicho terreno.

Con el ensayo de carga con placa obtenemos este objetivo transmitiendo carga a un gato hidráulico apoyado en una grúa de 40 toneladas y midiendo las deflexiones del terreno bajo ella; representamos la relación esfuerzo (en abscisas) y deformación (en ordenadas) en un gráfico; estas representaciones pueden tener diferentes expresiones como las que vemos en la anterior figura de 2.84A a 2.84F.

A. En el gráfico de la figura 2.84A se puede observar un primer tramo elástico en el que las relaciones esfuerzo deformación son proporcionales. Posteriormente, una zona crítica supone la aparición de un tramo plástico que se puede interpretar como la rotura parcial del terreno donde la deformación aumenta considerablemente con muy pocos incrementos en el esfuerzo. La relación $(\Delta\sigma/\Delta\varepsilon)$xD siendo D el diámetro de la placa, se denomina módulo de deformación (M_E) y su dimensión es la de una presión (kp/cm², MPa, Nw/mm², etc.). Este valor puede prefijarse en función de las solicitaciones que se requieran para una determinada función del terreno de infraestructura, ataluzado, terraplenado, etc.

B. Aquellos ensayos que se realizan con dos ciclos de carga presentan una imagen como la que se puede ver en el caso de la figura 2.84B y en el que se puede observar cómo después de un ciclo de carga y otro de descarga, volvemos a pasar por intervalos iguales con pendientes distintas. En este caso, se pueden medir para los mismos intervalos de carga dos valores del módulo de deformación M_{E1} y M_{E2} siendo mayor el segundo, dado que el paso por primera vez por un determinado intervalo de carga produce una compactación o consolidación del terreno haciéndolo más denso, compacto y con mejores prestaciones geotécnicas, por lo que la segunda pasada por esas mismas tensiones es ya sobre un terreno que ha sido mejorado. Por otro lado, la profundidad afectada es aproximadamente el doble del diámetro de la placa, esto se hace más notable a mayores presiones para un ancho o diámetro determinado. De esta forma distintos tipos de gráficas informan sobre fenómenos distintos. La anterior gráfica 2.84B muestra también un terreno homogéneo y elástico en el que la relación esfuerzo deformación es lineal en profundidad y no se alcanza la rotura.

C. En el caso C se puede ver un terreno en el que existe un blandón o presenta unas características geotécnicas un tanto deficientes a partir de cierta carga, sería el caso de un subnivel cohesivo o granular semisaturado de características geotécnicas menos favorables como al que se culpó de ser cohesivo y no cohesivo simultáneamente.

D. Si el incremento de las deformaciones con las cargas se extiende en profundidad, o se da el caso de que era solamente la parte inicial más superficial la que presentaba buenas condiciones portantes y por debajo se encuentra un terreno más blando, tenemos el caso D que también puede representar un terreno que ha alcanzado su límite elástico y se ha llevado a la rotura.

E. En el caso E el fenómeno es el contrario, bajo la capa menos densa que estamos ensayando existe otra mucho más favorable geotécnicamente. Una variante de esta disposición es que la capa más densa y de mejores prestaciones geotécnicas esté embebida y sea lo suficientemente pequeña como para quedar reflejada en el diagrama tensión-deformación (es el siguiente caso F).

F. El último caso F es el de un caso E, pero intercalado. También así se puede visualizar la existencia de cuerpos extraños como grandes bolos o sillares y trozos de roca localizados en el seno de las capas estudiadas, tal cual comentaba la empresa adjudicataria sobre un antiguo muro; es de destacar que es el caso complementario a C.

La compactación bajo las cimentaciones del edificio del hoy Parlamento de Navarra estuvo un siglo transmitiendo unos 4,5 kp/cm² con el resultado inicial de un asiento medio de unos 1,76 cm en condiciones como las de la gráfica B, atendiendo exclusivamente al primer ciclo de carga. La descarga posterior y recarga debería seguir el mismo itinerario, por eso se comprobó hasta 13,5 kp/cm² como límite tecnológico físico al que se pudo llegar. El resultado no fue nada sorpresivo, es el que se puede ver en la figura 2.83. En la siguiente tabla XV podemos ver un resumen de los parámetros estudiados en los cuatro ensayos de carga de la figura 2.83 que, a la sazón, nos dieron una respuesta.

Tabla XV:

Ensayo	Carga máx. (kp/cm²)	Asiento máx. (cm)	M_E Entre 2 y 3 kp/cm²	M_E Entre 5 y 6 kp/cm²	M_E Entre 9 y 10 kp/cm²
PC-1 (ϕ 60 cm)	7,0	0,74	359	210	---
PC-2 (ϕ 60 cm)	7,0	0,44	549	448	---
PC-3 (ϕ 30 cm)	13,5	0,82	271	552	804
PC-4 (ϕ 30 cm)	13,5	1,05	317	523	500

2.14.3.3. Preguntas y respuestas mecánicas bajo el Parlamento de Navarra.

A partir de estos datos y de los análisis a los distintos ensayos realizados, para un cimiento de 1,2 m de ancho como el que se construyó para despedir el siglo XIX, podemos estudiar la trayectoria tensional y la respuesta del terreno de acuerdo a los datos dinámicos ahora conocidos.

En la tabla y gráfica de la siguiente figura 2.85 podemos recrear la historia tensional de acuerdo a las modificaciones sufridas por el edificio desde su construcción, se trata de una suerte de *"interrogatorio geotécnico"* en lenguaje mecánico, el propio terreno responde con deformación a las preguntas: las cargas. Esta es la única manera directa con que podemos estudiar la trayectoria de estos últimos acontecimientos del terreno[6].

Etapa constructiva	Edificación y puesta en servicio Hasta el inicio de las obras (4,50 kp/cm²)	Vaciado, demoliciones, retirada de forjados, etc. (2,73 kp/cm²)	Bataches 1 en proyecto (3,50 kp/cm²)	Situación pésima de sobreexcavación (5,43 kp/cm²)	Media (del asiento adicional experimentado en condiciones de sobreexcavación en las zonas de berma)
P-1	Asiento 2,10 cm	Permanece	Permanece	Asiento adicional 0,68 cm	0,44 cm
P-2	Asiento 1,32 cm	Permanece	Permanece	Asiento adicional 0,35 cm	
P-3	Asiento 1,94 cm	Permanece	Permanece	Asiento adicional 0,33 cm	
P-4	Asiento 1,69 cm	Permanece	Permanece	Asiento adicional 0,41 cm	

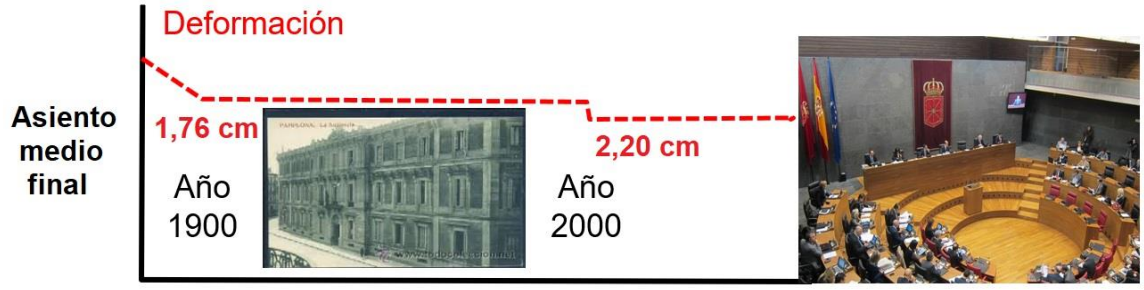


Figura 2.85. Evolución histórica de la relación cargas-asientos de la antigua Audiencia Provincial en su transformación a Parlamento de Navarra.

[6] Utilizamos la conocida fórmula dada por Terzaghi: $S=S_0 \times (2B/(B+0{,}30))^2$ donde S es el asiento que experimentará la cimentación de ancho B, tomando como referencia el asiento (S_0) de la placa utilizada de 0,30 m de diámetro.

La figura anterior muestra la situación tensional de partida y la evolución posterior. Se muestra cómo se pueden recrear las trayectorias tensionales desde el nacimiento de la edificación hasta lo sucedido la noche del 12 de junio del año 2000. Las dimensiones y datos geométricos se pudieron tomar a partir de la zona oeste del edificio histórico, la más pésima de todas.

También, dispusimos de una fotografía que se realizó el día 12 al mediodía. Muestra el denominado *batache 1* (eran tres generaciones de bataches denominadas 1, 2 y 3) situado al oeste de la fachada sur que colapsó y se puede ver en toda su extensión horas antes del desplome. Las distancias y perspectivas son conocidas y además las medidas de obra para la ejecución de los bataches y cimentaciones están marcadas con pintura verde y roja para orientar a los operarios (figura 2.86).

Figura 2.86. Sobreexcavación (en rojo) del denominado "batache de generación 1" (se realizarían al tresbolillo hasta tres generaciones) en prácticamente el doble de lo indicado (en verde). Foto facilitada por la ingeniería de estructuras el día 12 de junio de 2000. Se pueden ver: el cimiento corrido de mampostería con aglomerante hidráulico, el apoyo sobre las terrazas cuaternarias de gravas en matriz arcillosa P1 y la formación eocena de Margas de Pamplona E1 que acogerían las nuevas solicitaciones.

2.14.4. Análisis de un colapso desde la estabilidad de las cimentaciones.

El modelo utilizado es el siguiente: altura del talud hasta la berma: 3,5 m; ancho de la berma: 1,7 m; empotramiento del cimiento en gravas: 0,40 m; ángulo: 60º, ancho del cimiento 1,20 m; altura del terreno tras el cimiento: 1,2 m; bajo todo esto, se encuentra la formación de gravas heterométricas P1 y continúa el talud 1,5 m más hasta el biarritziense de Margas de Pamplona E1. A partir de las trayectorias tensionales de los ensayos de carga, podemos recoger la historia del edificio en un itinerario tensión-deformación como el de la figura 2.85 en cuatro puntos diferentes cercanos a la zona colapsada. El primer episodio recrea las condiciones de construcción del edificio hasta los 4,5 kp/cm² alcanzados. Se produce durante las obras un asiento generalizado y prácticamente inmediato de unos 1,76 cm. Desde ese momento hasta el comienzo de las obras, más de un siglo después, el edificio alberga la Audiencia Provincial de Navarra. Al comenzar las obras para el nuevo uso como Parlamento de Navarra con las modificaciones comentadas, en primer lugar, se conservan fachadas, se demuelen los antiguos muros y se vacían forjados y otros elementos estructurales, cubiertas, etc. La carga disminuye hasta los 2,73 kp/cm², el terreno en descarga no manifiesta ninguna reacción.

Si se hubiesen ejecutado simultáneamente tres de los bataches de 3 m proyectados (figura 2.86 y 2.87 en verde), en el peor de los casos, es decir, tres tandas de bataches excavados, en ejecución o recién hechos aún sin entrar en carga por falta de fraguado o adecuación (incluidas las prisas), se hubiesen incrementado las cargas hasta los 3,5 kp/cm² que fue el límite tensional de la recomendación hecha en el informe geotécnico que realizamos años antes. El terreno, al no sobrepasar los 4,5 kp/cm² del siglo anterior, no manifestaría tampoco ninguna reacción. Sin embargo, la situación de sobreexcavación a que se sometió al muro (figuras 2.86 y 2.87 en rojo), supuso franquear ese umbral recomendado y no sólo ese, también la tensión histórica de más de un siglo de 4,5 kp/cm² alcanzando los 5,43 kp/cm².

Obviamente el terreno, ante esta nueva situación desconocida reaccionó y se contrajo verticalmente del orden de medio centímetro (figura 2.85), suficiente para que unos muros rígidos con muy poco apoyo comenzasen a crujir, a extenderse la fisuración con el resultado del colapso final del muro. En efecto, todos los materiales granulares, cohesivos y rocas expresan su historia tensional en términos de deformación, en laboratorio suele utilizarse el ensayo edométrico para terrenos cohesivos, arcillas y materiales de grano fino, los terrenos así estudiados manifiestan una trayectoria tensodeformacional lineal hasta alcanzar cargas desconocidas, a partir de éstas, la deformación aumenta con presiones de confinamiento muy pequeñas, el terreno tiene que reajustar sus partículas a nuevas condiciones como en la gráfica D de la figura 2.84.

Observando el resumen de la historia tensional y deformacional del terreno del edificio, en las dos últimas columnas de la figura 2.85 o en la gráfica en el año 2000 bajo ella, se aclaran por sí mismas las causas del derrumbe. Los datos corresponden a los de una cimentación corrida de 1,20 m de ancho como hemos explicado. Para terrenos granulares finos, limos y arenas, también se utilizan estos *"interrogatorios geotécnicos"*. En rocas, los ensayos de compresión simple manifiestan actividad microsísmica solamente a partir de las tensiones que la roca no ha conocido, por ello, si queremos recrear las condiciones tensionales en las que se encontró un determinado macizo rocoso en su historia, debemos aumentar la carga y detectar, por ejemplo, con un transductor o detector de actividad microsísmica el inicio de la misma: ese es el máximo nivel "conocido por la roca" (efecto Kaiser).

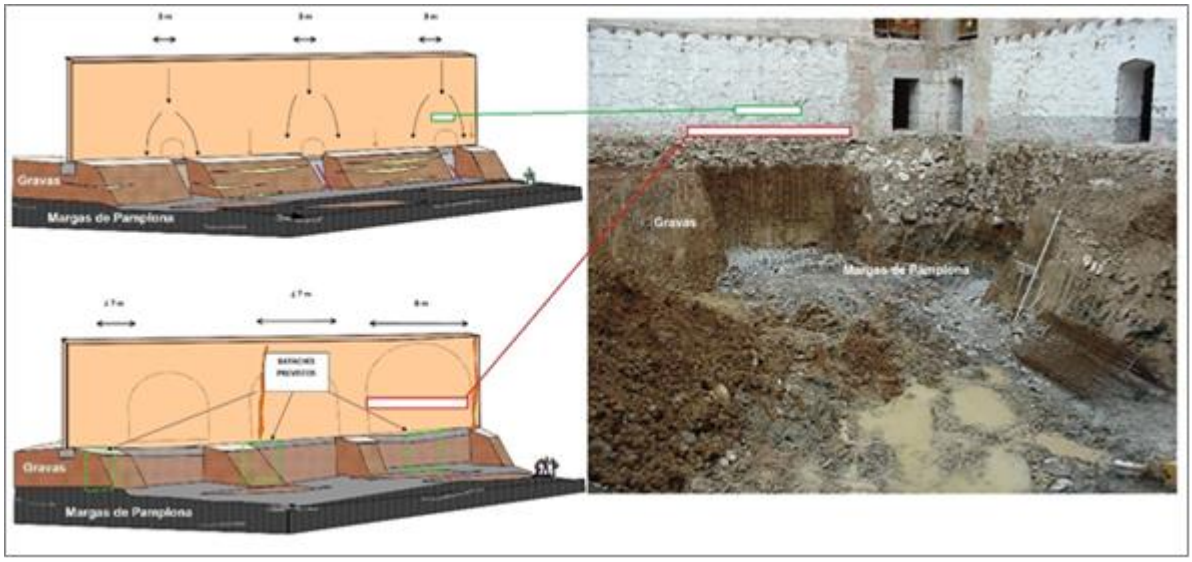


Figura 2.87. Sobreexcavación del denominado "batache de generación 1" y recreación de lo realmente sucedido: convivieron tres ejecuciones excavadas bajo el viejo muro de la Audiencia Provincial. El muro que colapsó quedó prácticamente sin apoyo.

En gravas, ni los ensayos de compresión ni los ensayos edométricos son posibles, solamente con los ensayos de carga podemos culminar esta experiencia, que es lo que hicimos en el Parlamento de Navarra. El terreno deberá comenzar a deformarse al superar estados tensionales desconocidos en su historia, dado que este intervalo es muy difícil de determinar por la propia naturaleza del suelo. Éste, en el caso que nos concierne, debería comenzar a comportarse de forma "extraña" a partir de unos 4,5 kp/cm², tensión máxima conocida bajo las cimentaciones durante la vida del edificio, y eso es lo que sucedió. Todas las disposiciones de las partículas del terreno han estado alguna vez sometidas a esas cargas o menores, por ello, al traspasar ese umbral, tal y como es de prever, el terreno reajustó sus partículas y se deformó. Las rígidas estructuras de mampostería y ladrillo comenzaron a crujir (figura 2.87).

2.14.5. Análisis de un colapso desde la estabilidad de las excavaciones.

El mismo análisis se puede aplicar a la estabilidad de la propia excavación. La siguiente figura 2.88 resume los estados tensionales en relación al factor de seguridad (FS) aplicando el método de Bishop. El caso A representa la excavación de 3,5 m de profundidad hasta las Margas de Pamplona dejando una berma de 1,7 m con las cargas que transmitía el edificio de la Audiencia Territorial de 33 t/m durante todo el siglo XX, el FS=1,47. El caso B representaría un momento en el que tres bataches de 3 m de ancho (9 m) dejaran una parte del terreno sin carga y los arcos de descarga se llevasen al resto del muro: 42 t/m y FS=1,25.

El caso C no existió, pero era una manera de demostrar con los datos suministrados por la empresa constructora y la consultora geotécnica, que con c=0,05 kp/cm² y ϕ=35 el menor FS se daría en la zona de pendiente, lo cual no representaba en absoluto lo sucedido. El caso D es el caso real que colapsó al descalzar 18 de los 24 m del muro sur, transmitiendo (si en algún momento esta situación teórica pudo darse) 65 t/m al terreno. El FS=1 y el talud deslizaría.

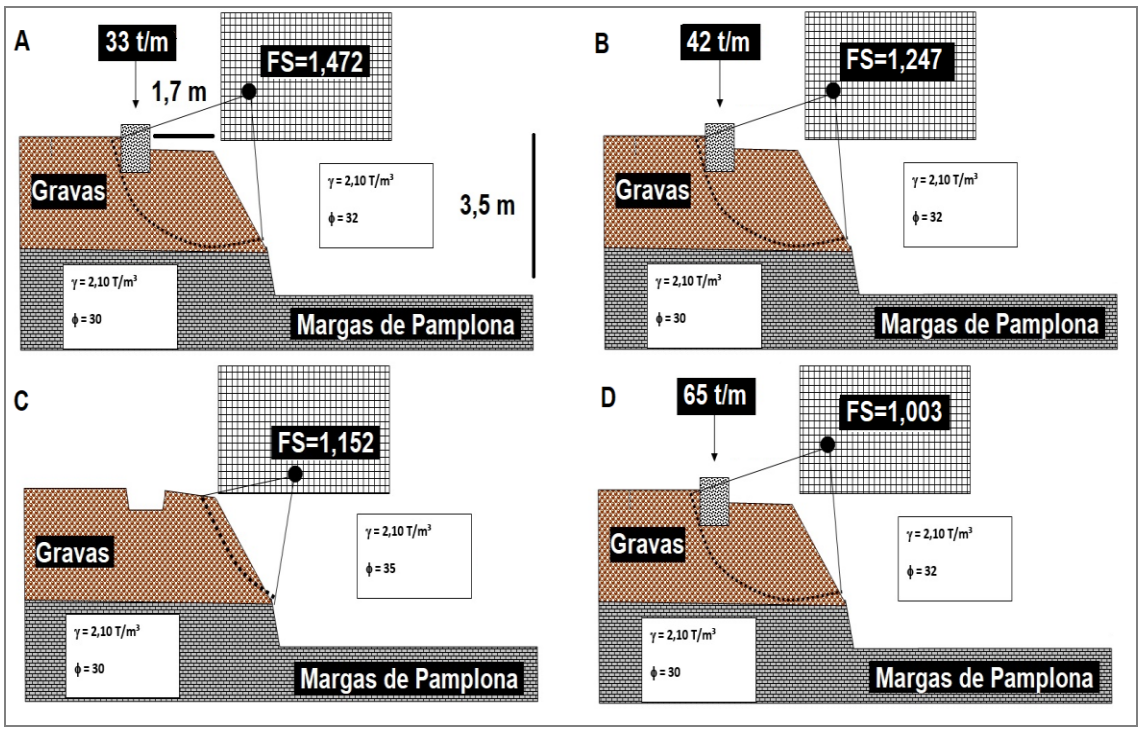


Figura 2.88. Los taludes dejados cuando se ejecutó la reforma y la restauración para el nuevo Parlamento de Navarra en el año 2000, que mantenía las cargas del edificio situadas inmediatamente detrás de la berma a una profundidad de más de 2 m, se encontraban en una situación sobradamente estable con FS > 1,47.

Las observaciones que hemos desarrollado aquí no están solamente basadas en los resultados obtenidos de las prospecciones, ensayos de laboratorio y cálculos de ingeniería, también se han considerado las conversaciones y observaciones personales de quienes escucharon los crujidos, observaron las primeras grietas directamente en obra y señalaron el problema horas antes.

Es así como se pudo trazar un itinerario que satisfizo una interpretación geotécnica del colapso parcial del edificio en rehabilitación. Las perturbaciones que se introdujeron en la estructura y en el subsuelo vinieron derivadas de aquellas acciones. La estructura también pudo verse afectada por la demolición de la solera del trasdós con el movimiento de máquinas y vibraciones que pudieron afectar mucho más a la fábrica de ladrillo que al terreno consolidado durante un siglo; finalmente, la suma de todo ello produjo el desplome analizado.

La situación de partida es la que se presenta en la figura 2.88A, las dimensiones se han tomado a partir de la zona oeste, que era la más pésima, también de la fotografía que se realizó el día 12 de junio de 2000 al mediodía, horas antes del colapso (figura 2.86), la cual muestra el denominado batache de generación o grupo 1 oeste de la fachada sur en toda su extensión (hubo tres grupos o generaciones de bataches denominados bataches de generación o grupo 1, 2 y 3).

Las distancias y la geometría eran conocidas, el modelo utilizado entonces fue el siguiente: altura del talud hasta la berma: 3,5 m; ancho de la berma: 1,7 m; empotramiento del cimiento en gravas: 0,40 m; ángulo: 60º, ancho del cimiento 1,20 m; altura del terreno tras el cimiento: 1,2 m.

Bajo todo esto, se encuentra la formación de gravas heterométricas y continúa el talud 1,5 m más hasta el macizo biarritziense de Margas de Pamplona. La situación en que se encontraba la excavación el día 12 de junio de 2000 puede visualizarse en las figuras 2.86 y 2.87 y era la misma o similar a la que había en la fachada norte.

La situación de estabilidad de esta disposición del muro sur interior con la distribución geométrica definida más arriba puede visualizarse en la figura 2.88A, ésta, asimismo, es similar, aunque ciertamente menos favorable que en la zona norte u oeste.

Así se explica por qué la situación fue estable en otras zonas, como lo fue en el muro sur hasta el descalce de buena parte del muro, unos valores más cercanos a la realidad de la cohesión dejaron la certeza de que la sobreexcavación fue responsable del colapso.

El siguiente párrafo está extraído del publicado por el Gobierno de Navarra y el IGME en 2002, (pág. 51, condiciones para obras de tierra) en él se hace referencia a las excavaciones realizadas en este nivel de gravas P1:

> *"Estabilidad de taludes:*
>
> *Los taludes naturales que se observan son los que corresponden, cuando existan, a bordes de terraza; son estables, aunque pueden producirse pequeños desprendimientos de cantos. Los taludes provisionales, en ausencia de nivel freático, se mantienen verticales con alturas de 2-3 m; los taludes definitivos, con alturas inferiores a 10 m pueden proyectarse 3:4 (H/V)."*

Es obvio que semejante definición habla de un terreno muchísimo más favorable de lo que pudimos ver en los análisis de quienes tacharon al terreno de deficiente o de ser cohesivo y no cohesivo a la vez y además se corresponden con el conocimiento histórico que tenemos de la formación cuaternaria P1. Si volvemos la mirada a las recomendaciones sobre el proyecto de taludes definitivos y nos fijamos en que la componente horizontal puede ser menor que la vertical, "3:4 (H/V).", debemos darnos cuenta de que esto es así porque se está contando con una importante componente natural: la cohesión; por lo tanto, si nos pasamos de conservadores en nuestros cálculos y los éstos desprecian esta fuerza natural, tanto si se debe a la matriz arcillosa como a las fuerzas capilares y enlaces de carga eléctrica descritas por ejemplo en *"Algunas aclaraciones sobre estudios geotécnicos en suelos colapsables en Navarra"*. (RE: revista de edificación, ISSN 0213-8948, N.º 31-32, 2002. INGEOPRES, N.º. 142, ISSN 1136-4785 2005, págs. 48-53 1998. INGEOTER. Vol. 8. Cap. 6. ISBN: 9798493129292. Aretxabala, A. 2002), o a ambas, estamos cayendo en una contradicción.

Al eludir esta fuerza, los cálculos no son representativos de los procesos ni de la dinámica que se puede observar en el terreno que estamos analizando. Por otro lado, en esta frase se describe perfectamente el modo de inestabilidad de tales terrenos, algo que se ha podido observar igualmente, al tratarse del mismo terreno descrito, en el patio de la antigua Audiencia Provincial: *"...son estables aunque pueden producirse pequeños desprendimientos de cantos...",* si los referidos "cantos" se desprenden, es porque previamente están prendidos, así nos volvemos a encontrar nuevamente con la cohesión y con la contradicción que se aportaba entonces por parte de la constructora y no es otra que la descripción referente a la cohesión natural, un terreno que presentase una cohesión prácticamente nula, por ejemplo: 0,05 kp/cm² (0,5 T/m²) no podría manifestar tales procesos geológicos, dándose la fluencia paralela al talud de sus granos (figura 2.88C); tampoco podrían mantenerse las excavaciones verticales como pudo verse en ocasiones en la obra y habitualmente en cualquier obra de Pamplona en las terrazas cuaternarias sobre las Margas de Pamplona.

En la tabla siguiente puede verse un resumen de los parámetros naturales de cohesión y rozamiento interno estudiados, tanto para las gravas en matriz arenoarcillosa como para los limos semisaturados:

Tabla XVI

Subnivel estudiado	Cohesión (kp/cm²) Corte Directo	Rozamiento interno (º) Corte Directo	Cohesión (kp/cm²) ST-308
Gravas, en matriz limoarcillosa	0,24	32	0,16-0,35
Limos semisaturados	0,12	22	0,08-0,18

La presencia de ambos niveles en las zonas menos favorables donde no se produjeron inestabilidades, ya que como pudimos comprobar, los niveles de limos semisaturados bajo la zona colapsada no estaban presentes, puede tomarse como de un 20 % para los limos y un 80% aproximadamente para las gravas, aunque esto puede variar de una zona a otra de cualquier obra de Pamplona. Los cálculos de los diferentes estados tensionales que utilizamos son los anteriores, pero ahora aplicados a la estabilidad de las excavaciones:

1-Bataches de 3,20 m considerando un tramo de 31 m: masa total 1.016 ton.

Antes de la excavación: $q_u = 33$ t/m, $\sigma = 2{,}73$ kp/cm²

Después de la excavación de bataches 1 $q_u = 42$ t/m, $\sigma = 3{,}50$ kp/cm²

Se pueden visualizar estas situaciones en las figuras 2.88A y 2.88B.

2-Bataches de 6 m considerando un tramo de 24 m: masa total 783 ton.

Antes de la excavación: $q_u = 33$ t/m, $\sigma = 2{,}72$ kp/cm²

Después de la excavación de bataches 1 $q_u = 65$ t/m, $\sigma = 5{,}43$ kp/cm²

Se puede visualizar esta situación en la figura 2.88D.

Como se afirmó en las reuniones para analizar lo sucedido y en algunos de los apartados estudiados de los informes de la empresa concesionaria y de la consultora geotécnica, si el terreno involucrado tuviese una cohesión de 0,05 kp/cm², la rotura ya no hubiese sido circular sino paralela al talud, como se ve en la figura 2.88C.

Además, si la cohesión llegara a bajar hasta 0,05 kp/cm², para comportarse como un terreno prácticamente granular, entonces un análisis de la rotura como el que hacemos dista bastante de la realidad; el caso es que este tipo de inestabilidad no está descrito en ningún informe conocido hasta la fecha en Pamplona, sería más semejante al de un material granular en acopio, una zahorra de cantera, semillas, grava amontonada o arena (el análisis se ha hecho con el mismo programa y las mismas condiciones de partida, solamente se ha variado el valor de la cohesión y el del ángulo de rozamiento).

2.14.6. Proyectos exitosos sin prisas.

En el proyecto se contempló una actuación por bataches de 3 m, de forma que un arco de descarga de aproximadamente 1,5 m de radio transmite las cargas a las zonas adyacentes del terreno (ver figura 2.87). Una vez abierta la primera generación de bataches y hormigonados éstos, se procede a su soporte por medio de un puntal metálico y a la excavación de los bataches de segunda generación, sistemáticamente, se hace lo mismo para los de tercera generación.

El caso más desfavorable es el de la apertura de los bataches de primera generación, pues todo se apoya en el terreno; tanto los de segunda como los de tercera transmiten ya las cargas desviadas al substrato eoceno de Margas de Pamplona. Así es como finalmente, cumpliendo las distancias y tiempos de fraguado necesarios, se llevó a cabo la obra y la transmisión de cargas a las Margas de Pamplona, algo que desde un principio había sido acogido como un proyecto exitoso aplaudido por proyectistas, inspectores, ingenierías y constructora. Simplemente se estaba siguiendo con la tradición constructiva que tan bien había funcionado en épocas previas.

Si esta situación teórica hubiese sido inestable, parte de la fachada norte y oeste que también se mantuvieron con excavaciones de un ancho bastante superior al que se exigió en proyecto (de hasta 5,5-6,0 m) deberían haber sufrido su correspondiente desestabilización y sin embargo, se mantuvieron en pie tras cerca de dos meses (abril y mayo de 2000) soportando maquinaria, lluvia, cambios de clima y hasta una manguera vertiendo agua sobre una berma en la cara norte durante unas 16 horas, también desde el día 17 de julio de 2000, tras las fiestas de San Fermín, la retirada y el movimiento de escombros del muros interior sur desplomado se hizo en aquellas condiciones.

En la fotografía de la figura 2.86 puede verse uno de estos bataches y en la 2.89 un croquis que muestra la situación de la excavación previa al desplome. En el informe de la consultora geotécnica que pudimos estudiar se aportaba la siguiente información: *"El hundimiento del muro afecta a un tramo de unos 35 m de longitud. Según la información que nos ha sido facilitada, en el momento del hundimiento se encontraban excavados 3 bataches, con bermas intermedias de unos 7 m de anchura."*. Realmente la longitud de muro desplomado fue de 28 m.

El sobrepeso en las bermas de unos 7 m de ancho fue el causante de que éstas se deformasen, o sea, se llegó al límite: FS ≈ 1. Así que podemos hacer un retroanálisis y recrear este estado, fijados γ=2,10 T/m³, ϕ=32 en las terrazas, sobrecarga: 65 T/m, nos queda un valor para la cohesión en el entorno de c=0,18 – 0,24 kp/cm², y ello, basándonos en un hecho real: la propia caída del muro; por ello, si la discusión se llevara a cuestionar este parámetro, nadie podría negar esta realidad histórica, ensayada y no solamente geológica, también puede ser extraída como incógnita de los cálculos reales de inestabilidad.

2.14.7. Conclusiones. Análisis integrado de un colapso parcial.

Desafortunadamente, Pamplona, como ocurrió en Navarra y en otras circunscripciones o en toda España, fueron víctimas (aunque en ocasiones muy puntuales) del acelerado ritmo constructivo que se impuso con la llamada burbuja del ladrillo. En el caso de la adecuación del Parlamento de Navarra, los acontecimientos fueron por otras vías a las previstas y en un momento dado se impusieron las prisas sobre la resistencia del terreno.

Las actuaciones, como ya hemos visto, se desviaron por otro camino del indicado en el proyecto. Los bataches de primera generación se realizaron con una anchura mayor (incluso en ocasiones de más del doble a la indicada) por cuestiones de retrasos en los plazos de avance de la obra.

Entonces contemplamos tres posibilidades en el proceso de colapso, ya que las observaciones dadas por las personas que percibieron ruidos y movimientos acabaron sobre las 19 horas de aquel día y el colapso se dio sobre las 23 horas: una en la que se desprendieron trozos de muro y otra en la que no y una tercera que contemplaría las infinitas posibilidades intermedias, es decir: antes de desprenderse algún trozo ya se había producido algún asiento o ciertas deformaciones, o también éstas pudieron darse simultáneamente hasta la caída final.

Con desprendimiento de trozos de muro bajo los arcos de descarga es muy probable que se "desprendiesen" trozos de fachada; en la figura 2.89 queremos hacer notar esta situación, refleja que el conocimiento puramente técnico basado en cálculos mecánicos y matemáticos se pierde ante la evidencia intuitiva a que queremos hacer referencia. En este caso las zonas descalzadas colapsan directamente y el muro arrastra tras de sí al resto de la estructura.

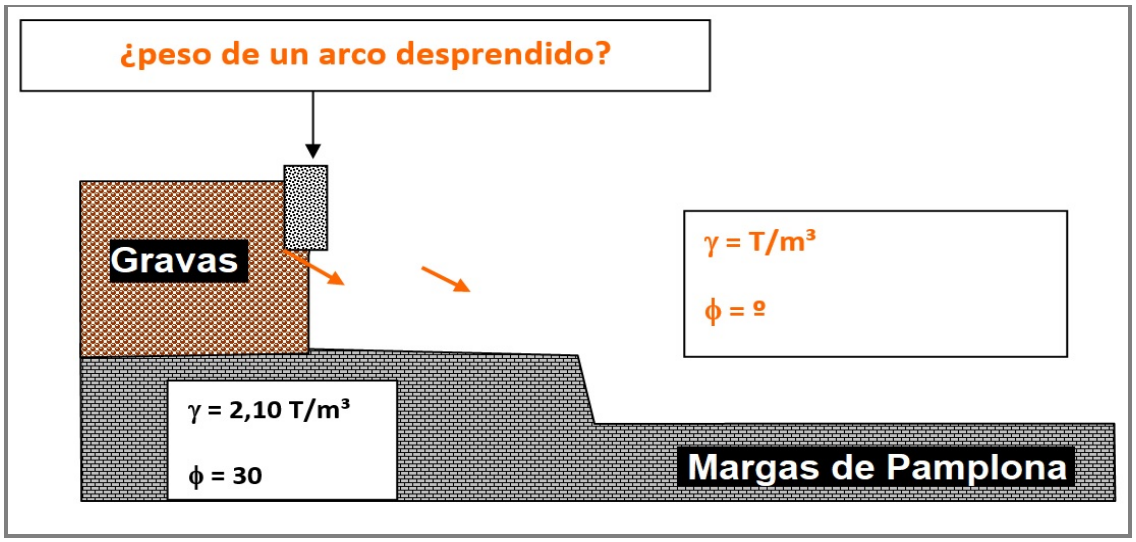


Figura 2.89. Situación real vivida en el desplome del muro interior sur el 12 de junio de 2000 en el Parlamento de Navarra.

En el caso de que el colapso se hubiese dado sin desprendimiento de trozos de muro bajo los arcos de descarga, es decir, incluso la figura de arriba no reflejase toda la realidad y una pequeña parte del terreno entre los bataches hubiese aguantado, el primer asiento de casi 0,5 cm (ver figura 2.86) del terreno en el momento de descalzar más del 50% del muro sur es el detonante: comienzan las primeras grietas y deberían haberse notado pequeños crujidos, este primer proceso se solapa con el segundo, a saber, la deformación de los taludes, el cual, dada la componente cohesiva del terreno, es más lento.

Se sobrepasa el coeficiente de seguridad de las excavaciones, el círculo pésimo de estabilidad se suma a la deformación vertical, no creemos que se produzca deslizamiento circular con FS=1,003 (figura 2.88D) sino que el terreno absorbe la deformación, pero dicha deformación ya es irreversible y acelera el proceso descrito. Una vez llegados a ese punto de tantas deformaciones irreversibles (esto pudo producirse durante unas 3 o 4 horas) la inestabilidad avanza provocando grandes grietas con sus ruidos y crujidos, pequeños desprendimientos y el colapso final. En caso de que se hubiesen dado pequeños desprendimientos del muro, éstos pueden ser todo un abanico de posibilidades en las que las deformaciones tanto del terreno como de la estructura, plásticas las primeras y con fractura las segundas, avancen de forma escalonada o simultánea. Así que al terreno no se le puede hacer responsable de esta situación, pues éste, realmente "estaba ausente" (figura 2.89).

2.15. El siglo XX. La geotecnia de Pamplona en la era del hormigón armado.

A pesar de nacer prácticamente con el siglo XX, el moderno hormigón armado (HA) ya forma parte importante o añadida de todos los edificios descritos y de la casi totalidad de los existentes en Pamplona. Arreglos, mantenimientos y rehabilitaciones han llevado al gran invento tecnológico de nuestra era a ocupar cualquier espacio. La mayoría de los cimientos ejecutados después de las guerras mundiales y especialmente tras la segunda, fueron en hormigón armado, independientemente de su clasificación superficial o profunda, losa, zapata, pozo, pilote o micropilote, ejecutado in situ o prefabricado.

La mayoría, también acabó apoyándose sobre las Margas de Pamplona. La Pamplona que comenzó a ver este nuevo producto tan versátil y moldeable como lleno de posibilidades, es una ciudad del finales del siglo XIX y principios del XX con una marcada personalidad militar, las últimas murallas que la habían protegido o encorsetado ya prácticamente no tenían ninguna función desde que en el siglo XVI fueran reconstruidas y repensadas; realmente se convirtieron en un serio problema urbanístico ya que constituían un cinturón que no le dejaba crecer en horizontal, lo que provocaba además de los problemas de hacinamiento e insalubridad, los de exceso de peso en algunos edificios que añadieron más plantas (ver el caso del edificio del Paseo del Obispo Barbazán). Las nefastas consecuencias higiénicas y para la salud de la población habían sido perfectamente interiorizadas siglos antes.

Pamplona ya buscaba, tras la pandemia de 1599-1600, una solución que, tras siglos de confinamientos, restricciones a la movilidad y huidas a espacios abiertos, no parecía llegar nunca. Los sucesivos conflictos bélicos no facilitaron la salida y en gran medida estimularon el crecimiento en vertical con añadidos de plantas y más peso sobre las cimentaciones heredadas. Y al igual que Pamplona se impuso, antes de la era cristiana, a otras poblaciones porque creció en momentos en que los periodos de paz se dilataban, en el siglo XX, tras las guerras carlistas y la guerra civil, se da por fin el salto completo y Pamplona se decidió a salir de las murallas, no sin antes haber dejado una ciudad histórica de edificios de notable altura. Era la única forma que tuvo para crecer. El impacto geotécnico que provocó lo hemos visto muy de cerca materializado en el edificio del Paseo del Obispo Barbazán. Tras las guerras del XIX, en el exterior de las murallas no era posible edificar por razones militares, eran lo que se denominaban "zonas polémicas" en el argot militar, es decir, terrenos próximos a los recintos militares donde no se podía construir. En zonas más alejadas de la ciudad sí se podía, pero solo edificios religiosos, de carácter oficial y si eran particulares deberían llevar estructura de madera con una altitud y dimensiones determinadas.

En 1884 el rey Alfonso XII visitó Pamplona y entre otras cosas, se consiguió que se suavizasen algo estas normas. Lograr un primer ensanche fue el objetivo principal y para 1887 la negociación ya estaba en manos del concejal Serafín Mata y Oneca. Para conseguir salir de la vieja Iruña hubo que ceder terrenos en el soto de Ansoáin a los militares, además de 750.000 pesetas y garantizar el suministro de agua para los cuarteles, consiguiendo finalmente que se pudiera edificar en el exterior del recinto amurallado de la ciudad, aunque solo la parte colindante con la Ciudadela.

En 1888 se presenta el primer trazado urbanístico que no concluye tras varias negociaciones y reformas hasta 1891. Pero en 1890 ya se había vendido el primer solar (y en 1900 el último) y aunque el Ensanche viejo o Primer Ensanche solo tuvo inicialmente cinco manzanas de casas, fue aprovechado por los propios militares y otras gentes pudientes: además ahí estaba construyéndose ya la Audiencia Provincial, el actual Parlamento de Navarra, que hemos visto cómo se instaló en el siglo XXI con las dificultades inherentes a la gran aceleración, también la Alhóndiga, la Escuela de Artes y Oficios antigua, el llamado Tránsito Municipal y además quedó una amplia explanada para que los cuarteles de infantería erigidos en 1919 fueran derribados solo 45 años después (exceptuando el Gobierno Militar).

En 1971 para dar forma a la Avenida del Ejército se derribó uno de los cuarteles. Éste se había construido sobre la propia muralla de la Ciudadela, por eso se demolió también parte de ella. Al proceder a dicho derribo, quedó abierta en uno de sus lados, más tarde esa apertura sería bien aprovechada. Pero en Pamplona se destaca la constante negativa del ejército a tirar las que entonces ya se consideraban unas murallas inútiles. Realmente esas razones fueron las que lograron que Pamplona las conservase a costa de no poder trazar un extenso Ensanche cuadriculado como el de Barcelona, Zaragoza o San Sebastián, también como el de otras ciudades españolas en el desarrollo conocido en el régimen de Franco como el de *la época de los ensanches*. La primera de las cinco manzanas de este Primer Ensanche se perdió en medio de la especulación de la segunda mitad del siglo XX. Hoy aparece dividida en dos partes formadas por edificios modernos. En qué manera y en qué momento exacto, en estas singulares circunstancias, se inició y desarrolló la arquitectura moderna en Navarra es aún un debate entre expertos. Tendríamos que remontarnos a lo que fueran los primeros pasos del Primer Racionalismo en la arquitectura en Navarra. Pero lo que no cabe duda es que, durante los años treinta previos al golpe militar de 1936, existió arquitectura moderna en Navarra, prácticamente todos los arquitectos utilizaron las corrientes racionalistas en el diseño de sus edificios de hormigón armado. Navarra, con el tiempo, se convirtió en un lugar de investigación y desarrollo de este nuevo material. Los años de la aceleración trajeron las primeras tecnologías con aceros dulces y más tarde corrugados, las necesidades constructivas invadieron la Cuenca de Pamplona de edificios de hormigón con las características de cada década.

Quien suscribe fue director técnico del área de hormigón armado (HA) del Instituto Científico y Tecnológico de Navarra (ICT) de 1992 a 2016, un centro de investigación de la Universidad de Navarra con una rama dedicada al sector de la construcción. Estaba situado en la Escuela de Arquitectura. Durante esos años se investigó su mejora, la optimización del mismo y de sus productos en los sectores industriales, de edificación, prefabricados, ingeniería civil, Patrimonio Histórico, etc., que sin duda han supuesto una mejora y un desarrollo sin precedentes de las calidades que suministran los fabricantes y constructores. Pero, como veremos más adelante, hubo que pagar un precio económico, social y medioambiental nada desdeñable (en la parte ocho).

2.16. Juventud, madurez y vejez de nuestras nuevas estructuras.

El hormigón armado, como tecnología, ya ha alcanzado su madurez y también mira a su futuro: su vejez. Cuál es la edad útil de un determinado elemento de hormigón armado (HA) es una pregunta que casi nadie se atreve o puede responder. Para poder hacerlo echaremos mano de las normativas de construcción relativas a por ejemplo al Código Técnico de la Edificación de 2006 (CTE) o a las sucesivas normativas que afectan a su elaboración, distribución, puesta en obra y control de calidad, así como de su mantenimiento y demolición, tales como las sucesivas Instrucciones EHE o normativas tecnológicas NTE basadas en procedimientos normalizados UNE-EN. En cualquier caso, las edades barajadas son muy variables y alcanzan valores muy específicos que van desde 15 años para casos extremos de solicitaciones y agresividad notable o de 120 años para las más favorables, así que hablar de una edad útil de entre 50 y 100 años sería lo correcto mirando a la durabilidad.

Muchos son los factores que van a afectar a la vida de una infraestructura o un edificio, tanto internos (diseño, materiales, puesta en obra…) como externos (clima, ambiente exterior, salinidad, cercanía al mar, ciclos de hielo-deshielo, sismicidad, terrenos inestables…). En algunos casos ya se ha cumplido su vida útil; por ejemplo, los primeros edificios, centrales energéticas o puentes de principios del siglo XX ya se han abandonado, se han demolido o se han reforzado, en la mayoría de los casos prácticamente se han visto sustituidos. El primer boom del acelerado urbanismo español de los años sesenta del siglo XX ha cumplido su primer plazo y estaría entrando de lleno ya en su ancianidad.

El ligero incremento que se da desde mediados de los años ochenta del siglo XX entraría en su madurez y los voraces desarrollos urbanísticos de las dos últimas décadas (el 30-40% del parque inmobiliario) y la mayoría de las grandes infraestructuras de hormigón armado que acompañaron el último acelerado desarrollo económico español, continúan siendo jóvenes.

Otro de los grandes retos del siglo XXI involucra al Patrimonio Histórico, especialmente en un país con un catálogo patrimonial (UNESCO) que lo sitúa, después de Italia, en el segundo lugar del planeta con más lugares Patrimonio de la Humanidad. Los aspectos geotécnicos deberán acompañar, como hemos visto, al uso adecuado de los materiales, los cuales, muchas veces por cuestiones meramente mecánicas (ver los ejemplos de las iglesias de Santiago de Lorca, la cubierta de la iglesia de Artaiz, Noain o Astráin), pero las interacciones mineralógicas tienen una vertiente geotécnica que nunca hay que perder de vista. Afirman Gisbert et al. (2011):

> *"Siempre que introducimos un mortero en una fábrica histórica hay que analizar la interacción mutua (debido a que la fábrica histórica es un material diferente del mortero de restauración) y su comportamiento frente a los agentes de deterioro de cualquier tipo". Morteros de Restauración.* Josep Gisbert Aguilar, Ignacio Mateos Royo y Ion Ander Somovilla de Miguel. (Zabaglia, 2011).

Algunas administraciones, como por ejemplo el Gobierno Vasco, articularon leyes como el decreto 241/2012, de 21 de noviembre, por el que se regula la inspección técnica de edificios en la Comunidad Autónoma del País Vasco y se atiende a varios factores para tomar decisiones de mantenimiento, arreglo, eficiencia energética o demolición sobre el parque inmobiliario de la Comunidad.

Por ejemplo, el barrio de San Jorge de Pamplona mantuvo su carácter rural desde que el cerro de Santa Lucía recogía a los cultivadores de esas tierras. Desde los tres enclaves situados donde hoy se encuentra el puente de Miluce, el centro de salud y la Estación del Norte (año de 1860) surgieron construcciones a partir del siglo XIX, especialmente para almacenes vinculados al ferrocarril y las viviendas de los trabajadores, lo que se extendió hasta la primera mitad del siglo XX. Hoy no queda prácticamente nada de aquellas promociones.

En la década de 1960 comenzó el desarrollo urbano de San Jorge que hoy alberga a 12.000 personas. Los primeros edificios e infraestructuras del desarrollo urbano de San Jorge cumplirán 70 años a partir de 2030. La normativa que regula la construcción comenzó en España en la década de 1970. Hasta entonces no había ningún tipo de norma que regulase el sector. Garantizar la seguridad de las personas recaía sobre la experiencia y la ética del promotor.

Hasta 1968 no hay ninguna referencia a la seguridad sísmica o a las inundaciones. Para poder controlar una actividad económica que enseguida se erigió en el motor del desarrollo urbano, de la industria turística o del metal, fue necesario definir reglas de obligado cumplimiento para aplicar tanto en proyectos como sobre la ejecución.

En el Real Decreto 1650 publicado en 1977, se establecieron las Normas Básicas de la Edificación. Destacan la N.B.E. CT-79. *Condiciones Térmicas de los Edificios* y la N.B.E. CPI-96 *Condiciones de Protección Frente a Incendios*. Más tarde, a las NBE se sumaron las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE) para completar un marco regulatorio, pero sin carácter obligatorio. Así surgieron las primeras propuestas de uso para la geotecnia o la seguridad sísmica hasta la entrada del *Código Técnico de Edificación* (CTE, 2006). Todas aquellas edificaciones han entrado en su ancianidad.

En tan solo 70 años el sector se enfrenta a nuevos retos como el declive energético de la sociedad termoindustrial y el cambio climático que lo acompaña. Las nuevas condiciones pueden alterar las posibilidades de mantenimiento de este entorno artificial creado en tan poco tiempo, provocando una aceleración de los procesos de deterioro que afectarán a la seguridad y la capacidad de servicio de la infraestructura de hormigón en cualquier parte del mundo.

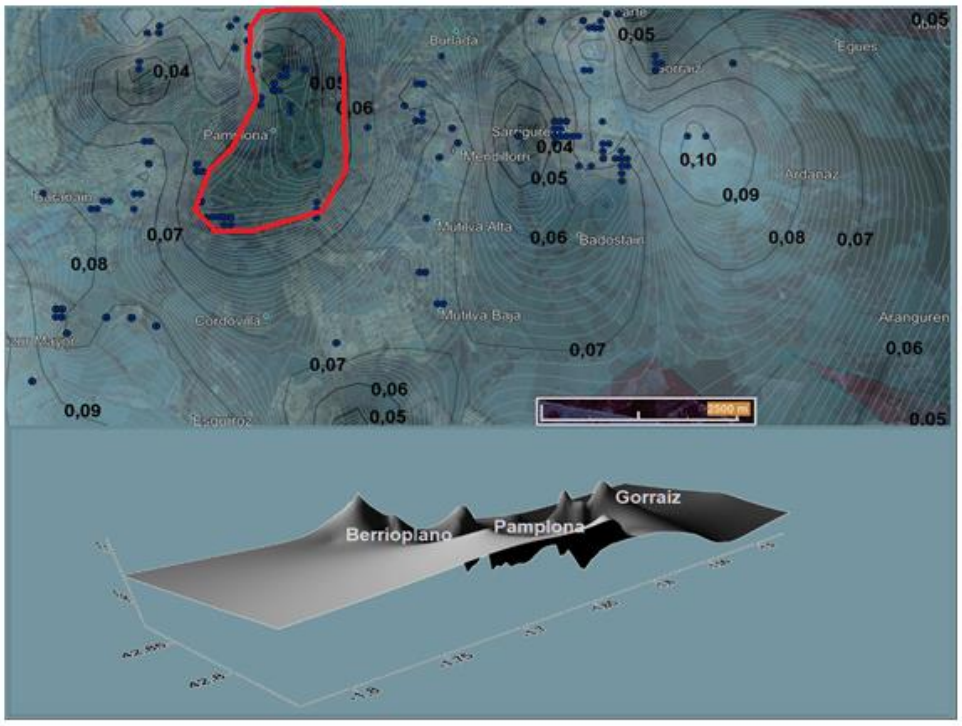
Cuando San Jorge comenzó su moderna andadura como barrio de Pamplona en 1960, la atmósfera del planeta albergaba 315 ppm de CO_2. El año 2020 lo superó en 100 (415 ppm de CO_2) y fue testigo de temperaturas récord. Ello también afectó al permafrost (25% de toda la tierra emergida). Desde el norte más frío vimos las consecuencias mecánicas y geotécnicas del aumento de las temperaturas como noticia habitual. Suelos de ciudades del norte de Canadá, de Alaska o enormes extensiones de Rusia ya no resistían edificaciones, autopistas, puentes, vías de tren o grandes centrales energéticas provocando enormes impactos medioambientales como los de Norilsk en junio de 2020. Pero la fusión del permafrost urbano no era la única consecuencia.

El problema del calentamiento global tenía más vertientes geotécnicas y la vieja Iruña no se libraría de ellas. En 2021 la temperatura global se superó, y en 2022, y en 2023... Estos aspectos y las posibles estrategias de adaptación y mitigación geotécnicas serán analizadas más detenidamente en lo que involucra al sector en la parte ocho.

PARTE 3

CARACTERIZACIONES GEOMECÁNICAS

Y GEOTÉCNICAS



3.1. Área estudiada, selección de lugares representativos. Influencia del muestreo.

La base de datos manejada en esta tercera parte proviene de 1745 informes y trabajos de geotecnia y mecánica de suelos realizados o supervisados por el autor de 1991 a 2021. De ellos se han seleccionado sobre la formación eocena, biarritziense, de Margas de Pamplona E1 y E2, 362 puntos que ofrecen una buena calidad y fiabilidad de resultados para extrapolar una metodología hacia el siglo XXI con normativas como el Código Técnico de la Edificación (CTE). Especialmente se han tenido en cuenta los lugares de marcado carácter histórico y patrimonial.

La superficie en la que aparecen las Margas de Pamplona en Navarra abarca unos 250 km² por lo que se ha procesado una media de 16 datos/km², siendo la cuenca y especialmente el área metropolitana de Pamplona la de mayor densidad, tal y como se puede ver en las siguientes imágenes 3.01 y 3.02. La situación geográfica de las zonas estudiadas se encuentra directamente sobre las Margas de Pamplona o sobre terrenos cuaternarios como los niveles de terrazas o rellenos de carácter antrópico.

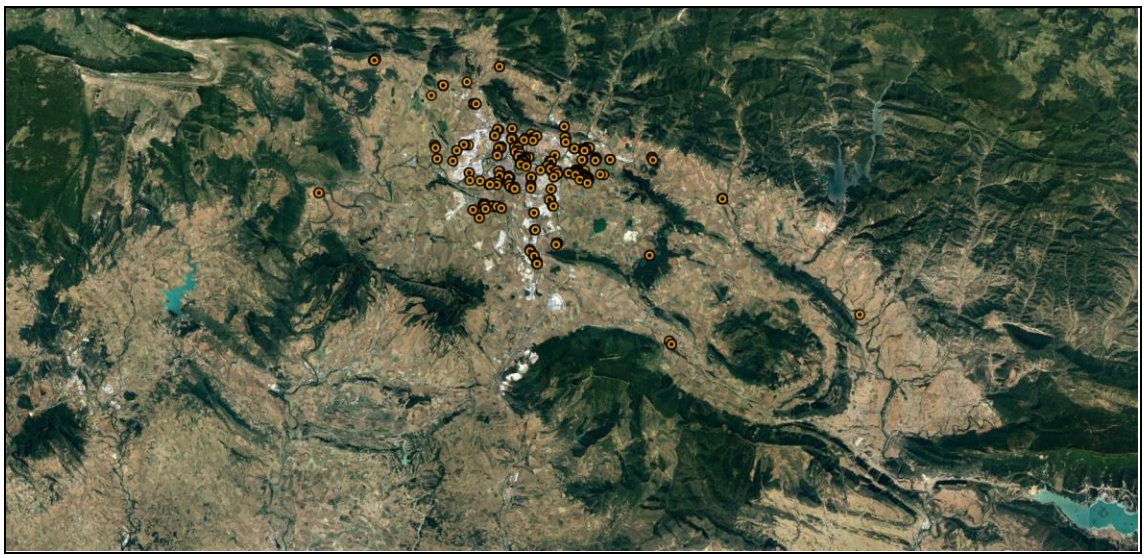


Figura 3.01. Localización de los lugares geográficos donde se han hecho los estudios geotécnicos, recogido de muestras y donde se han tomado datos geomecánicos de las Margas de Pamplona y sus residuales.

En la siguiente imagen 3.02 se pueden ver los lugares estudiados sobre una proyección en la que se destaca la extensión en Navarra de la formación biarritziense E1 y E2 de Margas de Pamplona (en rojo). En algunos casos —especialmente en los que se encuentran en el área metropolitana y, sobre todo, cercanas al núcleo histórico de la ciudad de Pompelo, donde hay una mayor concentración de lugares elegidos— se puede observar que se debieron atravesar terrenos cuaternarios hasta llegar a interceptar el sustrato rocoso.

Los terrenos cuaternarios P que preceden a la aparición en vertical de la formación de margas raramente sobrepasan los 6 m de profundidad (hemos visto algunas excepciones); la profundidad de acceso se encuentra entre los 2 y los 4 m en más de las tres cuartas partes de los casos estudiados.

También es de destacar que la zona más al sur, tanto al este como al oeste de Monreal, no hay prácticamente puntos estudiados desde la perspectiva geotécnica cuantitativa, esto es debido a la escasa urbanización de esas zonas, aunque sí se incluyen, como vimos, lugares que han sido objeto de estudios históricos y arqueológicos como Tabar, Garítoain o Tiebas, pues aportan una información importante sobre la relación de carácter geotécnico que el ser humano ha mantenido con la formación desde la Edad del Hierro.

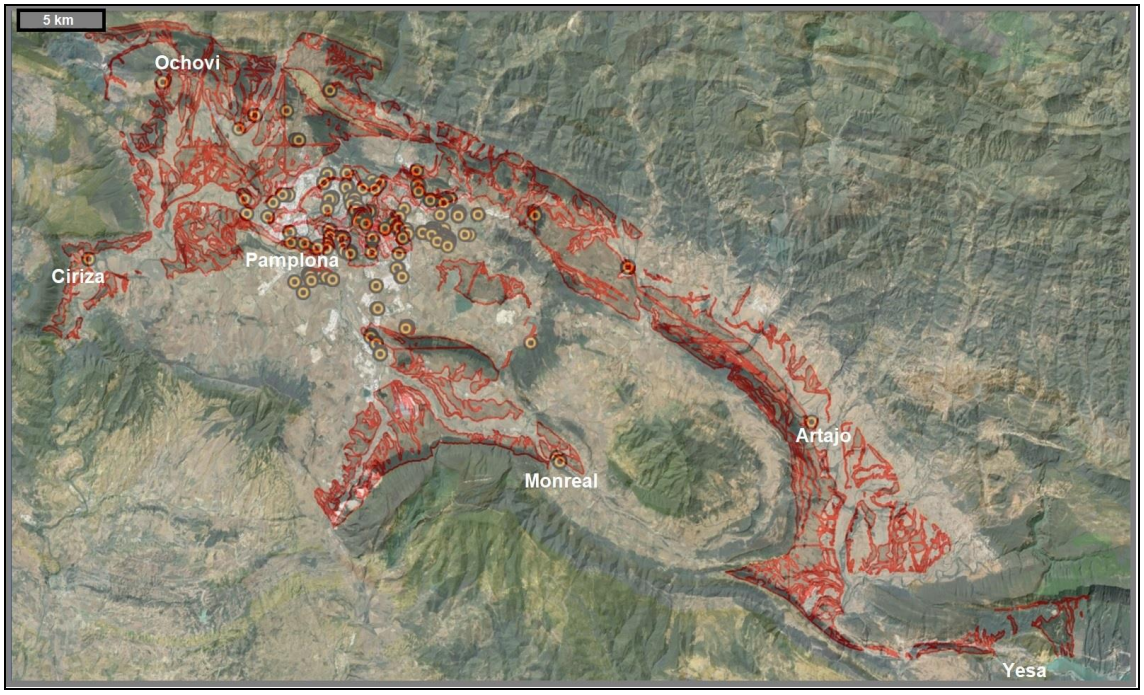


Figura 3.02. Localización de los lugares geográficos donde se han hecho los estudios de campo o geotécnicos (en rojo), se han tomado las muestras (puntos amarillos) y de donde se han medido datos geomecánicos de las Margas de Pamplona y los afloramientos de la formación. Datos sobre el Mapa Geológico 1:25.000 del Geoportal, Gobierno de Navarra (navarra.es).

En esta tercera parte se han estudiado 4.000 datos geográficos y geológicos, 362 lugares con 14 parámetros de los filtrados que tuvieron cierta representatividad. Es importante enfrentar esos 362 puntos con la profundidad y entre catálogos, unos parámetros con otros, pues como veremos más adelante, la profundidad es el factor espacial fundamental a la hora de observar variaciones en el comportamiento evolutivo, mecánico y geoquímico de las Margas de Pamplona. El clima es clave.

Como se puede observar en la figura 3.03, existe una ligera tendencia en el presente estudio a que los parámetros geomecánicos y geotécnicos investigados se encuentren, además de más agrupados por numerosos, más profundos a medida que nos desplazamos hacia el noroeste, destacando, obviamente, el área metropolitana de Pamplona. Las muestras tienden a ser más someras hacia el sureste. Iremos comentando su posible influencia en la manera de contrastar tendencias por parámetros cuya variabilidad es fuertemente contextual o dependiente de otros que lo son.

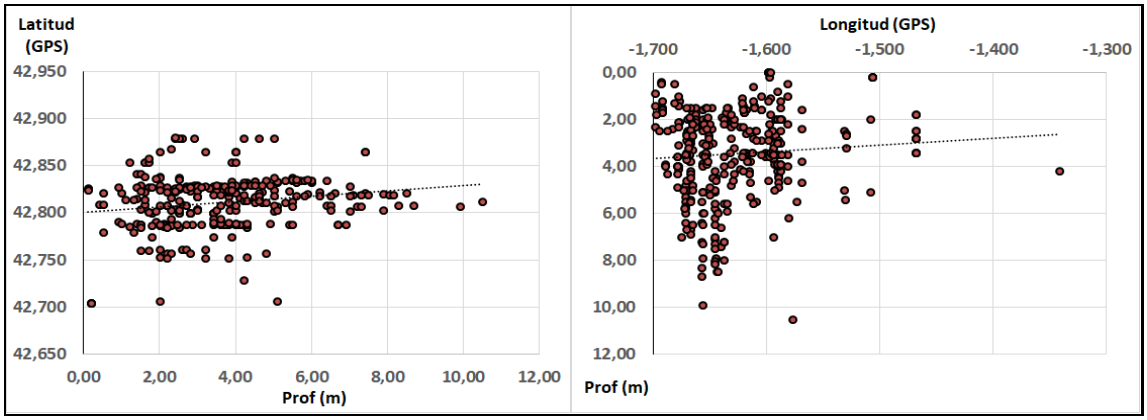


Figura 3.03. Latitud, longitud y profundidad de los 362 especímenes de Margas de Pamplona estudiados en este apartado. Obsérvese que la mayor parte corresponde a la latitud 42,75 y 42,85 con la longitud -1,7 a -1,6 correspondiente al área metropolitana de Pamplona. Obsérvese también un aumento de tendencia de la profundidad estudiada en el área metropolitana.

Hay que destacar este aspecto que se muestra en la figura 3.03 porque, aunque sea muy tenue, supone que algunos parámetros geotécnicos parecerían mejorar o ser menos favorables en su distribución geográfica horizontal debido a minúsculos cambios físicos o mineralógicos en la composición de las margas. En este trabajo veremos que se descarta esta variabilidad que sí se ha observado en otras formaciones. El tratamiento estadístico sugiere que las Margas de Pamplona, al menos en su parte navarra, no presentarían cambios laterales de facies relevantes que determinen comportamientos zonales. Sin embargo, es la profundidad a la que se encuentra el macizo rocoso, el mayor y más acusado de los parámetros que dentro de los límites mecánicos de la formación rocosa determina, con mayor claridad, la mayoría de las variaciones. Sucede en prácticamente todos los parámentros estudiados. En comparación, la localización geográfica se muestra irrelevante. Esta podría influir indirectamente por la cercanía de accidentes tectónicos u otras singularidades geológicas que sí lo hacen de manera local, como veremos a continuación. Lo que sí sugieren los datos es un relativamente pequeño incremento del valor del parámetro por el hecho de encontrase recién excavadas (en términos geológicos) y preservadas por los terrenos cuaternarios de las terrazas altas del río Arga (aquí llamadas P1) en relación a las formaciones exteriores (aquí denominadas E) que están en contacto directo con la atmósfera (figura 3.05).

3.2. Propiedades mecánicas esenciales de las Margas de Pamplona.

La Cuenca de Pamplona, en sentido geológico (no morfológico), sería mucho más amplia que la actual unidad alóctona delimitada por sus divisorias o márgenes mecánicos. Así, considerando el tiempo geológico, podrían detectarse comportamientos evolutivos inherentes a la formación de Margas de Pamplona que abarcasen también una escala regional. Visto de esta manera, a gran escala, los fenómenos de cambios importantes en la mecánica general responderían fundamentalmente a esfuerzos de origen tectónico, pero también geomorfológico o climático, especialmente cuando la Cuenca de Pamplona atraviesa episodios climáticos como sequías extremas (1990-1995) o lluvias récord (2012-2013) con notables cambios en los patrones de precipitaciones.

En esos casos concretos —y en los que éstos tampoco son extremos, pero suponen un cambio importante de las condiciones geotécnicas más superficiales—, la actividad de investigación geotécnica no se detiene, como tampoco lo hacen los ensayos in situ o la toma de muestras, pues ésta se realiza en ciertos condiciones climáticas sobre los primeros metros de terreno expuesto, los cuales siempre se ven afectados por dichas condiciones climáticas y finalmente se ven reflejados en los parámetros utilizados en ingeniería, edificación y obra pública. De ahí la importancia de ser conscientes de este aspecto fundamental en los terrenos con los que estamos interactuando en este caso: pueden cambiar *de cara* mucho más que en otras formaciones geológicas de carácter no tan evolutivo o nada evolutivo. Trabajar con generosos factores de seguridad, para evitar inestabilidades indeseadas en la actividad constructiva, ha sido y es el principal enfoque para la gestión del riesgo. Es el principio de precaución más normalizado, codificado y extendido en este tipo de terrenos.

3.2.1. Peso específico.

El peso específico de las rocas y suelos determina una buena parte del comportamiento geotécnico del terreno de apoyo de infraestructuras, edificaciones y obras públicas, por eso muchas veces es un parámetro que se busca maximizar u optimizar (procedimientos y ensayos de Mecánica de Suelos, tales como el Próctor, CBR, densidad máxima de arenas, etc., fueron creados a tal fin) para garantizar la estabilidad y la sostenibilidad de las grandes obras de ingeniería o de edificación. También los terraplenados y mejoras de explanadas, subbases, bases de aeropuertos, autopistas y carreteras han tomado este parámetro como central a la hora de dimensionar unidades constructivas y apoyos. No obstante, el peso específico de una roca no determina su comportamiento tanto como lo hace su contraparte no sólida, es decir, la red fractográfica del macizo rocoso, o de discontinuidades, que es verdaderamente la que lidera el comportamiento geomecánico de un volumen de corteza bajo las cargas y solicitaciones impuestas por las obras humanas. Este aspecto lo analizaremos desde índices como el RMR y clasificaciones geomecánicas.

En las Margas de Pamplona se han obtenido valores del peso específico de las partículas variables entre 2,60 y 2,76 g/cm³ normalmente en horizontes semialterados para ensayos de consolidación. Lo anteriormente comentado sobre la mayor influencia de la fractografía del macizo es especialmente notorio en el caso de obras subterráneas, tales como concavidades, túneles, taludes, galerías o sótanos excavados en los macizos rocosos. En general, el caso de la formación de Margas de Pamplona presenta una constancia y una homogeneidad de factores geomecánicos que pocas formaciones geológicas comparten. Es especialmente notorio el valor del peso específico y su relación con otros parámetros como la humedad, la resistencia, la plasticidad o la capacidad de cambio de volumen en función de la humedad, y es que a escala regional también parece importante y oportuno aprovechar el volumen de datos que hemos filtrado para obtener más información y conocer de manera más detallada aspectos que a veces no se tienen tan en cuenta como los claros beneficios que reporta al sector dicha constancia.

3.2.1.1. Peso específico y distribución espacial.

En general, el ensayo de peso específico (aparente o seco) puede dar información regional no sólo sobre los esfuerzos, el modelado y el clima, sino también sobre el origen de la formación y la variación geográfica de diferentes facies en rocas de todo tipo. Existen formaciones geológicas con marcadas anisotropías o propiedades físicas progresivas, tanto a nivel local como regional, con cambios laterales que suponen variaciones preferentes de parámetros como el peso específico, ligados a su génesis y en ocasiones a una tectónica local o regional.

Lo que podemos comprobar tanto con el peso específico como con otros parámetros mecánicos como la resistencia a la compresión, la resistencia al corte, el RQD o el RMR, es la marcada homogeneidad regional de la formación en su extensión geográfica, al menos en Navarra no es significativa la mutabilidad de estos parámetros geotécnicos dependiendo de, por ejemplo, la altura topográfica a la que se encuentra la roca de donde se toman las muestras, como tampoco lo es su latitud o su longitud.

Sin embargo, sí parece haber una cierta relación con el moldeado superficial más reciente en términos geológicos. La mayoría de los parámetros geomecánicos están muy influenciados por la profundidad a la que se encuentra la roca que los ofrece. El clima es el factor fundamental que condiciona buena parte del comportamiento de las Margas de Pamplona y solo en ocasiones puntuales y muy cerca de accidentes tectónicos, fallas, fracturas o diaclasas, se puede observar una variación remarcable en la que el clima también acaba adquiriendo, en relativamente poco tiempo, un papel protagonista. La capacidad de penetración de los agentes de meteorización es, en cualquier caso, determinante, sea ésta facilitada por métodos naturales o artificiales.

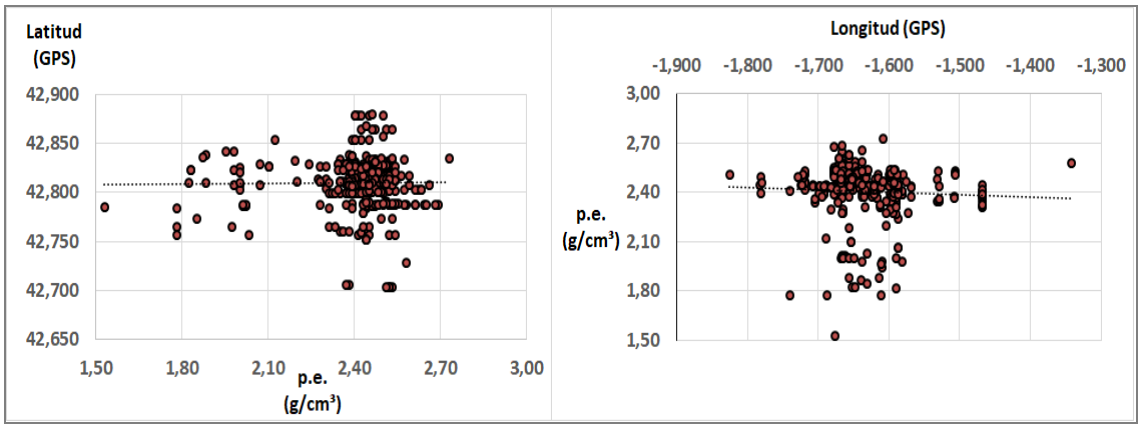


Figura 3.04. Latitud, longitud y peso específico de la Formación Margas de Pamplona (sin tener en cuenta la profundidad de las muestras). No existe una variabilidad N-S, apreciándose una muy leve tendencia a la baja hacia el este (hacia Yesa como límite oriental de la formación en Navarra). Obsérvese que la mayor cantidad de puntos se encuentran en parte corresponde a la latitud 42,75 y 42,85 con la longitud -1,7 a -1,6 que corresponde al área metropolitana de Pamplona con valores entre 2,30 y 2,60 g/cm³.

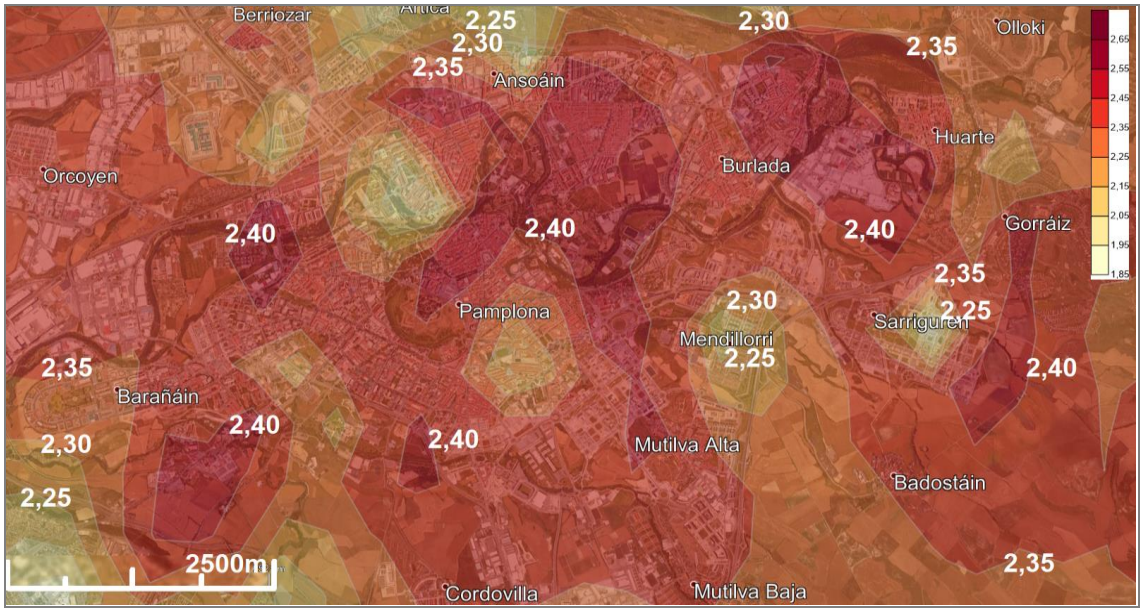


Figura 3.05. Latitud, longitud y peso específico mapeados en el área metropolitana de Pamplona sin tener en cuenta la profundidad. Ploteo con Surfer 13. Se pueden apreciar valores relativamente más altos en las áreas recientemente excavadas por el río Arga (en términos de tiempo geológico) y preservados por sus propios sedimentos de gravas cuaternarias y arcillas (en este trabajo terrenos P1 y P2) y menores valores en general en las áreas externas donde se definen los terrenos desnudos de las Margas de Pamplona que han desarrollado una leve capa de meteorización (terrenos con perfil E1 en este trabajo) y los que han desarrollado una cobertera de residuales de arcillas y roca alterada hasta grado VI de varios metros de espesor (E2 en este trabajo).

Aunque el peso específico de las muestras sanas y profundas de rocas, tomadas para investigación geológica o minera, por ejemplo, con objetivos exclusivamente geológicos como definición de las características y límites de una determinada formación, presenta valores mayores en general, las muestras de carácter geotécnico siempre presentan valores más bajos. Éstas son más superficiales y son las que generalmente se toman a efectos de cálculo de solicitaciones para ser utilizadas en cimentaciones, estabilidad de taludes, excavaciones u obras de tierra.

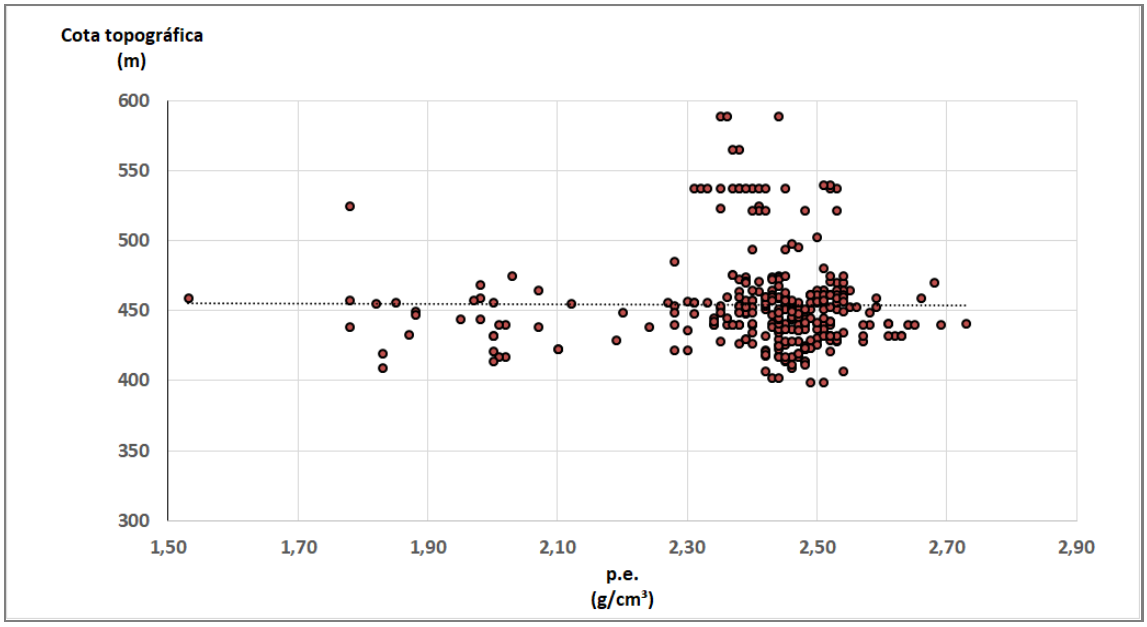


Figura 3.06. Cota topográfica y peso específico aparente sin tener en cuenta la profundidad. No existe variabilidad en el peso específico de la formación en relación a la cota topográfica donde yacen las muestras estudiadas. Conclusión: latitud, longitud y cota topográfica no tienen influencia en la variación del peso específico de las Margas de Pamplona, al menos en lo que a efectos geotécnicos se refiere.

Tanto en la figura 3.04 como en la 3.06 no se observa ninguna tendencia preferente que pueda ser remarcable. El peso específico no depende de las coordenadas xyz. Es lógico que esto ocurra ya que es precisamente el peso específico el parámetro mecánico que más varía con respecto a la profundidad (figura 3.07) y si hay un barrido en que esta variabilidad se manifiesta más marcada, obviamente se manifestará independientemente de si la muestra estaba más al este, más al sur o en una cota más elevada. De la misma manera que a mayor profundidad los valores de p.e. seco y aparente tienden a igualarse (figura 3.07 y 3.08), un claro reflejo de los cambios mineralógicos en las capas más externas favorecidos por el papel del agua en la formación de minerales arcillosos.

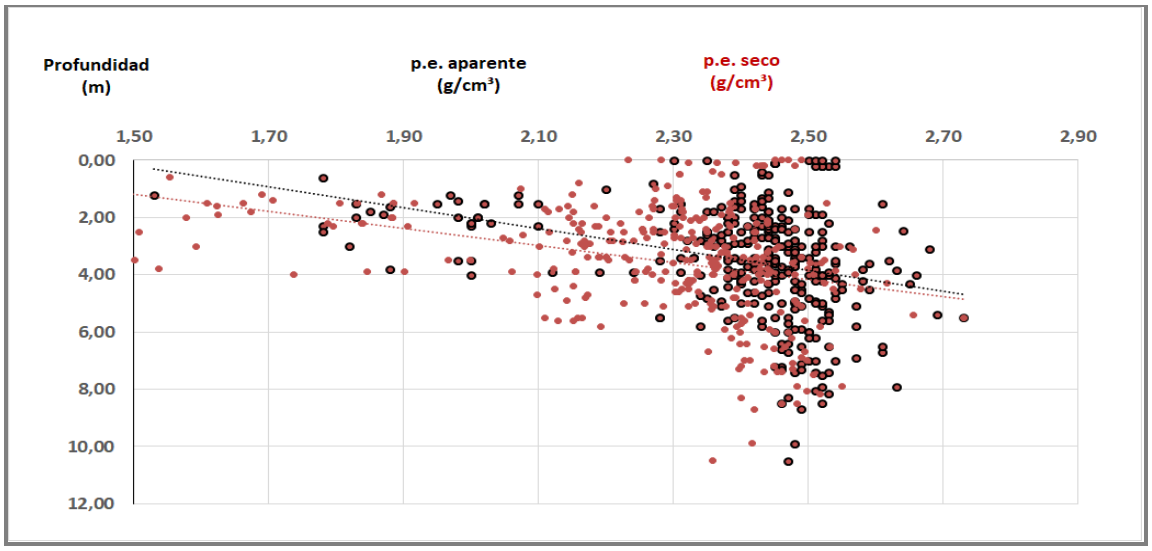


Figura 3.07. Profundidad y peso específico aparente (γ) y seco (γd). Hay una clara relación del valor del peso específico de la formación con respecto a la profundidad, así como su límite. Muestras más superficiales presentan más porosidad, permeabilidad y menor densidad de materia mineral. Se observa también, especialmente en muestras tomadas a menos de 3 m, una divergencia del valor según nos acercamos a la superficie. Siendo el peso específico aparente el que muestra mayor variabilidad. Lógicamente las muestras más externas se ven más afectadas por cambios mineralógicos en los que el agua juega un papel fundamental en la transformación de los minerales arcillosos. Si discriminamos los 3 primeros metros el efecto desaparece. Relación: $\gamma = (P + 5{,}28)/3{,}65$. Relación $\gamma d = (P + 3{,}31)/2{,}98$. Donde P es la profundidad en metros.

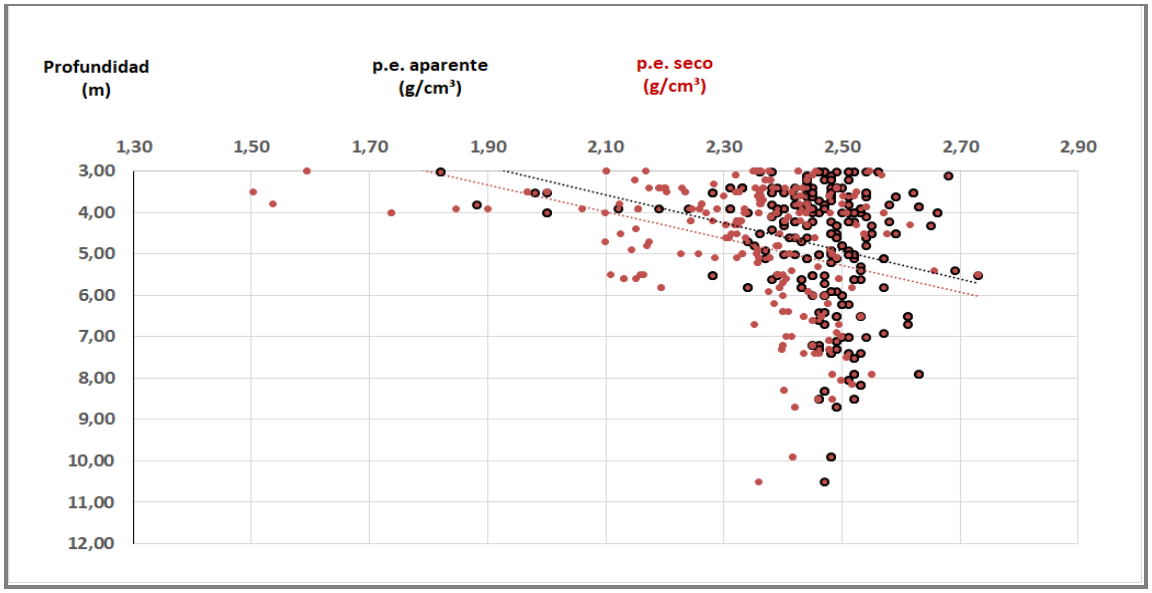


Figura 3.08. Profundidad y peso específico aparente y seco a (partir de 3 m de profundidad). Obsérvese que, si quitamos los tres primeros metros meteorizados, se recupera cierto paralelismo entre el peso específico seco y el aparente. La desaparición de la influencia de la formación de minerales arcillosos en las zonas más expuestas homogeniza la serie.

En el sector de la construcción, habitualmente a nivel de obra, han sido varias las ocasiones en que se ha sugerido que en la formación de Margas de Pamplona se darían cambios en las propiedades mecánicas en relación a ciertos estados de estrés; éstos vendrían provocados por la cercanía a accidentes tectónicos importantes. Intuitivamente y de manera local parece lógica tal afirmación, además, se ha comprobado que cerca de fallas o fracturas relativamente importantes, donde la roca se encuentra más fracturada o meteorizada, este fenómeno produce cierta pérdida de calidad del macizo rocoso.

Sin embargo, desde el punto de vista local, las pequeñas fracturas que se interceptan a nivel de obra, han sido siempre las que han provocado problemas de carácter geotécnico como inestabilidad de cuñas, excavaciones taludes, filtraciones de agua o por exceso de fracturación que en general deriva en mayor tasa de meteorización y pérdidas de rozamiento, cohesión, resistencia y peso específico.

Por ejemplo, la Cuenca de Pamplona es una depresión morfológica enmarcada entre los relieves calcáreos de la sierra de Sarvil y la estructura diapírica de Anoz al oeste (asociadas a la Falla de Pamplona o Estella) y la cuenca de Lumbier al este. El límite norte coincide con los crestones de calcarenitas y margas que van de Erice a Arre posiblemente originados por el Cabalgamiento de Roncesvalles y el margen sur lo determinan las sierras de El Perdón y el cabalgamiento de la Sierra de Alaiz como parte del Cabalgamiento Frontal Pirenaico.

Nuestros datos de 331 ensayos de peso específico aparente y 329 seco, repartidos por la formación eocena (figuras 3.07 y 3.08) van desde roca muy meteorizada, prácticamente suelo, con 1,53 g/cm³ como valor mínimo aparente (1,50 g/cm³ para el seco), hasta el máximo medido de 2,73 g/cm³ (2,66 g/cm³ p.e. seco) para el caso más denso y compacto; obtenemos una media de 2,41 g/cm³ (2,32 g/cm³ p.e. seco). Si todos estos datos recogidos a diferentes profundidades, cotas topográficas, épocas del año, períodos más o menos secos, etc., los enfrentamos con la situación geográfica en términos de latitud y longitud GPS apreciamos un cambio tan minúsculo en relación a la dispersión de resultados que podemos concluir, de momento, y a partir de este muestreo, que no existe una distribución de resultados indicativa de cambios de densidad en relación a la posición geográfica de las Margas de Pamplona, ni en horizontal ni en vertical, atendiendo a las características geotécnicas habituales enfocadas al sector de la construcción y obra pública en relación a la influencia de los límites mecánicos que enmarcan la cuenca. Es la profundidad el factor que más afecta. Las muestras someras son más ligeras, porosas y esponjosas, siempre y cuando no dejen de ser roca y mantengan las estructuras relícticas de la roca original. Y es que, una vez convertidas en suelo, algunas características como la capacidad de hinchamiento y retracción disminuyen, tal y como lo hacen también en el caso de la roca sana.

Existen propiedades de las Margas de Pamplona que se acentúan en estados intermedios y no en los extremos en lo que a meteorización se refiere. Es la profundidad el parámetro mayoritariamente regulador de dichas propiedades. Como se ha visto en la imagen de la figura 3.04, el muestreo tiene una apreciable (aunque muy leve) tendencia a que las muestras utilizadas han sido extraídas en cotas más profundas hacia el noroeste, por lo tanto, si enfrentamos la variación del peso específico con la profundidad obtendremos una gráfica proporcional como las conocidas para la mayoría de rocas, pero también si enfrentamos el peso específico con las coordenadas GPS este fenómeno debería mostrarse igualmente, como es el caso.

Considerando la latitud y el peso específico, apenas podríamos afirmarlo, sin embargo, con la longitud, aunque de manera muy débil, se puede observar una tendencia a la disminución del peso específico. Obviamente esto es una influencia de las características del muestreo, por lo que otros parámetros como el índice de expansividad, que se expresa también entre valores óptimos del peso específico de la roca degradada, debería verse influido, tal y como analizaremos más adelante.

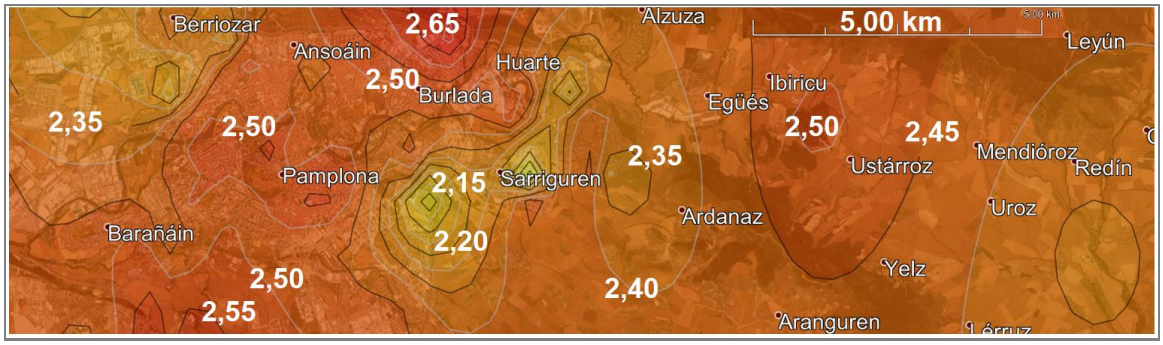


Figura 3.09. Profundidad y peso específico a partir de 3 m de profundidad mapeados en el área metropolitana de Pamplona. Ploteo con Surfer 13. Obsérvese que se siguen manteniendo los mayores valores bajo los depósitos de las terrazas cuaternarias P1 y P2.

3.2.1.2. Peso específico y características geomecánicas.

Los parámetros geomecánicos como el RQD o el RMR de Beniawski (1989) son bastante regulares y constantes en la formación eocena si la comparacmos con otros especímenes de rocas que suelen presentar variabilidades muy marcadas. En relación al peso específico, RQD y RMR aumentan proporcionalmente siendo muchos los casos estudiados con RQD = 100 en la geotecnica local de Pamplona y alrededores en las Margas de Pamplona. Parecería de perogrullo afirmarlo, pero no olvidemos que existen formaciones rocosas, algunas de ellas muy cercanas como las ofitas ligadas a la actividad diapírica de la zona, con valores del peso específico por encima de 2,80 y 2,90 g/cm³ pero con RQD nulo y que además no presentan esta manifiesta relación.

Es lógico que el RQD como un factor que forma una parte importante del RMR (hasta 20 puntos sobre 100) aumente en mayor proporción que éste que lo incluye, pues el medidor geomecánicos RMR se diseñó con el objeto de dimensionar concavidades, obras subtarráneas o excavaciones a cielo abierto que, entre otras cosas, depende de la propia calidad del macizo, evaludada ésta como el número de fracturas por unidad de longitud (que es la definición de RQD) y de características cualitativas, semicuantitativas y cuantitativas como el estado de las juntas y labios, corrientes de agua o resistencia a la compresión de la roca madre. En las Margas de Pamplona este parámetro de resistencia puntúa relativamente poco en el cálculo del RMR, apenas entre 2 y 4 puntos sobre 100, ya que, en muy contadas ocasiones, como veremos, superan los 300 kp/cm². Se mantiene así una mayor homogeneidad de resultados del RMR con esa menor influencia en el valor final.

La mayor concentración de mediciones del macizo rocoso de Margas de Pamplona se mantiene en valores del RMR en torno a 50 entre los valores más habituales de peso específico aparente que van de 2,30 a 2,70 g/cm³. Las clasificaciones geomecánicas de rocas son un elemento fundamental en la caracterización mecánica de los macizos rocosos para excavaciones, obras subterráneas o sostenimientos. En estudios de túneles, grandes excavaciones y taludes permiten una clasificación rápida y extremadamente útil del macizo rocoso[7]. Las Margas de Pamplona conforman macizos rocosos de tipo III (calidad media y RMR 41-60) de una escala que va de I (muy buena calidad y RMR 81 a 100) a V (muy mala calidad y RMR <20). La mayoría de las obras ejecutadas en Margas de Pamplona se enfrentan a macizos rocosos con RMR varíable entre 45 y 55. El RMR está correlacionado empíricamente con el ángulo de rozamiento interno, la cohesión, la permeabilidad o el módulo de Young del macizo (Em), no de la roca intacta. Podemos calcular el ángulo de rozamiento y cohesión del macizo conociendo que se trata, por ejemplo, de un tipo III con ϕ=25-35º y c=2-3 kp/cm² y múdulo de Young medio de las Margas de Pamplona de unos 10 GPa:

$$Em = 2RMR - 100 \text{ GPa, para RMR} > 50 \text{ y } Em = 10^{(RMR-10)/40} \text{ GPa, para RMR} \leq 50$$

La clasificación RMR tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

---

[7] El RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski fue desarrolado y perfeccionado por este profesor nacido en Cracovia, Zdzisław Tadeusz (Richard) Bieniawski, aunque su clasificación de 1973 y actualizada en 1979 y 1989 se debió sobre todo a sus estudios en África, en Johanesburgo, en la minería de Rodesia, Zambia y en Pretoria. Ha servido para clasificar rocas de todo el mundo, primero con el objeto de dimensionar obras subterráneas, excavaciones en roca, etc. Con el tiempo y la utilidad mostrada dio el salto a su uso en el dimensionados de cimentaciones, taludes y estabilidad de laderas en macizos rocosos de todas las naturalezas.

- La resistencia a la compresión de la matriz rocosa.
- El grado de fracturación en parámetros del RQD.
- El espaciado de las discontinuidades (planos de debilidad).
- Las condiciones de las discontinuidades.
- Parámetros o condiciones hidrogeológicas[8].
- La orientación de las discontinuidades con respecto a la estructura de la excavación.

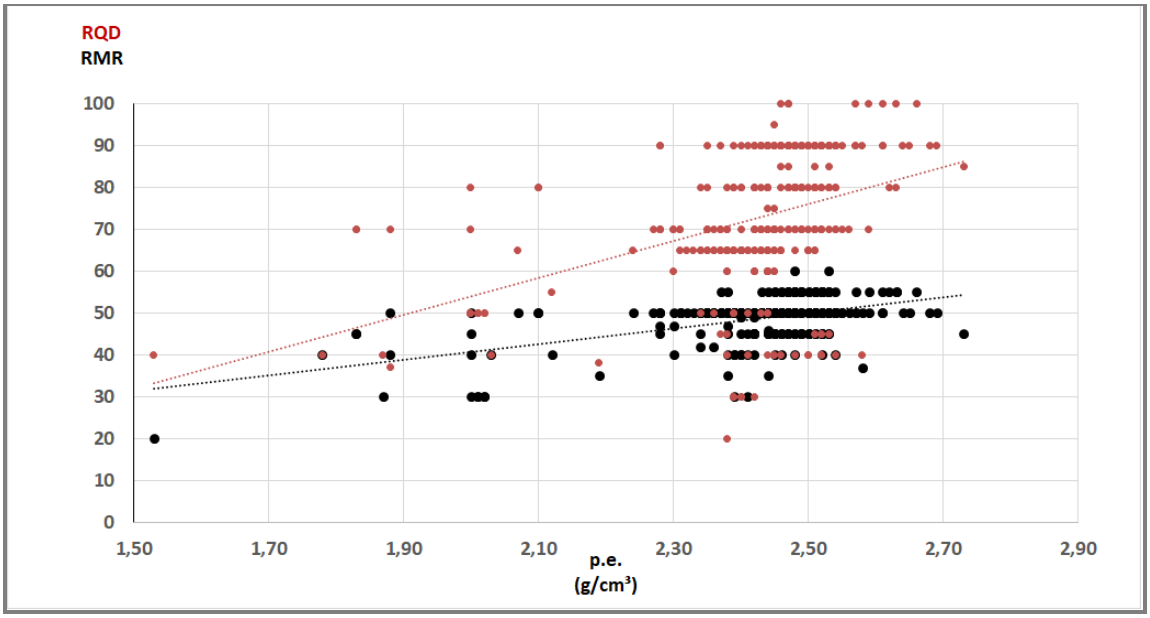


Figura 3.10. RQD, RMR del macizo rocoso frente a valores del peso específico aparente. Como adelantamos en el texto, queda reflejada la moderada limitación del peso específico (hasta un 20%) en el pronóstico de comportamiento global de un macizo rocoso ante obras de excavación, subterráneas o de sostenimiento. Son las discontinuidades, fracturas, fallas y diaclasas, su estado de humedad, su ritmicidad, persistencia y regularidad las circunstancias que determinan el comportamiento, muy por encima del valor del peso específico o la resistencia a compresión de la matriz de roca. $RQD=44{,}08\gamma-34{,}24$ y $RMR=18{,}06\gamma+3{,}54$.

[8] Las rocas involucradas en la formación Margas de Pamplona carecen de recursos hídricos subterráneos y si se intercepta un nivel de agua, por ejemplo, en una excavación, suele agotarse en horas o días. Las terrazas del río Arga, en particular las que se encuentran en su margen septentrional, es muy probable que se estén recargando en su mayor parte por las areniscas de la Sierra de San Cristóbal. Realmente éstos son los únicos materiales que podrían guardar algo parecido a acuíferos de cierto interés. Es la única zona donde actualmente se han efectuado algunas modestas explotaciones con pozos. También se explotan de modo restringido los fondos de valle y algunas áreas de las llanuras de inundación de los distintos ríos. Las formaciones de depósitos terciarios de margas o alternancias de niveles impermeables con calcarenitas no presentan agua como recurso subterráneo. En el caso de lugares concretos de la suave meseta de Pamplona, vimos cómo el contacto entre las Margas de Pamplona y las terrazas altas y medias, ha sido históricamente un objetivo a interceptar para disponer de cierta cantidad de agua en varios lugares de la ciudad histórica.

3.2.1.3. Peso específico y humedad natural.

Como afirmamos, las Margas de Pamplona son extremadamente sensibles al efecto del agua, mucho más que a su situación espacial: latitud, longitud y cota topográfica (xyz), algo que se puede corroborar en cómo el peso específico disminuye con ésta en el macizo rocoso con una clara tendencia a la meteorización física y química y pérdida de compacidad.

Está claramente relacionado con la profundidad a la que se encuentre el macizo considerado y la existencia de una capa activa que intercambia iones con la atmósfera y una cantidad relativamente importante de fracturas, diaclasas y fisuras que vehiculen el agua y que podemos perfectamente situar a unos 2-3 m en vertical.

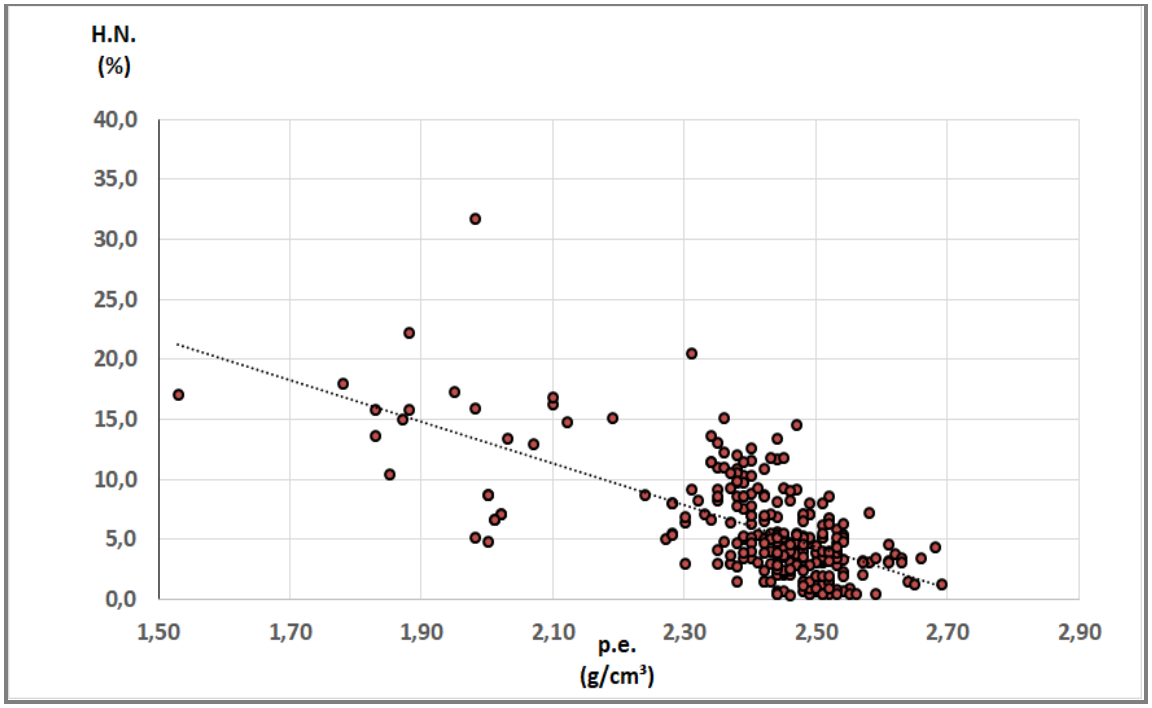


Figura 3.11. Humedad natural y peso específico. La mayor parte del muestreo se concentra en valores de roca típicos: 0-15% de humedad y 2,30-2,60 g/cm³ de peso específico aparente. Los mayores valores limitan la entrada de agua en la roca, los menores valores vienen siempre acompañados con una mayor capacidad de absorción de agua, pero también para perderla ya que se trata de especímenes más directamente en contacto con la atmosfera. Es uno de los detalles más importantes para entender algunos de los comportamientos de estas rocas relativamente alteradas. Relación: *HN=47,82-17,38γ.*

3.2.1.4. Peso específico, plasticidad, cambios de volumen.

La plasticidad de la roca muy alterada o de los residuales de las Margas de Pamplona suelen arrojar valores bastante variables dependiendo del grado de alteración. Medimos este parámetro de la humedad que hace cambiar el comportamiento del material con los Limites de Atterberg, quizás el primer ensayo normalizado de la Mecánica de Suelos que ha llegado a través de las décadas hasta nuestros días sin prácticamente modificaciones.

En suelos residuales se han visto valores de más de 60 para el límite líquido (LL) y de prácticamente entre 10 y 25 para el índice de plasticidad (IP) que es la diferencia de humedad que separa el comportamiento plástico del líquido. Se trata de valores de humedad que confieren comportamientos "límite" a la porción de terreno que ensayamos: su parte fina de tamaño limo y arcilla. En el caso del límite plástico (LP) hablamos de la humedad a partir de la cual una porción granulométrica fina del terreno deja de ser elástico y se deforma de manera permanente con la aplicación de una carga o un esfuerzo.

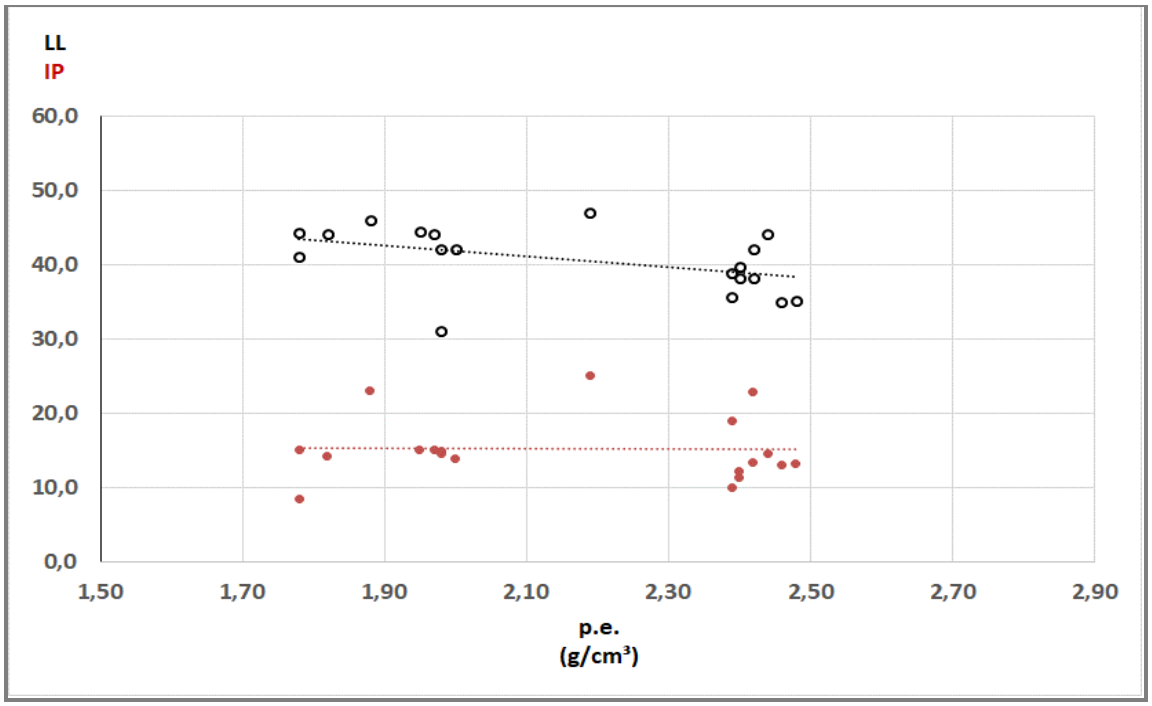


Figura 3.12. Límites de Atterberg: Límite Líquido (LL) e Índice de Plasticidad (IP) y peso específico. La plasticidad es inversamente proporcional al valor del peso específico.

El límite líquido (LL) representaría un mayor grado de humedad a partir de la cual el terreno fluye o se comporta como un líquido viscoso y no es necesaria la aplicación de ningún esfuerzo para que éste se deforme bajo la acción de la gravedad o su propio peso. Adquiere la forma del espacio que lo contine. El índice de plasticidad (IP) representa la diferencia entre ambos (IP=LL-LP).

Como se puede ver en la anterior imagen (figura 3.12), cuanto más alterada se encuentra la roca tenemos mayores valores de plasticidad y mayor diferencia entre el LL y el IP, es decir, la plasticidad es inversamente proporcional al valor del peso específico. De los 35 ensayos de plasticidad filtrados como adjudicables a roca muy alterada o semialterada que, además, han presentado la posibilidad de tallar probetas para realizar ensayos de compresión simple (más adelante veremos estos datos), hemos rescatado 19 de los que podemos enfrentar al peso específico con valores de LL entre 30 y 47 y de IP entre 9 y 25 (figura 3.12).

Es importante destacar que cuanto mayor es la plasticidad de un suelo mayor es su susceptibilidad para absorber y perder agua y generar cambios de volumen por esa entrada y salida de agua en la estructura. El siguiente gráfico (figura 3.13) muestra una enorme dispersión de este aspecto, pero también que, aunque la roca eocena muy alterada se encuentre entre valores del p.e. desde sólo 1,53 g/cm³ (casi un suelo) hasta 2,48 g/cm³, existe una cierta componente de hinchamiento que dentro de unos límites del valor del peso específico se puede detonar con más compacidad y no con menos, debido precisamente al desplazamiento de la estructura por las fuerzas de tracción ejercida por el agua. Ese es el papel trascendental que adelantamos y comentamos en la figura 3.12 y la anterior tabla I y vimos en detalle su proyección práctica en obra, por ejemplo en la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin. El denominado "cambio potencial de volumen" (CPV) del ensayo Lambe tiene más probabilidades de hacerse realidad en el perfil de margas alteradas que preceden al macizo sano de Margas de Pamplona que en de suelos residuales propiamente dichos de arcillas y limos CL y ML típicos de estos materiales. Los valores en las margas alteradas del índice de expansividad (IE) rara vez alcanzan los 0,120 MPa (1,2 kp/cm²) en los residuales de las Margas de Pamplona, dándose los mayores valores en el citado nivel de transición, en nuestro muestreo de 0,117 MPa pudiendo clasificarse el conjunto de residuales y margas alteradas como "no crítico" y a veces "marginal".

No obstante, como hemos comprobado y comentado, valores cercanos a 0,06 MPa son suficientes para que, en determiandas condiciones arquitectónicas (edificaciones con cimentaciones ligeras, someras apoyando en la capa activa), se produzcan patologías debidas a movimientos verticales estacionales o tras épocas de fuertes sequías o fuertes lluvias como el período 1990-1995, 2005-2006 o 2013 con buena parte del terreno sobrepasando valores del LL generando deslizamientos, por toda Navarra como veremos en la parte quinta. Hoy, tras un trabajo de concienciación en los cursos de las escuelas de arquitectura e ingeniería, en los colegios profesonales, y en seminarios y cursos sobre geotecnia y geología local en el marco del sector de la construcción, edificación y obra pública, prácticamente no queda profesional que no conozca este fenómeno, por lo que los nuevos proyectos incluyen en sus estudios geotécnicos recomendaciones claras y específicas al respecto.

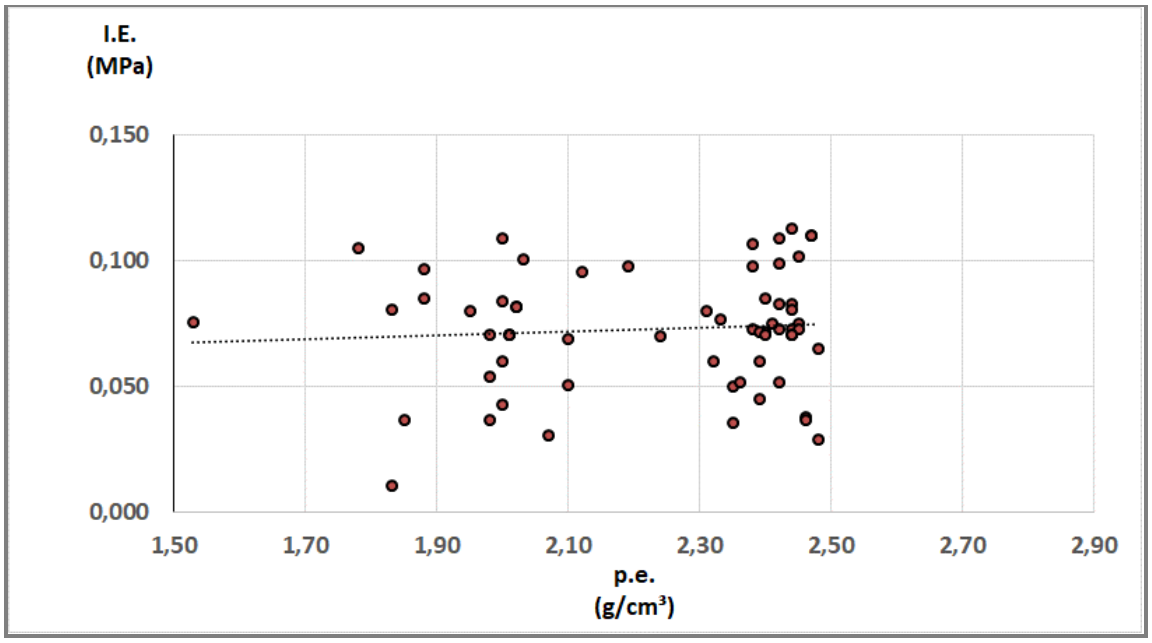


Figura 3.13. Índice de expansividad y peso específico. Como se puede observar, existe una cierta tendencia a incrementarse el índice de expansividad con el peso específico. A partir de cierto valor mayor de 2,50 g/cm³ este ensayo geotécnico en aparato Lambe no solo no es realizable, sino que pierde sentido. Al contrario que en otros especímenes de rocas evolutivas, las Margas de Pamplona alteradas y sus residuales no aumentan su capacidad de cambio de volumen al perder la textura y el cemento calcáreo de forma masiva, sino que muestran valores más elevados como rocas alteradas con grados de meteorización III-V.

3.2.2. Resistencia mecánica.

Hemos visto que, por un lado, la densidad del macizo rocoso semialterado determina proporcionalmente, y dentro de unos límites de meteorización, la capacidad de cambio de volumen superficial del terreno sobre el que actuamos (figuras 3.12 y 3.13). Por otro lado, veremos que, las resistencias mecánicas —proporcionales al peso específico, como en todo material pétreo, pero dentro de unos límites geoquímicos— presentan un cierto incremento según nos movemos hacia el este, al contrario que lo hacen el peso específico y el índice de expansividad.

Esto sugiere que, además de las limitaciones debidas al número y tipo de muestreo, se podría estar expresando a través de este tipo de relaciones mecánicas y espaciales, un suave cambio lateral en la composición mineralógica.

Teniendo en cuenta que, hacia el sureste las muestars serían algo más superficiales, parecería lógico también que el índice de expansividad aumentase al revés de lo observado. Creemos que a la vista de estos datos, surge la inevitable cuestión, dada la variabilidad de datos, de cuándo sabemos que lo que estamos estudiando son margas sanas o alteradas.

La respuesta remite a clasificaciones o tablas comparativas establecidas a partir de datos cualitativos generales para todas las rocas. La más utilizada en el ámbito geotécnico global y también en los especímenes rocosos de Navarra —y por supuesto de las Margas de Pamplona— vienen de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISMR, 1981); habitualmente aprece en cualquier estudio geotécnico que contemple el estado del material de infraestructura. Es aquella que da seis grados de alteración que van desde el grado I en el que la roca conserva sus características texturales y estructurales íntegras hasta el grado VI, en que han desaparecido por acción de la meteorización cuando lo que nos queda es un suelo. Los grados intermedios se clasifican a partir de aspectos cualitativos como el ser rayadas con un metal, contener zonas oxidadas, romper con la uña, el martillo y pocos o muchos golpes, etc.

Como norma, la más extendida quizás, es la basada en esa clasificación y propuesta desde las British Stándard (BS) en 1981 cuya útima versión de 2015 se acerca más a lo que sería una clasificación geomecánica como la vista para el RMR de Beniawski por ejemplo, donde se presentan tablas individuales de dureza o resistencia con otras de apertura y estado de las discontinuidades.

Esta clasificación ha venido siendo muy práctica en la actividad geotécnica y está totalmente universalizada; se utiliza para la distinción in situ de los grados de alteración basados en los criterios de la citada norma BS-5930/1981 que son los siguientes:

> I INALTERADA O SANA: no son visibles señales de meteorización. Roca fresca. Algunas discontinuidades pueden mostrar leves teñidos.
>
> II LEVEMENTE ALTERADA: meteorización penetrativa desarrollada en superficies de discontinuidades abiertas, pero solo meteorización leve del material rocoso. Las discontinuidades están coloreadas y la coloración puede extenderse dentro de la roca unos pocos milímetros desde la superficie de la discontinuidad.
>
> III MODERADAMENTE METEORIZADA: una leve coloración se extiende por la mayor parte de la masa. El material no es disgregable (salvo a trasvés de la fracturación).
>
> IV MUY METEORIZADA: la alteración se extiende por toda la masa y el material rocoso es parcialmente disgregable. Todo el material excepto el cuarzo está coloreado. La roca puede ser excavada con martillo de geólogo.
>
> V COMPLETAMENTE METEORIZADA: la roca está totalmente teñida, descompuesta y disgregada; solamente fragmentos de roca mantienen textura y estructura. La apariencia externa es de un suelo.
>
> VI SUELO RESIDUAL: suelo con completa desintegración de textura, estructura y mineralogía de la roca madre. En la que no es posible reconocer la estructura de la roca original.

En este estudio estarían representados todos esos grados. Más de 2/3 provienen de macizos rocosos y especímenes clasificables entre los grados I y IV. Por ello, dado que las características geomecánicas y por lo tanto geotécnicas de las margas dependen de su trayectoria de meteorización, éstas, permancecen y permanecerán en lo que a su comportamieto geotécnico se refiere, muy estrechamente ligadas al factor clima. Dependiendo de la exposición, la degradación puede durar desde unas semanas o meses hasta siglos. Esta es posiblemente la caracterítica más importante a destacar de las Margas de Pamplona y por ello nos lleva a reconocer la complejidad latente tras algunas observaciones para mejorar el uso de estas clasificaciones.

3.2.2.1. Resistencia mecánica y distribución espacial.

Al igual que en el caso del peso específico, la compresión simple de la roca no presenta variaciones relevantes en cuanto a distribución geográfica. Se puede observar en la correlación lineal una muy leve tendencia a aumentar con la longitud, en este último caso es así, pero con el peso específico esa minúscula tendencia era a la baja, lo cual nos pone en la vía de que se trataría de algo irrelevante, muy posiblemente consecuencia del tamaño del muestreo y de la pretensión de abarcar una extensión grande del territorio y de ciertas irregularidades de los macizos rocosos estudiados con esta primera tanda de datos. Sin embargo, más adelante veremos que también podría indicar un cierto cambio de composición que se manifestaría a través del índice de expansividad.

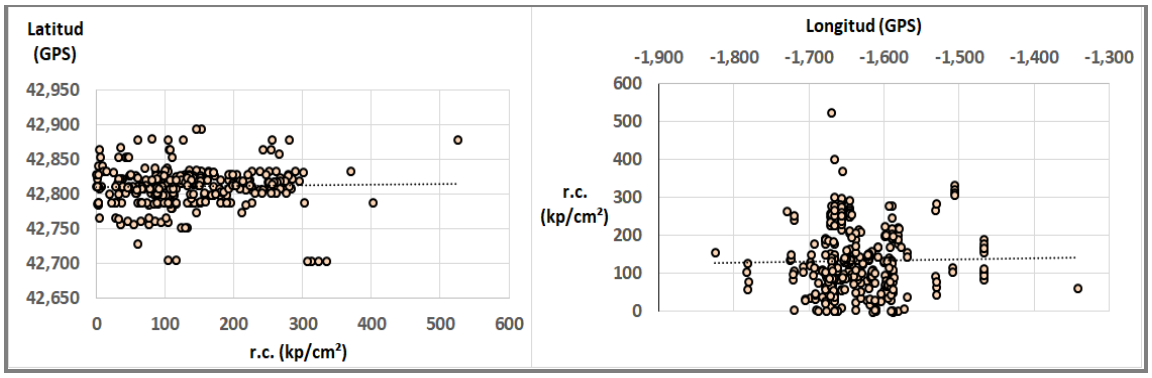


Figura 3.14. Latitud y longitud geográficas y resistencia a la compresión simple. No hay influencia en el tratamiento estadístico de la resistencia a la compresión simple en relación a su situación geográfica dentro de la misma formación.

Tampoco la cota topográfica en la extracción de las muestras parece tener relevancia. Si consideramos los fenómenos de decompresión que se pudiesen haber desarrollado paralelamente a los de mayor exposición atmosférica, afectando a las Margas de Pamplona, y considerando así su ubicación en altitud, las resistencias mecánicas deberían reflejarlo y presentar una cierta tendencia a la disminución y esto no sucede, se percibe incluso una muy leve tendencia contraria (figura 3.15).

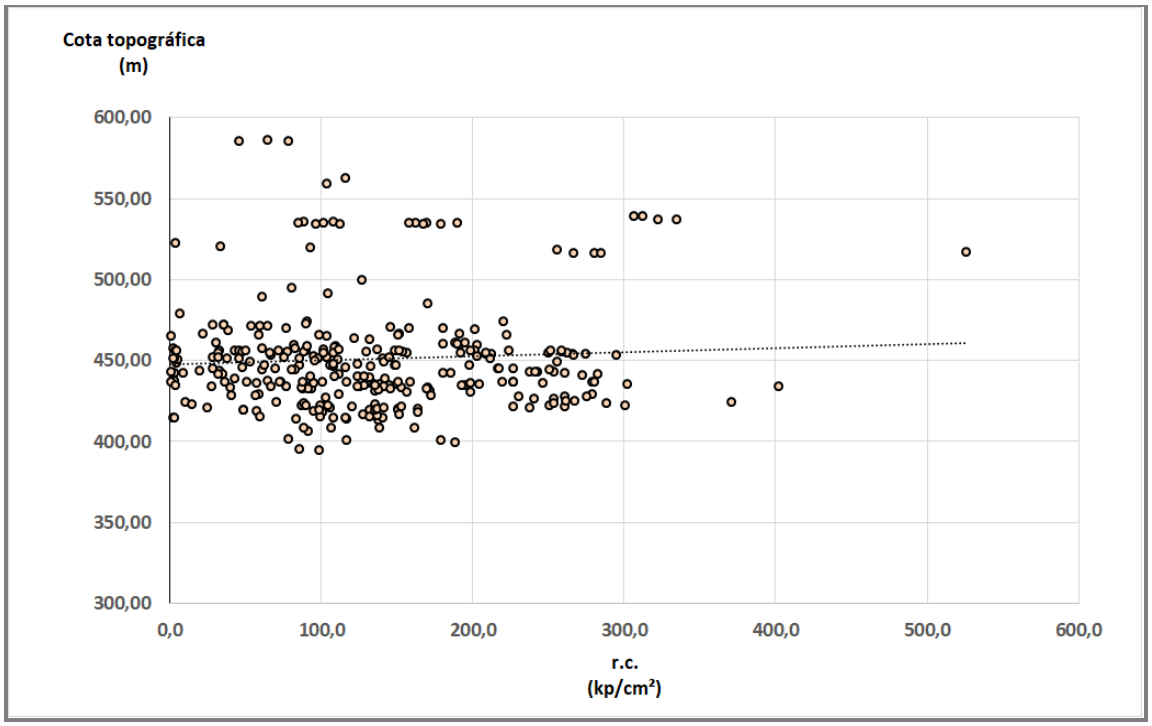


Figura 3.15. Cota topográfica y resistencia a la compresión simple. No hay una clara tendencia a que la cota topográfica donde se tomaron las muestras para estudiar su resistencia a compresión tenga influencia en la resistencia mecánica. La muy leve tendencia observada en el aumento con la cota topográfica puede ser una cuestión relacionada con la limitación del muestreo. Pero también deja abierta una investigación en relación a las tasas de erosión y los tiempos en que la roca que se va exponiendo comienza a interactuar con los agentes atmosféricos.

Este fenómeno, aparentemente contradictorio, se podría explicar también porque generalmente, en las zonas más bajas, donde se acumulan los sedimentos que los agentes externos acarrean de las zonas más altas, suele acumularse también el agua con los materiales que deposita. Y aunque suelen estar preservados por la alta permeabilidad de los residuales, mantienen una humedad y compacidad más constantes que se puede transmitir por el sistema fractográfico. No obstante, el avance de la erosión en las zonas altas provoca siempre un cierto rebote elástico, poniendo materiales mejor preservados por la propia formación al alcance de un muestreo.

3.2.2.2. Resistencia mecánica y características geomecánicas.

Sobre la posibilidad de dar alguna luz a nuestra última observación, al enfrentar la cota topográfica con los valores geomecánicos de RQD y RMR, tampoco hay una correlación clara, el RQD disminuye en cotas más altas, lo que puede indicar principios de decompresión y esponjamiento del macizo rocoso, algo que parecería lo normal. Al contrario, el RMR aumenta al incrementarse la cota topográfica, lo que puede indicar mejores condiciones globales para partes de la formación recientemente expuestas y un menor avance del ritmo de deterioro, por lo que, quizás no sea tan extraño este comportamiento de las Margas de Pamplona en estado natural.

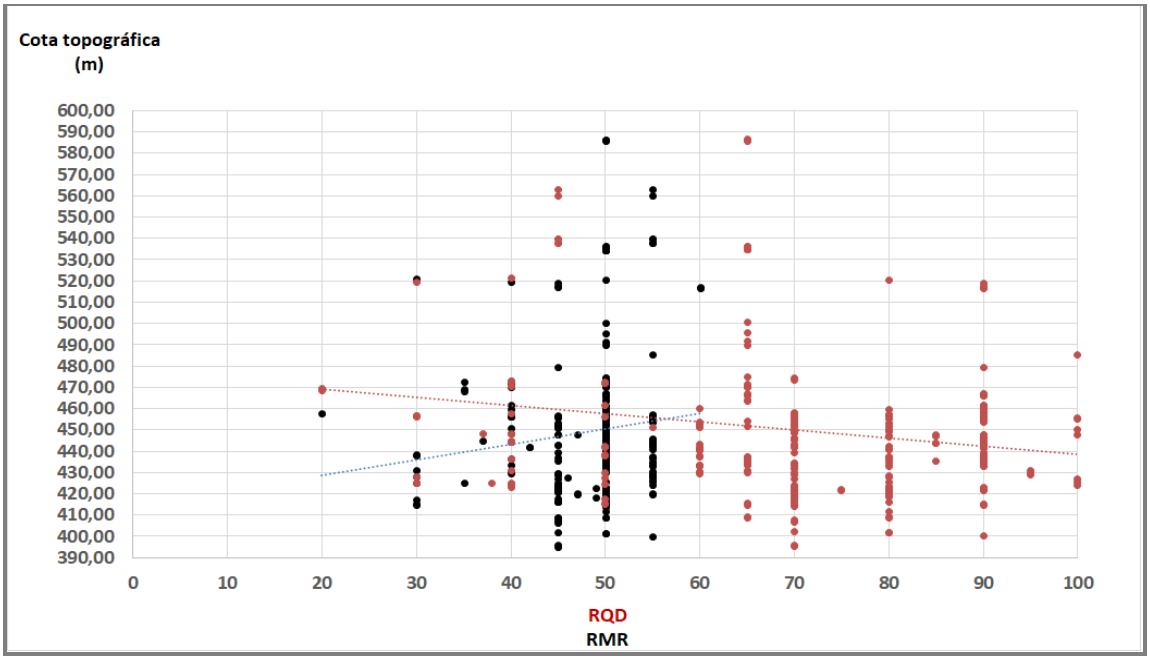


Figura 3.16. Cota topográfica y parámetros geomecánicos RQD y RMR. Existe una tendencia a reflejar cierta descompresión en zonas más altas, el RQD mide la cantidad de fracturas por unidad de longitud del macizo y éste es mayor a cotas más bajas, nuevamente las tasas de erosión podrían tener la respuesta. Realmente la gráfica muestra las limitaciones del tamaño del propio muestreo y la pretensión de abarcar una extensión relativamente grande del territorio, esto debe tenerse también en cuenta a la hora de considerar este tipo de relaciones.

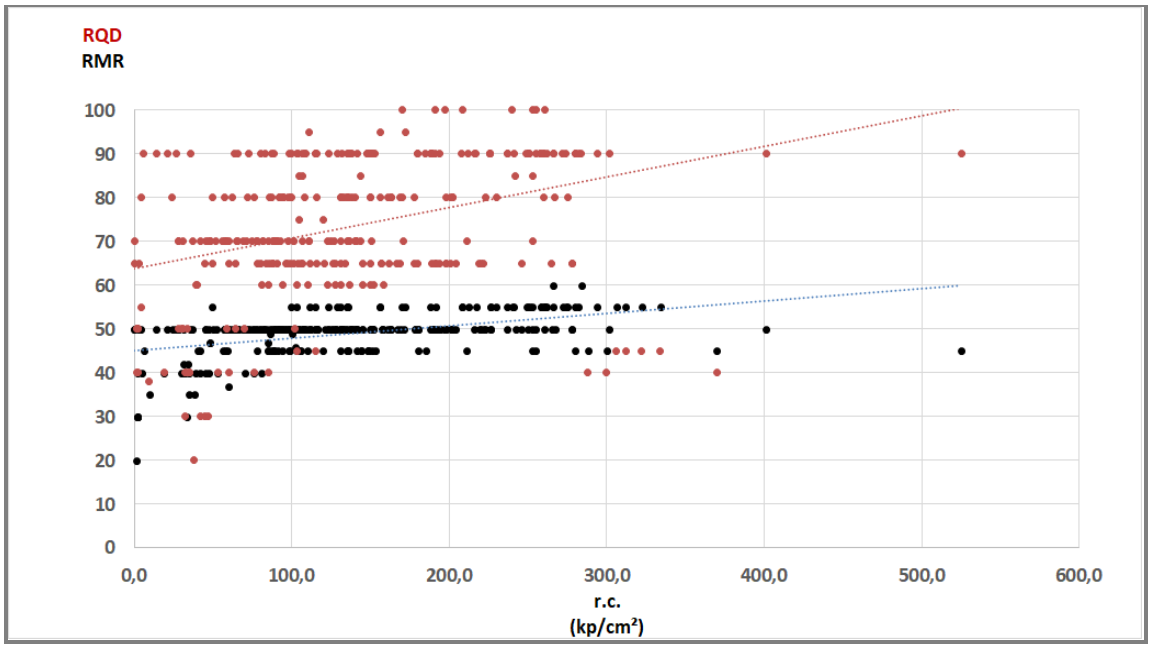


Figura 3.17. Parámetros geomecánicos RQD y RMR y resistencia a la compresión simple. Existe una clara relación proporcional entre la resistencia mecánica y los índices de calidad del macizo rocoso. A pesar de que en las Margas de Pamplona la resistencia mecánica compute bien poco en el resultado final. Relaciones que deben ser acotadas a criterio del técnico: *RQD=0,07rc+63,72* y *RMR=0,027rc+45,02*

Queda claro que la resistencia a la compresión, al igual que el peso específico, también aumenta proporcionalmente con los parámetros geomecánicos. Un valor alto del RQD propicia mejores condiciones mecánicas a la matriz rocosa, menores tasas de intercambio atmosférico, mayor valor del peso específico, etc. (ver figura 3.17). Lo mismo con el RMR, además, la resistencia a compresión, en el caso de las Margas de Pamplona, aunque muy poco (entre un 2 y un 4%) influye en la medida del RMR que también está regulada por mejores condiciones en la red fractográfica del macizo rocoso. Dado que a nivel geotécnico y aún más en geología de obras subterráneas se suele tratar con la constancia del macizo rocoso de Margas de Pamplona, podrá utilizarse la sigiente expresión para estimar el valor de RMR en sondeo a partir de la resistencia mecánica: *RMR=0,027rc+45,02.*

Es lógico que el RQD como un factor que forma una parte relativamente importante del RMR (hasta 20 puntos sobre 100) aumente en mayor proporción que el RMR si atendemos a las resistencias mecánicas por lo explicado en el caso del peso específico. Al igual que todos los parámetros físicos estudiados, los geomecánicos también alcanzan los valores más altos cuanto más profundas son las medidas, independientemente de la cota topográfica considerada.

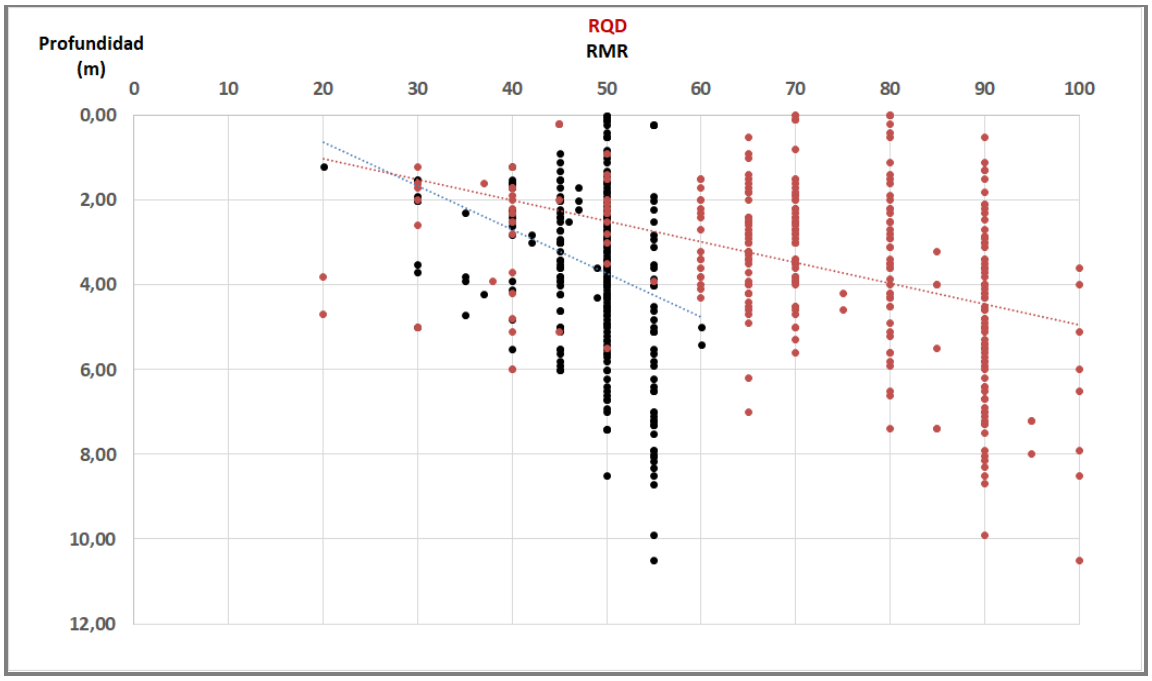


Figura 3.18. Los parámetros geomecánicos RQD y RMR también aumentan con la profundidad. Dado que ambos parámetros son índices de calidad geomecánica, es lógico que en un gran muestreo ambos aumenten con la profundidad, especialmente el RMR, el cual contempla variables que, en general, mejoran con la profundidad. Al igual que en casos anteriores, se deben acotar los datos, sería recomendable hacerlo al menos entre 1 y 5 m ya que se deben tener en cuenta los aspectos mineralógicos: *RMR=10P+14,30*

Además de la estratificación, que es la superficie de discontinuidad principal, las margas están afectadas por diaclasas subperpendiculares a ésta. Generalmente son poco regulares en lo referente a continuidad y espaciado, pero en las intercalaciones de calcarenitas y areniscas presentan una constancia mucho mayor con pautas sistemáticas y persistentes y con un espaciado que aumenta proporcionalmente al espesor de las capas entre 20 y 200 cm correspondiente a "diaclasas moderadamente separadas a separadas" (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas).

En cuanto a las direcciones predominantes o familias de juntas en el sector situado al norte de Pamplona —donde se dan las mayores inclinaciones de la serie en estratos de los perfiles geotécnicos circundantes de carácter estructural que hemos denominado C—, se distinguen dos familias predominantes, con direcciones ortogonales entre sí: NNE-SSO y ESE-ONO (Ezkaba) congruentes con la dirección de máxima compresión y con el plegamiento regional pirenaico.

3.2.2.3. Resistencia mecánica y profundidad.

La profundidad a la que se extraen las muestras es determinante (figura 3.19). Al igual que con el peso específico, las Margas de Pamplona matienen unas caracterísiticas mecánicas de mayor calidad cuanto más profundas se encuentren actualmente, independientemente de la cota topográfica en la que se ubiquen las muestras extraídas como vimos en las figuras 3.06 y 3.15.

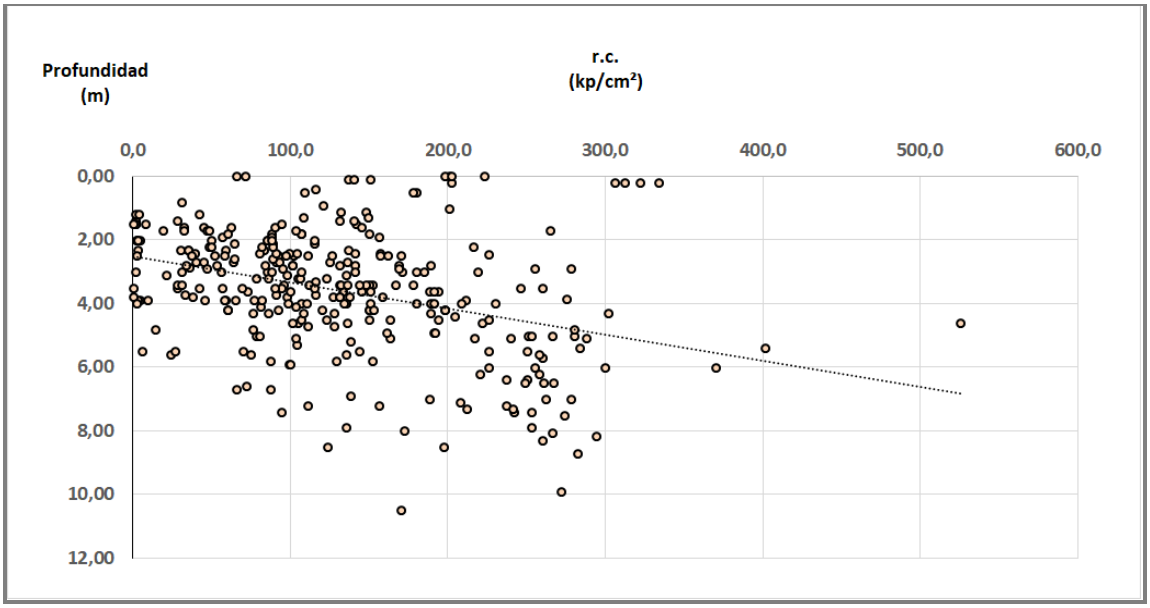


Figura 3.19. Resistencia a la compresión simple y profundidad. Otra vez, al igual que en el caso del peso específico y la calidad geomecánica que representan RQD y RMR, la resistencia mecánica aumenta con la profundidad de muestreo, independientemente de la cota topográfica o la situación geográfica. La relación entre ambos parámetros es acotada y válida entre valores que no supongan grandes cambios mineralógicos.

3.2.2.4. Resistencia mecánica, humedad, plasticidad, cambios de volumen.

La resistencia mecánica de las Margas de Pamplona se relaciona también con la humedad natural (figura 3.20), por una parte desde el punto de vista exclusivamente físico, la entrada de agua depende de la porosidad y por tanto de la densidad del material, por lo que como en todos los materiales pétreos, existe esa proporcionalidad resistencia-densidad, del otro lado estaría la reacción mineralógica y química que, protagonizada por las moléculas de agua capaces de entrar de manera estructural en los mimerales arcillosos, además de los procesos de hidrólisis, conllevan pérdidas de resistencia, pero también podemos visualizar algún detalle geomecánico interesante más respecto de su comportamiento geotécnico a la hora de tomar medidas constructivas. Veamos.

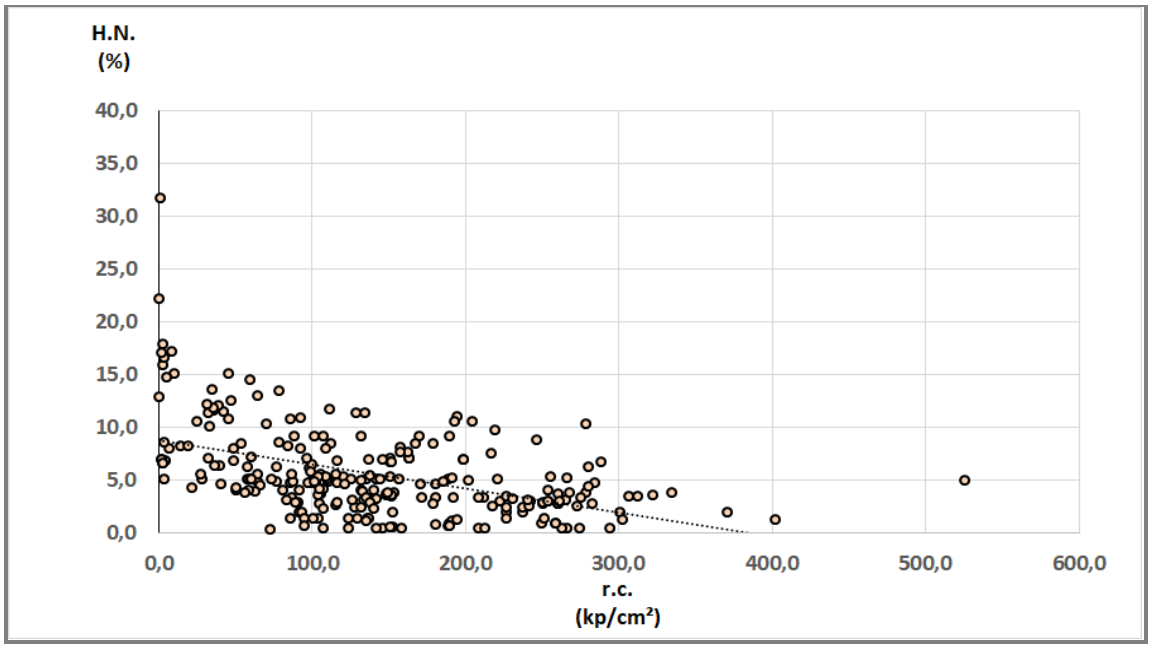


Figura 3.20. Resistencia a la compresión simple y humedad natural. Existe un claro aumento de la resistencia mecánica según el material pierde humedad. La relación de cualquier parámetro geotécnico o geomecánico con la resistencia mecánica siempre debe ser acotada.

De las muestras filtradas para quedarnos con 93 ensayos Lambe representativos de la roca alterada y semialterada, se han podido enfrentar a la resistencia a la compresión 57 de ellas (61,3%) con valores que oscilan entre 0 y 170 kp/cm² con índices de expansividad (IE) entre 0,031 y 0,117 MPa. Se puede observar que, al contrario de lo que se observa en el caso del peso específico, en que mayores pesos específicos muestran más altos I.E. dentro de los límites correspondientes al perfil de Margas de Pamplona semialteradas, la resistencia lógicamente aumenta, disminuyendo el I.E. cuanto menos han actuado los agentes atmosféricos y los procesos de meteorización. Se produce una tendencia a perder esta propiedad de hinchamiento potencial con el aumento de la resistencia mecánica, es decir, la matriz rocosa cuanto más intacta, más se opone al desarrollo de los esfuerzos de tracción internos favorecidos por la meteorización (figura 3.21).

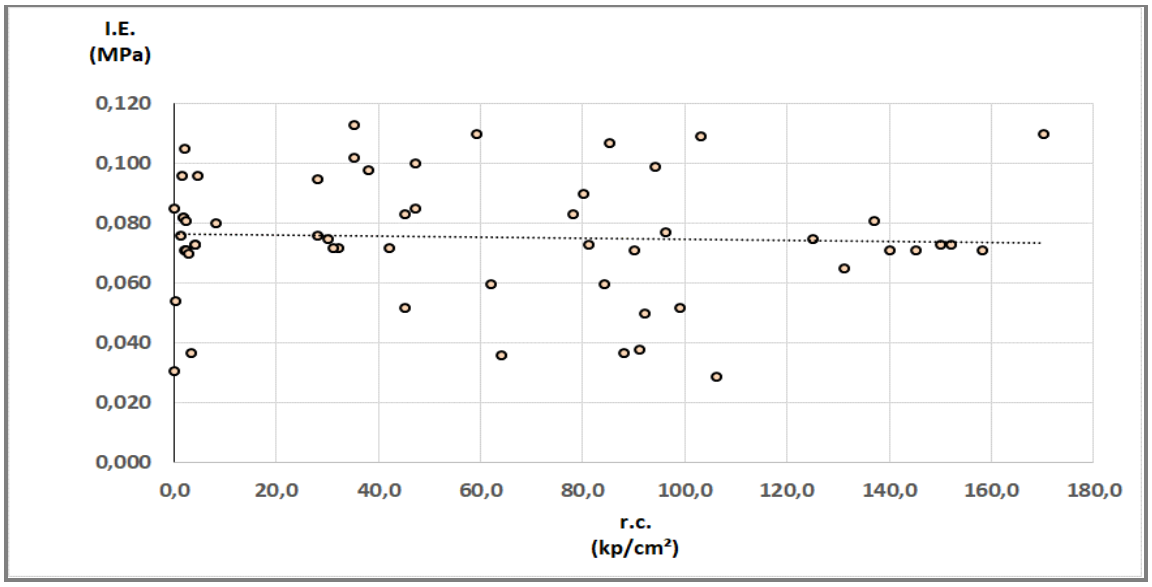


Figura 3.21. Resistencia a la compresión simple y expansividad potencial. Se observa cómo el I.E. disminuye levemente con el aumento de la resistencia mecánica.

De los 35 ensayos de plasticidad filtrados como adjudicables a roca muy alterada o semialterada que han presentado la posibilidad simultánea de tallar probetas para compresión y para realizar el ensayo Lambe, hemos rescatado 17 ensayos en los que podemos enfrentar la resistencia a compresión con valores de LL entre 31,1 y 47,0 y de IP entre 15,2 y 32,5 (figura 3.22). Si observamos la figura 3.13 vemos que tanto desde el punto de vista de estado como de comportamiento, peso específico y resistencia mecánica reflejan el mismo fenómeno.

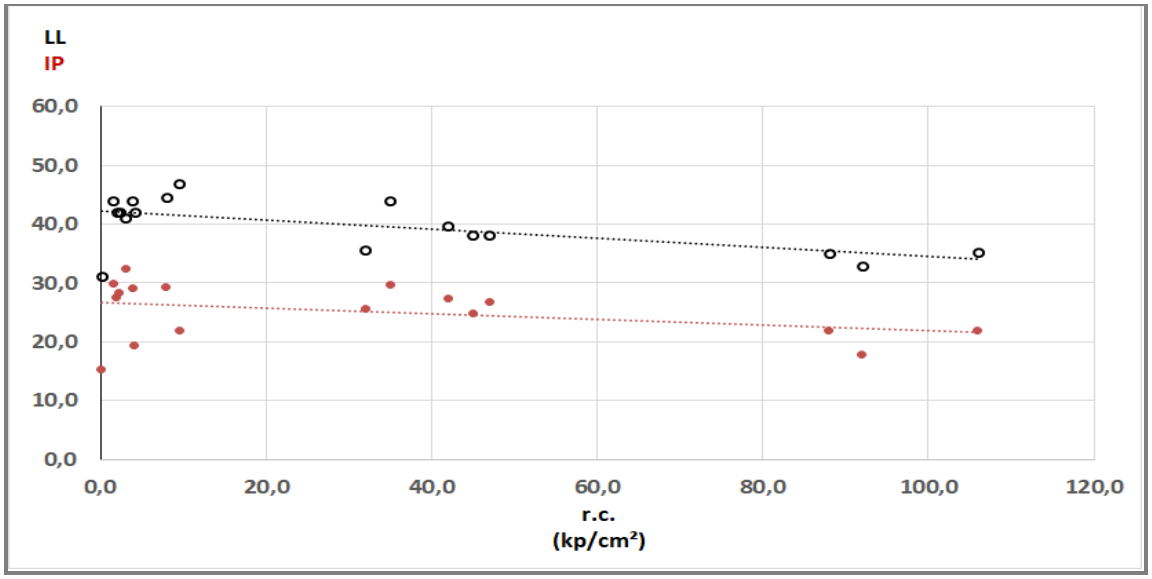


Figura 3.22. Límite Líquido (LL) e Índice de Plasticidad (IP) y resistencia a compresión simple. Al igual que en el caso del peso específico, ofrecen valores inversos hasta que la roca sana no presenta esta propiedad.

Una mirada a escala regional del índice de expansividad sugiere que las Margas de Pamplona son, aunque muy levemente, potencialmente más expansivas y retráctiles cuanto más al oeste y más al norte se encuentran (figuras 3.23 y 3.24); es decir, situados en Pamplona, los valores de cambio potencial de volumen (CPV) o del índice de expansividad disminuyen según nos alejamos de la ciudad hacia Yesa y aumentan según nos acercamos a la zona de los diapiros y formaciones salinas. Pero también, en la figura 3.24, en el diagrama 3D, podemos observar que el potencial de expansividad, en general, sería menor en las áreas que sustentan a las terrazas cuaternarias donde los perfiles de alteración de las margas son sensiblemente menores, aumentando el potencial al cambio de volumen en las áreas en que las margas afloran.

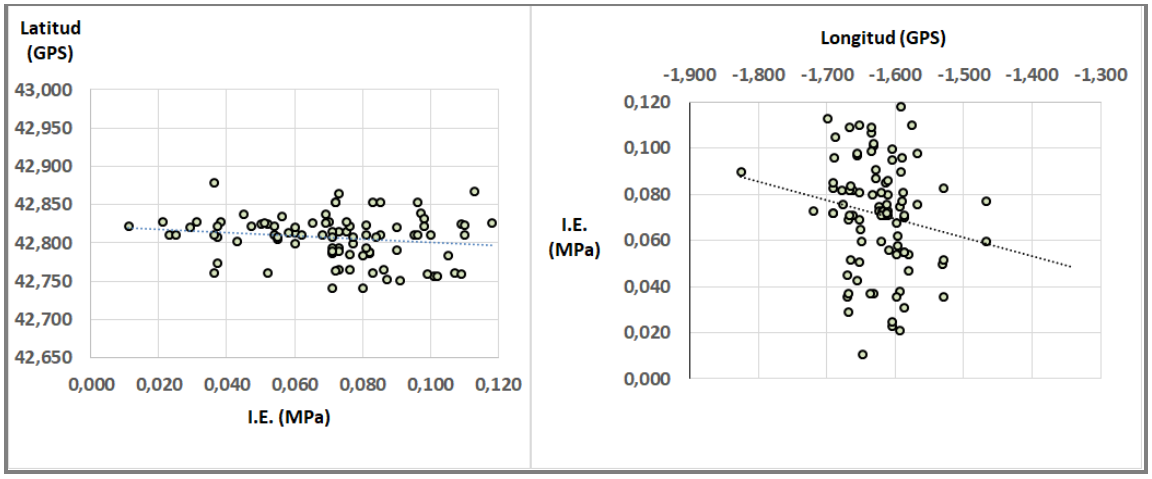


Figura 3.23. Cambio potencial de volumen, latitud y longitud geográficas. Obsérvese que el índice de expansividad en las Margas de Pamplona mostraría que éstas, aunque muy levemente, serían potencialmente más expansivas y retráctiles cuanto más al oeste y más al norte se encuentren.

Esta observación sugiere una congruencia con el hecho de que también el índice de expansividad aumenta con el peso específico en la marga semialterada, sin llegar a ser suelo suelto ni por supuesto a roca sana (figuras 3.14 y 3.21). Un suelo residual de marga es, por regla general, potencialmente menos expansivo que el horizonte de marga semialterada (II-III) más denso (figura 3.13), como también este último lo es con respecto a la roca intacta, aún mucho más densa pero sin capacidad de cambio de volumen (figuras 3.13 y 3.21).

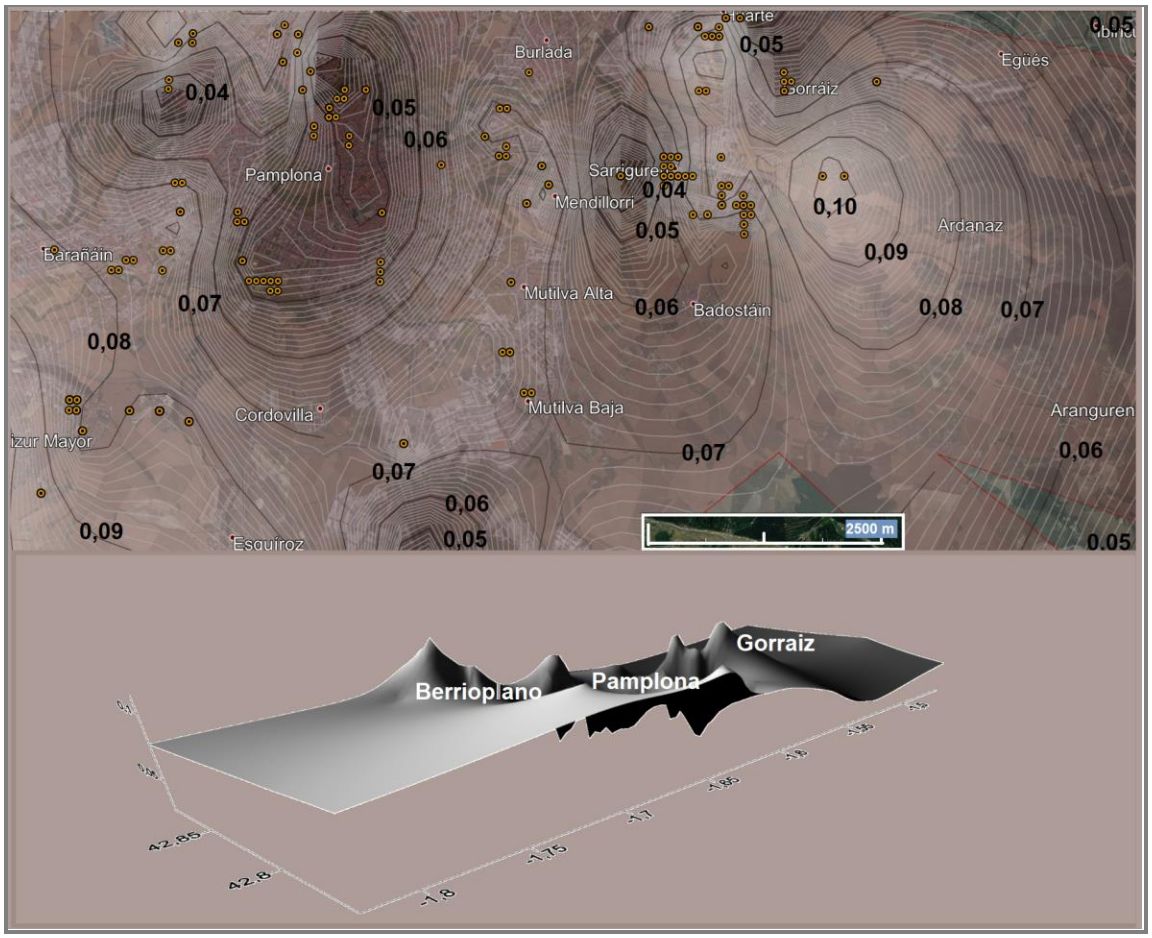


Figura 3.24. Arriba, cambio potencial de volumen (índice de expansividad en MPa), latitud y longitud mapeadas con Surfer 13 en el área metropolitana de Pamplona. Abajo, variaciones del cambio potencial de volumen (índice de expansividad en MPa), latitud y longitud, visto en un diagrama 3D en el área metropolitana de Pamplona. Mapeado con Surfer 13 con la escala de z (I.Exp) muy resaltada. El potencial para la expansividad, en general, sería menor en las áreas que sustentan a las terrazas cuaternarias de gravas P1 donde los perfiles de alteración de las margas son menores y el peso específico mayor, aumentando el potencial al cambio de volumen en las áreas en que las margas afloran directamente E1 y sobre todo E2. El contacto directo con la atmósfera incrementa el potencial expansivo-retráctil que, a su vez, aumenta con el intervalo del peso específico de las margas semialteradas (II-IV), sin llegar a ser suelo suelto (como en los perfiles geotécnicos E2) ni roca sana como la que aparece bajo las terrazas de P1.

3.2.3. Resistencia mecánica y peso específico.

Los criterios exclusivamente geológicos, tectónicos o mineralógicos no pueden explicar por sí solos algunos de los leves cambios detectados en ciertas relaciones de estado y comportamiento geotécnico de las Margas de Pamplona. Las intervenciones humanas y sobre todo, las climáticas tendrían una componente importante que además han variado con el tiempo. Aunque intentar cuantificarlo en el futuro requiera quizás, utilizar procedimientos relacionados con la dinámica de sistemas, hemos encontrado pocas, pero significativas relaciones fácilmente reconocibles. En la séptima parte de este estudio, esas relaciones van a determinar recomendaciones para procedimientos de auscultación, investigación y proyecto, así como de actuación en obra, siempre enfocados a una mayor simplificación y optimización del uso de la formación eocena E1 y sus terrenos asociados E2, P11, P12, P21, P22 y C que veremos definidas en la siguiente parte cuatro.

Estas determinaciones, por una cuestión puramente geológica y práctica, estarán siempre en relación con los inevitables elementos adyacentes (o inmersos) que acompañan a las Margas de Pamplona, como los habitualmente inseparables terrenos cuaternarios suprayacentes, los definitorios límites geológicos como las facies Flysh o las intercalaciones graduales de cambios litológicos que, como veremos, han sido los protagonistas indiscutibles de muchos de los grandes aciertos históricos de carácter geotécnico, pero también una de las mayores causas de desavenencias constructivas recientes a corregir.

Las respuestas al uso que se haga de las Margas de Pamplona depende, en gran medida, del tiempo que transcurre desde la excavación, extracción (en caso de terraplenados y taludes) hasta la puesta en obra. Posteriormente los procesos físico-químicos evolucionan durante la vida de cada tipología de obra dependiendo del clima y de la actividad humana. Finalmente, y como hemos adelantado, hay una relación proporcional entre el peso específico de todo material pétreo y su resistencia mecánica. En muchos casos se puede y se deben determinar límites —sobre todo y cuantitativamente, desde un mínimo razonable para la roca menos alterada y hasta el límite geológico máximo que impone la propia naturaleza de la formación— con una relación numérica proporcional para las Margas de Pamplona. Este límite inferior lo hemos puesto en 2,20 g/cm³ y como superior iríamos hasta poco más allá de los 2,73 g/cm³ que como máximo hemos medido en nuestros datos en la formación. Esta relación se presenta en la figura 3.26 y su expresión sería:

$$rc\ (kp/cm^2) = 457{,}5\ \gamma\ (g/cm^3) - 980{,}6$$

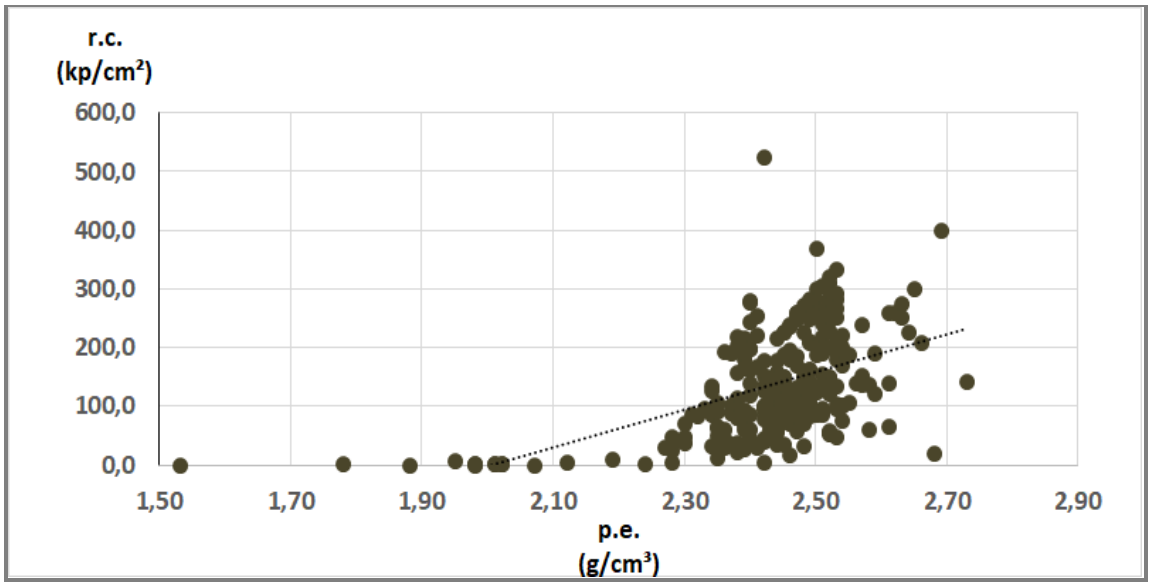


Figura 3.25. Variación de la resistencia a compresión con el peso específico en el espectro de meteorización I-VI según la norma BS-5930/81.

Existen relaciones singulares en las Margas de Pamplona como las vistas previamente que evidencian una formación rocosa bastante peculiar desde este nuevo paradigma histórico en que utilizamos unidades de medición estandarizada. Hablamos de gramos, megapascales, porcentajes de humedad, densidad, sistemas de medición, pero aún así no hemos sido capaces de determinar un prodecimiento fiable para catalogarlas según su estado de meteorización. La calidad de los datos y los resultados de las mediciones, así como la distribución en contextos geográficos, geológicos, topográficos, tensionales, se define por las propiedades estadísticas de las múltiples mediciones obtenidas utilizando un sistema de medición operado bajo condiciones estables.

Precisamente por ello, en el sector, cuando se ha asumido a través del conocimiento más profundo de las Margas de Pamplona su contundente variabilidad geotécnica con respecto al grado de meteorización, se ha demandado a las universideades y centros de investigación la posibilidad de proporcionar los criterios para una clasificación adecuada a sus comportamientos variables. Las clasificacones geomecánicas, los ínices de expansividad, humedades naturales, límites de Atterberg, etc., no proporcionan una visión de todo el espectro de roca desde lo que se puede clasificar como roca sana hasta muy alterada, que sirvan de pronóstico para evitar patologías o fallos constructivos como los que hemos visto a los largo de la hitoria. Solamente el peso específico y la resistencia a la compresión serían los parámetros idóneos que, a priori, parecerían más adecuados para abarcar una clasificación que pudiera adelantarse, prevenir o indicar itinerarios constructivos si pudiéramos hacerlo a partir de uno solo de ellos, o de ambos.

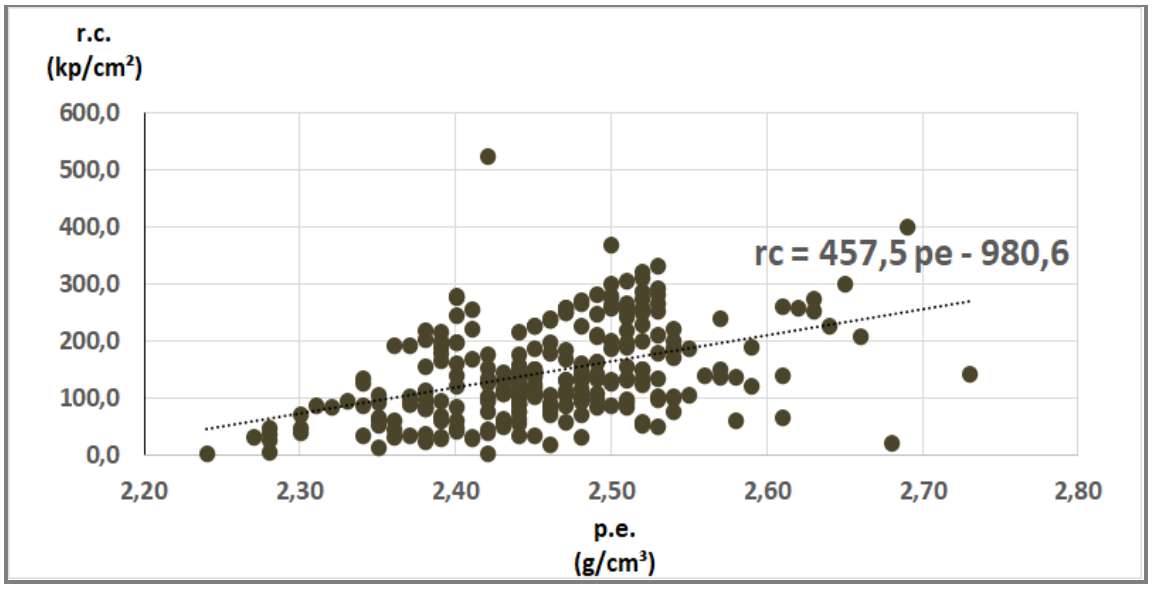


Figura 3.26. Variación de la resistencia a compresión con el peso específico en el espectro de meteorización I-IV según la norma BS-5930/81. Al eliminar los datos de los especímenes que se clasificaron como V y VI en la escala de meteorización, tenemos una correlación mucho más fiel de lo que sería una roca blanda como las Margas de Pamplona sanas o semisanas.

La mayoría de los parámetros que hemos analizado no son, por sí solos, indicativos de según qué grados de alterabilidad o problemática constructiva que pueda desencadenarse durante la obra o días, meses, años después, y no lo son por diferentes motivos: por ejemplo, las clasificaciones geomecánicas como el RMR de Bieniawski pueden guardar muy poca o nula relación con la resistencia o cambios de comportamiento estacional dada su poca representatividad más allá de las obras subterránes y excavaciones, menos aún para altos grados de alteración, donde las clasificaciones geomecánicas tienen bastante poco sentido. El peso específico podría variar desde valores muy bajos a muy altos con un RQD siempre máximo, lo que llevaría a equivocaciones ante un grado de meteorización medio sin una red fractográfica desarrollada, y eso, se ha podido comprobar en bastantes ocasiones en los macizos más superficiales. La humedad natural podría ser representativa, puede medirse en todos los grados de alteración y además está relacionada con el proceso de meteorización, sin embargo, humedades bajas de terrenos superficiales son habituales en las tomas de muestras en épocas estivales en terrenos con altos grados de alteración. Esa misma muestra puede arrojar valores muy altos de humedad natural después de una época de lluvias. El índice de expansividad no presenta un comportamienlo lineal, intentar obtener un resultado en muestras sanas o de grado de meterorización II no aporta ninguna información valiosa, ni siquiera a la hora de estudiar un acontecimiento geotécnico relevante de carácter histórico; pero tampoco lo hace de una manera pura y exclusivamente técnica.

3.3. Propuesta para una clasificación.

Otra cuestión interesante sería la existencia de límites, por ejemplo, de resistencia que, como hemos visto, indicarían diferentes comportamientos por tramos en los que la composición mineralógica en el mismo lugar, discriminaría diferentes especímenes por su comportamiento. Es algo que podemos visualizar en la variación de la pendiente de la resistencia a compresión en escala logarítmica con respecto a la profundiad. Se observan bien tres tendencias: la primera abarcaría prácticamente de 0 a 100 kp/cm², la segunda de 100 a 250 kp/² y de ahí en adelante estaría la tercera (figura 3.27).

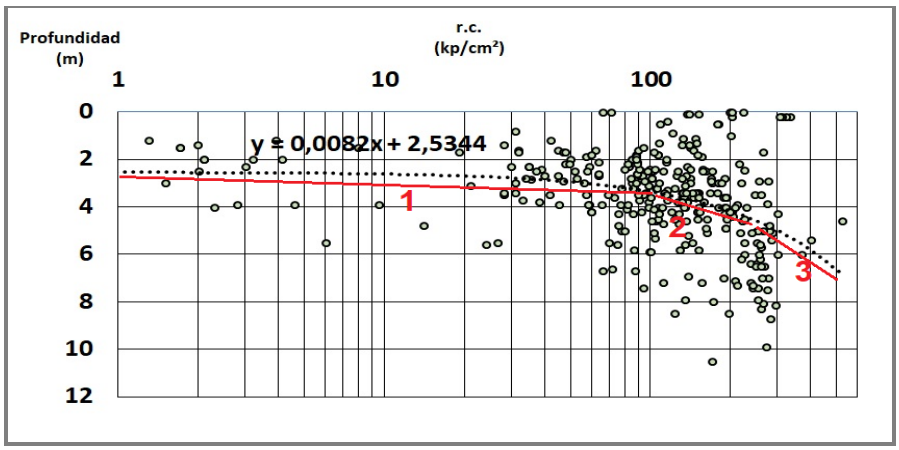


Figura 3.27. Representación de la variación de la pendiente de la resistencia a compresión en escala logarítmica con respecto a la profundiad. Se observan tres tendencias: la primera abarcaría el espectro de 0 a 100 kp/cm², la segunda de 100 a 250 kp/² y de ahí en adelante la tercera. La resistencia mecánica habla de diferentes comportamientos por tramos en los que la composición mineralógica, incluso en el mismo lugar geográfico, discriminaría al menos, tres especímenes de roca.

Por tanto, entre el peso específico y la resistencia mecánica deberíamos encontrar el parámetro idóneo con límites confiables para adecuar una clasificación adaptada a de la ISMR para las Margas de Pamplona. Si tomamos como referencia la campana de Gauss de ambos parámetros —peso específico y resistencia mecánica— como en la figura 3.28b, veremos que la primera distribución (p.e.) apenas ofrece un espectro para subdivisiones confiables o adecuadas, sin embargo, la resistencia mecánica (r.c.) suministra un amplio rango de valores que pueden ser aprovechables a tal propósito, como también se puede ver en la figura 3.28a. Por ejemplo, en el caso del peso específico una media de 2,41 g/cm³ y mediana 2,44 g/cm³ a una profundidad media de 3,53 m (3,40 m de mediana y desviación estándar de 1,94 m) arroja una desviación estándar de 0,17 mientras que la resistencia a compresión con una media de 133 kp/cm² y mediana de 121 kp/cm² a esa misma profundidad, presenta una desviación estándar de 84 kp/cm². La relación (desviación típica/media) σ/μ para el peso específico es 0,17/2,41 o lo que es lo mismo, apenas un 7% mientras que esa misma relación σ/μ para la resistencia mecánica es de 84/133, un 63%.

Los datos pueden verse en la concentración de resultados del peso específico (en azul) en comparación a la dispersión de la resistencia mecánica (naranja) en la figura 3.28a. En el caso del peso específico, la variación de la media menos la desviación estándar es de 2,24 g/cm³ y la de la suma de ambas es de 2,58 g/cm³. Es decir, deberíamos encontrar seis clases de grado de meteorización de los macizos rocosos de Margas de Pamplona que irían desde I a VI acotados entre 2,24-2,58 g/cm³ lo que conlleva ineludibles dificultades y bastantes inexactitudes para nuestro propósito.

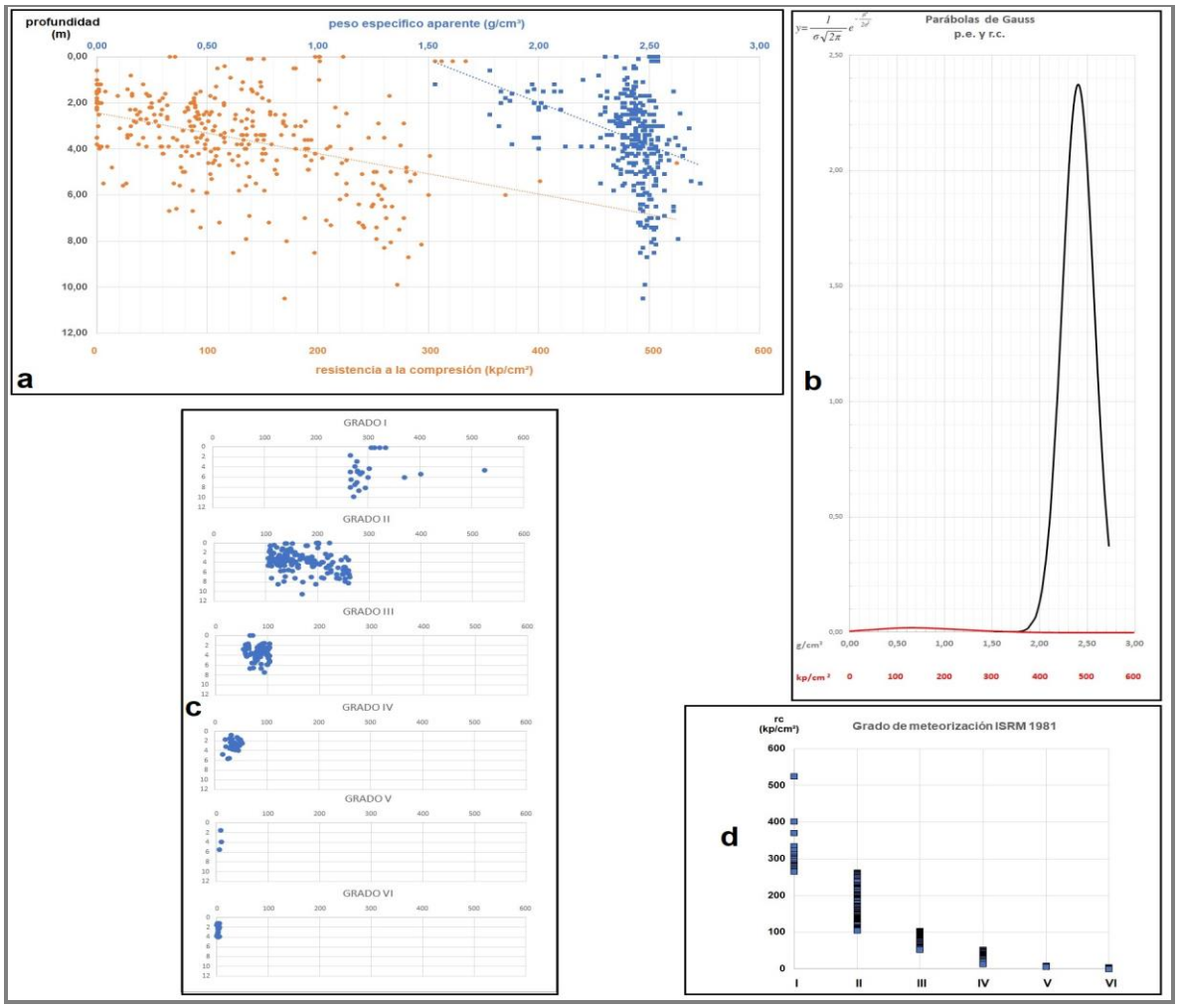
Sin embargo, esas distancias con la resistencia a compresión se distribuyen entre un amplio intervalo de 49 a 217 kp/cm², como hemos visto, un orden de magnitud más en la relación σ/μ. Si agrupamos los datos de estudios geotécnicos que clasificaron los macizos rocosos de manera cualitativa por su grado de meteorización (por ejemplo, según la ISMR, 1981), vemos que, al igual que sucedió con las clasificaciones geomecánicas como la del RMR de Beniawski o el índice Q de Barton[9], semejantes apreciaciones no se pensaron para un tipo de roca en particular, con el fin de disponer de clasificaciones locales o por familia litológica. La dificultad en rocas como las Margas de Pamplona cuyo comportamiento cambia en semanas o meses en relación a las condiciones climáticas es aún mayor.

Con respecto a la resistencia a la compresión, no obstante, tenemos la posibilidad de encotrar límites aceptables para una nueva clasificación basada en la de la ISMR dedicada a las Margas de Pamplona, por ejemplo, observando la tendencia general de tres intervalos con diferentes pendientes (figura 3.27) que se pueden visualizar a escala logarítmica.

El primero intervalo iría desde 0 hasta cerca de 100 kp/cm², el segundo desde 100 a unos 250 y el tercero a partir de esas resistencias. Adjudicando porcentajes sobre la máxima y mínima resistencias alcanzadas (de 0 a 525 kp/cm²) encontramos que el 20% de la distribución corresponde a 105 kp/cm² y el 50% a 263 kp/cm².

---

[9] La clasificación Q de Barton es una de las clasificaciones geomecánicas más utilizadas en los macizos rocosos junto con el RMR de Bieniawski. No obstante, el RMR normalmente se emplea más como índice geomecánico para la evaluación de las propiedades de los macizos rocosos y el índice Q se emplea sobre todo en la evaluación del sostenimiento de túneles mediante bulones, cerchas, hormigón proyectado, etc. La clasificación Q de Barton se desarrolló en por Barton, Lunde y Lien a partir de la información recogida de numerosos túneles y excavaciones. Posteriormente ha sido revisada en varias ocasiones. El índice Q permite estimar parámetros geotécnicos del macizo rocoso para diseñar sostenimientos en excavaciones y obras subterráneas. El índice Q varía entre 0,001 como roca excepcionalmente mala y hasta 1000 como excepcionalmente buena.



Figuras 3.28: Figura 3.28a: Variación de la resistencia a compresión (en escala 200 p.e.) y del peso específico (en escala normal) con la profundidad en que se observa una mayor concentración de resultados de este último en el entorno de los 2,40-2,50 g/cm³, mientras que la variabilidad de resultados de la resistencia mecánica ofrece mejores perspectivas de clasificación geomecánica y de distribución de intervalos de características diferenciadas para una clasificación por tramos o intervalos. **Figura 28b**: Parábolas de Gauss del peso específico (negro) y de la resistencia mecánica (en rojo x200p.e.) en la misma escala de ordenadas de la distribución normal que muestra un valor de ordenada de la figura 3.28a para la función de densidad $y=(1/\sigma\sqrt{2\pi})e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$ donde μ es la media y σ la desviación típica. Los puntos de inflexión para cada variable en el eje de abscisas (p.e y r.c.) se dan en $(\mu-\sigma)$, μ y $(\mu+\sigma)$. La mayor concentración de valores del p.e. dejaría fuera a este parámetro para los objetivos clasificatorios de grado de meteorización. **Figura 3.28c**: Al agrupar los valores de resistencia mecánica por grados de alteración como porcentajes del valor máximo de la resistencia mecánica con respecto a la profundidad (0-12 m) obtenemos una imagen bastante sugerente de qué intervalos de resistencia y profundidad se trabajan más en los estudios geotécnicos y por dónde podríamos comenzar a buscar un parámetro fiable para clasificar el estado de alteración de estos macizos rocosos de Margas de Pamplona. **Figura 3.28d**: Con esta agrupación presentada de la anterior figura 3.28c sin contar con la profundidad, la clasificación estaría prácticamente hecha.

La clasificación ISMR (1981) no deja de ser cualitativa y tampoco se pensó para ser cuantificada, sino que se le dotó de un carácter orientativo para todas las rocas. La distribución quedaría tal y como podemos visualizar en la anterior figura 3.28, sobre todo si nos fijamos en las 3.28c y 3.28d que dan una buena imagen de cómo discriminar diferentes especímenes geotécnicos de acuerdo a la resistencia a compresión. Los intervalos los podemos ver en la siguiente tabla XVII y redondear.

Tabla XVII

INTERVALO (kp/cm²)	GRADO	N	%
>263	I	24	7,7
105-263	II	154	49,5
53-105	III	77	24,8
11-53	IV	35	11,3
5-11	V	3	1,0
0-5	VI	8	5,8

I INALTERADA O SANA: no son visibles señales de meteorización. Roca fresca. Algunas discontinuidades pueden mostrar leves teñidos. *rc>260 kp/cm²*

II LEVEMENTE ALTERADA: meteorización penetrativa desarrollada en superficies de discontinuidades abiertas, pero solo meteorización leve del material rocoso. Las discontinuidades están coloreadas y la coloración puede extenderse dentro de la roca unos pocos milímetros desde la superficie de la discontinuidad. *105<rc<260 kp/cm²*

III MODERADAMENTE METEORIZADA: una leve coloración se extiende por la mayor parte de la masa. El material no es disgregable (salvo a trasvés de la fracturación). *50<rc<105 kp/cm²*

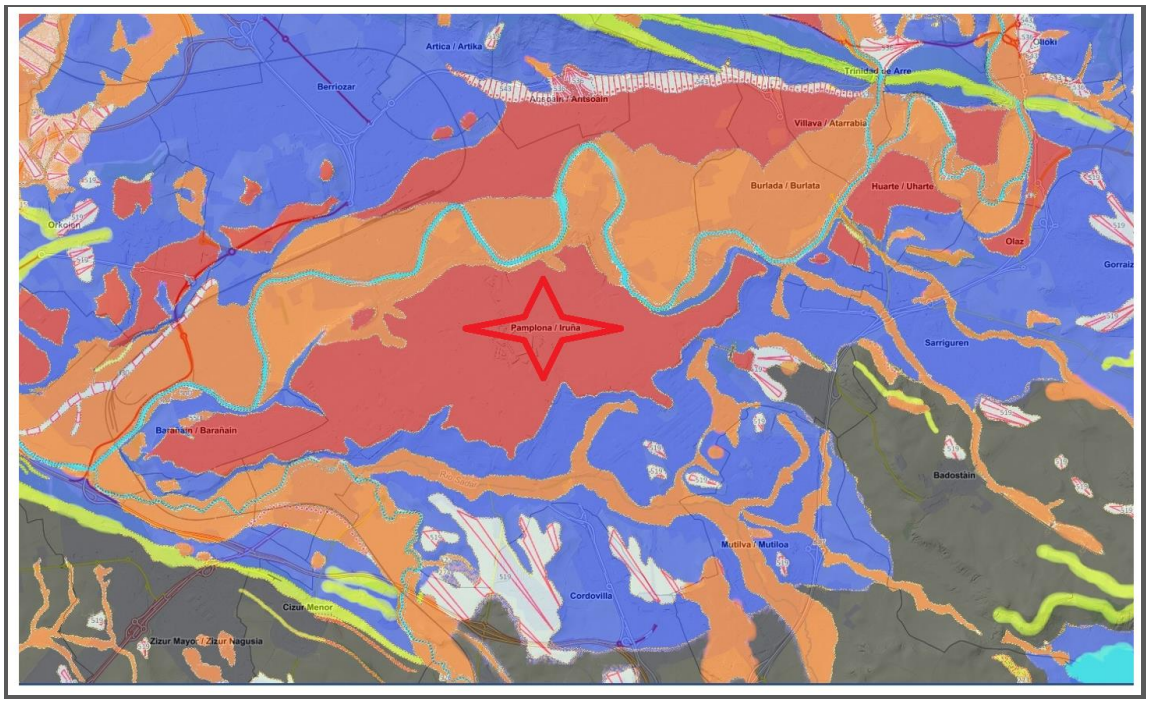
IV MUY METEORIZADA: la alteración se extiende por toda la masa y el material rocoso es parcialmente disgregable. Todo el material excepto el cuarzo está coloreado. La roca puede ser excavada con martillo de geólogo. *10<rc<50 kp/cm²*

V COMPLETAMENTE METEORIZADA: la roca está totalmente teñida, descompuesta y disgregada; solamente fragmentos de roca mantienen textura y estructura. La apariencia externa es de un suelo. *5<rc<10 kp/cm²*

VI SUELO RESIDUAL: suelo con completa desintegración de textura, estructura y mineralogía de la roca madre. En la que no es posible reconocer la estructura de la roca original. *0<rc<5 kp/cm²*

PARTE 4

MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA



4.1. Antes de la era científica y el Sistema Internacional de medidas (SI).

Elegidas por convención, como sistema de medición internacional o Sistema Internacional de medidas (SI), lo visto hasta ahora es una visión muy reciente ante miles de años de historia en que el ser humano interactuó con la formación rocosa eocena en sus estados E1 y E2. Además, por combinación de las unidades básicas de medición se obtuvieron las demás unidades que hemos utilizado para comprender las características singulares de la Margas de Pamplona, son las denominadas unidades derivadas del Sistema Internacional. Es la forma en que podemos definir cualquier magnitud física.

Se trata de la versión moderna del sistema métrico decimal, por lo que el SI también es conocido de forma genérica como sistema métrico. Es el sistema de unidades vigente en casi todos los países del mundo desde 1960 cuando se creó en la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas, durante la cual inicialmente se reconocieron seis unidades físicas básicas (las actuales excepto el mol). El mol se añadió en 1971. Entre los años 2006 y 2009 se armonizó el Sistema Internacional de Magnitudes —a cargo de las organizaciones ISO y CEI— con el SI. El resultado es la norma ISO/IEC 80000. Es obvio que con la presente investigación, primero geológica, luego geohistórica y finalmente geomecánica, evaluamos a nuestros antepasados bajo estas premisas (y seguiremos haciéndolo por el retrovisor de la historia). Desde nuestro tiempo analizamos decisiones geotécnicas, procedimientos, soluciones constructivas, etc., de cuando no existían sistemas estandarizados, aunque sí existían normas, como vamos a ver, e incluso a veces, escritas.

Sin embargo, lo que sí nos muestra la geohistoria es que la mayoría de los comportamientos geotécnicos descritos hoy en el contexto del SI eran sobradamente conocidos y que, al igual que ahora, e incluso en menor medida, los problemas geotécnicos por falta de conocimiento del peculiar comportamienro de la formación eocena, fueron y son muy puntuales, pudiendo afirmar que ha sido nuestra generación la que más se ha enfrentado a la realidad natural de las margas desde una actitud de dominio y no interactiva, debido sobre todo a la irrupción del motor de combustión y el correspondiente despliegue de una capacidad de realizar trabajo (energía) nunca antes visto quenos concedió cierta sensación de dominio. Hemos visto algunos casos históricos de los cientos de ellos que hemos podido estudiar con ejemplos emblemáticos por su importancia arquitectónica, histórica, patrimonial o administrativa. Hay que tener muy en cuenta que, de la mayoría del conjunto de núcleos de población, palacios o castillos navarros, no disponemos de ninguna documentación de carácter geotécnico de primera mano, muy al contrario, accedemos a través de noticias históricas y más recientemente los trabajos de archivo y sobre todo arqueológicos y de hemeroteca. Éstos son los que nos dan más luz sobre la relación de los seres humanos con las Margas de Pamplona a lo largo de los siglos. Estamos traduciendo al SI aquellas actitudes.

Por ejemplo, antes de acabar el primer milenio, las defensas construidas contra el poder musulmán no pasarían de ser terraplenados básicos y fosos más o menos provisionales para cuya construcción y excavación se utilizó energía muscular, humana y animal. Los poblados que se defendían, se parapetaban tras taludes de tierra levantados una y otra vez como primitivas fortalezas, también se combinaban con la construcción de incipientes castillos levantados con sillares. Se trataba de soluciones defensivas económicas, muy precarias y sencillas, pero exitosas en general.

Estos primitivos núcleos de resistencia, sobre todo al nuevo poder islámico, aún tenían una dimensión muy local. En realidad, se aprovechaban sobre todo de la protección que les ofrecían los ríos, las cordilleras y sus bosques, los barrancos, las cuevas, los lugares de difícil acceso. Comentan Levi-Provençal, E. y García Gómez, E., en sus *"Textos inéditos del Muqtabis de Ibn Hayyan sobre los orígenes del reino de Pamplona, Al-Ándalus"*, vol. 19, núm. 2 (1954)., p. 297, que recogen la noticia, fechada en 816, donde se narra la incursión militar de Abd al Karim contra los pamploneses comandados por Balask al-Yalasqui, y que entonces *se defendieron de los musulmanes gracias a ríos abruptos y barrancos a los que se acogieron obstruyendo sus accesos con troncos y fosos excavados en las rocas*. Esa tecnología les era familiar, eran lugares donde, además construyeron trampas que los musulmanes no pudieron franquear. Este sistema defensivo rudimentario de baja energía, aprovechando la orografía y las características geotécnicas y geomecánicas vistas en la anterior tercera parte, demuestra que tenía efectividad. Parece ser que, en varias incursiones, las tropas musulmanas se retiraron sin lograr sus objetivos de conquista.

Pero a la sazón, gracias a quienes estudian la historia y la arqueología, sabemos que la población de la Cuenca de Pamplona estaba organizada en torno a pequeñas aldeas originadas en tiempos muy remotos con escasa infraestructura defensiva y sin una urbe que destacase como fue más tarde la ciudad de Pompelo; así perduraron con ese mismo carácter abierto y llegaron al de los antiguos vici romanos. Sus defensas no pasarían de lo comentado desde el punto de vista puramente geomorfológico, con escasas disposiciones artificiales o tecnológicas que cambiasen el terreno, sino más bien aprovechando la orografía y la geomorfología con muy rudimentarias modificaciones de los macizos rocosos en sus partes más superficiales. Nada comparable a ocho sótanos de parking.

Posiblemente en los momentos más peligrosos —si las primeras condiciones defensivas eran superadas por los invasores o las previsiones, tras épocas de escasez, vislumbraban la imposibilidad de ofrecer resistencia, ni siquiera contando con una geomorfología bien conocida y la tecnología que sobre ella aplicaban—, los habitantes abandonarían esas aldeas para refugiarse en los núcleos más apartados que sí estuviesen mejor fortificados. Algunos de ellos, como vimos en Tabar, Garítoain o Santa Lucía, desde la Edad del Hierro ya disponían de estructuras defensivas algo sofisticadas y con cierta complejidad esculpidas en los macizos y amoldadas a la geomorfología.

La investigación sobre las edificaciones e infraestructuras defensivas históricas, sus remodelaciones, adaptaciones y más tarde el estudio de los castillos y palacios, no es aún lo suficientemente abundante para elaborar sólidas teorías de cómo evolucionaron desde el punto de vista ingenieril las defensas, o si los apoyos fueron profundos, robustos y renovados con tan poca frecuencia como las cimentaciones de la mayoría de los edificios históricos que las reutilizaban una y otra vez. Esas observaciones dan idea de la relativa facilidad tecnológica del nivel de margas y sus materiales asociados como las terrazas cuaternarias que sustentan, o los niveles de tránsito de calcarenitas y areniscas, facies Flysh, etc., que casi siempre suministraron la materia durable para los cimientos.

Sería más que oportuno, necesario, el comprobar en el futuro la existencia de una serie de fortificaciones, anteriores a la consolidación del reino de Pamplona con la característica del dominio de amplias áreas estratégicas del territorio, adaptándose a la geología y geomorfología de los terrenos donde se asientan y mostrando si existe una línea temporal en que inicialmente domina la adaptación geomorfológica para ir dando paso a soluciones mixtas y finalmente culminar con el dominio tecnológico antes de que aquellas personas decidiesen dejar la defensa en un segundo plano, algo que, como hemos visto, es tremendamente reciente. Por ejemplo, los episodios recurrentes de peste de los siglos XIV a XVIII fueron en Navarra los más intensos y mortíferos de Europa y supusieron una tímida salida de las fortificaciones debido a claras aspiraciones terapéuticas. Se produce un cambio en el tipo de construcciones que adquieren un nuevo carácter religioso-curativo y hospitalario. Se trata de nuevos lugares a los que poder acudir mientras se vivían las recurrentes pandemias que azotaban Navarra cada una o dos décadas, hasta que por el método de ensayo-error se aprendió el significado de los confinamientos domésticos, por barrios e incluso por comarcas. Hasta la llegada de 1723 con el último episodio pandémico. Entonces la actividad constructiva retoma una nueva dimensión y la defensa del territorio o dónde pasar cuarentenas y aislarse de aquellos *castigos divinos* en forma de enfermedad van dejando de ser protagonistas.

Aparecen nuevas modas, estilos artísticos, concepciones del espacio habitable que no existían previamente y creencias que tímidamente van requiriendo nuevas relaciones con el terreno que las sustentará. Desde el sistema internacional de medida se pueden y se deben traducir aquellos acontecimientos para ampliar nuestras bases de datos, pues éstas no tienen por qué comenzar desde cero en 1960. Realmente el medio geotécnico no ha cambiado, o ha cambiado muy poco, es indiferente si el impulso de una construcción y el contacto con el suelo es la defensa, la devoción, la búsqueda de la salud, almacenar agua o exaltar una determinada firma arquitectónica. La interacción con el subsuelo es la misma, sus respuestas idénticas, sus posibilidades y limitaciones apenas han cambiado. Lo que fue cambiando con la modernidad, los nuevos materiales y la tecnología fue la concepción del medio geotécnico.

4.2. La nueva concepción del medio geotécnico.

Nada de todo lo comentado anteriormente es comparable a lo sucedido a finales del XIX y principios del XX por cuestiones tan obvias como los efectos de la revolución industrial y la aparición del hormigón armado en cada rincón del planeta. Una revolución cuya base geológica muchas veces pasa desapercibida, la industria del hormigón armado tal cual la conocemos no hubiera sido posible sin la expansión simultánea de los combustibles fósiles (Aretxabala, A. 2016).

Recordemos también que la contracción de la población de hasta un 50% con la primera irrupción pandémica supuso la ralentización y el abandono durante periodos de tiempo de décadas (e incluso de siglos en algunas zonas) de los ritmos de la actividad constructiva, que bien fue abandonada directamente por el miedo de cada episodio pandémico o simplemente los trabajadores murieron sin terminar las construcciones que décadas después se retomaban o se demolían. Lo sucedido a partir de la segunda mitad del siglo XX es completamente distinto, la actividad constructiva se retomó desde concepciones absolutamente novedosas, especialmente después de 1985 y hasta 2008. La sociedad, a finales de los años setenta del siglo XX, ya recurría a la geotecnia de la misma manera que a las normas urbanísticas o las primeras sismorresistentes de 1968 y 1974 como una necesidad. Poco a poco fue tomando carácter normativo y pudo ponerse en práctica con los grandes crecimientos de las promociones de viviendas en los años ochenta y noventa de siglo XX.

En el año 2000, el Colegio de Arquitectos Vasco Navarro (COAVN) organizó en Pamplona un seminario sobre geotecnia en Navarra, dando especial importancia a todos los problemas de definición de perfiles geotécnicos congruentes con el conocimiento de la geología y las normas de construcción, incluida la entonces vigente norma sísmica NCSE-94 y las NTE-CEG para la realización de estudios geotécnicos, además de otras normativas entonces de obligado cumplimiento. Entonces presentamos por primera vez la propuesta de una microzonación geotécnica basada en perfiles sencillos de carácter geomorfológico y geotécnico adecuados a la construcción, edificación, infraestructuras, etc., enfocados a la obra pública en general y a todo el sector. Se trataba de un grupo de perfiles estratigráficos acordes con la geología de Pamplona (más tarde se hizo para Tudela, Tafalla, Estella, etc.). Era un pronóstico por áreas cartografiadas e indicaciones de parámetros que la experiencia nos indicaba como importantes a la hora de planificar estrategias de estudios. Nos encontramos que, a veces, estas estrategias eran francamente ineficientes. Otras, una suerte de copia y pega de obras previas, muchas veces fácilmente trazables por algún pequeño detalle que se transmitía constantemente a través de aquel artilugio llamado fax. Ocasionalmente eran abusivas, simplemente desproporcionadas o basadas en prospecciones y estudios geotécnicos que habitualmente no eran lo más adecuado para cada tipo de terreno.

En 2006 se publica el Código Técnico de la Edificación (CTE) donde aparecen tres tipos de terreno desde el punto de vista geotécnico (T1, T2 y T3) que pueden ser más o menos acordes con los tipos I, II, III y IV de la norma sismorresistente española NCSE-02 de 2002.

Para entonces ya se habían integrado los perfiles geotécnicos locales difundidos por el COAVN con los del CTE, la NCSE-02 y las publicaciones geotécnicas del Gobierno de Navarra. En ese tiempo se mantuvieron conversaciones con el Departamento de Geología del Gobierno de Navarra y se avanzó en una integración que hoy está en proceso de digitalización.

Los antecedentes inmediatos de clasificación geotécnica para los sectores de la obra pública se realizaron en el año 1988 bajo la denominación de *"Mapa Geotécnico para la Ordenación Territorial y Urbana de Pamplona"* con un acuerdo marco entre el IGME y la Diputación Foral de Navarra. Así nació el primer mapa geotécnico para la ordenación territorial y urbana del área metropolitana.

En esa época se hicieron otros similares para ciudades como Vigo, Gijón, Valladolid y poblaciones españolas que acordaron realizar este tipo de cartografías y diagnósticos geotécnicos.

En 2002, el de Pamplona se actualizó con nuevos trabajos de campo y laboratorio y con la edición del Mapa Geotécnico del área de Pamplona como una iniciativa exclusiva del Departamento de Obras Públicas, Transportes y Comunicaciones del Gobierno de Navarra; se justificó por la utilidad que había supuesto el primero de 1988 cuyas ediciones se habían agotado en plena efervescencia constructiva y porque en ese momento ya existía, o se estaba finalizando, una nueva base geológica a escala 1:25.000 de toda la Comunidad Foral y del entorno de Pamplona y su comarca.

Ello determinó la actualización del *Mapa Geotécnico* de acuerdo con la actualización del conocimiento geológico en ese momento y, sobre todo, su adaptación a los programas informáticos y bases de datos utilizados por el propio Gobierno de Navarra y todos los usuarios con acceso a las versiones digitales y en línea. Desde entonces se actualizan los datos y mapas constantemente.

Entonces, a las Margas de Pamplona se les adjudicó en la cartografía y en sus características la llamada Zona II2 que se correspondía con las unidades geológicas T4 y T6: conjuntamente las formaciones Margas de Pamplona y Margas de Ilundáin, cuya agrupación a efectos geotécnicos se estableció por la *"más que evidente similitud litológica"* (*Mapa Geotécnico para la Ordenación Territorial y Urbana de Pamplona*, 2002, página 69) entre ambas formaciones. Así, su separación en las llamadas Subzonas sólo requirió aplicar el criterio de las pendientes: Subzonas II21, II22 y II23, correspondientes a pendientes menores del 6%, entre el 6% y el 30%, y mayores del 30%, respectivamente.

En 2006 irrumpe en el sector el Código Técnico de la Edificación (CTE) que sigue su evolución con actualizaciones constantes; supone la introducción de la mayor densidad de normas y procedimientos acordes con una nueva visión de la habitabilidad basadas en la filosofía de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) de 1999; ésta respondía a la necesidad de actualizar todo el conjunto de normas que heredaba de la Ley de Vivienda de 1957, pero también de completar una regulación que hasta 1999 había sido bastante dispersa y poco específica.

La actualización fue especialmente necesaria cuando la edificación se convirtió en uno de los principales sectores económicos con repercusiones en el conjunto de la sociedad española y navarra y con todos los valores culturales que entrañaba el patrimonio arquitectónico a rehabilitar en el segundo país del planeta con más lugares Patrimonio de la Humanidad (UNESCO). Además aquí se convive con una (prácticamente incontable) herencia arquitectónica con la que no siempre se acertó en esos años de tránsito a la hora de ubicarla en los nuevos contextos urbanos o de exigencias de servicio, tal y como hemos visto en algunos casos estudiados en la segunda parte.

Se pudo experimentar cómo generalmente es el suelo, un recurso que se va a valorar como *"escaso y no renovable"* en la Ley 8/2007 el que genera una mayor parte de las patologías con grandes pérdidas económicas como las que hemos estudiado, especialmente cuando su conocimiento no es el adecuado, tratándose en muchos casos de perjuicios irreversibles o muy costosos de reparar[10].

---

[10] Normalmente los costos de cimentación suponen entre un 10% y un 20% del total de la obra dependiendo de la tipología de construcción, cimentación, terreno, etc. Sin embargo, en el caso de las patologías asociadas a defectos geotécnicos o de desconocimiento de las características peculiares de un terreno, pueden suponer costes del 40% a más del 100% del proyecto. En Navarra, por ejemplo, en obras que involucraron a las Margas de Pamplona hay casos conocidos por encima del 200%. El caso del recrecimiento de Yesa, cuyo plazo inicial de entrega era 2006 saltó a la actualidad geotécnica con el toque de atención dado casi una década después (en 2018) por el Tribunal de Cuentas del Estado. Es paradigmático al haberse acercado al 400% por problemas de índole geológica, siendo el Tribunal de Cuentas una entidad cuyo carácter nada tiene que ver con la geotecnia o el medio ambiente. Ese año el tribunal lo achacaba a *"la existencia de defectos o carencias en los proyectos iniciales, la falta de previsión […] tras haberse constatado riesgos de deslizamientos en las laderas del embalse, así como dificultades en su impermeabilización, lo que dio lugar a una sucesión de tres modificaciones contractuales -la tercera de las cuales con la necesidad aparejada de solicitar nuevos informes de impacto ambiental-, las obras y sus contratos asociados, han debido prolongarse, al menos, hasta el mes de octubre de 2020"*. Las obras actualmente (2024) están paradas esperando un cuarto modificado de 2016 y continuarán al menos hasta 2027 según las últimas estimaciones de la expresidenta de la Confederación Hidrográfica del Ebro en declaraciones en octubre de 2023. Los padres de la geotecnia como Terzaghi o Hoek, han insistido siempre en su legado que las actuaciones más eficientes son la revisión de la información geológico-geotécnica preexistente y, en segundo término, los reconocimientos geológicos adecuados en el campo. Este proceder lo hereda el CTE en su punto 3.2.1 Programación: *"Para la programación del reconocimiento del terreno se deben tener en cuenta todos los datos relevantes de la parcela, tanto los topográficos o urbanísticos y generales del edificio, como los datos previos de reconocimientos y estudios de la misma parcela o parcelas limítrofes si existen, y los generales de la zona realizados en la fase de planeamiento o urbanización"*. Por su parte, autores como González de Vallejo (2004), Fookes (1997) De Freitas (1992) han relacionado el coste con el beneficio, comprobando que, el coste más bajo que genera un muy alto beneficio geotécnico es la revisión de la información previa. Después del análisis de la información, la actuación más eficiente es la inspección del terreno (o reconocimientos de campo). Esta actividad posee un coste bajo a medio plazo con un beneficio muy alto.

Cuando España afrontó la redacción de la LOE se planteó como objetivo principal el responder a las innumerables demandas de la sociedad española, cada vez más preocupada no sólo por los estándares de calidad de las nuevas edificaciones e infraestructuras, también la seguridad, el bienestar, la energía y la protección del patrimonio y del medio ambiente fueron aspectos asimismo de primera línea.

El Código Técnico de la Edificación vino a plasmar en especificaciones concretas los objetivos de la LOE y a traducir al lenguaje técnico aquellas aspiraciones. Casi de manera simultánea las Cortes Generales aprobaron en 2007 la Ley del Suelo (Ley 8/2007, de 28 de mayo) en donde se considera al material (o materiales) que sustentan todo lo comentado como recursos naturales escasos y no renovables y se apuesta por un desarrollo territorial y urbano que contemple la sostenibilidad.

Entre otras previsiones, la citada ley establece que los desarrollos urbanísticos deben someterse a una evaluación ambiental previa y a un informe de sostenibilidad en el que deberán incluirse mapas de riesgos naturales del ámbito objeto de la ordenación: Artículo 2.15.

El valor que adquirió entonces la actualización del Mapa Geotécnico de Pamplona supuso una nueva dimensión con la extensión de su utilización en espacios relacionados con la prevención, con el cuidado del patrimonio, del medio ambiente y un urbanismo con un nuevo carácter profundamente geológico que se amplió a toda Navarra.

La obligatoriedad de incluir estos mapas de riesgos geológicos en los instrumentos de ordenación de las actuaciones de urbanización fue una novedad en nuestro ordenamiento jurídico y sectorial que aún no se ha desarrollado completamente, pero ya está dando buenos resultados al profundizar en el nexo de unión entre la prevención de riesgos naturales, con el cuidado del medio natural, el histórico y la planificación territorial, urbana y constructiva.

Desafortunadamente llegó en un momento bastante complicado, fue justo cuando la actividad sectorial sufrió el batacazo de 2008, cayendo la actividad hasta valores por debajo de los años 80 del siglo XX, pero entonces, tal y como vimos en Sarriguren, ya se presentaban estudios locales con zonaciones geotécnicas para la distribución de infraestructuras y áreas residenciales de nueva construcción.

Aunque la inercia no se extendió como hubiera sido deseable para los profesionales de la geotecnia y para todo el sector, la caída de la actividad sectorial lastró un mayor perfeccionamiento y una optimización en este proceder. Ello supuso un frenazo en el desarrollo de la investigación geotécnica local que, de la mano del sector de la construcción, podría haberse optimizado a través de la investigación y de la creación de procedimientos locales de la actividad geotécnica. Pero poco o nada se hizo en este ámbito. El sector ya se había diseñado para la maximización de beneficios.

Los mapas geológicos y geotécnicos fueron una de las herramientas más útiles para el sector al integrar en códigos cartografiados buena parte de los procedimientos basados en experiencias previas, como también buena parte de la tradición geotécnica que se desarrolló en cada área durante la historia, especialmente en los siglos XX y lo poco, pero intenso, que se recorrió en el XXI. No obstante, las recomendaciones constructivas, muy generales, tales como la excavabilidad, la estabilidad de las excavaciones, las presiones admisibles, etc., estaban más enfocadas a un crecimiento de las ciudades con nueva edificación y nuevos barrios, incluso nuevas urbes, como vimos en el caso extremo de Sarriguren que pasó de 5 habitantes a más de 15.000 en menos de una década. Sin embargo, para las tecnologías e itinerarios de adecuación de las edificaciones históricas, a pesar de haber sido utilizados en los gabinetes de ingeniería y arquitectura, ni los mapas geotécnicos, ni los propios estudios dedicados, pudieron evitar perjuicios y desavenencias como las que hemos visto en Noáin o en la Audiencia Territorial, hoy Parlamento. En el trasfondo siempre aparece alguna manera inadecuada de trato a los materiales geológicos involucrados. Quizás por eso surge la necesidad de conocer esos materiales con más profundidad a la luz de sus propias reacciones ante procesos de cambio en las infraestructuras y edificaciones sabiendo dónde están.

4.3. Propuesta de perfiles adecuados al Código Técnico de la Edificación (CTE).

La ciudad de Pamplona y sus alrededores presentan fundamentalmente dos perfiles geotécnicos naturales principales, uno formado por terrazas, altas, medias o bajas, que descansan sobre las Margas de Pamplona conformando un corte al que denominaremos tipo Pamplona, con ese nivel de terrazas anunciando las Margas de Pamplona. Y, en segundo lugar, un corte sin terraza o perfil eoceno, exterior, periférico en que directamente afloran las Margas de Pamplona con diferentes grados de alteración en profundidad. Existiría un tercer perfil estructural que será incluido aparte.

Los perfiles de terrazas bajas como los que encontramos en Arazuri, San Jorge, Rochapea, Ansoáin, Chantrea, Burlada, Villava, etc., configurarían un corte geotécnico similar al tipo Pamplona y ha venido siendo tratado prácticamente igual desde el punto de vista constructivo. Existe una excepción limitante para la construcción en un perfil tipo Pamplona de terraza baja, pero no es de carácter geotécnico, sino hidrológico. Ha supuesto históricamente una notable limitación constructiva en las zonas cercanas a los cursos fluviales, en las llanuras de inundación, sobre todo del río Arga, con antiguas huertas ligadas a ellas, etc. Son lugares donde históricamente se solía evitar construir edificaciones importantes. Sin embargo, sí se ha hecho en las últimas décadas. El tratamiento geotécnico ha venido siendo el mismo que en las terrazas altas y medias, pero las consecuencias, como las vividas en las inundaciones de 2003, de junio de 2013, febrero de 2015 o diciembre de 2021, llevaron a ciertos barrios de algunos municipios erigidos sobre este perfil a pedir la declaración de zonas catastróficas e incluso recientemente, a pedir la retirada estratégica.

Por lo tanto, dividiremos las zonaciones de estas tres familias en cuatro tipos fundamentales:

- Perfil E (Exterior): acceso directo a las Margas de Pamplona con diferentes grados de alteración. Geotécnicamente representa el mayor grado de urbanización de las tres últimas décadas con el desarrollo de los nuevos barrios como en Arre, Cizur, Erripagaña, Ansoáin, Nuevo Artica, Mendillorri, Mutilva, Soto Lezkairu, Sarriguren, Gorraiz, etc. Es importante destacar que, en general, los perfiles de alteración para cimentar sobre la formación biarritziense rara vez sobrepasan los 3 m y que debido a las obras de las últimas décadas es cada vez más habitual encontrar rellenos esporádicos de margas y gravas, o ambas mezcladas, provenientes de otras obras recientes que igualmente, rara vez sobrepasan 3 m.
- Perfil P1 (Pamplona-1): con terrazas rojizas de gravas en matriz limo arcillosa que pueden variar de unos decímetros hasta unos 6 m.
- Perfil P2 (Pamplona-2): con terrazas medias-bajas de color terroso parduzco formadas por gravas con arenas y arcillas que a veces sobrepasan los 6 m.
- Perfil C (Circundante): de marcado carácter estructural con intercalaciones de calcarenitas, areniscas, margocalizas en diferentes disposiciones estructurales.

Estos perfiles meramente geotécnicos estarían subdivididos además en el caso del perfil exterior en E1 con menos de 3 m de espesor de roca alterada IV a VI o en su caso por rellenos de origen antrópico, coluviones o glacis y E2 con más de 3 m de espesor.

En el caso de los perfiles P1 haremos una subdivisión en dos grupos, P11: gravas altas con menos de 3 m de espesor y P12: gravas altas con más de 3 m de espesor sobre las Margas de Pamplona.

Para P2 seguiremos el mismo criterio: P21 para terrazas de menos de 3 m de espesor y P22 en caso de encontrar alguna zona con más de 3 m.

Por lo tanto, tendríamos siete perfiles geotécnicos en prácticamente toda el área metropolitana de Pamplona: E1, E2, P11, P12, P21, P22 y C.

Existen una serie de formaciones esporádicas que abarcan superficies pequeñas o se encuentran en lugares que difícilmente vayan a ser densamente urbanizados, tales como laderas muy acentuadas o como las calizas tableadas y las arcillas y yesos que afloran entre Orcoyen y Loza al NO de Pamplona, los glacis o rellenos antrópicos. Hemos incluido algunas formaciones relativamente importantes de glacis y coluviones que abarcan sobre todo pendientes acusadas también en zonas circundantes. Sin embargo, será el estudio geotécnico de cada proyecto el que defina los perfiles adecuados al tipo de obra, tamaño, necesidades constructivas, aprovechamiento de materiales, etc.

4.3.1. Código Técnico de la Edificación (CTE) y geotecnia.

A la hora de realizar un estudio geotécnico en el área metropolitana de Pamplona y a efectos del reconocimiento del terreno aplicado a todo el Estado, la unidad a considerar según el CTE, es el edificio o el conjunto de edificios de una misma promoción. Así clasifica la construcción y el terreno según las tablas 3.1 y 3.2 del *Documento Básico SE-C Cimientos*, en su capítulo 3. El CTE nos define cada tipología de construcción que divide en cinco clases:

C-0: Construcciones de menos de 4 plantas y superficie construida inferior a 300 m².
C-1: Otras construcciones de menos de 4 plantas.
C-2: Construcciones entre 4 y 10 plantas.
C-3: Construcciones entre 11 a 20 plantas.
C-4: Conjuntos monumentales o singulares, o de más de 20 plantas.

Y el grupo de terreno que divide en tres clases:

T-1: Terrenos favorables: aquellos con poca variabilidad, y en los que la práctica habitual en la zona es de cimentación directa mediante elementos aislados.
T-2: Terrenos intermedios: los que presentan variabilidad, o que en la zona no siempre se recurre a la misma solución de cimentación, o en los que se puede suponer que tienen rellenos antrópicos de cierta relevancia, aunque probablemente no superen los 3,0 m.
T-3: Terrenos desfavorables: los que no pueden clasificarse en ninguno de los tipos anteriores. De forma especial se considerarán en este grupo los siguientes terrenos:

a) Suelos expansivos
b) Suelos colapsables
c) Suelos blandos o sueltos
d) Terrenos kársticos en yesos o calizas
e) Terrenos variables en cuanto a composición y estado
f) Rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m
g) Terrenos en zonas susceptibles de sufrir deslizamientos
h) Rocas volcánicas en coladas delgadas o con cavidades
i) Terrenos con desnivel superior a 15º
j) Suelos residuales
k) Terrenos de marismas

Los terrenos E1 se han clasificado como de tipo T1 y el resto T2, siendo difícil encontrar terrenos naturales del tipo T3 en el área metropolitana de Pamplona, aunque sí destacan los del tipo f: rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m que proliferaron en las tres últimas décadas en áreas con fuertes tasas de urbanización como sucedió en Cizur, Mendillorri, Gorraiz, Sarriguren, Mutilva, etc., como resultado de la creación de escombreras y rellenos incontrolados provenientes de excavaciones, sobre todo para los sótanos de los nuevos barrios periféricos.

Es de destacar que se han clasificado como T3 algunas zonas periféricas con cierta susceptibilidad a sufrir deslizamientos (tipo g) o con desniveles superiores a 15º (tipo i). Los problemas de hinchamiento y retracción, si bien han sido evitados desde mediados de los años 90 del siglo XX tras nuestras publicaciones, seminarios, etc., provocaron problemas puntuales, sobre todo de carácter estético sin prácticamente impacto estructural que no sea el visto en monumentos como la Iglesia de Noain, no los clasificaremos como T3, estarían ligados perfiles del tipo Exterior E2.

También es verdad que no hay suelos colapsables en la Cuenca de Pamplona, si bien algunos apoyos sobre rellenos sometidos a fuertes vibraciones dieron lugar a colapsos por el impulso de fuerzas exógenas, tampoco consideraremos tales fenómenos como intrínsecos a la zona. El CTE da indicaciones concretas para la realización de estudios geotécnicos, con carácter general, nos indica que el mínimo de puntos a reconocer en cada parcela será de tres. En la tabla 3.3 del capítulo 3 del citado documento se recogen las distancias máximas entre puntos de reconocimiento que no se deben sobrepasar, así como las profundidades orientativas P bajo el nivel final de la excavación.

La profundidad del reconocimiento en cada caso se fijará teniendo en cuenta el resto del articulado del capítulo 3 del CTE y el corte geotécnico del terreno. Todos los puntos de reconocimiento, en planimetría y altimetría, deben quedar reflejados en un plano, referidos a puntos fijos claramente reconocibles del entorno, o en su defecto a coordenadas UTM. Esas distancias máximas entre puntos de reconocimiento y profundidades orientativas son las que se pueden ver en la tabla XVIII.

En el caso de que las distancias máximas excedan las dimensiones de la superficie a reconocer, deben disminuirse hasta que se cumpla con el número de puntos mínimos requeridos (CTE 3.6). A partir de los datos recogidos en campo y en laboratorio, se estimará la capacidad portante del terreno, así como la cota de cimentación más idónea que reciba las cargas del edificio y ciertas medidas y disposiciones geomecánicas para excavaciones y métodos constructivos de acuerdo al tipo de construcción (tabla XIX). La clasificación para un estudio típico en un edificio del tipo C-1 en el área metropolitana de Pamplona en algún lugar con un perfil E1 (un terreno T-1 según el documento), cumpliendo el CTE puede ajustarse a lo mostrado la tabla XIX para un edificio de menos de 4 plantas (contando los sótanos) y unos 650 m² de dimensión en planta.

Tabla XVIII

Tipo de construcción	**Terreno tipo T1 (E1)**		**Terreno tipo T2 (E2, P11, P12, P21 y P22)**	
	Distancia máxima (m)	Profundidad orientativa (m)	Distancia máxima (m)	Profundidad orientativa (m)
C0, C1	35	6	30	18
C2	30	12	25	25
C3	25	14	20	30
C4	20	16	17	35

Tabla XIX

Tipo de construcción	C-1 (Otras construcciones de menos de 4 plantas)
Dimensión en planta	650 m²
Grupo de terreno	T-1 (Terrenos favorables: aquellos con poca variabilidad, y en los que la práctica habitual en la zona es de cimentación directa mediante elementos aislados)
Distancia máxima entre puntos de reconocimiento	30 m
Número de sondeos	2
Porcentaje de sustitución de pruebas de penetración por sondeos	No cabe sustitución. Se trata de un terreno tipo T1 y un edificio C1, la exigencia mínima en cuanto a la ejecución de sondeos es 2
Prospecciones a realizar	2 sondeos, 4 ensayos de penetración dinámica DPSH

Los objetivos fundamentales perseguidos bajo ese documento son los de conocer las características tensodeformacionales y fisicoquímicas de los terrenos que yacen bajo el solar de cualquier parcela involucrada, dando por sentado que a través de los mapas geotécnicos para ordenación territorial y urbana somos capaces de:

1) Dividir el subsuelo estudiado en las diferentes prospecciones (6 en el ejemplo de arriba) en grupos de conducta análoga.
2) Proporcionar una buena base de entendimiento de las características del subsuelo de la zona para todas las personas en la cadena de transmisión técnica, desde la que hace los ensayos de campo, la que proyecta un determinado elemento, hasta el constructor.
3) Facilitar la planificación y el diseño de estructuras en suelo y roca, proporcionando datos cuantitativos y cualitativos necesarios para la solución real de los problemas de ingeniería.
4) Proporcionar una base común para la comunicación efectiva entre todas las personas que trabajen en un determinado aspecto geotécnico de las estructuras que se establezcan o se vayan a someter a nuevas solicitaciones.

El enfoque global que se busca así es el de facilitar las labores de diseño y disposición de las futuras cimentaciones o las existentes que se sometan a un cambio en las cargas, contenciones, drenajes, obras de excavación, etc.

4.3.2. Los terrenos en la NCSE-02.

La Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 tiene como objeto proporcionar criterios sencillos para la consideración de la acción sísmica en un proyecto, construcción, restauración o conservación de edificios, así como en su reforma o rehabilitación. Una parte importante del diseño y cálculo de cimentaciones y estructuras consiste en la modelización de la acción sísmica que dependerá del método de cálculo a adoptar y del tipo de terreno. La norma distingue cuatro tipos de terreno:

Terreno tipo I

Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $v_S > 750$ m/s.

Terreno tipo II

Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $750 \text{ m/s} \geq v_S > 400$ m/s.

Terreno tipo III

Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $400 \text{ m/s} \geq v_S > 200$ m/s.

Terreno tipo IV

Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $v_S \leq 200$ m/s.

En 2012 se hizo una campaña geofísica con un buen número de perfiles y datos de velocidad de las ondas P en varias áreas, incluyendo la formación de Margas de Pamplona para el *Estudio informativo de la red ferroviaria en la Comarca de Pamplona. Fase B. E. 1:2.000* de la Secretaría General de Infraestructuras. Ministerio de Transportes y Movilidad Urbana.

Las ondas P generalmente viajan a una velocidad 1,73 veces la de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material. De aquel estudio del Ministerio de Transportes tenemos tres perfiles que podemos ver en la siguiente figura 4.1 con valores hasta unos 50 m de profundidad sin la cobertura cuaternaria, se trataría de todo el perfil del macizo de Margas de Pamplona.

Vemos que, si las ondas S viajan a una velocidad media del 58% de la de las ondas P, podríamos considerar terrenos III y IV prácticamente los primeros metros, siendo el paso gradual, no neto. En este caso coincidiría con el perfil E2 de nuestra propuesta.

Cada proyecto geotécnico podrá y deberá estudiar su caso particular por medios geotécnicos convencionales como los indicados en el CTE.

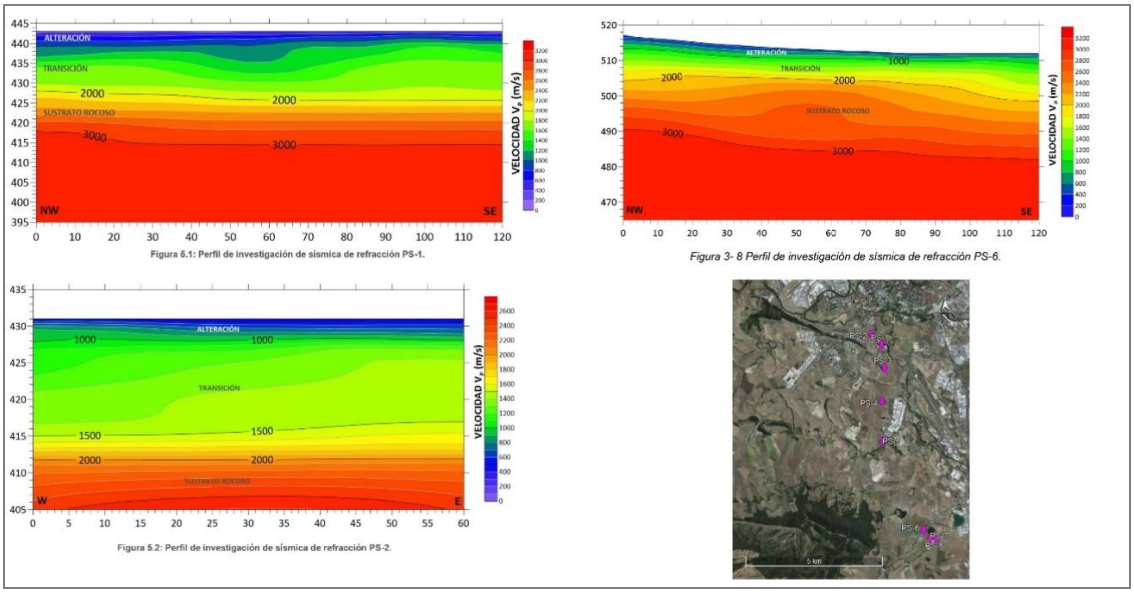


Figura 4.01. Valores de Vp (m/s) de tres perfiles situados al sur de Pamplona en las Margas de Pamplona sin cobertera cuaternaria. Se trataría del perfil geotécnico E2 descrito en nuestra propuesta. Los datos geofísicos están extraídos del *Estudio informativo de la red ferroviaria en la Comarca de Pamplona. Fase B. E. 1:2.000* de la Secretaría General de Infraestructuras. Ministerio de Transportes y Movilidad Urbana, 2012.

A continuación, presentamos una microzonación geotécnica adecuada a la evolución geomorfológica de las Margas de Pamplona con los siete perfiles definidos para el área de Pamplona. El primer mapa (figura 4.2) está basado en la litología y la evolución geomorfológica del área metropolitana. El segundo mapa es el mismo (figura 4.3), presenta los siete perfiles geotécnicos como pronóstico para la elaboración del proyecto de construcción.

4.4. Microzonación geotécnica

4.4.1. Microzonación geotécnica, litológica y geomorfológica

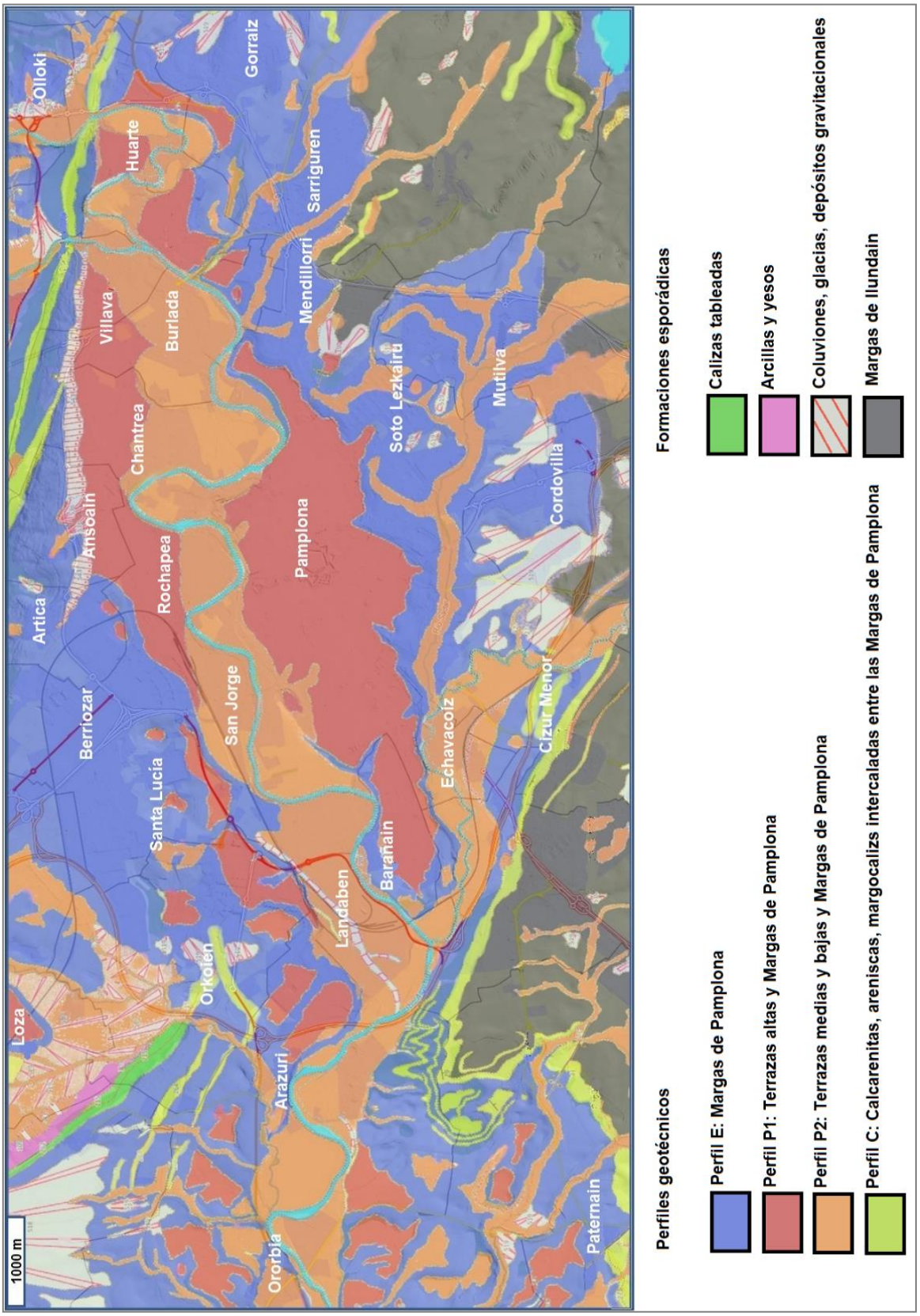


Figura 4.02. Litología y evolución geomorfológica del área metropolitana de Pamplona.

4.4.2. Microzonación geotécnica, perfiles geotécnicos

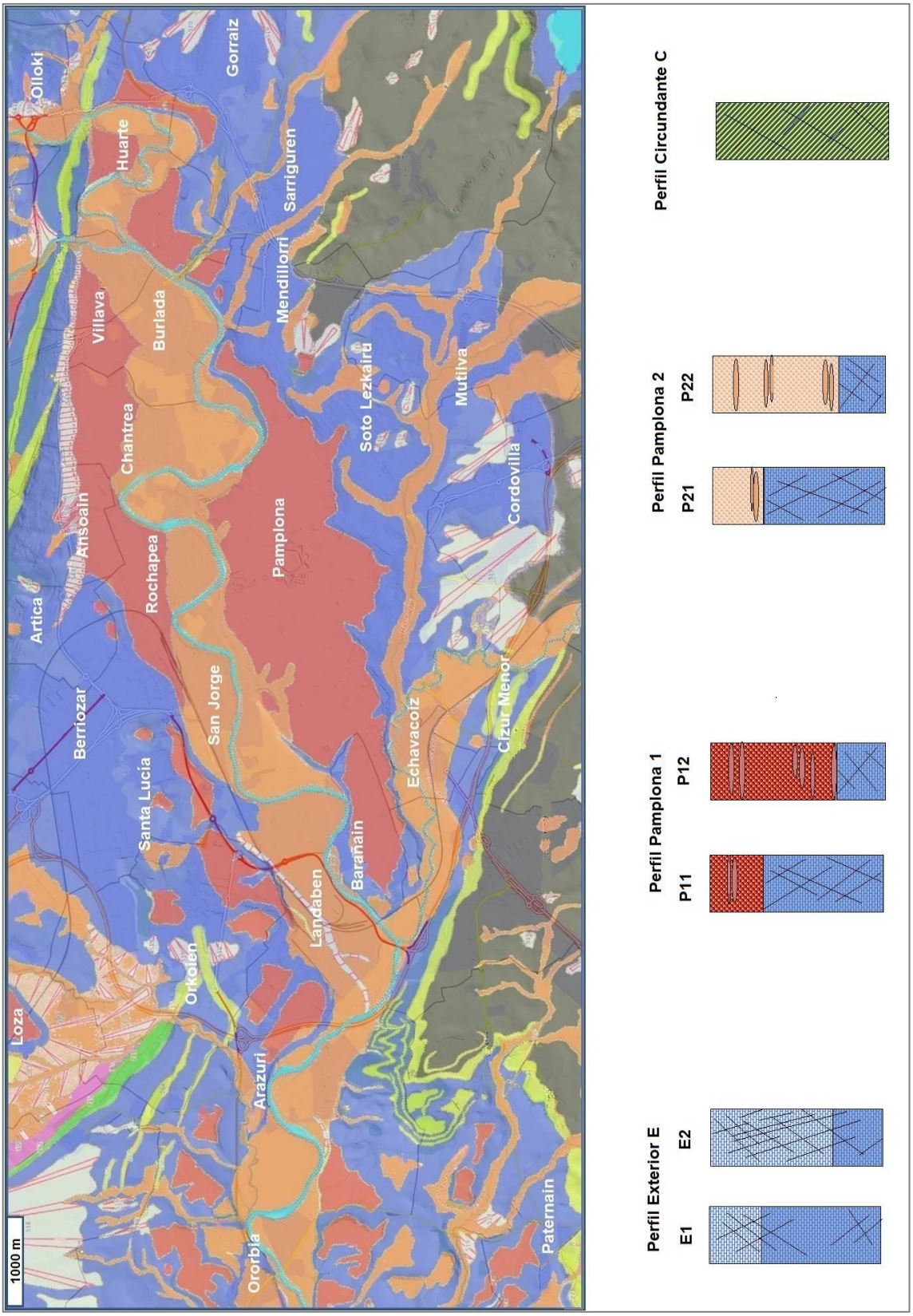


Figura 4.03. Siete perfiles geotécnicos. Pronóstico para la elaboración del proyecto geotécnico.

PARTE 5

INESTABILIDADES GEOTÉCNICAS

5.1. Fenómenos de inestabilidad en los márgenes de la formación de Margas de Pamplona.

Los fenómenos de inestabilidad de laderas son relativamente poco frecuentes en los terrenos que involucran a la formación eocena de Margas de Pamplona. Comparada con otras áreas cercanas como Guipúzcoa, con un 95% de superficie con pendientes por encima del 15% o Vizcaya, con un 90%. La Navarra central sería similar a Álava, donde no se sobrepasa el 50%. La generación de pendientes acusadas es un fenómeno multifuncional y necesita como proceso gravitacional que es, no sólo que una serie de parámetros se encuentren en un cierto rango de valores para que las fuerzas de sostenimiento sean igualadas por las de desprendimiento, es necesaria una pendiente acusada, pero, sobre todo, en el caso de nuestra formación, una predisposición estructural y litológica que se da habitualmente en los márgenes. En algunos casos, como los estudiados en monumentos con varios siglos de edad, la reptación de la parte superficial del suelo, especialmente en los perfiles E1 y E2 sería uno de los factores más importantes a tener en cuenta.

Figura 5.01. Tratamiento de un talud con bulonado que, como se puede observar, con el tiempo se vuelve poco o nada efectivo. Es la A-138 a la altura de Coscojuela de Sobrarbe (PK 39) en la parte basal de margas con niveles arenosos del Luteciense en la vecina provincia de Huesca. Es muy raro ver algo así en las Margas de Pamplona.

Generalmente, los taludes naturales son siempre estables, únicamente presentan el problema de la alteración de las margas que progresivamente van deteriorando el talud, observándose abundantes acarcavamientos (ver figura 5.02). Los taludes artificiales en las margas alteradas producirán flujos de barro y deslizamientos, mientras que los que se efectúen en margas sanas presentarán con el tiempo un deterioro progresivo, asimismo la existencia de cuñas desprendidas es uno de los fenómenos repentinos que puntualmente han tenido consecuencias accidentales en obras de excavación, tanto para infraestructuras como para edificación.

Normalmente estables, los taludes urbanos muy ocasionalmente pueden presentar problemas de inestabilidad. Es debido sobre todo a la presencia de niveles margosos muy alterados de menor competencia que el resto, provocando caídas de material. También es de destacar la observación ya adelantada: los mayores problemas de estabilidad, tanto con intervención humana como, por ejemplo, por erosión fluvial o ambas, se dan en los márgenes de la formación e involucran siempre a los materiales de muro o techo de la Formación de Margas de Pamplona formados por alternancias de areniscas, margas, margocalizas, calcarenitas, Flysch, etc. Estos materiales por sí mismos no generan inestabilidades, sino que es necesaria una predisposición estructural que favorezca roturas de laderas. Con ello nos referimos a una distribución geométrica, orientación, dirección, buzamiento, que faciliten el movimiento impulsado por la gravedad y que, por una actuación humana en favor de la inestabilidad, éste se dispare y produzca la rotura. Este es el fenómeno que vamos a investigar, pues es el factor común a deslizamientos locales de pequeña entidad, deslizamientos recurrentes o históricos de mediana entidad y grandes deslizamientos.

Figura 5.02. Talud de excavación en Soto Lezkairu (sur de Pamplona), una zona recientemente urbanizada contigua a la Universidad Pública de Navarra. Las cárcavas y depósitos a pie de talud muestran la práctica imposibilidad de revegetación de taludes en Margas de Pamplona con inclinaciones por encima de 20º.

A continuación, vamos a exponer tres casos, uno local de pequeña entidad con menos de 500 m^3 de material removido en Cemboráin. Un segundo análisis se va a centrar en un deslizamiento de tamaño medio, recurrente e histórico, con unos 75.000 m^3 (150 veces más) que en condiciones desfavorables se reactiva cada cierto tiempo y, a veces, necesita de grandes intervenciones, como sucedió en 1992 y en 2013. Se trata del deslizamiento latente de Arre. Finamente, analizaremos un gran deslizamiento (o mejor, deslizamientos) que vienen dando problemas desde hace décadas en la ladera derecha del embalse de Yesa. Son unos 11.900.000 m^3 (24.000 veces más) que sigue en movimiento extremadamente lento con aceleraciones repentinas muy vinculadas al clima.

5.2. El caso de Cemboráin.

El caso de Cemboráin es notablemente representativo. Se trata de un ejemplo muy didáctico de cómo todo un conjunto de circunstancias, comenzando por subestimar la disposición estructural de los materiales geológicos, pueden darse cita para provocar un accidente que, afortunadamente, solo fue material. Lo sucedido en Cemboráin es fácil de desgranar, se trata de una desestabilización pequeña pero llamativa, de fácil solución, con una trazabilidad bastante sencilla y menos compleja que los casos más voluminosos que vamos a ver en Arre y Yesa. Por eso lo hemos elegido.

Ficha técnica:

Desprendimiento de unos 500 m³ en terrenos del tipo C sin daños personales. Colapso de unidades recién ejecutadas. Afección a viviendas en construcción por desplome de un muro antiguo y parte de otro moderno y colapso parcial de una pequeña edificación para corral y aperos de labranza.

5.2.1. Cronología y fenómenos observados.

Con el inicio de enero de 2006, en un solar de Cemboráin, localidad situada a unos 15 km de Pamplona en dirección SE, se produjo la rotura de un muro de contención de altura variable entre 2 y 3 m con caída de una parte del talud al que debía contener; la caída —según decían los vecinos y testigos con los que pudimos conversar—, debió suceder entre la noche del día 31 de diciembre de 2005 y el primero de año de 2006. La masa removida fue menor de unos 500 m³.

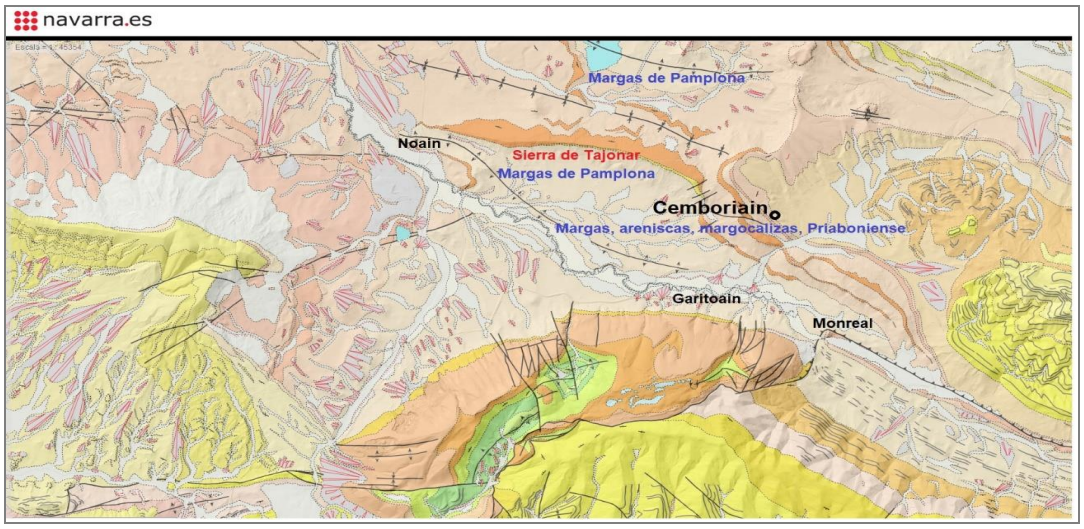


Figura 5.03. Situación de Cemboráin en los márgenes de la formación de Margas de Pamplona entre margas, areniscas y margocalizas del Priaboniense con inclinaciones hacia el sur de 40º- 45º.

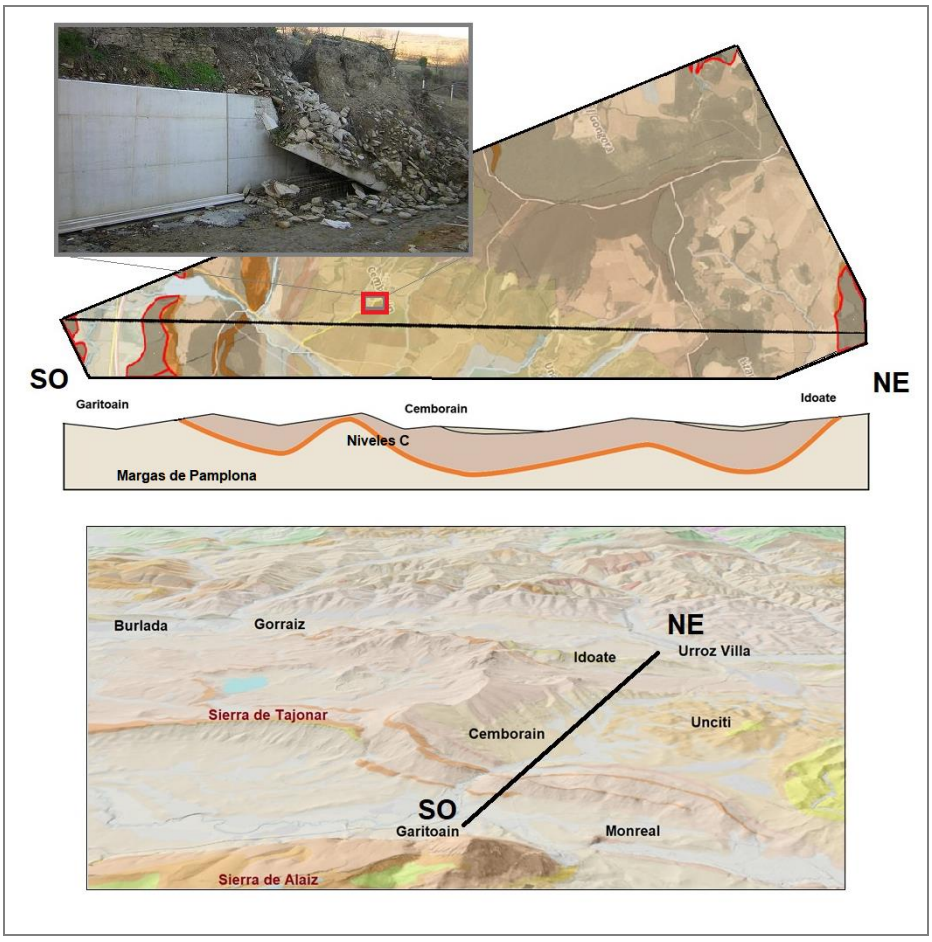


Figura 5.04. Parte del deslizamiento del terreno de Cemboráin fue capaz de romper el muro de hormigón armado que se construyó después de la excavación para urbanizar el área. Situación de Cemboráin con respecto al desaparecido Garítoain a 10 km al SO de Urroz en el área sismogénica de Lizoain-Urroz al NE.

Solo hubo daños menores en un corral de la zona alta (las gallinas salieron al exterior al caer la pared sur) y parte de la estructura de dos viviendas que estaban aún en construcción bajo el talud (ver figura 5.04). Las inspecciones de campo, las investigaciones de monitoreo sísmico de las redes del IGN y Renass-France, así como el relato de los testigos nos llevaron a considerar las siguientes 6 observaciones, las cuales fueron fundamentales para comprender el proceso por el que se produjo la caída del muro aquella madrugada:

1. El colapso de parte de la estructura de contención se produjo durante la madrugada del día 31 de diciembre de 2005 al 1 de enero de 2006, según la información de las personas que vieron esa parte del muro caída. No hay testigos que observasen directamente el transcurso del deslizamiento o colapso: si fue de golpe, si se realizó en varios episodios, si lento, si rápido, etc. Los trabajadores de la obra adyacente lo encontraron ya caído cuando se incorporaron después de las fiestas de fin de año y año nuevo.

2. Hubo cuatro episodios de lluvias entre noviembre y diciembre. Durante esos dos meses la estación meteorológica de Monreal del Gobierno de Navarra recogió 211,7 l/m². Los días previos al desplome fueron muy fríos, las temperaturas alcanzaron hasta más de siete grados bajo cero, hubo varios días con máximas por debajo de 0ºC tras los tres periodos de lluvias importantes (el cuarto comienza el día 29 de diciembre con un aumento notable de las temperaturas). La congelación del agua del terreno más superficial, como sucedió en toda el área circundante es un detalle a tener en cuenta: charcos congelados, zonas de umbría con hielo durante días, etc.

3. El día 29 de diciembre subieron las temperaturas hasta 10ºC y el día 30 cayeron cerca de 30 l/m². Ese mismo día, 30 de diciembre a las 18:38 h, se produce un terremoto de magnitud mbLg 2,2 (IGN) ML 2,5 (Renass-France) con epicentro en Huarte, a unos 11 km de distancia, con hipocentro a 6,4 km de profundidad (IGN) 5 km (Renass-France). Desde septiembre de 2004 se habían producido cientos de eventos sísmicos de baja magnitud destacando dos mayores ML 5,3 y ML 5,2 (Renass-France) mbLg 4,5 y 4,1 (IGN) respectivamente los días 18 y 30 de septiembre de 2004 que se achacaron al primer llenado del embalse de Itoiz. El enjambre se prolongó, como veremos en la sexta parte, unos años más. Durante 2004 y 2005 fueron habituales los registros semanales y a veces diarios de decenas de eventos sísmicos, así como los testimonios de personas que sentían las sacudidas más intensas (ver el caso de la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin en la parte dos). En el mes de diciembre de 2005 se produjeron en el área más cercana y circundante a Cemboráin siete eventos sísmicos, los seis precedentes al del día 30 de diciembre con magnitudes entre 0,8 y 1,5 mbLg se pueden considerar, como el del día 30, parte del enjambre derivado del llenado de Itoiz del que hablaremos por su trascendencia a la hora de contar con efectos cosísmicos en toda el área epicentral, y especialmente en el áreal metropolitana de Pamplona y en toda la comarca.

Tabla XX

Eventos sísmicos sucedidos alrededor de Cemboráin en diciembre de 2005

Fecha	Hora Local	Profundidad (km)	Magnitud (mbLg)	Localización
09/12/2005	03:57:12	0,0	1,1	NE Nagore
19/12/2005	05:57:31	0,0	1,2	NE Beriáin
25/12/2005	16:07:09	6,1	1,0	NW Aoiz
25/12/2005	18:29:39	11,8	1,5	W Nagore
25/12/2005	22:58:47	10,6	0,8	NE Lizoain
29/12/2005	15:11:36	0,0	1,4	NE Aoiz
30/12/2005	**18:38:16**	**6,4 (5,0 Renass)**	**2,2 (ML 2,5)**	**NE Huarte**

4. El muro ejecutado para sostenimiento no tenía ningún sistema de drenaje ni anclado o bulonado.

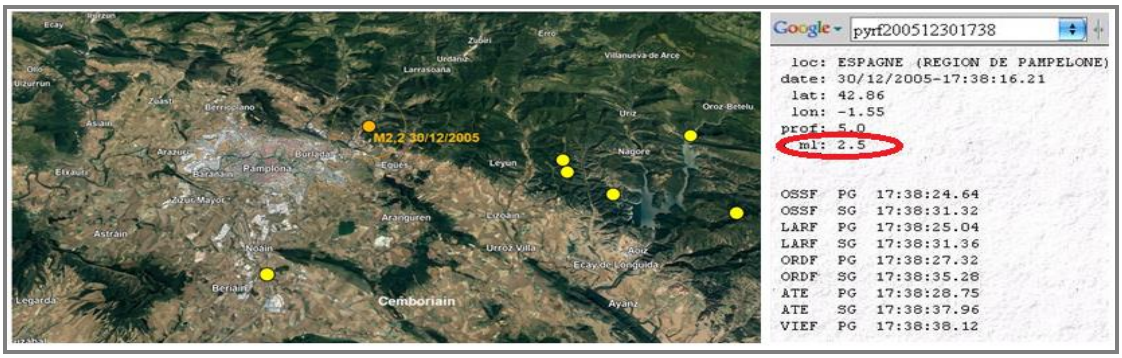


Figura 5.05. A la izquierda: epicentros de los siete eventos sísmicos sucedidos a unos 20 km alrededor de Cemboráin en diciembre de 2005 (en amarillo) y del mbLg 2,2 (ML2,5) del día 30 de diciembre a las 18:48 horas (en naranja). Derecha: registros digitales de la red Renass-France del evento ML2,5 a 5 km de profundidad del 30/12/2005 a las 18:38h hora local.

5. Los estratos de margas, areniscas y margocalizas, en ese lugar, buzan hacia el interior de la excavación unos 40-45º, como se puede ver en la figura 5.06. Esta misma configuración podía verse antes del desprendimiento por todo el frente donde el muro se había ejecutado, era una observación de los operarios que ejecutaron el muro en las semanas previas al derrumbe.

Figura 5.06. Estratos intercalados de margocaliza y arenisca con buzamientos de 40º- 45º hacia la excavación.

6. El estado de las viejas tapias de piedra de la zona alta de las huertas mostraba evidencias de haberse caído localmente antes de la rotura del muro. Su estado ya era bastante deficiente antes de la caída global más voluminosa. Si no hubiese sido por el impulso que supone la caída del muro, cuyo resultado es mucho más espectacular, dichos deterioros hubiesen continuado, pero probablemente pasarían desapercibidos, la zona no estaba urbanizada, sino en campo abierto.

Lo anteriormente comentado, configura una serie de factores que juntos fueron clave para provocar la caída global. El cómo actuaron lo vamos a desglosar a continuación.

Figura 5.07. Arriba: parte del desplome del 30 de diciembre de 2005. Abajo: misma perspectiva en agosto de 2021 tras más de dos lustros de contención.

Como se puede ver, al considerar las seis observaciones descritas, partimos ya de unas condiciones que comprometen la estabilidad del conjunto talud-muro de contención. Por un lado, la pendiente existente antes de la excavación de la obra se incrementa al bajar la cota de actuación y aumentar la altura crítica. La disposición de los estratos de roca de marga es, independientemente de la obra que se ejecute, favorable a deslizamientos localizados que seguramente ya se dieron en varias ocasiones. Si pasaron desapercibidos es porque su volumen era pequeño y porque su impacto o trascendencia era mínima. Pero solamente las condiciones geológicas de esa ladera, desde el punto de vista de la estabilidad geológica, indican que es precisamente el caso más desfavorable en los deslizamientos conocidos en los márgenes de la formación, tanto a muro como a techo, donde de manera progresiva, la formación de Margas de Pamplona se va convirtiendo en una unidad de marcado carácter anisotrópico, con una estratificación centimétrica alternante en la que el papel de las areniscas, margocalizas o calcarenitas se va haciendo más y más importante desde el punto de vista geotécnico. En la figura 5.07 se puede ver el estado actual tras la caída y el arreglo ejecutado.

5.2.2. Desglose geotécnico de una inestabilidad.

Al modelizar o tantear lo ocurrido en Cemboráin aquella madrugada, desde un análisis que suponga rotura circular como los de los tipos de Bishop, dovelas, Taylor, etc., no se acerca a la realidad de lo observado, el deslizamiento, a pesar de la cantidad de material deslizado que lo ocultaba, se pudo deducir que se produjo fundamentalmente por planos de estratificación y discontinuidades estructurales preferentes.

Por lo tanto, desde un punto de vista morfológico, el deslizamiento es fundamentalmente de carácter (o morfología) estructural y comienza en algún lugar en el trasdós del muro, la caída de la parte de cobertera es la más espectacular, arrastra casi todo el material visible, pero se inicia en el nivel de margas, areniscas y margocalizas que lo sustenta.

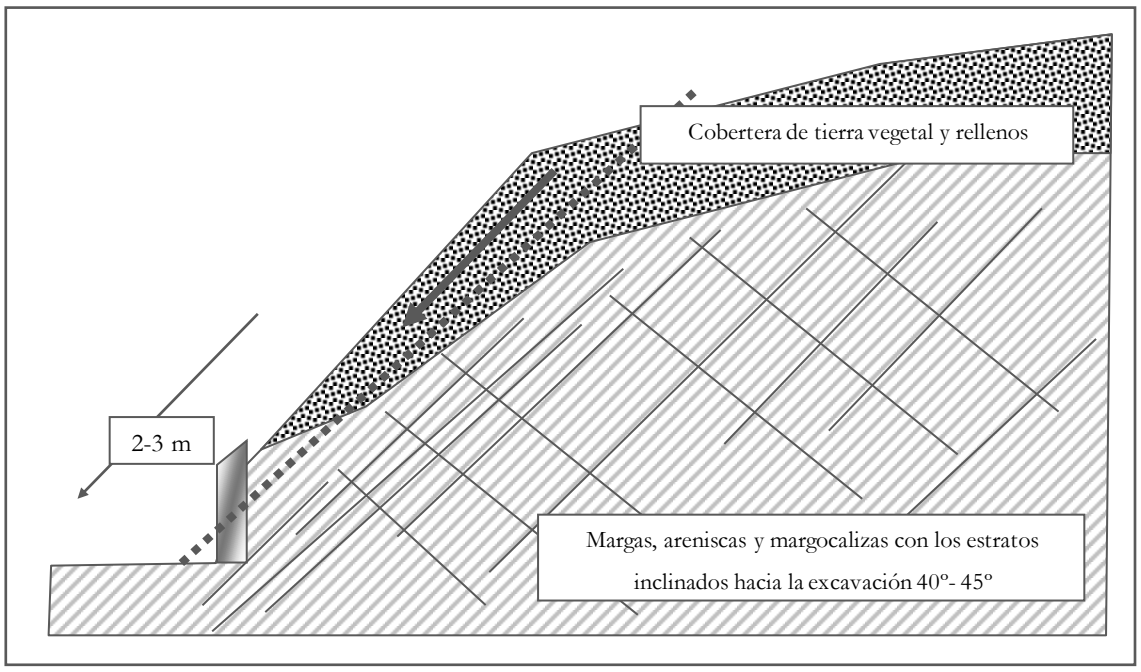


Figura 5.08. Croquis mostrando la situación estratigráfica del terreno antes del desplome.

Lo que las investigaciones de campo mostraron fue que el itinerario, o más bien la conjunción de fenómenos que llevaron a la caída final de una parte del trasdós del muro y su rotura, vino a ser más o menos lo siguiente:

1. Como se pudo testificar en campo y quedó manifiesto en las fotografías, idealizado en el croquis anterior (figura 5.08) la inclinación de los estratos de marga configura la más desfavorable de las posibilidades de deslizamiento: estratos inclinados unos 40-45º en la dirección de la excavación.

El ángulo de rozamiento interno de todo el macizo se puede estimar en unos 30-35º por métodos geomecánicos basados en el índice RMR de Beniawski, (RMR = 45-55) y la cohesión entre 1,0 y 1,5 kp/cm², siempre en estado seco, normal y sin considerar la influencia del clima, por lo que la rotura circular para un material de esas características con un peso específico aparente cercano a 2,40 t/m³ no se daría ni aún con taludes verticales. El deslizamiento por cuñas de roca o aprovechando estructuras de debilidad previas era el más probable y fue el que finalmente sucedió favorecido por el descalce del talud. En cuanto a un deslizamiento de la parte de rellenos heterogéneos con ángulo de rozamiento 20-25º, cohesión entre 0,1 y 0,2 kp/cm² y peso específico cercano a 1,80-2,00 t/m³, podría darse de forma muy superficial (como seguramente ya se ha dado en ocasiones) pero sin afectar al muro.

2. El muro se ejecutó previo corte vertical del terreno en la base del talud sin sostenimiento temporal (bataches u otros) como vimos en la adecuación del edificio de la antigua Audiencia que albergaría el Parlamento de Navarra (a pesar de estar proyectado hacerlo) y como veremos también en el caso de Arre y Yesa. Además, no se tenía contemplado un drenaje ni se habían considerado previamente las condiciones geomecánicas del talud ni la excavación. En el trasdós se acumulaba agua y una parte de esa agua se acumuló, especialmente en la base, en los poros del terreno, en las fracturas y diaclasas, pero sobre todo, en los planos de estratificación. La época de lluvias previas (en la estación de Monreal se registran hasta 211,7 l/m² acumulados desde noviembre) supuso que el agua fuera retenida en grietas y poros por la parte impermeable de la roca (margas y margocalizas) y por el efecto "presa" que hacía el propio muro hacia el interior. El agua almacenada, sobre todo en los planos más superficiales y en las discontinuidades propias de la estratificación, se congeló durante los intervalos en que las temperaturas bajaron por debajo de 0º C los días previos al desplome, especialmente del 24 al 29 de diciembre cuando las temperaturas máximas rozan los 2ºC y las mínimas llegan a -7ºC con los días 25, 27 y 28 de diciembre en que las temperaturas máximas ni siquiera alcanzan los 0ºC, siendo la media del 24 al 29 de -2,5ºC (ver figura 5.9 y tabla XXI). En contraste, los días 28, 29 y 30 de diciembre, de repente se superan los 30 l/m² de precipitación con una subida media de las temperaturas de hasta 5ºC el día previo al desplome. Durante la semana anterior al deslizamiento, el terreno empapado se congeló y finalmente las copiosas lluvias y la subida de temperaturas de finales de diciembre lubricaron todo el conjunto. Esta congelación intensificó fenómenos de dilatación y rotura por tracción de planos ya bastante vulnerables, reduciendo la cohesión estimada en 1,0-1,5 kp/cm² hasta valores cercanos a 0 kp/cm², por lo que la sostenibilidad del conjunto dependió en algunas zonas solamente del rozamiento.

El ángulo de rozamiento del macizo rocoso tipo III (Beniawski, 1989), en condiciones normales, como hemos apuntado, pudo ser estimado en 30-35º a partir del RMR, pudiendo disminuir una vez descongelada el agua a valores cercanos a 15-20º por lubricación de las paredes y alcanzar humedades localmente cercanas al Límite Líquido, mientras que el ángulo de inclinación era de unos 40-45º. Si en alguna zona, un cuerpo de roca se desprende del resto del macizo, como así se pudo comprobar, se produce un deslizamiento estructural inicial y localmente planar. Sólo contando con la inclinación a favor de la excavación ya se superan las fuerzas de rozamiento. El resto es un efecto en cadena.

3. El papel que juega el terremoto ML2,5 registrado el día 30 tras las copiosas lluvias del día anterior, con epicentro en Huarte a unos 12 km de distancia, es también un fenómeno a tener en cuenta. Laderas vulnerables o en estado de transición debida a obras que puntualmente alcanzan factores de seguridad cercanos a la unidad, como fue el caso de Cemboráin, suelen presentar desplomes de baja o media entidad. No obstante, también cualquier fuerte vibración debida a vehículos pesados, explanaciones, excavaciones, etc., han provocado la caída de taludes similares. En el caso de Cemboráin, algunas de las personas con las que hablamos aseguraron haber sentido la tarde del 30 de diciembre "como una explosión", se trataría de algo parecido al paso de un camión, pero de una intensidad algo mayor. Con magnitudes M>2 suele haber testimonios de haber sido sentido con baja intensidad algún terremoto en el área epicentral, algo que se hizo común durante el primer llenado del embalse de Itoiz con cerca de un millar de eventos durante 2004 y 2005 y se corroboró en 2020-2021 durante el enjambre de Lizoáin (cerca de 850 eventos). En las comarcas afectadas es normal, durante estos fenómenos sísmicos, que se produzcan pequeños desplomes o deslizamientos muy localizados, sobre todo en excavaciones o laderas que presentan factores de seguridad cercanos a la unidad, en carreteras, vaciados, obras que se están ejecutando, etc.[11]

[11] El fenómeno no es desconocido ni en la zona ni en las cercanas áreas recientemente afectadas como Erreniega-El Perdón en 2013 (unos 400 eventos con dos ML4,2), el área de Esteribar en 2017 (un centenar de eventos tras un M4,2 con ab=0,16g en Pamplona, cuadruplicando las expectativas de la norma NSCE-02). También en el área de Lizoáin en 2004-2005 con el primer llenado de Itoiz (4,6 y 4,1) y recientemente en 2020-2021, más de 800 eventos con casi un centenar de ellos sentidos en el área metropolitana con tres impactos ampliamente sentidos, el M4,6 de la medianoche (y posteriores) del 1 de octubre de 2020, desde Bizkaia a Barcelona (4,6, 4,4 y 4,1) y ha llevado a que, por ejemplo, el día 21 de noviembre de 2020 fuesen sentidos en el Valle de Egüés (unos 10 km al norte) cuatro pequeños terremotos de magnitudes tan bajas como mbLg 0,9, 1,2, 1,5 y 1,5 con intensidades I-II, fenómeno que se va haciendo más y más común según pasan los años gracias a la inmediatez de las encuestas online, las redes digitales de monitorización y el contraste de experiencias entre afectados, tanto desde medios de comunicación como por redes sociales, compartiendo sensaciones y datos multimedia.

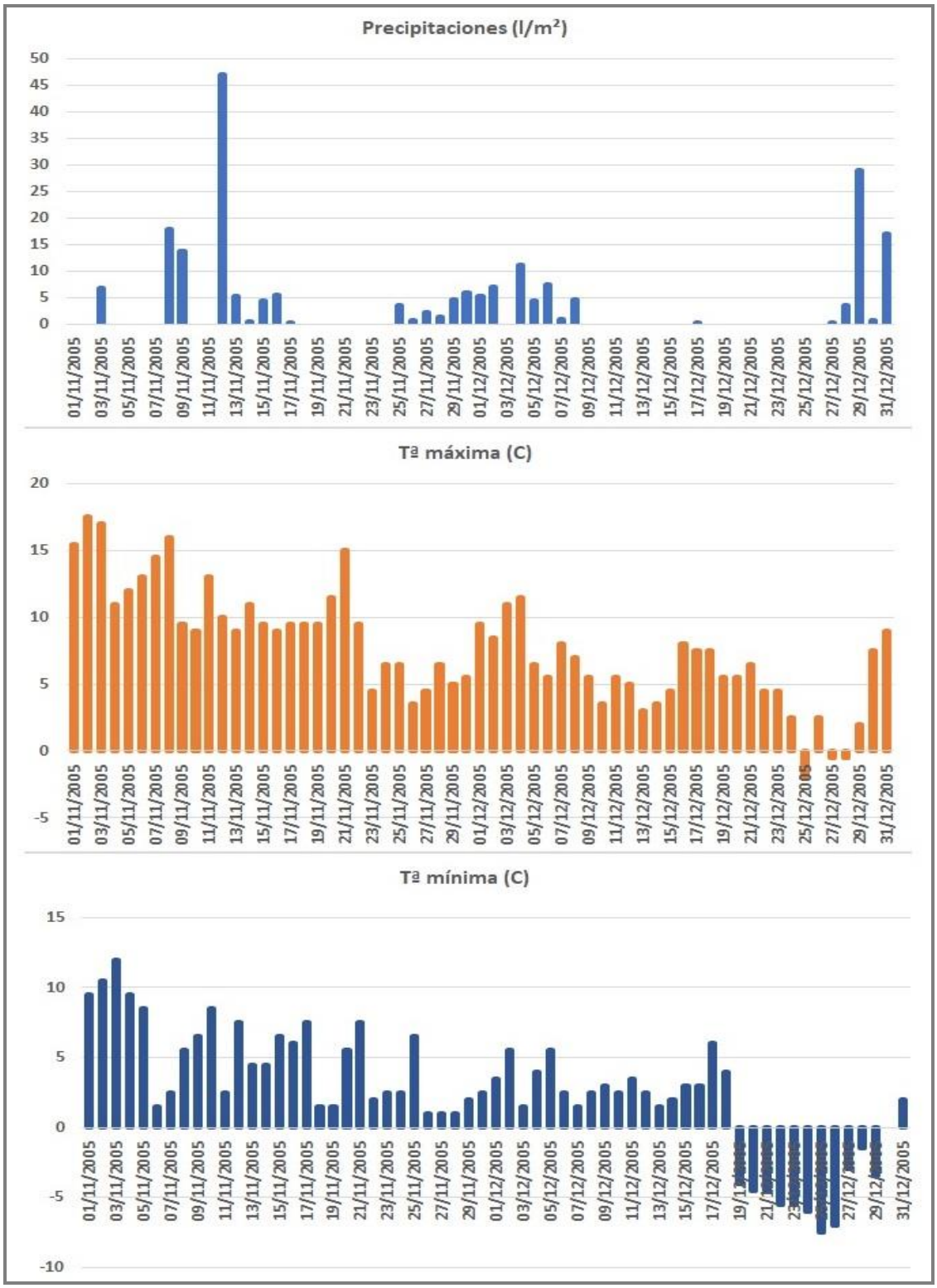


Figura 5.09. Precipitaciones (l/m²), temperaturas máximas y mínimas (ºC) en la estación de Monreal durante noviembre y diciembre de 2005.

Tabla XXI. Precipitaciones y temperaturas alrededor de Cemboráin en noviembre de 2005

Noviembre 2005	Precipitación acumulada (l/m²)	Temperatura máxima (º C)	Temperatura mínima (º C)
01/11/2005	0,0	15,5	9,5
02/11/2005	0,0	17,5	10,5
03/11/2005	6,7	17,0	12,0
04/11/2005	0,0	11,0	9,5
05/11/2005	0,0	12,0	8,5
06/11/2005	0,0	13,0	1,5
07/11/2005	0,0	14,5	2,5
08/11/2005	18,0	16,0	5,5
09/11/2005	13,8	9,5	6,5
10/11/2005	0,0	9,0	8,5
11/11/2005	0,0	13,0	2,5
12/11/2005	47,0	10,0	7,5
13/11/2005	5,3	9,0	4,5
14/11/2005	0,4	11,0	4,5
15/11/2005	4,4	9,5	6,5
16/11/2005	5,4	9,0	6,0
17/11/2005	0,1	9,5	7,5
18/11/2005	0,0	9,5	1,5
19/11/2005	0,0	9,5	1,5
20/11/2005	0,0	11,5	5,5
21/11/2005	0,0	15,0	7,5
22/11/2005	0,0	9,5	2,0
23/11/2005	0,0	4,5	2,5
24/11/2005	0,0	6,5	2,5
25/11/2005	3,6	6,5	6,5
26/11/2005	0,8	3,5	1,0
27/11/2005	2,3	4,5	1,0
28/11/2005	1,4	6,5	1,0
29/11/2005	4,7	5,0	2,0
30/11/2005	5,9	5,5	2,5

Tabla XXI. Precipitaciones y temperaturas alrededor de Cemboráin en diciembre de 2005

Diciembre 2005	Precipitación acumulada (l/m²)	Temperatura máxima (º C)	Temperatura mínima (º C)
01/12/2005	5,3	9,5	3,5
02/12/2005	7,0	8,5	5,5
03/12/2005	0,0	11,0	1,5
04/12/2005	11,2	11,5	4,0
05/12/2005	4,5	6,5	5,5
06/12/2005	7,5	5,5	2,5
07/12/2005	0,9	8,0	1,5
08/12/2005	4,7	7,0	2,5
09/12/2005	0,0	5,5	3,0
10/12/2005	0,0	3,5	2,5
11/12/2005	0,0	5,5	3,5
12/12/2005	0,0	5,0	2,5
13/12/2005	0,0	3,0	1,5
14/12/2005	0,0	3,5	2,0
15/12/2005	0,0	4,5	3,0
16/12/2005	0,0	8,0	3,0
17/12/2005	0,3	7,5	6,0
18/12/2005	0,0	7,5	4,0
19/12/2005	0,0	5,5	-4,0
20/12/2005	0,0	5,5	-4,5
21/12/2005	0,0	6,5	-4,5
22/12/2005	0,0	4,5	-5,5
23/12/2005	0,0	4,5	-5,5
24/12/2005	0,0	2,5	-6,0
25/12/2005	0,0	-2,0	-7,5
26/12/2005	0,0	2,5	-7,0
27/12/2005	0,3	-0,5	-3,0
28/12/2005	3,6	-0,5	-1,5
29/12/2005	29,0	2,0	-3,5
30/12/2005 ML2,5	0,6	7,5	0,0
31/12/2005	17,0	9,0	2,0

Se trata de un inestabilidad típica de una zona marginal en las formaciones de margas con estratificación marcada e inclinaciones favorables a las inestabilidades. Además, respecto de la caída del talud y la rotura del muro de Cemboráin, hay que tener en cuenta los siguientes detalles:

1. Disposición de los estratos (inclinados de la forma más desfavorable).
2. Efecto de acumulación de agua en el trasdós (muro sin drenajes haciendo de presa).
3. Congelación del agua (separación de juntas de estratificación y de cuerpos de roca, disminuyendo la cohesión).
4. Descongelación del agua (lubricación de juntas ya separadas, disminuyendo el ángulo de rozamiento).
5. Acción desestabilizadora de un pequeño terremoto (acentúa la disposición poco estable del conjunto).

Si intentásemos adjudicar un porcentaje determinado de influencia por su intensidad —en el espacio y en el tiempo— a cada uno de esos procesos, deberíamos crear una metodología bastante compleja para evaluar el grado de actuación de cada uno. No obstante, para que se produjera la caída del muro fue necesaria una interacción de varios factores en ese espacio y en ese tiempo. Sí que se podría especular sobre la posibilidad puntual (en un determinado intervalo de tiempo) de que uno de los procesos haya podido ser predominante y por lo tanto con mayor influencia en el desplome final que los demás. La tabla anterior, con los datos de precipitación y temperatura muestra que éstos son notablemente significativos de lo afirmado; por ejemplo, en los momentos de congelación del terreno, la rotura y separación de juntas, fracturas y diaclasas sería más significativa: del 24 al 29 de diciembre. Como se puede ver en el cuadro anterior, el terreno permanece mojado debido a las lluvias moderadas de noviembre y diciembre, pero esa semana cae la temperatura media a -2,5º (24 a 29 de diciembre). Inmediatamente, el día 29 se registran 29 l/m² que vienen con la subida de las temperaturas medias de 5ºC y con la descongelación.

Ese día 29 de diciembre de 2005 predominan la pérdida del rozamiento, el incremento de la plasticidad y la lubricación; posteriormente al terremoto del día 30 se produce un desajuste tensional que lo más probable es que no hubiese sido tan influyente unas horas o días antes, dada su baja intensidad; durante las lluvias del día 29 se produce una acumulación de agua en el trasdós, etc. Pero como queremos hacer notar, no sería justo el apuntar solamente a uno de los cinco procesos en marcha, como se pretendió por parte de la propiedad o por parte de los técnicos, como responsable máximo de la inestabilidad y el desplome. Cada uno de ellos cumplió su función y la suma de todos sus efectos culminaron con la rotura del macizo, del muro, del corral y del desplome de 500 m³ de material sobre las obras de edificación que confiaron su seguridad a un muro que carecía de un mínimo reconocimiento geotécnico-estructural o de carácter ambiental.

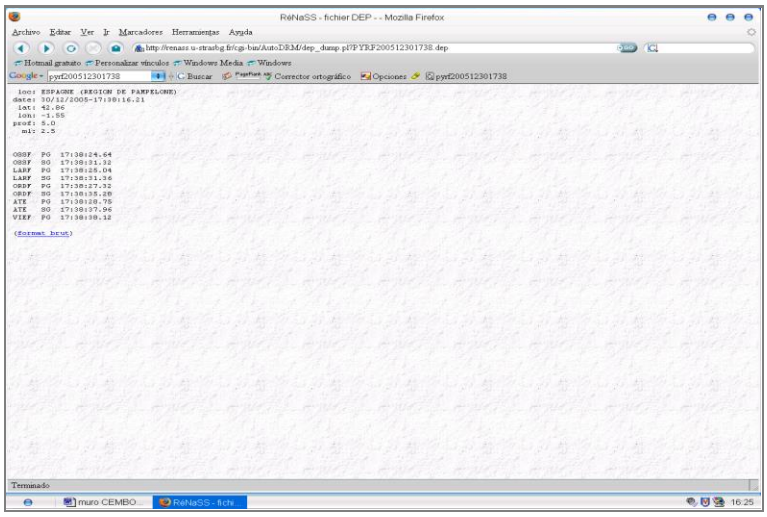


Figura 5.10. Extracto del registro del evento sísmico publicado por la Banque RéNaSS del servicio sismográfico francés para el terremoto de magnitud ML2,5 registrado del 30-12-2005, con epicentro en Huarte.

Figura 5.11. Aspecto que presentaba el muro, con rotura a media altura, en la zona donde éste termina en longitud.

Las huellas de reptación en esa ladera y de pequeños desprendimientos localizados se podían y se pueden ver aún en varias zonas de alrededor, por lo que queda claro que una cierta inestabilidad ya existía, solo faltó que a través de la perturbación desatada con la realización de la obra se conjugasen los factores enumerados y sus procesos derivados para culminar en un deslizamiento planar en el macizo rocoso. Éste arrastró a la cobertera vegetal, al muro y a los rellenos que soportaban el corral del que se escaparon las gallinas. Todo ello mediante una reacción en cadena en la que los muretes y tapias de las huertas de la zonas alta y parte del corral colapsaron con un terreno (roca y suelo) que había perdido las características mecánicas de partida en días o semanas.

Figura 5.12. Detalle del buzamiento de los estratos hacia la excavación en la zona donde se apoyó la grúa. En la parte baja se puede ver una pequeña cuña de marga tableada desprendida encima de un trozo de acero corrugado. A la derecha se puede ver una surgencia de agua entre el macizo rocoso de apoyo y la cimentación del muro de sostenimiento.

El modelo de comportamiento descrito es muy representativo de cómo se generan inestabilidades en los márgenes de la formación biarritziense, especialmente en las formaciones que a muro y techo preceden o suceden a las Margas de Pamplona. El caso de Cemboráin se desarrolló en unos días y a escala de parcela, pero veremos que a mayor escala de espacio y tiempo también estos mecanismos, además de la fatiga de los materiales, generan costosos accidentes, perjuicios y grandes pérdidas económicas. El estudio y los procesos que generan estos colapsos, roturas y deslizamientos —de mayor o mucha mayor entidad— son perfectamente aplicables al conjunto de los materiales marginales del macizo, simplemente cambiando las escalas en el espacio y en el tiempo, que es lo que veremos a continuación.

5.3. El deslizamiento histórico de Arre.

Ficha técnica:

Deslizamiento reactivado al menos dos veces en los últimos 30 años. Suele variar la geometría tras las actuaciones, aunque engloba unos 75.000 m³ de terrenos de los tipos E1, E2 y C sin daños personales, pero con impacto económico destacable: daños a infraestructuras y viales, cortes de acceso y circulación de usuarios y mercancías durante meses y desvíos por la N-121-A y NA-2517 que comunican Pamplona con Francia, con varios polígonos industriales del norte de la comarca, entre ellos y con la ciudad.

5.3.1. Estudio del deslizamiento y la reactivación.

El caso de Arre, situado en los márgenes de la formación biarritziense, es el más conocido en la comarca de Pamplona, pues vuelve a ser noticia o copar las portadas de los medios locales cuando es necesaria la intervención e incluso es inevitable el corte y desvío de las carreteras NA-2517 y N-121-A que acceden desde Villava a Arre la primera, y comunica Pamplona con Francia, la segunda. En un comunicado del Gobierno de Navarra fechado el 16 de noviembre de 2013, con motivo de nuevas actuaciones tras un nuevo episodio de deslizamientos, cierre de carreteras y vistosas deformaciones en la zona afectada, algo que se alargaría hasta diciembre de ese año, se dice:

> *"En este punto se vienen produciendo episodios de deslizamiento de tierras de manera periódica, en general a continuación de periodos de lluvia intensa".* Portal del Gobierno de Navarra (navarra.es, 2013).

En efecto, la ladera de Arre ha venido mostrando inestabilidades recurrentes desde hace décadas. En el año 1992, tras un evento de varios deslizamientos hubo que cortar la carretera y algunos accesos. El Departamento de Obras Públicas, Transportes y Comunicaciones del Gobierno de Navarra encargó entonces el *Proyecto de estabilización de la ladera del Monte Ezcaba y la variante este de Pamplona* que finalmente, adjudicó a Euroestudios S.A. y que se presentó en julio de ese mismo año. En aquel episodio, la zona más afectada fue la noroeste en la N-121-A en unos 170 x 125 m. En 2013 el área afectada era bastante más amplia y las tipologías de los deslizamientos conservaban la casuística de las de 1992 a la que se sumaron desprendimientos de roca y deslizamientos superficiales de tipo planar en la NA-2517 (ver figura 5.13). El incidente de deslizamientos observados en 1992 es el mejor estudiado hasta la fecha, era de tipo rotacional, involucrando en su mayoría a suelos coluviales y margas alteradas, además de la escollera ejecutada unos años antes al ampliar la carretera N-121-A a Francia de la que no tenemos proyecto ni estudio. Los problemas comenzaron al observarse las roturas abiertas en la propia capa de rodadura de la N-121-A que pronto abrieron los diarios locales. Enseguida aparecieron en prensa las enormes grietas de la parte alta de la ladera; en algunos casos de más de 2 m de anchura con profundidades cercanas a los 8 m, en una extensión de más de 170 m en paralelo a la propia ladera y unos 125 m en perpendicular.

En total se calcularon unos 75.000 m³ de terreno removido, y no era la primera vez ni fue la última tras las actuaciones llevadas a cabo. En 2013 con una reactivación más espectacular si cabe, esa cifra se superó.

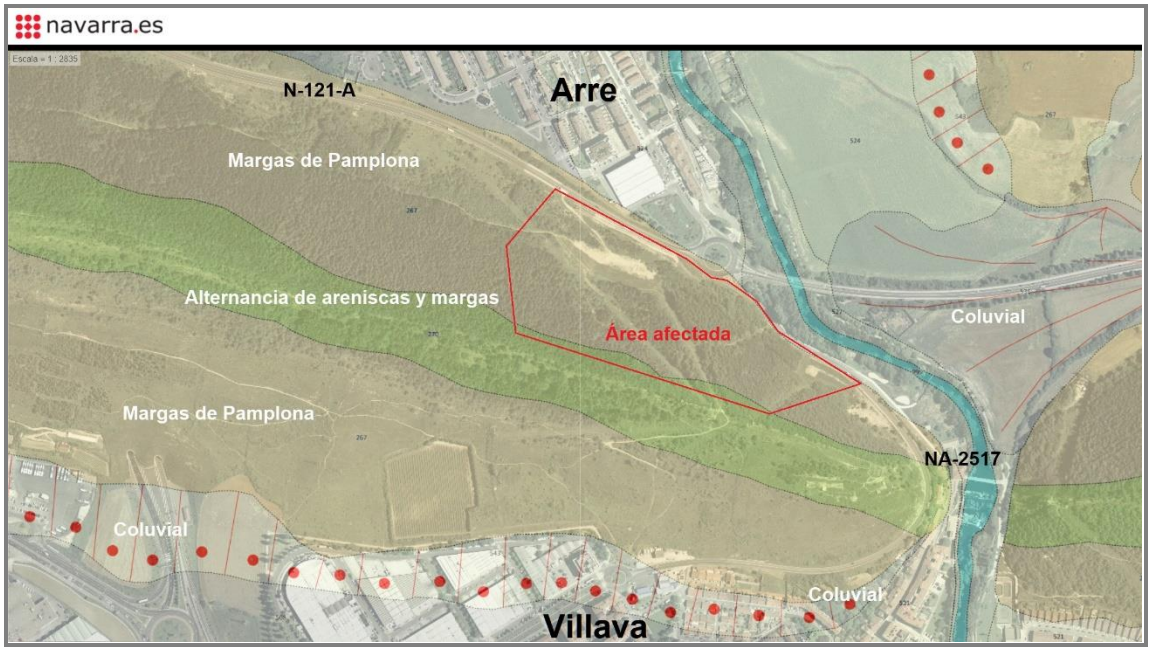


Figura 5.13. Situación del área afectada por deslizamientos recurrentes en Arre, en los taludes de las carreteras N-121-A y NA-2517. La mayor parte de los 75.000 m³ removidos en 1992 y algo más en 2013, son coluviales angulosos provenientes de la alteración de los niveles superiores de areniscas y margas (en verde) tableadas (perfiles C) y primeros tramos de margas alteradas E2 (naranja) que en esta zona ya presentan intercalaciones importantes de las litologías que dan fin a la formación.

5.3.2. El deslizamiento y la actuación de 1992 en Arre y alrededores.

A principios de 1992 comenzaron las deformaciones, sobre todo se notaron en la capa de rodadura de la carretera a Francia y en la escollera que entonces se encontraba apoyada en ladera levantada unos años antes con motivo de la ampliación de la N-121-A Pamplona-Francia, aunque más que una escollera, se trataba de grandes piedras apoyando contra el talud excavado para la ampliación de la carretera. Ese año, se rehízo completamente y aunque siguió apoyando contra la ladera, se definió una nueva escollera mucho más robusta acompañada de drenajes y zanjas de evacuación adecuadas. Entonces se vio con sorpresa cómo además de tratarse de una unidad estructural estrecha y liviana, la antigua escollera estaba incluida en el deslizamiento general que, con la propia carretera y parte del bosque por encima de ella, se había deformado enormemente. El deslizamiento, a pesar de todas las medidas adecuadas que se tomaron, tardó 21 años en volver a reactivarse de manera, si cabe, más violenta. En 2013 se da en el mismo lugar que el de 1992, incluso abarca un área más extensa, pero el desencadenante principal —como bien apuntaba el Gobierno de Navarra y veremos, es el agua—, actuó de manera bien distinta en cada caso.

Antes de 1992 nos encontrábamos con refuerzos precarios y factores de seguridad bajos, sólo faltaron unas lluvias copiosas, pero no calificables como históricas, para activar el deslizamiento. Y es que en 1992 se impulsaron varias actuaciones que vamos a resumir en cuatro, pero obviamente, por lo sucedido en 2013, no fueron capaces de evitar el problema para siempre, ya que 21 años después, se produjo una reactivación importante con notable impacto social.

1. En primer lugar, en 1992 se acordó el cierre de las grietas con tierra y sellado para evitar nuevas entradas de agua, estos trabajos complementarían a los nuevos drenajes. Desde siempre, y como bien indicó el Gobierno de Navarra en la nota del 16 de noviembre de 2013, el agua filtrada en los episodios de fuertes lluvias desencadena de manera periódica las inestabilidades.

2. En segundo lugar, y como viene siendo habitual, se propuso la excavación de zonas medias y altas para aliviar peso, de manera que se procedería en una cuarta actuación a un retaluzado del trasdós que incrementaría ligeramente el factor de seguridad. Este detalle es importante porque, en general, los deslizamientos que involucran suelos y rocas en formaciones muy estratificadas y concretamente en las márgenes de la Formación de Margas de Pamplona, suelen encontrar una solución pasajera al ser aliviados de peso en su parte alta, aunque no son pocas las veces vividas en el sector que esta solución pasajera se trata como si fuera definitiva en la creencia, que no certeza, de que así, se neutralizan las fuerzas desestabilizantes para siempre. Sin embargo, la experiencia nos enseña que éstas vuelven una y otra vez, generalmente con lluvias importantes. Los factores de seguridad (FS) medidos en los diferentes perfiles estudiados en 1992 arrojaron valores desde 0,7 (¡ojo!, en las computadoras) a 1,0. Tras las obras propuestas comentadas, éstos permanecerían entre 1,25-1,35 (también en las computadoras), algo que, obviamente, no sucedió o varió con el tiempo.

3. En tercer lugar, se ejecutaría la escollera y los drenajes tanto en el trasdós como en las zonas internas.

4. En cuarto lugar, el citado retaluzado culminaría con otras actuaciones de carácter geotécnico y estético, quedando el resto del proyecto con intervenciones de revegetación, señalización y reparación de baches, ensanchamiento de calzada, etc.

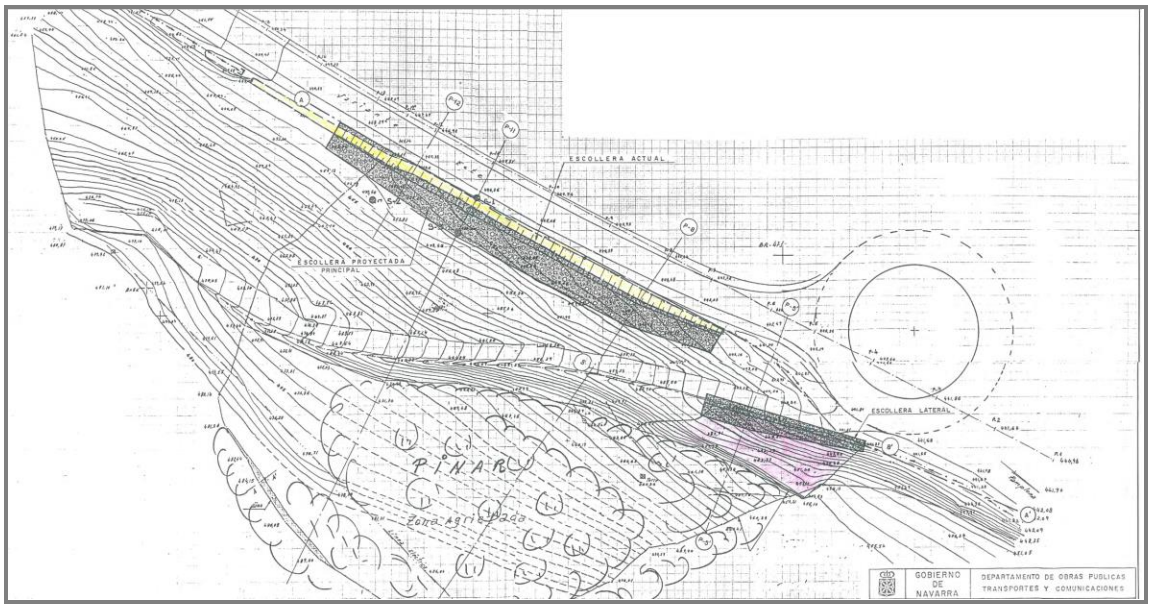


Figura 5.14. Croquis del *Proyecto de estabilización de la ladera del Monte Ezcaba y la variante este de Pamplona* del Gobierno de Navarra encargado a Euroestudios, mostrando la situación de los deslizamientos de Arre y la zona de actuación donde se repondría una nueva escollera en los taludes de la carretera N-121-A.

Es de destacar que la modelización hecha en 1992 para calcular los factores de seguridad (FS) y el dimensionado de las obras, parte de tres capas con espesores variables denominadas coluvial superior (arenas gravas y arcillas), coluvial inferior (arcilla parda) y roca (Margas de Pamplona). Al coluvial superior se le adjudicó una cohesión nula, un ángulo de rozamiento efectivo de Ǿ = 30º y un peso específico (se da por supuesto que aparente) de γ = 2,0 t/m³. Al coluvial inferior que anuncia el macizo biarritziense, cohesión c = 0,05 t/m², ángulo de rozamiento efectivo de Ǿ = 25º y densidad (sic) γ = 2,1 t/m³. A las Margas de Pamplona se les otorga una cohesión "muy alta", fricción 35º y densidad γ = 2,7 t/m³. Una vez realizados los perfiles con los círculos de rotura pésimos que dieron FS mínimos, se diseñaron escolleras con cohesión c = 0 t/m², ángulo de rozamiento efectivo Ǿ = 55º y densidad γ = 2,1 t/m³. La ejecución final fue por bataches en tramos de 5 m (ver figura 5.15).

Se obtuvieron así varios tipos y diseños que fueron analizados en el informe del Gobierno de Navarra realizado por Euroestudios y se escogió un tipo de escollera denominado *Diseño Nº5* con entre 8,5 y 9,0 m de anchura, este diseño garantizaba un FS entre 1,25 y 1,35 que fue *considerado suficiente para garantizar la estabilidad de la masa deslizada*.

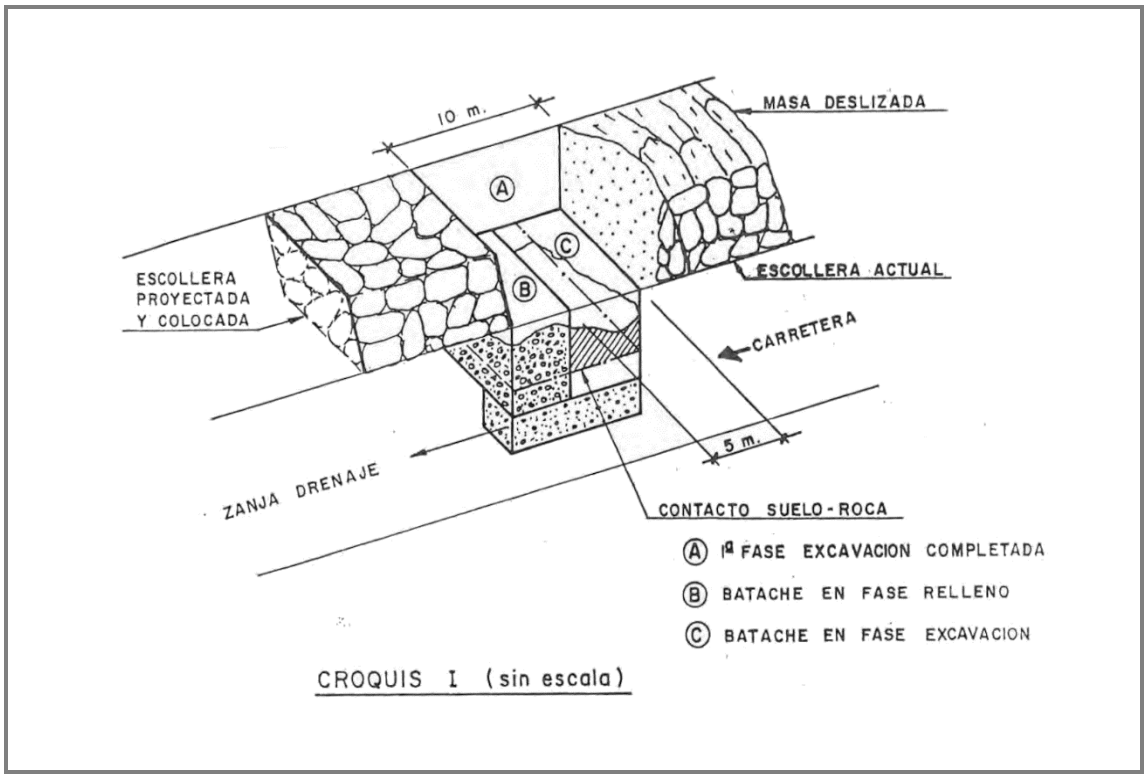


Figura 5.15. Modelo, perfil y modo de ejecución del muro-escollera elegido en 1992 para detener el movimiento de la ladera norte del monte Ezkaba frente a Arre. Puede verse que inicialmente se ejecuta una excavación de 10 m en una primera fase con un batache de una longitud de 5 m en la fase de excavación, contiguo a otros 5 m de actuaciones y relleno. *Proyecto de estabilización de la ladera del Monte Ezcaba y la variante este de Pamplona* del Gobierno de Navarra encargado a Euroestudios.

Para la escollera destinada a contener los suelos desprendidos en la zona lateral cercana a la rotonda, con los mismos criterios, se diseña una escollera de 4,5 m de anchura. Recordemos que la denominada "escollera" que se sustituyó en 1992 apenas tenía una fila de piedras contra el talud, que la enorme grieta en la zona alta delimitaba el límite superior de la masa deslizada y la lateral al este el límite oriental que en 2013 se superaría. Todo ello quedó más o menos preparado para un futuro estable y fueron escasas las ocasiones en que, hasta 2013, hubo que retocar la carretera, arreglar baches o abultamientos, recoger piedras caídas muy localmente o preocuparse de que algo como lo sucedido en 1992 se volviera a repetir.

Figura 5.16. Aspecto del arcén en 1992 mientras se realizaban los primeros avances de la reposición de la escollera y la grieta lateral de cierre en la parte alta, zona inferir del bosque del Monte Ezkaba. *Proyecto de estabilización de la ladera del Monte Ezcaba y la variante este de Pamplona* del Gobierno de Navarra encargado a Euroestudios (1992).

5.3.3. Reactivación en 2013 y nuevas actuaciones.

El 13 de febrero de 2013, tras varios meses que marcaron récords de lluvias y deslizamientos en toda la geografía navarra, volvió a manifestarse lo que había apuntado el Gobierno de Navarra en noviembre de aquel mismo año: que en esa ladera *los episodios de deslizamiento son periódicos*.

Llamativas deformaciones obligaron a cortar la carretera de nuevo y hubo que reparar el muro-escollera ejecutado en 1992 como parte de la solución que parecía definitiva 21 años antes. En varios tramos, el muro-escollera de 1992 fue nuevamente arrastrado solidariamente con el deslizamiento, como los coluviales, la calzada y la roca alterada. A ello habría que añadir el desplome de parte de la ladera en su parte oriental sobre la NA-2517, por lo que lo sucedido en 2013 no solamente se debe considerar como una reactivación, sino también una ampliación. Incluyendo las actuaciones de la NA-2517 y las ampliaciones a la N-121-A, un área de unos 200 m de ancho por 500 m de longitud (no toda se deslizó) está siendo controlada desde este último incidente de 2013, esta vez incluyendo un tramo lateral en la carretera a Villava.

En el episodio de 2013 se colocaron inclinómetros de manera urgente, se controlaron los niveles freáticos y se dispuso de nuevos estudios de topografía con inspecciones de carácter geotécnico. Especialmente en la zona alta, algunas piedras de la escollera cayeron a la carretera en un tramo de unos 200 m, se identificaron varias deformaciones con las típicas "panzas" descritas años antes en la parte afectada y nuevamente hubo que desviar el tráfico y cerrar el tramo varios meses. Las labores fueron más complicadas de lo esperado, se duplicaron en tiempo por encima de lo previsto inicialmente, llegando las obras hasta finales de 2013.

Un nuevo proyecto y una ejecución urgente dieron más problemas de lo inicialmente esperado; según la empresa adjudicataria, Arian Construcción y Gestión de Infraestructuras S.A., fue debido a la dificultad de ejecución que, como de costumbre, volvió a requerir el alivio de peso de la zona alta, el refuerzo del muro, la ejecución de nuevas zanjas de drenaje y el arreglo de los desperfectos de la escollera que, esta vez, como novedad, apoyaría en roca. Y es que la escollera de Arre que se había rehecho completamente tras la rotura de 1992, no pudo evitar que se viese afectada la propia carretera con espectaculares grietas y nuevos abombamientos en la capa de rodadura, desplazamientos verticales y horizontales e incluso el levantamiento de la calzada en el margen del movimiento rotacional que la interceptaba y transportaba.

Al tratarse de un deslizamiento de grandes dimensiones y de la tercera intervención desde los años ochenta del siglo XX, en 2013 se consideró oportuno diseñar un nuevo contrafuerte de muro-escollera, pero esta vez apoyado en la roca biarritziense E1 para neutralizar la superficie de rotura que afectaba a la carretera N-121-A y agilizar los procesos de drenaje. El empotramiento de toda la base alcanza desde entonces los 7 m de profundidad bajo el talud. Además del proyecto de estabilización, retirada de tierras y seguimiento para la reposición final de la nueva tercera escollera, se llevó a cabo una nueva construcción de drenajes mediante columnas de gravas con mechinales. Dos inclinómetros y un piezómetro continúan arrojando datos desde entonces.

Es llamativo el aumento del movimiento detectado en julio de 2013, que responde, como veremos, a un mes de junio récord en lluvias precedido de varios meses que también lo fueron. En la parte correspondiente a la NA-2517 (ver figuras 5.16 y 5.17) aflora el macizo rocoso en una buena parte del talud, los trozos de roca caídos fueron retirados y desde entonces se mantienen con una malla sujeta con bulones con dos objetivos principalmente: un sistema de protección con bulonado para el propio talud rocoso que impide el desprendimiento de grandes trozos de roca y además evita las caídas de piedras sobre la carretera. Se trata de un sistema de estabilización adecuado para una zona de roca tan susceptible a la meteorización como son las Margas de Pamplona y margocalizas, calcarenitas y areniscas intercaladas (ver el contraste con lo que se observa en la figura 5.01).

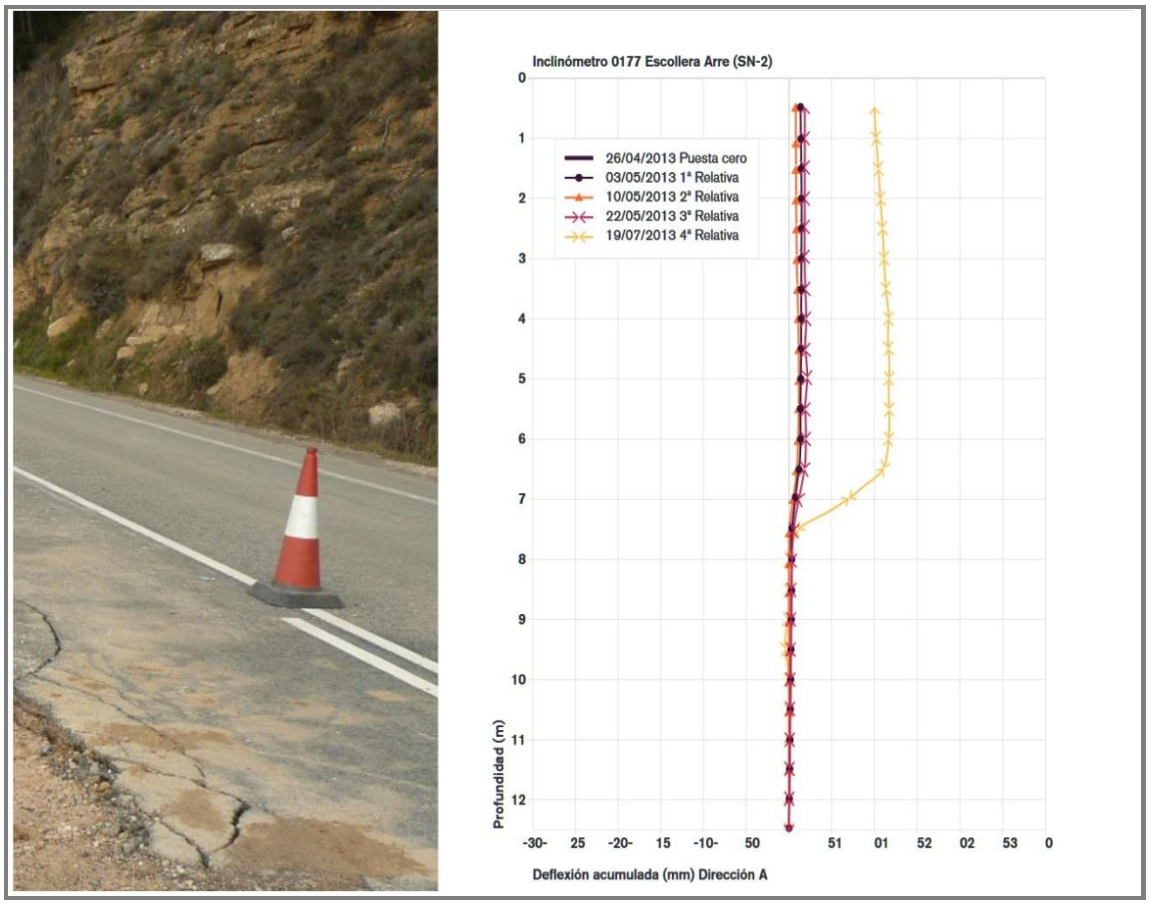


Figura 5.17. Localización y seguimiento de la deflexión acumulada en el inclinómetro 0177 Escollera de Arre (SN-2) situado sobre la N-212-A Pamplona-Francia con las mediciones (en mm) hechas en abril, mayo y julio de 2013. Obsérvese la evolución a unos 7 m de profundidad entre el 22 de mayo y el 19 de julio (en amarillo). Memoria de 2013 de la Sección de Geología y Geotecnia de la Dirección General de Obras Públicas del Departamento de Fomento del Gobierno de Navarra.

En la última década (2013-2023) no hemos tenido la oportunidad de comprobar si, considerando a priori que el notable efecto de la lluvia es un factor fundamental, ésta sería capaz otra vez de generar *"En ese punto […] episodios de deslizamiento de tierras de manera periódica, en general a continuación de periodos de lluvia intensa"*. Todos los años, exceptuando 2014 (865,6 l/m²) y 2015 (794,0 l/m²) estarían cerca de la media histórica 1880-2022 (782,9 l/m²) y con meses muy por debajo de los picos de enero y febrero de 2013 y sin episodios que destaquen por sus cuantiosas precipitaciones. Pero hay que destacar por su importancia y por lo que veremos más adelante, que en la memoria de 2013 de la Sección de Geología y Geotecnia de la Dirección General de Obras Públicas del Departamento de Fomento del Gobierno de Navarra se informa de algo muy significativo:

> *"2013 fue un año especialmente lluvioso, principalmente durante el primer trimestre, lo que ha ocasionado numerosos movimientos de tierras tales como desprendimientos y deslizamientos en la Red de Carreteras de la Comunidad Foral, lo que supuso un incremento de trabajo para el personal de la Sección, así como del equipo de sondeos que fue requerido para la exploración de numerosos movimientos que han afectado a las carreteras. Concretamente se realizaron actuaciones en las carreteras donde se produjeron afecciones. También como consecuencia de las intensas lluvias del primer trimestre de 2013, se produjeron numerosos hundimientos de terrenos y deslizamientos en varias poblaciones de Navarra a las que se ha asesorado mediante el correspondiente informe de análisis de las causas y propuesta de solución, en general a petición del Departamento de Administración Local".*

Y enumera 36 actuaciones de urgencia en: Arre, Ostiz, Guirguillano, Ujué, Abárzuza, Miranda de Arga, Larrau, Beorburu, Nardués, Ochagavía, Sartaguda, Ribaforada, Azpiroz, Burutain, Huarte-Pamplona, Rocaforte, Ansoain, Cirauqui, Sangüesa, Lizoain, Javier, Lezaeta, Ilurdotz, Eusa, Obanos, Subiza, Villanueva de Yerri, Almandoz, Arandigoyen, San Martín de Unx, Pueyo, Mendigorría, San Cristobal, Carcastillo, Izurdiaga y Berbinzana, acompañados con fotografías de los deslizamientos más espectaculares ocurridos en 2013 en la Comunidad Foral de Navarra.

Se produce, además un espectacular incremento de la sismicidad en varias áreas del territorio de la Comunidad Foral hasta el punto de que, tanto a nivel científico, como de los medios de comunicación, al año 2013 se le denominó "el año de los terremotos". Cabe destacar el enjambre sísmico que comenzó el 14 de febrero de 2013 en la Sierra de El Perdón que golpeó durante meses a los barrios sur de Pamplona y pueblos cercanos a la Sierra y se alargó hasta el verano de aquel año con más de 300 eventos que fueron extendiéndose en horizontal y en vertical, dos de ellos ML4,2 el 23 de marzo y el 20 de abril con incidencias en el área epicentral. Hubo días con más de 30 eventos, algunos con notables impactos, una buena parte fueron sentidos por la población de la zona epicentral con desperfectos en algunas edificaciones, lo que provocó en el Parlamento de Navarra la convocatoria de una comisión parlamentaria para tratar el fenómeno de la sismicidad en general y la hidrosismicidad en particular tras los datos manejados por Protección Civil. Fue el autor de esta tesis quien, en calidad de delegado del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos y profesor de geología y geotecnia en la Escuela de Arquitectura, dio explicaciones a sus señorías sobre esta cuestión el 22 de abril de aquel año. Más adelante, en la parte sexta, analizaremos esta cuestión.

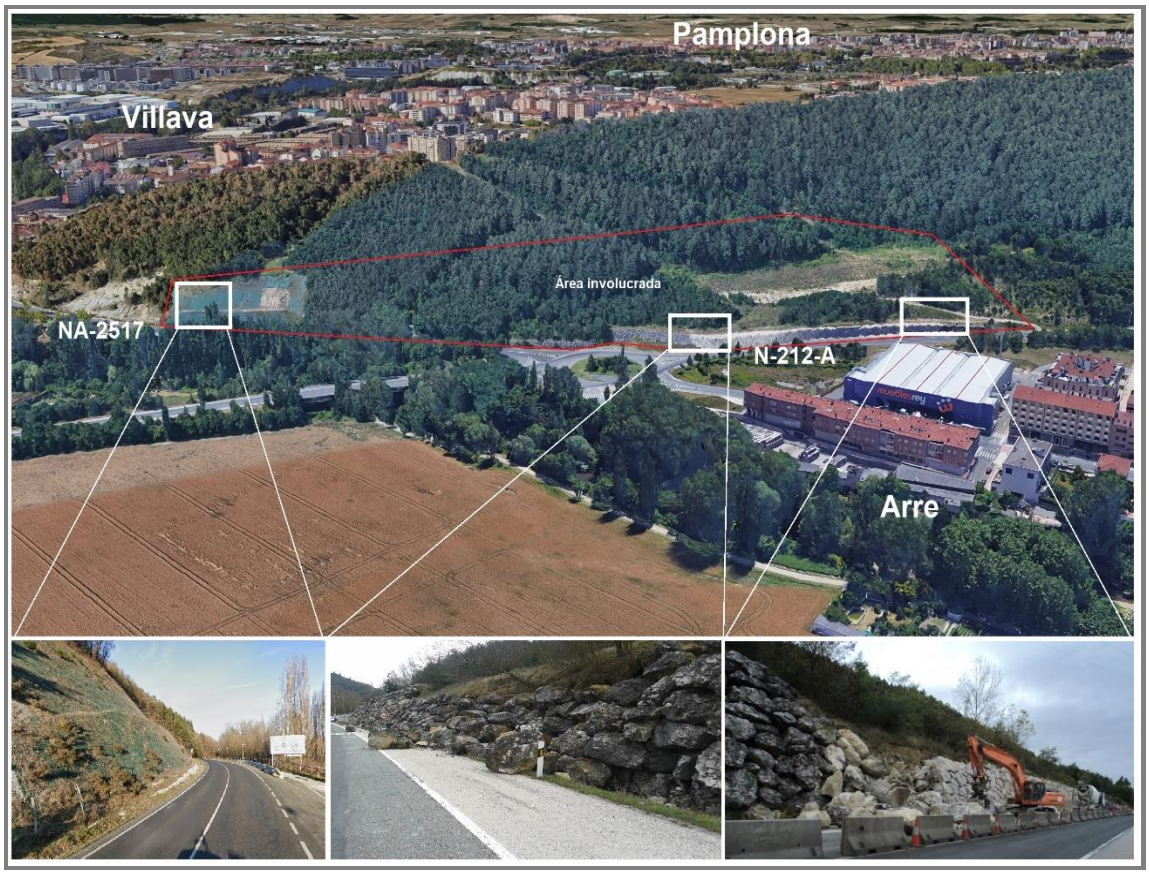


Figura 5.17. Localización de las tres zonas de más intensa actuación en 2013 en la escollera de Arre. A la izquierda la parte correspondiente a la NA-2517 donde aflora el macizo rocoso y donde se localiza la malla sujeta con bulones que a su vez sujeta cuñas de roca y piedras desprendidas. En el centro la zona más cercana a la rotonda que une ambas carreteras con dos entradas a Arre, lugar donde se desplomó parte del muro-escollera ejecutado en 1992. A la derecha trabajos de reposición de la parte final (occidental) donde se encuentra el camino de acceso al Monte Ezkaba. Foto superior e izquierda Sentinel 2, Google Earth y centro y derecha del archivo del Gobierno de Navarra.

5.3.4. Análisis de los deslizamientos de 1992 y 2013.

Como vimos en el caso de Cemboráin, las temperaturas bajo cero después de fuertes lluvias jugaron un papel importante al congelarse el agua en el terreno, meteorizar los estratos inclinados hacia la excavación y desbaratar la cohesión y el rozamiento de unos estratos favorables al deslizamiento tras una excavación desestabilizante. Al investigar las posibilidades de que este proceso pudo estar presente en el desenlace de 1992 llegamos a la conclusión de que es muy improbable por varias causas. También en Cemboráin, la sismicidad asociada al enjambre disparado por el primer llenado de Itoiz, debió tener una cierta influencia para desbaratar el equilibrio que dio lugar a la caída del muro. Sin embargo, "el año de los terremotos" nada tiene que ver desde el punto de vista de la sismicidad como desencadenante de las inestabilidades manifiestas desde el 13 de febrero de 2013.

5.3.5. La influencia de las temperaturas.

En primer lugar, si comparamos lo sucedido con el deslizamiento de Cemboráin vemos que aquél fue pequeño, unos 500 m³, de tipo planar e involucra estratos inclinados de manera muy desfavorable al hacer un corte vertical para la ejecución de un muro de hormigón armado y urbanizar el espacio. El deslizamiento de Arre de 1992 aglutinaba de orden de 150 deslizamientos como el de Cemboráin, unos 75.000 m³ y, además no fue planar, sino rotacional, incluyendo sobre todo suelos coluviales y parte de roca alterada. No hubo excavación vertical, ésta ya se había hecho en los años ochenta del siglo XX. Por otro lado, en Arre, en diciembre de 1991 solo cayeron 10,8 l/m², en enero de 1992 apenas 3,2 l/m² y en febrero con 16,5 l/m², estos meses fueron los únicos de ese año en que se registraron temperaturas bajo cero, pero de manera intermitente. Al contrario que en el caso de Cemboráin, las caídas de la temperatura por debajo de cero se dieron con poca continuidad y sin un solo día en que las máximas se quedasen bajo cero. En marzo se alcanzaron los 97,9 l/m² y en abril 66,0 l/m², pero en ninguno de estos meses se alcanzan temperaturas por debajo de 0ºC. Las mayores precipitaciones de ese año se dieron en verano, siendo junio con 111,1 l/m² y octubre con 216,0 l/m² los meses más lluviosos, pero para entonces el deslizamiento ya estaba en marcha, al menos, que se sepa, desde marzo de 1992. Concluimos por tanto que no hay ninguna evidencia, ni estructural ni debida a ciclos de hielo-deshielo ni por gelifluxión que puedan ser responsables directos de la activación de 1992. En cuanto a la influencia de este fenómeno en la reactivación de 2013 sucede lo mismo, no hay temperaturas bajo cero continuadas ni días que las mantengan, pero sí el hecho de que solo en 44 días (los 31 días de enero y hasta el 13 de febrero en que se detectan las primeras inestabilidades) la precipitación superara los 473 l/m², lo que supone aproximadamente 2/3 de la precipitación media anual para el periodo 1991-2020 registrados por la Estación Meteorológica de Pamplona MAN situada a unos 4 km de Arre.

5.3.6. El nulo papel de la sismicidad en la experiencia de Arre.

Aunque el año 2013 se conoció como "el año de los terremotos" por la cantidad de temblores que fueron sentidos por la población de Navarra, especialmente en los barrios sur de Pamplona y los pueblos de alrededor de la Sierra de El Perdón, el año 2020 lo superó en cantidad, intensidad y magnitud, pero desde el este. Toda la energía liberada por el enjambre sísmico de la Sierra de El Perdón de 2013 equivaldría a un terremoto de magnitud ML4,8. El enjambre sísmico del sur de Pamplona de 2013 comenzó el 14 de febrero con cinco pequeños terremotos de magnitud 1,3 a 2,0 muy someros bajo Uterga, Adiós y Biurrun y no fue hasta el día 25 de febrero con un evento de magnitud 2,3 que la población de los barrios sur de Pamplona comenzó a sentir los temblores.

Avanzados unos días en que la frecuencia e intensidad aumentaron, el Gobierno de Navarra consultó al IGN y publicó una nota de prensa en la que explicaba que los hipocentros eran muy someros, con sismogramas que denotaban el colapso de cavernas salinas.

Bajo la Sierra de El Perdón se explotaron sales de potasa hasta 1997 y muchas de las oquedades que quedaron siguen produciendo fenómenos de subsidencia tras episodios de fuertes precipitaciones. Volveremos sobre ello más adelante. El Perdón se encuentra al suroeste de la ciudad y Arre al noreste, a unos 20 km en línea recta de los primeros epicentros. Justo en el lado opuesto.

Dimos por concluido el enjambre en julio de aquel año, se habían producido algo más de 300 eventos de los que una veintena fueron sentidos por la población si incluimos áreas más al norte. En el mapa de la figura 5.18 se puede ver la situación de Arre al noreste de Pamplona y los epicentros de la Sierra de El Perdón al suroeste a unos 20 km. En la siguiente figura 5.19 se puede ver la lista de los 15 eventos sísmicos en un diámetro de unos 30 km alrededor de Arre con M>2 o Intensidad >II que se produjeron en todo el año 2013. Ninguno de ellos es anterior a la reactivación del deslizamiento. Por tanto, podemos concluir que la sismicidad nada tuvo que ver como desencadenante de la reactivación del deslizamiento de aquel año 2013 de Arre, aunque sí pudo agravar la situación una vez reactivado este deslizamiento que cada cierto tiempo da señales de seguir su itinerario de movimientos.

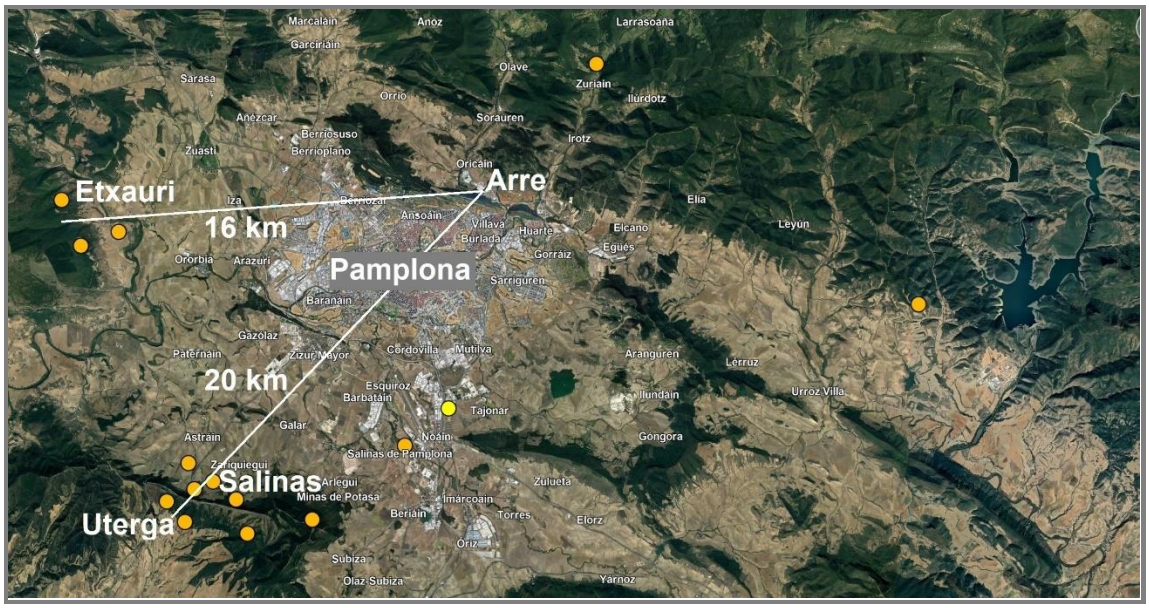


Figura 5.18. Situación de Arre con respecto a los terremotos M>2 o Intensidad >II en 30 km alrededor de Arre. Los más enérgicos ML4,2 del 23 de marzo y del 20 de abril, ambos con intensidad IV, se encuentran entre 16 y 20 km de Arre. El primer terremoto sentido por la población con intensidad III, fue de magnitud M2,3 y se produjo el 25 de febrero. Para esa fecha el deslizamiento de Arre llevaba casi dos semanas reactivado y ya se habían tomado medidas de precaución. Sentinel 2 (Google Earth).

Fecha	Prof. (km)	Intensidad	Magnitud	Localización
25/02/2013	3	III	2,3	LIZOAIN
18/03/2013	0	III	3,4	UTERGA
18/03/2013	1	II-III	3,0	SALINAS DE PAMPLONA
18/03/2013	0	II-III	3,0	UTERGA
19/03/2013	0	II-III	3,0	SALINAS DE PAMPLONA
21/03/2013	9	III	3,6	CIRIZA
22/03/2013	0	III	2,8	ETXAURI
23/03/2013	0	IV	4,2	ETXAURI
04/04/2013	0	III	2,5	BERIAIN
20/04/2013	0	IV	4,2	SALINAS DE PAMPLONA
27/04/2013	0	III	3,0	UTERGA
03/05/2013	0	III	1,9	BERIAIN
13/05/2013	2	III	2,5	BERIAIN
20/06/2013	0	III	2,4	UTERGA
23/10/2013	0	III	3,0	OLAVE

Figura 5.19. Lista de los 15 terremotos M>2 o Intensidad >II en 30 km alrededor de Arre. Los más enérgicos ML4,2 del 23 de marzo y del 20 de abril, ambos con intensidad IV, se encuentran entre 16 y 20 km

5.3.7. El efecto de las lluvias.

Si observamos la meteorología (precipitaciones acumuladas, recogidas por la estación del Aeropuerto de Pamplona Noáin (Latitud: 42.7775 Longitud: -1.649722 Altitud: 459 m) desde 1974 hasta 2022, vemos que 2013 sigue manteniéndose como el año más lluvioso, siendo el único que supera los 1000 l/m², concretamente 1030,7 en Noáin y 1227,1 l/m² en la Estación de la Mancomunidad de Pamplona-MAN mientras que 1992, con 746,7 en Noáin (902,8 en Pamplona-MAN) ocupa la posición 12 de 34 (figura 5.20). En los registros de la estación de Noáin faltan varios años, consultando estaciones cercanas se comprueba que no suponen ningún cambio para 2013 y para 1992 una pérdida o ganancia de uno o dos puestos, dependiendo de la estación consultada.

La media del período considerado es de 680,9 l/m², congruente y ligeramente inferior que los 782,9 l/m² del periodo 1880-2022 en la Estación de la Mancomunidad (Pamplona MAN) un poco más al norte (figuras 5.20, 5.21 y 5.22). Sin embargo, el deslizamiento de 1992 viene precedido por precipitaciones abundantes en el trimestre de septiembre, octubre y noviembre de 1991 (figura 5.21), con casi 330 l/m², más de la mitad de todo el año 1991, seguido de un trimestre que va de diciembre de 1991 con enero y febrero de 1992, bastante secos como únicos meses con escasos días que alcanzaran temperaturas bajo cero.

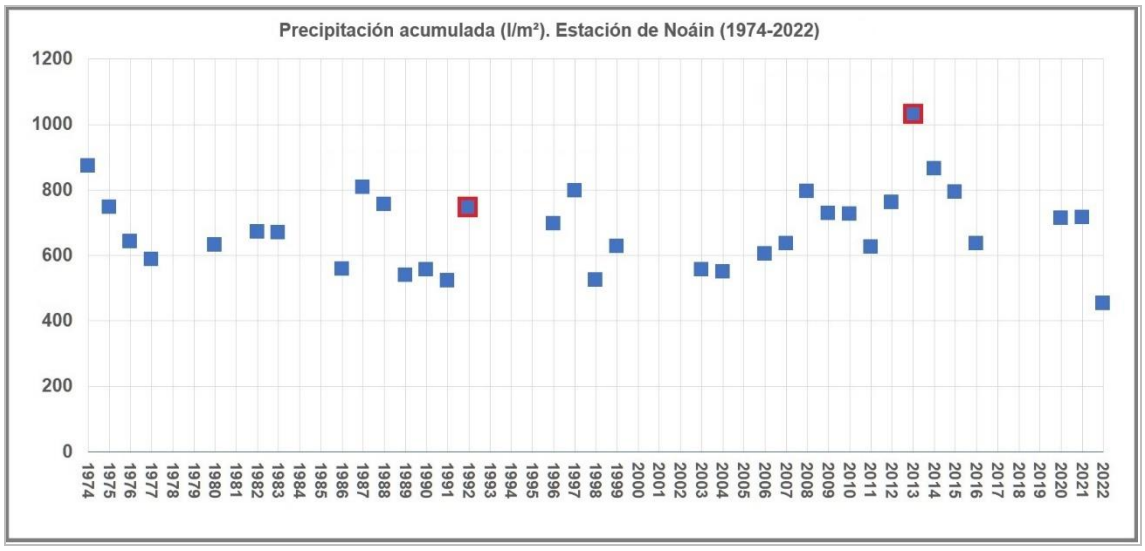


Figura 5.20. Precipitación acumulada en l/m² por año de la serie histórica 1974-2022 de la Estación de Pamplona-Aeropuerto de Noáin. Gobierno de Navarra.

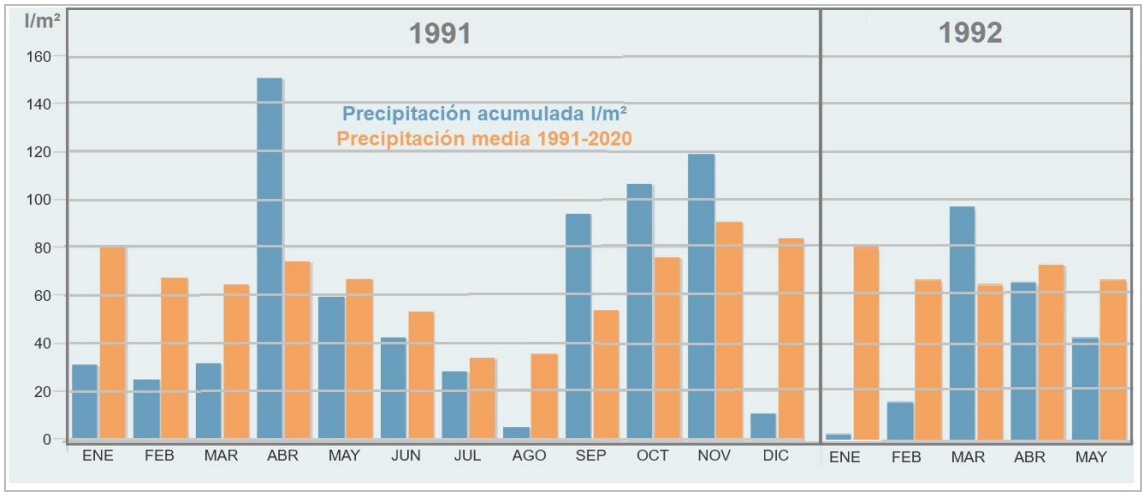


Figura 5.21. Precipitación acumulada en l/m² por año de la serie 1991-1992 de la Estación de Pamplona-Mancomunidad (MAN). Gobierno de Navarra. Como puede verse, en el trimestre septiembre, octubre y noviembre de 1991 en la zona central del gráfico, ya se estaba gestando la inestabilidad, la cual avanzaría lentamente hasta hacerse notoria a principios de 1992 con la caída de rocas de la escollera y el abombamiento de la calzada. Posteriormente, el deslizamiento alcanza los niveles de rotura y avance en el contacto suelo-roca que dan lugar a la aparición de las enormes grietas en el Monte Ezkaba frente a Arre.

Es oportuno indicar que la precipitación acumulada anual en la Zona Media de Navarra, varía desde 1000 a 600 l/m² de norte a sur. Por tanto, el año 1992 se encontraría dentro de los valores medios anuales históricos, pero el trimestre de septiembre a diciembre de 1991 registró valores por encima de la media.

También es importante resaltar que, en 1992, visto el análisis geotécnico que ofrece una instantánea de la precaria estabilidad del conjunto suelo-escollera, no eran necesarias unas lluvias históricas como las de 2013 para activar el deslizamiento. Lo más probable es que en el trimestre septiembre, octubre, noviembre de 1991 ya hubiesen comenzado a deformarse la ladera, la carretera y la escollera y que a finales de ese año y principios de 1992 el proceso ya estaba en marcha. Una vez detonada la inestabilidad, a falta de lluvias en diciembre y en enero, el proceso superó el punto de no retorno y la lenta deformación avanzó hasta hacerse notoria con la caída de rocas de la escollera, los abombamientos de la calzada y las enormes grietas descritas y fotografiadas.

El año 2013, conocido como "año de los terremotos" fue desbancado del pódium en este aspecto referente a la sismicidad por el año 2020 con una sismicidad localizada al este de Pamplona mucho más enérgica, duradera e intensa. Sin embargo, el año 2013, fuera del ámbito de los medios de comunicación o del lenguaje popular, sí pasaría a la historia como el año de los grandes aguaceros, el año del diluvio o el año de los deslizamientos. En cuanto a 2013 y la lluvia, este año presentó valores por encima del 50% de la serie histórica 1974-2022 y un 32% por encima de la media para la serie 1880-2022 si tomamos como referencia la Estación de Pamplona MAN. Es el récord histórico navarro y nunca se ha vuelto a superar

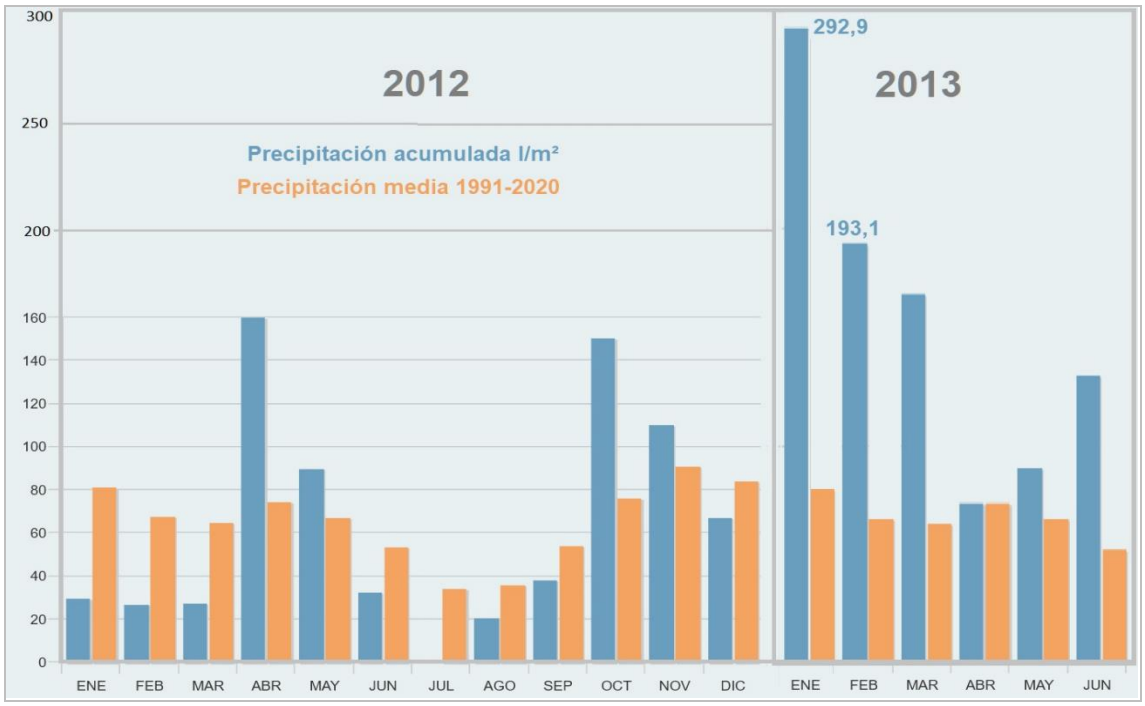


Figura 5.22. Precipitación acumulada en l/m² por año de la serie 2012-2013 de la Estación de Pamplona-Mancomunidad (MAN). Gobierno de Navarra. Como puede verse, octubre de 2012 es un mes de precipitaciones importantes que duplica la media, pero lo sucedido entre enero y marzo de 2013 no tenía precedentes en los registros históricos que se remontan a 1880.

En ambos casos, 1992 y 2013, las intensas precipitaciones de los meses previos al deslizamiento sugieren que fue este fenómeno climático el que por sí solo desencadenó otra vez las inestabilidades previamente preparadas por las actuaciones humanas. Sin embargo, cuando se produjo la reactivación de 2013 ya se habían tomado medidas de estabilización dos décadas antes, entre las que hemos enumerado destacamos la excavación y retirada de material de la parte alta. Este proceder que incrementaría sensiblemente el factor de seguridad no tuvo el efecto deseado en 1992, pero de ello estábamos advertidos, en el caso de Yesa profundizaremos en este conocido aspecto. Las medidas a tomar para frenar los movimientos tuvieron que ser ampliadas una vez más. No cabe duda de que las impresionantes lluvias récord navarras (más de una década después lo siguen siendo) fueron el desencadenante de aquella reactivación, como lo fueron por la práctica totalidad de la geografía navarra, tal y como se recoge en la *Memoria 2013 del Departamento de Obras Públicas del Gobierno de Navarra*. Ahora, la ladera sigue controlada y es de esperar que mucho mejor preparada para aguantar un evento meteorológico como el de 2013. En la anterior figura 5.22 se puede ver que ya en octubre de 2012 las lluvias duplicaron la media 1991-2020 y que lo sucedido en enero, febrero y marzo de 2013 no tenía precedentes conocidos.

El año 2013 supera más de una década después todos los récords de lluvias registrados en Navarra desde que hay registros. Algunos de los deslizamientos de aquel año fueron enormes, como el de Subiza, de unos 800 x 500 m, que podemos ver en la figura 6.46 y del que hablaremos más adelante en relación a la sismicidad, el de Ilurdotz, que requirió la evacuación de personas y animales en un barrio entero. También hubo que actuar de urgencia en inestabilidades menores en aquel *año de los deslizamientos* en Ostiz, Guirguillano, Ujué, Abárzuza, Miranda de Arga que quedó aislada, Larrau, Beorburu, Nardués, Ochagavía, Sartaguda, Ribaforada, Azpiroz, Burutain, Huarte-Pamplona, Rocaforte, Ansoain, Cirauqui, Sangüesa, Lizoain, Javier, Lezaeta, Eusa, Obanos, Villanueva de Yerri, Almandoz, Arandigoyen, San Martín de Unx, Pueyo, Mendigorría, San Cristobal, Carcastillo, Izurdiaga, Berbinzana… Pero, sin duda, los que más preocuparon y siguen preocupando a la sociedad navarra por sus dimensiones, su envergadura y su trascendencia social y económica fueron los deslizamientos de Yesa. A principios de 2013 la ladera derecha de Yesa llegó a deslizarse en algunas zonas unos 30 cm. Cientos de vecinos fueron desalojados de sus viviendas y, aunque las autoridades prometieron hasta el otoño de ese mismo año que volverían a ellas *cuando se alcanzase la estabilidad*, nunca volvieron. Finalmente fueron forzosamente desalojados, expropiados e indemnizados. Entonces, el estribo derecho de la vieja presa de hormigón se levantó cerca de 1,5 cm, se activó el escenario de Alerta 1 para la ciudad de Sangüesa y comenzó un periplo de estudios y actuaciones que llevaron a paralizar temporalmente la obra en el otoño de 2023 hasta disponer de un cuarto modificado del proyecto que se aprobó en febrero de 2016.

5.4. La ladera derecha de Yesa.

Actualmente (enero de 2024) las obras para el recrecimiento de la presa de Yesa, que comenzaron en 2001, permanecen paralizadas a la espera de un cuarto modificado aprobado en febrero de 2016. Según la expresidenta de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE): *"… en este momento se está tramitando una cuarta modificación por razones técnicas con el objetivo de dar una mayor consolidación de la ladera de la margen derecha."* (Dolores Pascual, expresidenta de la CHE, Pamplona 21 de noviembre de 2023. Declaraciones recogidas por el diario La Vanguardia).

Ficha técnica de Yesa

Deslizamientos recurrentes en las dos últimas décadas (más de una docena superpuestos, retirados, reactivados o enterrados) en un total de unos 11.900.000 m³ removidos en materiales de los perfiles geotécnicos E1, E2 y C. Graves afecciones a infraestructuras que fueron reconstruidas, luego derribadas y finalmente retiradas. Dos urbanizaciones con 104 viviendas quedaron arruinadas, fueron forzosamente expropiadas y demolidas. Se produjo un movimiento del estribo derecho de la presa vieja y se activó el estado de Alerta-1 para la ciudad de Sangüesa. Se siguen observando desplomes que de cuando en cuando se producen por varias causas, algunas son más o menos conocidas y otras siguen en estudio, al igual que el impacto económico y social derivado.

5.4.1. Situación actual

Si el deslizamiento de Arre suponía en volumen unos 150 deslizamientos como el de Cemboráin, el conjunto de los que configuran el deslizamiento general de Yesa serían unas 160 veces el de Arre, es decir, unos 24.000 deslizamientos como el de Cemboráin. En la ladera derecha de Yesa permanecen latentes o activos varios deslizamientos de manera simultánea desde hace décadas; se pueden englobar en un deslizamiento general heterogéneo con comportamiento irregular que, a veces, repta al completo y otras lo hace sensiblemente por alguna zona concreta.

Especialmente desde 2013 se agudizaron los problemas, año en que, como sucedió por toda la geografía de Navarra, las lluvias históricas produjeron la desestabilización de toda la ladera derecha de Yesa, tal y como hemos visto en el caso de Arre y en más de 30 localidades contempladas en la *Memoria de 2013 de la Sección de Geología y Geotecnia de la Dirección General de Obras Públicas del Departamento de Fomento del Gobierno de Navarra.*

Decenas de laderas, taludes y excavaciones sufrieron algún grado de inestabilidad, desde casi o nada importantes a evacuaciones de barrios enteros como sucedió en Ilurdotz o en Yesa, pero en ese caso, los vecinos no pudieron volver nunca más.

Debemos subrayar, no obstante, que también la gran mayoría de los miles de desniveles con laderas que se hicieron para ubicar obras públicas, urbanizaciones o simplemente ya estaban incrustadas en un medio que con el tiempo pasó de ser un medio natural a humano, no sufrieron inestabilidades, porque a pesar de tanta lluvia, las condiciones tensionales siguieron siendo seguras o las medidas tomadas tras actuaciones humanas fueron acertadas en la mayoría del territorio. El caso de Yesa representaría el de mayor impacto económico y social en Navarra, no solo por su volumen y por agravarse de manera irreversible ese año 2013, sino que, desde que se tiene conocimiento de estos fenómenos, lo es tanto por el volumen puramente geológico deslizado (casi una docena de millones de metros cúbicos) como por la huella económica, la ruina con expropiación forzosa y derribo de más de un centenar de viviendas, el levantamiento dentro del propio deslizamiento de la presa de hormigón armado o la conmoción que deja en la sociedad, especialmente en las localidades situadas aguas abajo del Río Aragón. No cabe duda de que las decenas de informes que surgieron tras ese acontecimiento de 2013, las enormes inyecciones de dinero y recursos durante los 23 años de obras desde que el exministro Jaume Matas pusiera la primera piedra, indicaban que algo no había salido bien y, por lo tanto, alguna actuación o incomprensión del medio geológico había predispuesto a la ladera derecha para superar en aquellos meses de lluvias récord de 2013 unos movimientos de más de 5 cm/mes. En total, en 2013 la ladera que incluía el estribo derecho de la presa, se movía como un glaciar de roca que superó los 30 cm. El movimiento se ralentizó en los años siguientes hasta hacerse prácticamente imperceptible de manera global, aunque realmente nunca paró y vive momentos de aceleración que vamos a intentar analizar.

La ladera derecha incluye lóbulos durmientes que de cuando en cuando se reactivan por diferentes causas. La mayoría de ellas siguen en estudio. Además de las causas naturales (lluvias, sismicidad, ciclos hielo-deshielo) y artificiales (excavaciones y obras) como las vistas en casos anteriores, en el caso de Yesa hay que añadir el efecto de las fluctuaciones y cambios en las presiones intersticiales y subpresiones inducidas por los cambios en el nivel de agua embalsada.

Se han podido contabilizar más de una decena de deslizamientos en los diferentes estudios realizados, desde pequeños desprendimientos de baja entidad, algunos ya retirados, otros excavados o enterrados, hasta los dos mayores cuyas superficies de rotura se han descrito en varias ocasiones en la amplia literatura sobre la estabilidad de las laderas de Yesa. El más voluminoso sería el que cabalga sobre la *Superficie Inferior de Rotura* (SIR) hasta unos 117 m de profundidad máxima. Transporta sobre él otra masa que se desliza desde la superficie del terreno hasta unos 60 m de profundidad por la denominada *Superficie Principal de Rotura* (SPR) que es la que mayor tasa de movimiento presenta. Ambos guardan una cierta geometría estructural. Nuestra aportación es que este modelo ha podido variar debido al avance del deterioro de los materiales de C involucrados.

También es de destacar el denominado *deslizamiento de El Inglés*; se trata de un deslizamiento rotacional del que se tiene constancia desde los primeros informes de la presa aún existente, que se ha venido activando en diferentes épocas y ha sido objeto de varias actuaciones a lo largo de la historia de las obras de Yesa. Hay menciones incluso durante la construcción de la presa, aunque el más significativo ocurrió durante el primer desembalse de 1960 tras un descenso en el nivel del agua de unos 10 m. Hablamos de un volumen total removido y latente cercano a los 11.900.000 m³.

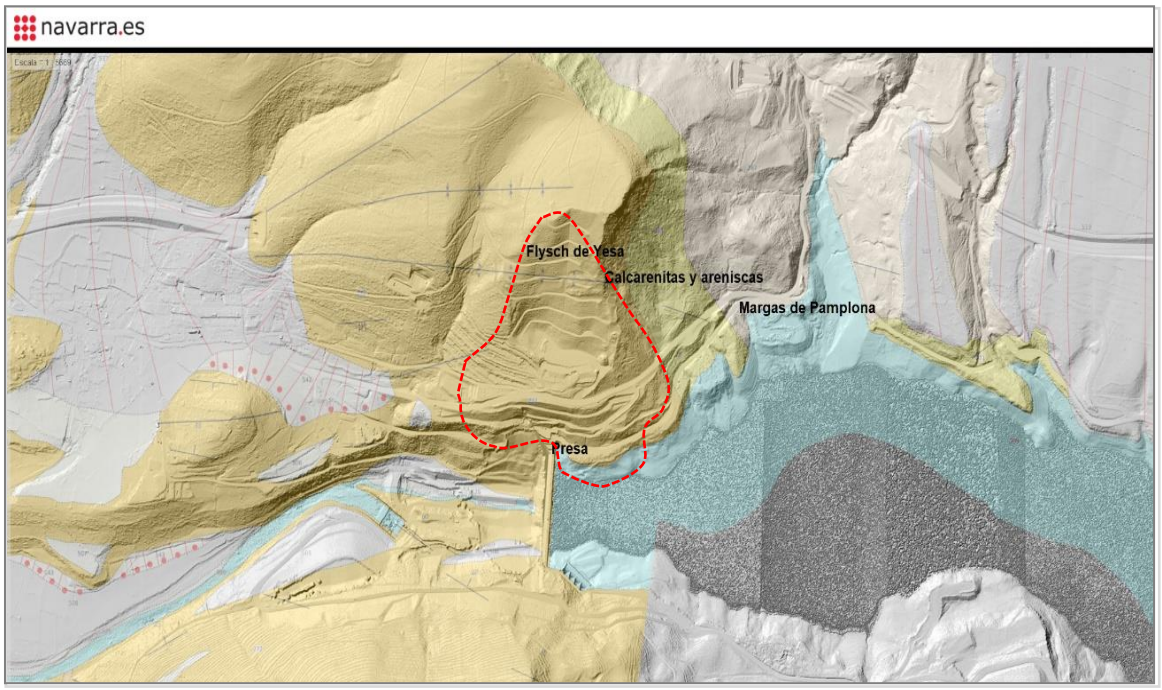


Figura 5.23. Límites del área removida global (en rojo) que incluye los lóbulos superpuestos en la ladera derecha de la presa de Yesa sobre la formación biarritziense de Margas de Pamplona aflorando masivamente al este (beige), margas con calcarenitas y areniscas sobre ellas (amarillo) y Flysh de Yesa (naranja) como perfil geotécnico de transición a techo C de la formación eocena de Margas de Pamplona E1.

Este movimiento variable e irregular se puede seguir desde febrero de 2023, ya que disponemos de los datos del European Ground Motion Service (EGMS) a partir de las mediciones del satélite Sentinel-1 del Proyecto Europeo Copernicus (figura 5.25)[12].

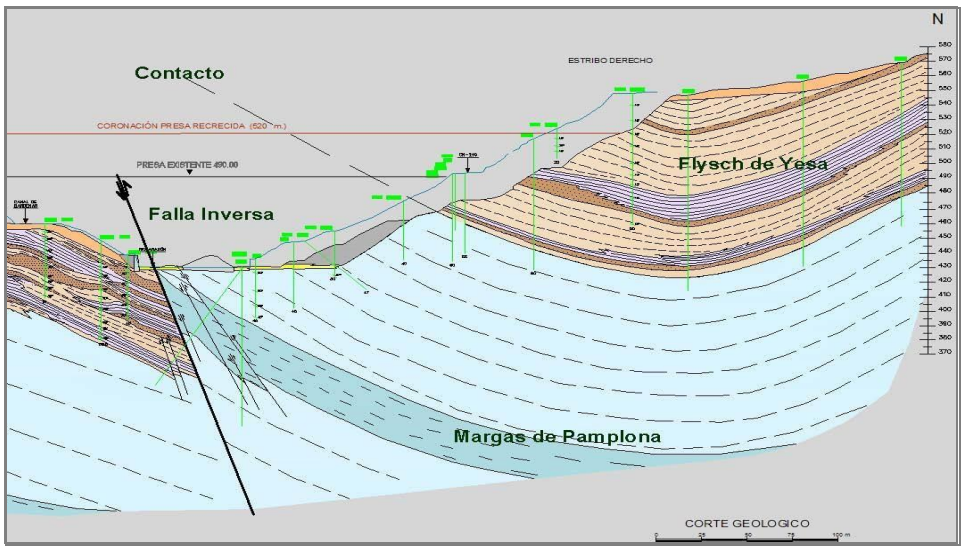


Figura 5.24. Se puede ver que los principales deslizamientos se interpretaron afectando al Flysch de Yesa desde su contacto con las Margas de Pamplona, desde el contacto entre éstas y el Flysch de Yesa se desarrollaron con el tiempo varios deslizamientos a diferentes profundidades. No podemos descartar que el avance de la fracturación y brechificación haya modificado con el tiempo ese modelo de deslizamiento hacia otro sin que la parte baja contrapendiente haya sido también incluida en el deslizamiento general. Esta parte se amplía en el texto. Fuente: Modificado nº3, CHE.

[12] Entre los servicios que ofrece Copernicus está el European Ground Motion Service (EGMS). Se basa en el análisis interferométrico multitemporal de imágenes de radar del satélite Sentinel-1 a máxima resolución. Esta técnica permite identificar puntos de medición contrastados y confiables para los cuales se extraen valores de velocidad de movimiento del suelo y series temporales de deformación. Dichos puntos de medición suelen coincidir con edificios, estructuras artificiales, áreas sin vegetación en general y referencias sin cambios forzados por grandes obras o modificaciones del medio que los propios algoritmos eligen o rechazan. Los datos de los sistemas globales de navegación por satélite se utilizan también como calibrado de las mediciones interferométricas. Este servicio amplía así las herramientas disponibles para ejercer el oficio de las ciencias de la Tierra. Copernicus comenzó a recopilar datos del movimiento del terreno en 2016 y se divide en cuatro componentes principales: 1) global, con datos bio-geofísicos para todo el planeta, 2) paneuropeo, centrado en esos mismos datos para Europa con alta resolución, 3) local, para puntos críticos en zonas propensas a desafíos o problemas ambientales específicos y 4) imágenes y datos de referencia a disposición de los investigadores como bases de datos in situ. Desde finales de 2022 disponemos de datos en línea y desde febrero de 2023 de una enorme base de datos para exploración y explotación adquiribles en formatos estándar. Así queda incluido el uso del suelo, del territorio, las características y los cambios de la cubierta terrestre, el estado de la vegetación, el ciclo del agua y las variables energéticas. Cualquier ciudadano u organización de cualquier lugar del mundo puede acceder al servicio de ciencias de la Tierra de Copernicus de forma gratuita, completa y abierta. Copernicus promueve su utilización y el intercambio de información y datos. No hay restricción en el uso, reproducción o redistribución de la información y datos. El Servicio Europeo de Movimiento Terrestre (EGMS) es de libre acceso para cualquier ciudadano u organización y brinda la oportunidad sin precedentes de estudiar los peligros geológicos y la deformación inducida por las actividades humanas.

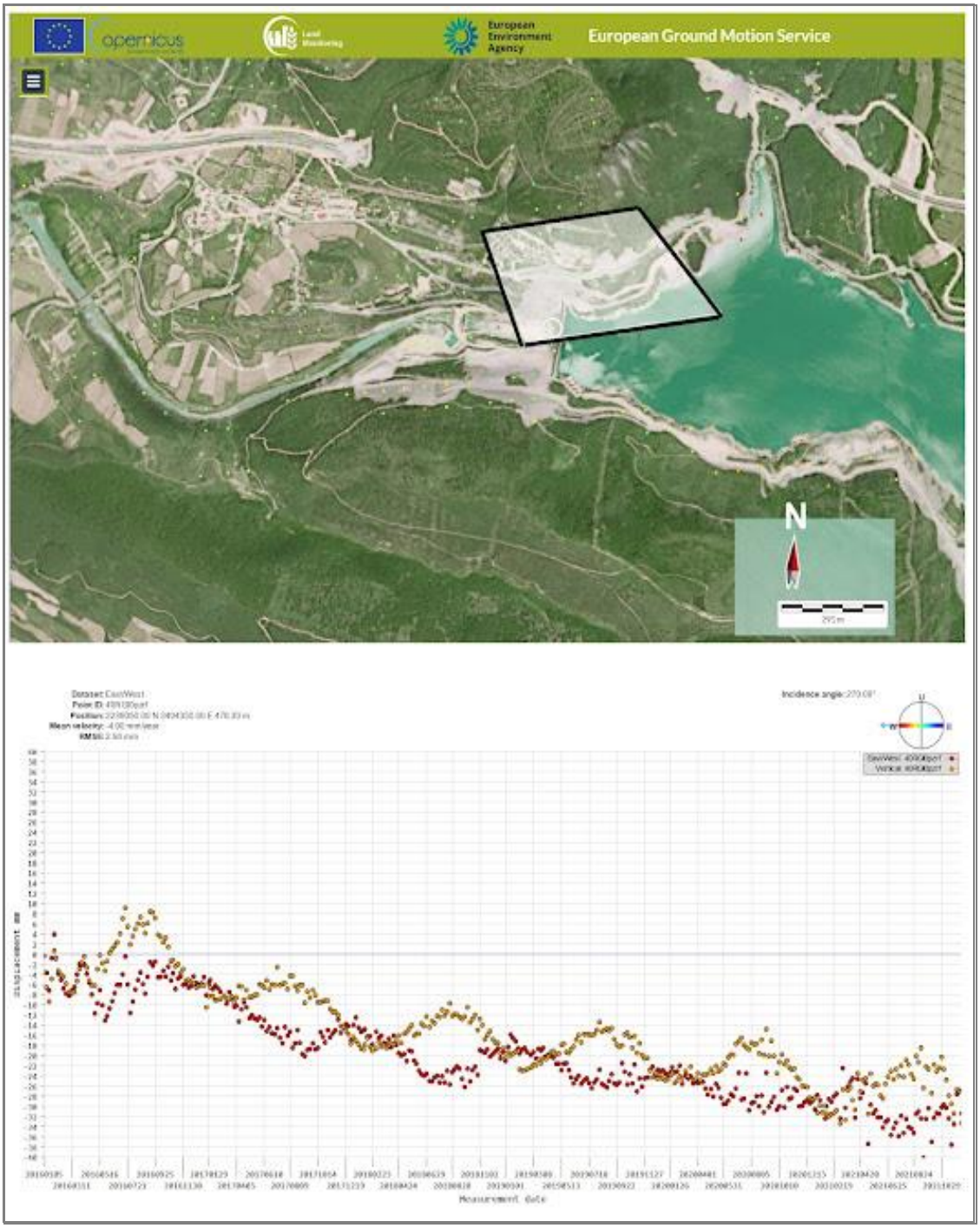


Figura 5.25. Movimientos horizontales (E-O en rojo) y verticales (naranja) integrados de 31 puntos seleccionados en la ladera derecha de Yesa (área encuadrada arriba) que muestran un movimiento anual en vertical y este-oeste cercanos a 5-10 mm/año. Se puede apreciar de manera significativa la influencia de los ciclos de embalse y desembalse. Periodo de 2016 a noviembre de 2021. Fuente: European Ground Motion Service (EGMS), Proyecto Copernicus.

En la siguiente figura, extraída del informe de 2019 del Gobierno de Navarra realizado por la empresa Geoconsult y el profesor Luciano Picarrelli de la Universidad de Nápoles, podemos ver superpuestos algunos de los deslizamientos anteriormente comentados y mejor conocidos. El más extenso es el que deslizaría por la SIR hasta 117 m de profundidad incluyendo la masa transportada que también desliza por encima a unos 60 m por SPR sobre él. En rojo el deslizamiento de El Inglés y en verde deslizamientos localizados en diferentes épocas de entidad más superficial.

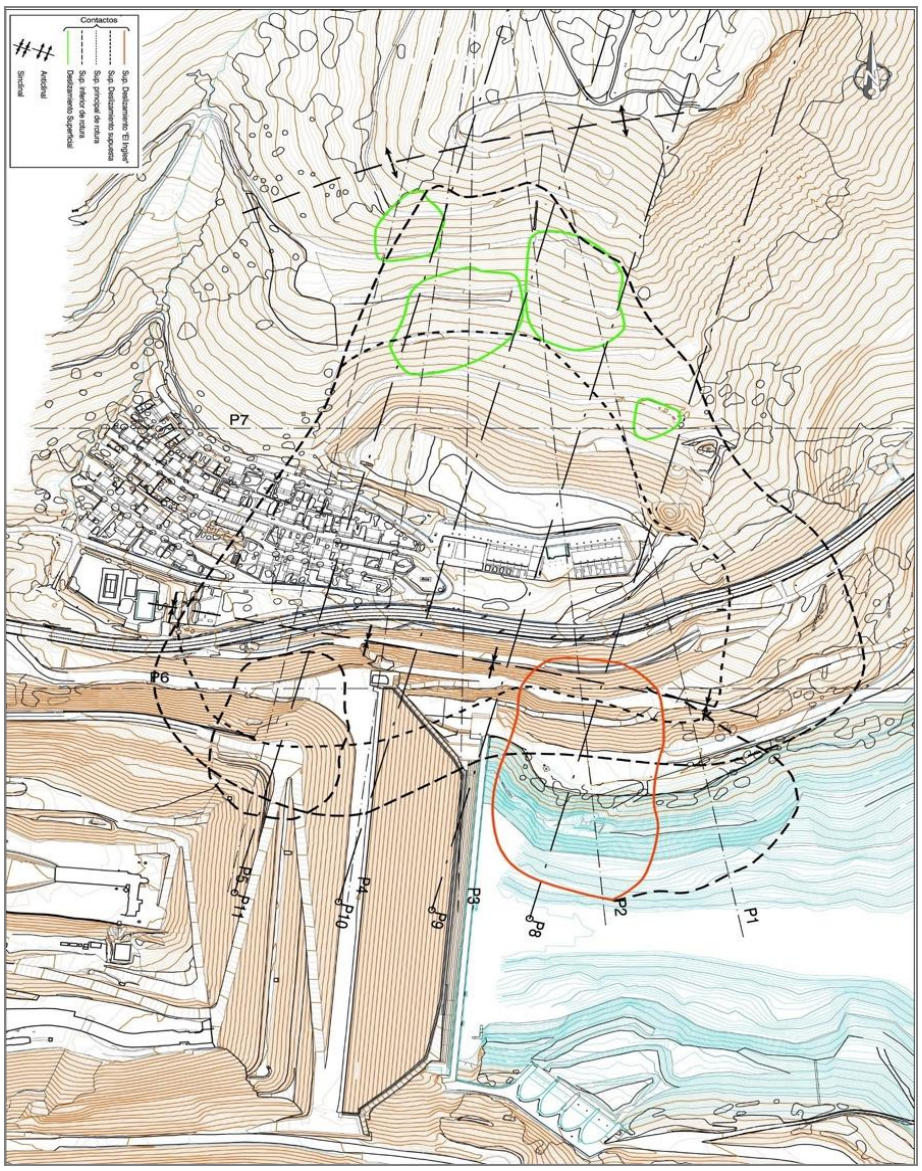


Figura 5.26. Principales masas en movimiento detectadas en 2019 y recogidas en el informe encargado a través del Gobierno de Navarra a la empresa Geoconsult y al profesor Luciano Picarrelli de la Universidad de Nápoles. En rojo se puede ver el deslizamiento de El Inglés.

Es importante recordar algunos de los episodios de deslizamientos más destacados y su cronología. Todos ellos fueron recogidos en informes dedicados y que desde el evento de 2013 han sido reinterpretados, por lo que podemos afirmar que son cada vez mejor conocidos:

- 1928 - 1933: Primeras manifestaciones de inestabilidad (deslizamiento de El Inglés).
- 1960: Reactivación del deslizamiento de El Inglés (tras primer llenado y desembalse).
- 1964: Reactivación del deslizamiento de El Inglés (tras llenado y desembalse).
- 2006: Desplazamientos verticales en bloques de hormigón de la presa.
- 2011: Primeros indicios de inestabilidad detectados en la auscultación.
- 2012: Descalce para obras de apoyo de la nueva presa en la base con nuevos movimientos.
- 2013: Deslizamiento de grandes dimensiones de unos 20 cm/mes. Comienzan las obras de emergencia. La vieja presa se levanta cerca de 1,5 cm y se desaloja a los vecinos de las urbanizaciones. Escenario de Alerta 1 en Sangüesa.
- 2014: Desplome de la zona del estribo (unos 30.000 m^3).
- 2014-2019: El movimiento es calificado como lento y extremadamente lento.
- 2019: Se abren grietas en la zona superior tras las lluvias del otoño.

La evolución del perfil típico de la ladera y las cotas de coronación de las presas vieja y nueva, se pueden ver en la siguiente figura 5.27 extraída del tercer modificado del proyecto. Las obras para la acogida del estribo derecho y las primeras labores de intento de estabilización serían los detonantes principales del desarrollo de SPR y de SIR en 2012 y se aceleraron en 2013 con las lluvias, disminuyendo cuando éstas remitieron.

Más tarde, la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) retiró el material de unos 300 m a pie (en la parte baja) de la ladera propiciando la desestabilización de una enorme masa que entró en movimiento. La ladera ya se encontraba en una situación comprometida, e incluso de equilibrio estricto.

Hubo varios avisos, están recogidos en movimientos desde 1998. La propia CHE determinó entonces como detonante de la desestabilización tanto a esa excavación como a las labores de estabilización (sic) afirmando que su causa próxima residía *"en la excavación realizada para cimentar el estribo derecho de la presa y estabilizar dicha ladera ante la solicitación que supondrá su llenado y vaciado periódicos en fase de explotación"* tal y como certificaron sus técnicos en el informe CHE 09-01-2013. Es en ese momento cuando se traspasó el punto sin retorno.

Hemos visto en el caso de Arre cómo en 1992, y luego en 2013, se alivió peso de las zonas media y alta con una sensación de estabilidad propiciada por la retirada de material que, una vez rota la ladera, no es garantía de estabilidad. Esto también sucedió en Yesa, pues como se hiciera en 1960 con el deslizamiento de El Inglés y en ocasiones posteriores que se recogen en la amplia bibliografía, esa *falsa estabilidad* fue siempre pasajera.

No se debe ni se puede considerar definitiva atendiendo a la memoria del 100% de las experiencias previas, no solo en Arre u otras circunscripciones, especialmente si consideramos las indicaciones dadas por los primeros estudiosos de la estabilidad de las laderas de la propia obra de Yesa como fueron René Petit o José Antonio Jiménez Salas en los años sesenta del siglo XX. También el profesor Luciano Picarelli de la Universidad de Nápoles, observando los acontecimientos se dio cuenta tanto de su relativa efectividad como de su capacidad de alivio temporal.

La siguiente figura 5.27 (Perfil 9 del informe del Gobierno de Navarra) muestra superpuesta la topografía de varios años: el de 2003 en verde claro, 2007 en verde oscuro y 2012 en verde botella. En mayo de 2013 (morado) se puede ver la primera gran actuación de emergencia consistente, sobre todo, en la retirada de rocas de la zona alta tras el movimiento de un par de decímetros. En noviembre de 2013 (magenta) la segunda fase de retirada de peso.

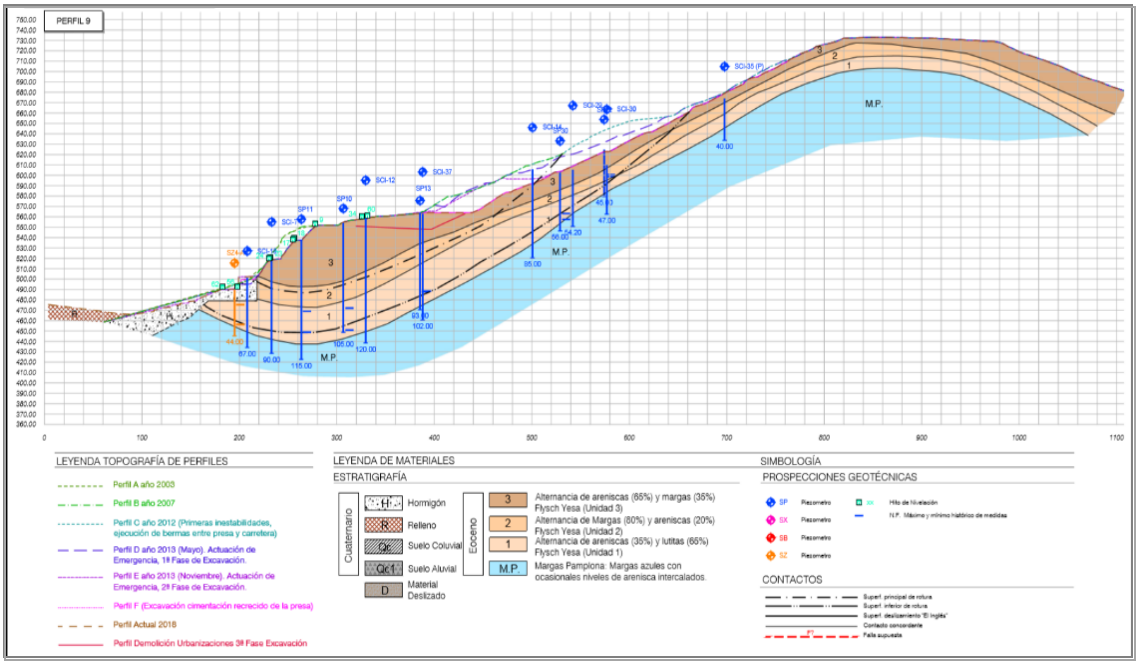
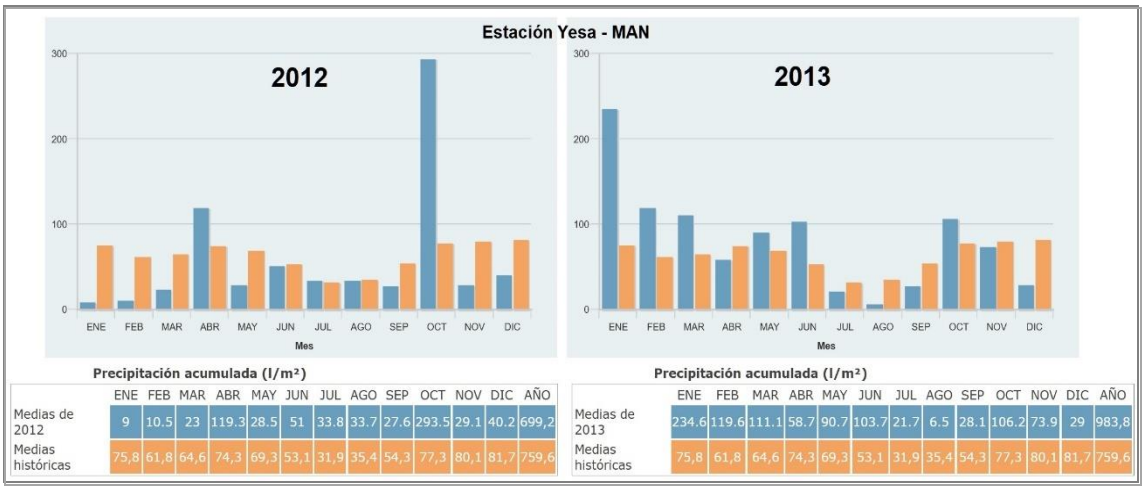


Figura 5.27. Corte del terreno considerados en el estudio que realizó Geoconsult para el Gobierno de Navarra. Se pueden ver los perfiles modificados que van desde 2003 a 2018. También en líneas intermitentes negras podemos ver las SPR y SIR guardando un segmento contrapendiente en la parte baja (de carácter estructural acomodado a la estructura sinclinal) que se sumaría a las fuerzas estabilizadoras. Se trata del denominado Perfil 9 (Geoconsult, Gobierno de Navarra 2019).

Ninguna de aquellas medidas consiguió parar definitivamente las deformaciones, éstas siguieron produciéndose con un movimiento *"extremadamente lento"* (Cruden, D.M. y Barnes D.J. 1996). El profesor Picarelli observa en 2019, al igual que los autores mencionados anteriormente, que dichas excavaciones en la parte alta no fueron el principal motivo de la desaceleración del movimiento, sino parte de un alivio subordinado al régimen de lluvias y posterior movimiento de agua subterránea:

> *"Estas excavaciones contribuyeron ciertamente a la estabilización de la zona, a pesar de que se produjo una fuerte disminución de la tasa de desplazamiento en el mes de febrero, justo después del cambio de régimen hidrológico…".* (Luciano Picarelli, Informe para el Gobierno de Navarra, 2019).

En efecto, al igual que en el caso de Arre en 2013, la fuerte aceleración de las deformaciones detectadas en Yesa que se activan a partir de las fuertes lluvias de octubre de 2012 (293,5 l/m² recogidos en la estación de Yesa-MAN) se dieron cuando ya se había ejecutado una enorme excavación de unos 300 m en la base de la ladera para acoger el estribo y "estabilizar la zona" (CHE 09-01-2013) y ya se había detectado movimiento. Las copiosas lluvias de enero de 2013 (234,6 l/m²) se suman al efecto desestabilizador que ya se había puesto en marcha. Es entonces cuando comienza una nueva retirada de peso de la parte alta, pero esta vez mucho mayor que en los casos históricos previos, lo cual, como bien apunta el profesor Picarelli (2019), jugaría un papel secundario con respecto al régimen de lluvias, por lo que la posterior desaceleración del movimiento se debe especialmente al hecho de que cesaran las lluvias que cuadruplicaron la media histórica (octubre de 2012) o la triplicaron (enero de 2013).



Precipitación acumulada (l/m²)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO
Medias de 2012	9	10.5	23	119.3	28.5	51	33.8	33.7	27.6	293.5	29.1	40.2	699,2
Medias históricas	75,8	61,8	64,6	74,3	69,3	53,1	31,9	35,4	54,3	77,3	80,1	81,7	759,6

Precipitación acumulada (l/m²)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO
Medias de 2013	234.6	119.6	111.1	58.7	90.7	103.7	21.7	6.5	28.1	106.2	73.9	29	983,8
Medias históricas	75,8	61,8	64,6	74,3	69,3	53,1	31,9	35,4	54,3	77,3	80,1	81,7	759,6

Figura 5.28. Precipitaciones (l/m²) recogidas en al Estación Yesa-MAN en 2012 y 2013. Gobierno de Navarra. Obsérvese que octubre de 2012 cuadrupica la media histórica 1991-2020 a pesar de que 2012 se considere un año más seco de lo normal. Enero de 2013 la triplica.

El área y volumen total afectados por los deslizamientos principales serían entonces para el deslizamiento profundo que sustenta al principal, SIR+SPR: una superficie de 237.418 m² con una máxima profundidad máxima de 117 m y un volumen de 11.900.000 m³. Sólo el deslizamiento de El Inglés afectaría a unos 500.000 m³, unas siete veces el volumen removido en el deslizamiento de Arre.

La excavación ejecutada en 2012 para la cimentación del estribo derecho y las labores de estabilización que, como indicó la CHE, sería la causa última que provocó la inestabilidad, es decir, la rotura irreversible o "punto de no retorno" sería de unos 300.000 m³. El volumen retirado tras las obras de emergencia para aliviar peso se estima en cerca de 1.500.000 m³, aproximadamente el triple de lo removido en el también provocado deslizamiento de El Inglés. Primera conclusión por lo tanto a tener en cuenta: todos los deslizamientos estudiados desde entonces han sido provocados.

5.4.2. Últimos estudios en Yesa (2016-2023).

El 23 de diciembre de 2015 se creó el Grupo de Trabajo Técnico Interdepartamental con dos técnicos de cada uno de los departamentos del Gobierno de Navarra: Presidencia, Función Pública, Interior y Justicia, Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Administración Local y Desarrollo Económico.

Tras recabar información con diferentes técnicos independientes entre los que se incluyen el autor de esta tesis, además de con la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), se presenta en sede parlamentaria el Informe de 21 de junio de 2016 que concluye con la existencia de importantes incertidumbres sobre la situación de seguridad por factores naturales y técnicos. También se recomienda la paralización de las obras hasta que no se garantice la absoluta seguridad.

El BOE publica que se creará una comisión al objeto de elaborar un dictamen sobre la seguridad de Yesa y dos años después se publica la Resolución de 29 de junio de 2018 de la Dirección General del Agua: *Convenio de encomienda de gestión al Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, para la elaboración de un dictamen en relación con la presa de Yesa (Navarra)*. El informe no se haría público hasta más de cuatro años después, a finales de 2022.

En 2017 D. Félix Quiralte López, quien había sido tesorero del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España (ICOG) y trabajado para la auscultación geofísica y geomecánica de la cerrada y estribo derecho, publicó un informe titulado *"Recrecimiento del embalse de Yesa. Contribución al conocimiento geológico-geotécnico de la cerrada y la estabilidad del estribo derecho"*. El autor falleció en agosto de 2019.

Tras reactivarse así la investigación geológica, fue en 2018 cuando el Tribunal de Cuentas, una entidad ajena al mundo de la geología, en su *"INFORME DE FISCALIZACIÓN DE LA CONTRATACIÓN CELEBRADA EN 2014 POR EL MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE Y SUS ORGANISMOS DEPENDIENTES, Y SU EJECUCIÓN HASTA 2017. Nº1.279"* se adhirió a las advertencias dadas dos años antes por la comisión de técnicos del Gobierno de Navarra sobre la inseguridad geológica y el daño económico y social derivado de ella. El Tribunal lo hacía expresándose con estas sentencias:

> *"La existencia de defectos o carencias en los proyectos iniciales, la falta de previsión, la descoordinación entre Administraciones, la ausencia de informes o actuaciones preceptivas o la imprevisión acerca del resultado de dichas actuaciones, han ocasionado su alteración sustantiva en cuanto a su ritmo de ejecución, a su coste final o a su rentabilidad social en términos de satisfacción del interés público al que deben responder […] Tras haberse constatado riesgos de deslizamientos en las laderas del embalse, así como dificultades en su impermeabilización, lo que dio lugar a una sucesión de tres modificaciones contractuales —la tercera de las cuales con la necesidad aparejada de solicitar nuevos informes de impacto ambiental—, las obras y sus contratos asociados, han debido prolongarse, al menos, hasta el mes de octubre de 2020".* (Es oportuno señalar que posteriormente se retrasó el final de las obras a 2021, 2023, 2024 y 2027).

El día 9 de octubre de 2018 el Gobierno de Navarra adjudica el estudio a la empresa especializada Geoconsult por 222.337,51 euros y un plazo de entrega de siete meses. De entre todos los puntos que demanda el peticionario se destaca como prioritario la definición actual de la estabilidad. Se dan varias prórrogas hasta la entrega y presentación al Gobierno de Navarra y otras personalidades de ayuntamientos afectados de Navarra. Geoconsult contó con la colaboración del profesor Luciano Picarelli de la Universidad de Nápoles.

Por la trascendencia que todo lo relacionado con la seguridad del embalse de Yesa tiene para la ciudad de Sangüesa, el Ayuntamiento de Sangüesa encargó en 2020 otro estudio que analizara la estabilidad de la ladera derecha de la presa de Yesa, se elaborara un informe que incluyera unas conclusiones y recomendaciones que acoten el problema de seguridad existente y ayudasen a su resolución y a la prevención de incidentes que pudieran afectar a la población de Sangüesa/Zangoza. Fue contratada con la empresa Ingeniería Geológica, Tecnología y Ciencia S.L. (Ingeotyc S.L.) que para la realización del trabajo contó con la colaboración de Don Tomás Morales, profesor titular de geotecnia de la Universidad del País Vasco.

El informe se presentó el día 17 de julio de 2020, se acordó trasladarlo al Gobierno de Navarra, al Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico y a la Confederación Hidrográfica del Ebro, así como publicarlo en la página web para conocimiento de la ciudadanía.

El Ayuntamiento en pleno decidió exigir a la CHE la remisión de forma inmediata, de cuanta información afecte a la seguridad de la presa, así como la publicación de los datos de auscultación de la presa y de la ladera. También:

> *"Solicitar al Ministerio responsable de las obras, hoy el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a la vista de las conclusiones del Estudio elaborado por Geoconsult para Gobierno de Navarra y del análisis de este elaborado por Ingeotyc para el Ayuntamiento de Sangüesa / Zangoza, que abandone la idea del llenado de la nueva presa de tierras sueltas ya construida, estableciendo una cota de seguridad que en ningún caso supere la de la actual presa de hormigón. La nueva presa debería quedar como garantía de protección, ante las incertidumbres que sigue presentando el proyecto ejecutado, con un bajo factor de seguridad y sin el margen necesario para prevenir los efectos de circunstancias desfavorables como seísmos, lluvias intensas u otras circunstancias desfavorables. Todos los ciudadanos que vivimos aguas abajo de las presas, tenemos derecho a vivir en unas condiciones de seguridad y tranquilidad que no se dan en la situación actual del embalse de Yesa y su llenado no haría sino incrementar los riesgos para la población".* Ayuntamiento de Sangüesa, 2020.

Con fecha 14 de febrero de 2020, la Fundación Nueva Cultura del Agua (FNCA) encargó a los investigadores de la Universidad de Zaragoza, Antonio María Casas Sainz y Antonio Aretxabala Díez del Departamento de Ciencias de la Tierra, la elaboración de un informe sobre los últimos datos publicados tanto por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), como por parte del Gobierno de Navarra y el Ayuntamiento de Sangüesa respecto del estado de la ladera derecha que continuaba en movimiento. El informe *"Estudio de evaluación y seguimiento de la ladera derecha de Yesa"* fue presentado el 7 de octubre de 2020 en una jornada pública con la FNCA por el Relator de la ONU por el Derecho al Agua, Pedro Arrojo y los autores del mismo. También fue remitido a las instancias gubernamentales y autonómicas. Era el antepenúltimo de más de una treintena de informes disponible sobre la estabilidad de las laderas de Yesa. Data de octubre de 2020 y no llegó a formar parte de la bibliografía ni referencias del presentado en abril de 2021 por el Colegio de Ingenieros Canales y Puertos de España (CICCP) hecho púbico en octubre de 2022. Una de las conclusiones que recoge este penúltimo informe del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos es que los datos de todos los anteriores ya no serían fiables (no incluye el de la FNCA de octubre de 2020, seguramente porque no llegó a incluirse), por lo que descartan algunas de las conclusiones obtenidas en las decenas de informes previos y plantea seguir con las obras a pesar de las incertidumbres que ello conlleva y también mientras se producen los movimientos variables descritos, que sí son la única certeza fiable hasta hoy. Propone que para avanzar hará falta un nuevo método: el *método observacional* (ensayo-error) desde la premisa (que no certeza) de que toda actuación que derive en algún tipo de perjuicio o desavenencia será reversible gracias a un exhaustivo control que estaría por describir.

Una cosa es cierta: todos los informes concluyen en que la ladera está siendo sustentada en la zona central por la propia presa vieja de Yesa. La nueva presa recrecida se apoya en terrenos previamente deslizados, en proceso de deslizamiento o que están generando nuevos deslizamientos activos. Las laderas derecha e izquierda llevan en movimiento variable desde que comenzaron las obras y la complejidad de interpretación de su geología y de la dinámica hidrogeológica y geotécnica sigue presentando muchas incertidumbres. Lo que no es incertidumbre, sino certeza, es el movimiento variable.

En marzo de 2023, los afectados, a través de tres asociaciones ciudadanas, hacen un análisis con una presentación en el Ayuntamiento de Sangüesa concluyendo que el denominado método observacional (ensayo-error) propuesto por el Colegio de Ingenieros Canales Puertos ha venido siendo lo que se ha hecho desde el principio y que la historia demuestra que, en el 100% de los casos, no existe la reversibilidad que se propone y ponen como ejemplos los movimientos de 2013 de más de 30 cm, la ruina de las urbanizaciones con las expropiaciones forzosas o el movimiento del estribo norte de la vieja presa de hormigón armado. Ninguna de esas circunstancias fue reversible.

En mayo de 2023 el Ayuntamiento de Sangüesa hace público el informe *VALORACIÓN DEL «DICTAMEN FINAL SOBRE LA SEGURIDAD DE LAS OBRAS DEL RECRECIMIENTO DE LA PRESA DE YESA, CON ATENCIÓN ESPECIAL A LA LADERA DERECHA»*. Se trata de una valoración encargada por el Ayuntamiento de Sangüesa / Zangoza a Ingeotyc, S.L. que fue elaborada por Valentín Ibarra Lozano y Tomás Morales Juberías de la Universidad del País Vasco. Concluyen en tres cuestiones fundamentales: i) la ladera se sigue moviendo, ii) el factor de seguridad FS sigue siendo cercano a la unidad y iii) el método observacional (ensayo-error), propuesto para seguir con las obras, es lo que se ha venido haciendo desde el principio y las respuestas del terreno pueden no ser reversibles. Por todo ello recomiendan no llenar el embalse.

5.4.3. Consideraciones de importancia sobre la modelización geológica.

Quienes han trabajado durante más de dos décadas en la problemática geotécnica de Yesa desde que comenzaron las obras, confluyen en que el gran problema de fondo han sido las interpretaciones de la estructura sobre la que se asienta la presa, tanto la vieja, como la nueva.

Por ejemplo, en 2008 se asumía un modelo geológico que incluía la existencia de una falla inversa, la *"Falla de Yesa"* (ver figura 5.24). Dicha interpretación convivió unos años (al menos hasta 2013) con otra aparecida oficialmente en 2010 en la que no había falla, sino un pliegue periclinal que afectaba a la formación de Margas de Pamplona y al Flysch de Yesa en el que gradualmente se convierten a techo.

En efecto, en 2008 el ICOG presentó un informe con la existencia de una falla inversa en el vaso que aflora en la zona del estribo izquierdo, para entonces los datos geofísicos del tercer modificado dejaron clara la existencia de la Falla de Yesa justo bajo la cerrada y las presas.

En 2010 la interpretación que asumía la existencia de un cierre periclinal (y no una falla inversa en la zona del vaso) era, por tanto, incompatible con el de 2008. Aún a día de hoy (2024) no ha quedado claro el modelo exacto sobre el que se estuvo actuando y exactamente para qué. Realmente sucedió lo mismo que en Cemboráin, pero a una escala 24.000 veces mayor.

El anuncio del modificado Nº4 en febrero de 2016, el que actualmente se tramita, puso de manifiesto que los anteriores tres modificados no habían solucionado el problema de la estabilidad y que, precisamente, de esa falta de datos geológicos, se derivaron buena parte de los problemas heredados en las modelizaciones geotécnicas.

No obstante, los autores que presentaron este modelo de 2010, con cierre periclinal en vez de falla, en 2013 y en 2015 asumieron también la existencia de falla inversa como en el modelo de 2008. Así se desprende de la observación del corte geológico I-I' de la página 116 del informe de Prospección y Geotecnia del 11 de junio de 2013 en la web de la CHE.

Pero en 2017, con el informe de D. Félix Quiralte López, se supo que hubo un tercer modelo geológico que precedió a ambos. Fue a finales de 2007 y comienzos de 2008 y aparece en los anexos de la Asistencia Técnica, en la *"MODIFICACIÓN Nº3 del RECRECIMIENTO DEL EMBALSE DE YESA"*. Se había presentado concretamente en la elaboración del perfil geológico por el eje de presa y la caracterización geomecánica de los materiales presentes en la cerrada, información que iba incluida en el *"ANEJO Nº4. ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO Y DE MATERIALES"*.

Aquel informe presentaba un trabajo con bajo buzamiento de la falla inversa referida como Falla de Yesa y según los datos geofísicos, quedó correctamente justificada con unos 30º-40º de inclinación a partir de sísmica de reflexión.

Sin embargo, en el informe final se prescinde de esta información y se representa la falla con un ángulo mucho mayor, de unos 60º, a pesar de no existir ninguna justificación para ello. El autor, como introducción a su informe asegura:

> *En principio, el buzamiento de la falla es irrelevante para la cimentación de la presa, ya que las características geomecánicas que presenta la zona de falla son semejantes a las de la roca que la rodea, pero en el estudio de 2009 se excluyó tanto mi perfil geológico como su estudio justificativo (también se excluyó la sísmica de reflexión), incluyendo una falla con gran buzamiento sin justificar. También se excluyó del estudio de 2009 la caracterización geomecánica de los materiales de la cerrada, siendo este tema fundamental y muy relevante para la estabilidad del estribo derecho de la presa, que parece ha estado y está causando problemas de inestabilidad. Si se hubieran adoptado para los cálculos de estabilidad del estribo derecho los parámetros geomecánicos propuestos en mi informe de 2008, además de la sísmica de reflexión, pienso que se podrían haber evitado o reducido las graves consecuencias sociales y económicas de las inestabilidades de este estribo, ya que este aspecto sí es relevante*. (Quiralte-López, F. 2017)

Es en 2020 —dos décadas después de comenzar las obras—, cuando los geólogos de la Universidad de Zaragoza (Casas, A. y Aretxabala, A.) afirmaron que existían datos suficientes que demostraban que ninguno de los modelos hasta el momento era geológicamente satisfactorio.

Por ello surgió la necesaria propuesta de realizar un estudio exhaustivo de campo con reconstrucción 3D de la Geología Estructural, para entender de una vez la geometría de las superficies estratigráficas (estructura), los cambios laterales de facies entre las Margas de Pamplona, perfiles geotécnicos E1 y E2, y el Flysch de Yesa, perfil C con la geometría de las discontinuidades antiguas (fallas) y modernas (deslizamientos) y su influencia en la configuración actual de la cerrada, poniendo especial atención a que SIR y SPR ya no sigan acomodadas a la estructura sinclinal.

5.4.4. No hay una explicación satisfactoria de lo observado.

Es verdad que los sistemas no lineales como Yesa se caracterizan por su comportamiento no expresable como una suma de los comportamientos de sus descriptores, pero es que en el caso que nos atañe, éstos han cambiado con el tiempo sin poder dar respuesta a los movimientos de ambas laderas que hoy continúan activos. Hay procesos de origen natural que sí tienen un fuerte impacto (aparte de la sismicidad) en el movimiento de la ladera, lo han tenido y siempre lo tendrán.

Entre los procesos naturales que evolucionan en el seno de toda la ladera afectada por redes fractográficas variables, pero con tendencia a extenderse como es el caso de Yesa, con distribución de presión de agua de manera igualmente variable, estaría el del incremento y descenso de las presiones intersticiales en el interior del macizo. Éste acompaña a los aumentos y descensos del agua del embalse y a la aparición de nuevas zonas de cizalla y fisuración forzadas por los fenómenos de rebote elástico (al eliminar peso para aliviar la carga), reptación o creep y oscilaciones anuales debidas a los ciclos de embalse-desembalse (ver figura 5.25).

Las medidas tomadas de alivio de peso supusieron una mejora de las condiciones que se reflejaron en un descenso de la velocidad de los movimientos, especialmente después de febrero de 2013 al reducirse las lluvias (Picarelli, L. 2019). Sin embargo, se generó un rebote elástico pronosticado en 2013 (Aretxabala, A. 2013) y ahora detectado en la parte superior de la ladera, por ejemplo, con el satélite Sentinel-1 del Proyecto Copernicus. Con los ciclos de movimiento debidos a los embalses y desembalses y la reptación del terreno (creep) se están generando en el interior de la ladera derecha movimientos que inciden en la fatiga de los materiales con zonas inestables y con variaciones de la presión de poro interconectadas (Universidad de Navarra, Aretxabala, A. 2015, Universidad de Nápoles, Picarelli, L. 2019). Son las consecuencias pronosticadas en la metáfora de la "piel de leopardo" del profesor Luciano Picarelli (Universidad de Nápoles, Picarelli, L. 2019) que acompañan a los cambios de volumen globales acordes a los embalses y desembalses, al creep y al comportamiento errático y se manifiesta en la expansión del sistema fractográfico con cambios en las presiones intersticiales. En resumen, en 2023 se corrobora que la masa deslizada se sigue deteriorando debido principalmente a cuatro procesos simultáneos:

1. Rebote elástico (al haber quitado peso) en la zona alta con hundimiento en la parte baja.
2. Se producen movimientos horizontales hacia el oeste, aguas abajo y hacia el este, aguas arriba.
3. Los ciclos embalse-desembalse mueven el terreno arriba y abajo y con la pendiente reptan.
4. Se van formando más zonas de fricción, tensión y fractura en el seno de la masa deslizada.

5.4.5. Sobre la consideración de las superficies de deslizamiento.

Nuestra opinión es que tras las modelizaciones que no pudieron explicar el problema, como acabamos de ver, al final se adoptó una de ellas: que los deslizamientos siguen las superficies de estratificación tanto a favor de pendiente como contrapendiente. Los modelos de decenas de informes encargados por la administración acarrearon las contradicciones inherentes a ese modelo, especialmente se hacen notorias cuando no satisfacen lo observado y al utilizar otra vez el mismo modelo, el resultado es el mismo: una disociación más entre lo visto y lo previsto.

El problema es que ya es un hecho histórico que no admite opinión alguna el que la mayoría de aquellos informes siempre estuvieron sesgados para obtener factores de seguridad favorables mayores a la unidad y a veces mucho mayores, aun cuando la ladera derecha de Yesa nunca dejaba de moverse. Una cuestión que ahora ya se recomienda olvidar, tal y como exhorta el Informe del Colegio de Caminos, Canales y Puertos de abril de 2021.

El mismo dictamen, como hemos comentado, plantea seguir con las obras dejando de investigar lo sucedido de manera histórica, controlando ese movimiento (asumiendo que siempre estará presente) de características desconocidas, su velocidad y, en caso de que provocase más desavenencias, considerar que éstas serían reversibles.

> *"Creemos que la principal opción es el método observacional, ya comentado anteriormente. Hay que calibrar las obras en su estado actual y futuro, con todos los refuerzos y mejoras previstas, y dejar de investigar etapas anteriores ya superadas. Se trataría, por tanto, tal como se comenta en los capítulos 9 y 10, de someter las presas a las situaciones esperables en su futura explotación, pero de una manera muy cuidadosa y detallada y siempre con carácter reversible".* (Dictamen final sobre la seguridad de las obras del recrecimiento de la presa de Yesa, con atención especial a la ladera derecha. CICCP, 2021).

Los propios estudios de fracturación presentados en 2019 por Geoconsult al Gobierno de Navarra ya indicaban que los informes anteriores mostraban densidades y orientaciones de fracturación incompatibles con el modelo de deslizamiento vía planos de estratificación adoptado históricamente.

De hecho, con los datos existentes es imposible asegurar la existencia de un segmento del deslizamiento con buzamiento contrapendiente en la parte baja de la ladera (ver figura 5.27), es decir, tras la brechificación no es tan probable que todos los deslizamientos tengan una marcada componente estructural y en vez de seguir las líneas de estratificación que determina el sinclinal, se han podido crear (de manera forzada) nuevas superficies de debilidad y rotura que no tienen por qué seguir la disposición del sinclinal, sino la de la pendiente (Casas, A., Aretxabala, A. 2020).

No se pudo confirmar este punto crucial para el modelo a adoptar, no se conoce la existencia de una campaña de sondeos en la zona correspondiente a ese segmento enfocada a predecir la profundidad a la cual deberían encontrarse las superficies de deslizamiento, pero la nueva presa ya está hecha y apoya precisamente en esta zona brechificada. Si esa profundidad fuera mayor de la asumida sin esos datos, nos encontraríamos en una situación considerablemente más desfavorable que la prevista por el modelo histórico adoptado en prácticamente todos los informes, lo cual explicaría por qué los diferentes factores de seguridad históricos no se cumplieron, como sucedió también en el deslizamiento de Arre.

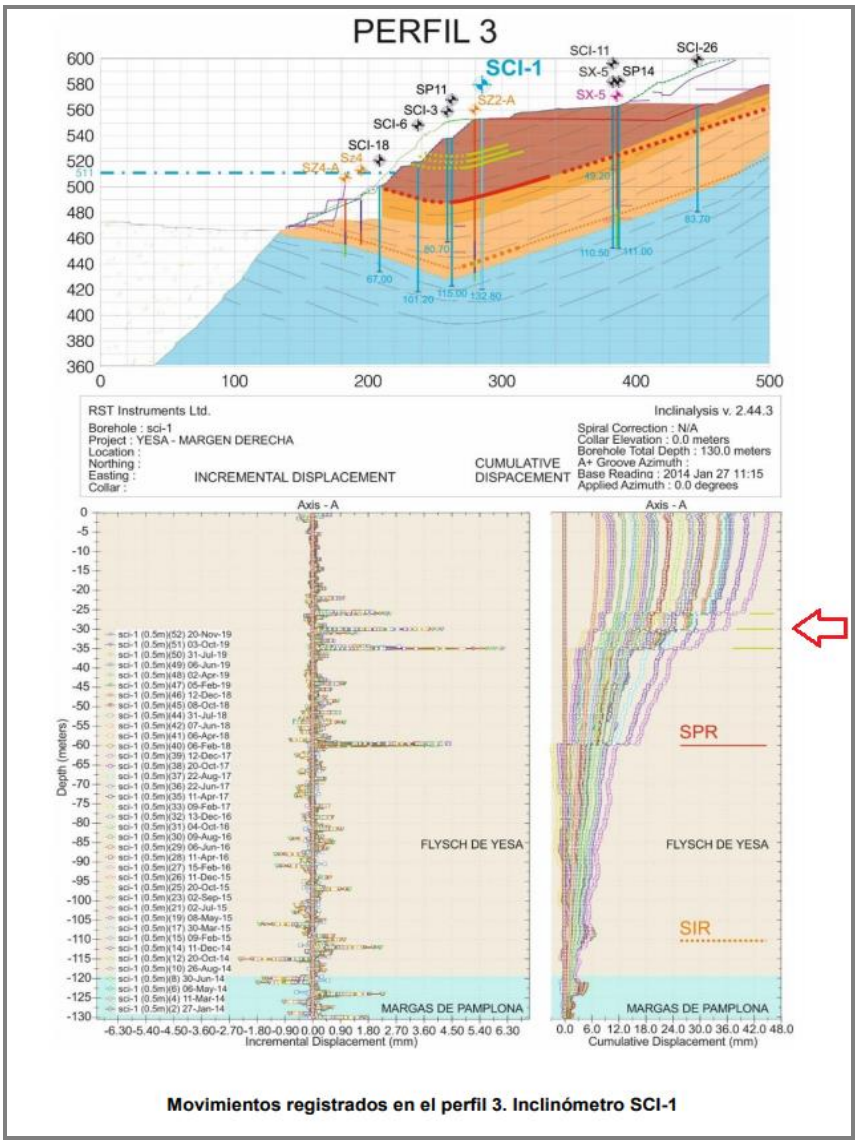
Podría no haber segmentos del deslizamiento buzando contrapendiente, así explicaríamos, entre otras cosas, por qué se siguen moviendo si ya se habían anunciado generosos factores de seguridad bajo las premisas de deslizamientos ajustados a la estructura sinclinal, a la retirada de carga, los muros y anclajes y el contrafuerte que supone el caballón de la presa de tierra.

Ello sugiere que, con las interpretaciones históricas, siguió perviviendo durante más de dos décadas de actuaciones insatisfactorias la posibilidad de estabilizar el enorme deslizamiento de casi doce millones de metros cúbicos con muros y anclajes, además de las excavaciones de la parte alta y el efecto contrafuerte de ambas presas.

Tampoco se sabe la relación cinemática entre las dos superficies de deslizamiento más importantes: la superficie principal de rotura (SPR) y la superficie inferior de rotura (SIR), y cómo pueden estar relacionados los movimientos de ambas cuando aumentan las lluvias o los procesos de embalse y desembalse. De hecho, los movimientos pueden estar relacionados, y es un factor que se dejó a un lado tanto en los informes anteriores como en el informe del Gobierno de Navarra encargado a Geoconsult, entregado en 2019 y que en 2021 el CICCP obvia también.

Aunque los estudios históricos se centraron durante más de dos décadas en los movimientos en X e Y (por medio de vectores proyectados sobre el plano horizontal), es necesario que un estudio cinemático incluya movimientos en Z (ver figura 5.25) y los datos del satélite Sentinel-1 del Proyecto Copernicus nos facilita en cierta medida esa componente.

Actualmente se superponen varios deslizamientos de diferente entidad, siendo los más importantes los que se relacionaron con algo similar a SPR y SIR a favor de niveles más margosos del Flysch de Yesa y en el contacto con las Margas de Pamplona con la posibilidad, como hemos comentado, de un segmento que buzaría contrapendiente aportando un cierto grado estimado de estabilidad, pero que no acaba de hacerse plausible por todo lo comentado. Esa zona es la que más se hunde. Parece lógico entonces pensar que si se moviese a favor de la estructura sinclinal, alguna vez se hubiese elevado. Pero carecemos de esa información previa a la ejecución de la presa. Solamente con el EGMS de Copernicus, a partir de 2016, sabemos que su movimiento vertical es el contrario. En las últimas mediciones de 2018, previas a la entrega del informe del Gobierno de Navarra, la SPR presentaba velocidades cercanas a 2 mm/mes y excepcionalmente 4 mm/mes. Otros lóbulos pueden permanecer dormidos y reactivarse por condiciones climáticas o gestión del nivel del embalse, obras o impactos sísmicos, o varias de ellas simultáneamente, o todas ellas a la vez. Pero ya en 2020 el informe del Ayuntamiento de Sangüesa de 2020 ponía de manifiesto que, al menos, se han desarrollado nuevos deslizamientos activos sobre la superficie principal de rotura (SPR) entre 25 y 35 m de profundidad, tal y como vemos en la siguiente imagen (figura 5.29) del perfil 3 y del denominado SCI-1 en la zona cercana a la presa. Del segmento contrapendiente poco sabemos.



Movimientos registrados en el perfil 3. Inclinómetro SCI-1

Figura 5.29. La autofracturación del Flysch con el avance del movimiento estaba quedando registrada en varios inclinómetros. Por encima de la Superficie Principal de Rotura (SPR), entre unos 25-35 m de profundidad se pueden ya detectar, al menos, tres nuevos deslizamientos activos. (Geoconsult, Gobierno de Navarra 2019).

A qué profundidad se producen las entradas y salidas de agua subterránea capaz de afectar a la presión de poro es también algo desconocido y, por tanto, lo es la variabilidad de los parámetros resistentes que gobiernan el global de la inestabilidad. Tampoco cuál es la respuesta a los diferentes episodios de lluvias en relación a su duración y cantidad y otras incertidumbres derivadas que atañen a esa transmisividad en un macizo rocoso que continúa sometido a autofracturación con reapertura de nuevas vías de entrada de agua a un ritmo variable (de entre 2 y 4 mm/mes) y que no está igualmente distribuido por la ladera.

Lo que sí ponen de manifiesto los informes entregados a partir de 2019 es que la fracturación avanza tanto en horizontal como en vertical, tal y como se presentó en 2013 por la Universidad de Zaragoza (Gutiérrez, F. 2013) y en 2015 por la Universidad de Navarra (Aretxabala, A. 2015) ver figuras 5.29 y 5.30.

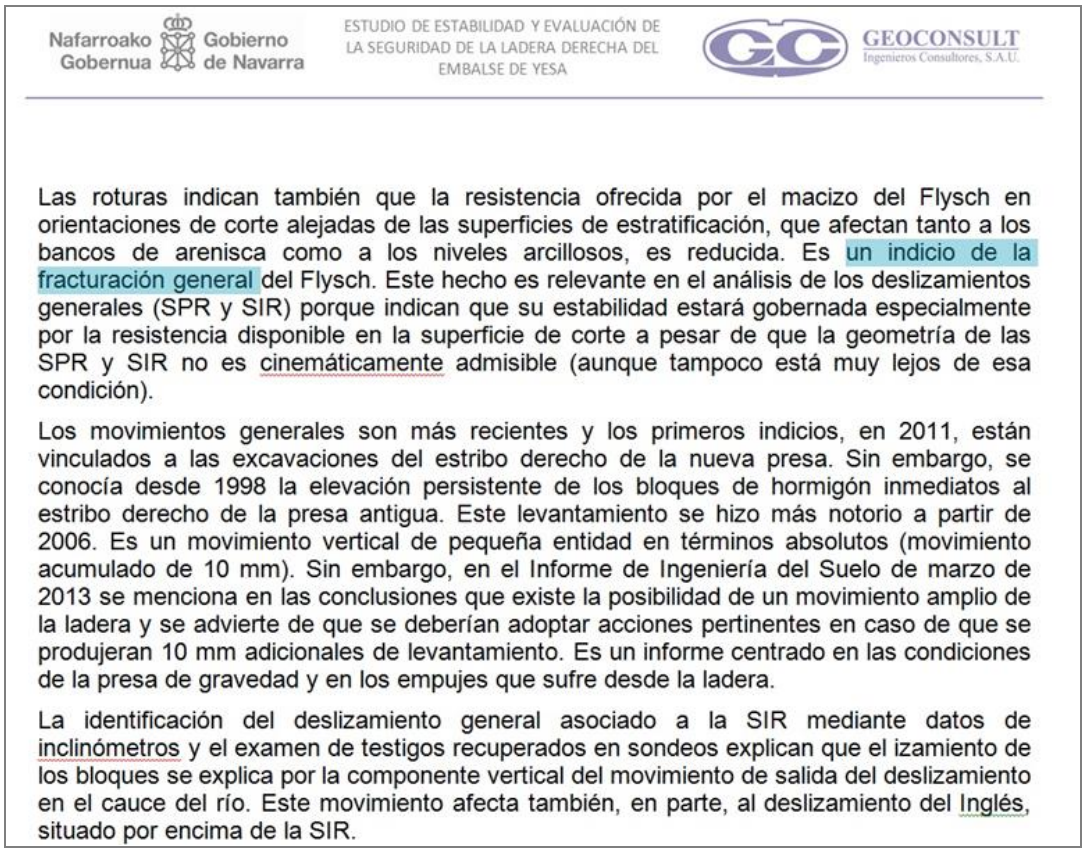


Figura 5.30. Sobre la fracturación del Flysch con el avance del movimiento, Geoconsult apreció en 2019 un avance tanto horizontal como vertical (Z) que detecta en el levantamiento de la vieja presa, tal y como se presentó en 2013 por la Universidad de Zaragoza (Gutiérrez, F. 2013) y en 2015 por la Universidad de Navarra (Aretxabala, A. 2015).

La fuerza de rozamiento aumenta levemente con la velocidad, pues dicho autotriturado ha ido haciendo evolucionar a los materiales de la ladera hacia un sistema algo viscoso que podría asemejarse a un creep con valores del FS, incluso tan bajos como 0,90 (Gobierno de Navarra, Geoconsult, 2019).

La viscosidad solo se manifiesta en fluidos en movimiento, por ello el tratamiento fluido de la ladera derecha de Yesa en los modelos 3D deja clara la primera certeza: la ladera se mueve y además de manera un tanto viscosa, luego los postulados de viscosidad tienen cierta validez en los análisis.

Si la viscosidad fuera muy alta, el rozamiento entre zonas adyacentes lo sería también, lo que significa que éstas no podrían moverse unas respecto de otras o lo harían muy poco, es decir, estaríamos ante un sólido puro.

Si por el contrario la viscosidad fuera nula, estaríamos ante un superfluido que presenta propiedades notables como escapar del recipiente que la contiene, en este caso sería la cubeta que define y determina la SIR.

Una incertidumbre de los sistemas no lineales, como la ladera de Yesa, es que esto también podría pasar con FS calculados por una computadora cercanos a 0,90. El triturado o brechificado impuesto, impulsado por *"… la excavación realizada para cimentar el estribo derecho de la presa y estabilizar dicha ladera ante la solicitación que supondrá su llenado y vaciado periódicos en fase de explotación…"* (Informe de la CHE del 9 de enero de 2013) extiende y generaliza la fracturación reduciendo la calidad del macizo rocoso y favoreciendo la entrada del agua; por eso las cifras de movimiento y seguridad, desde el punto de vista del convenio internacional basado en el uso del FS sensu stricto, son congruentes: se mueve y el FS oscila en torno a la unidad.

El FS ha ido disminuyendo con el tiempo en un macizo rocoso que ha dejado de estar "intacto" tal y como las universidades antes mencionadas y Geoconsult para el Gobierno de Navarra sentenciaron en varias ocasiones (ver figuras 5.30 y 5.31).

Sin embargo, sabiendo que oscila alrededor de la unidad y en movimiento, en estos últimos años hemos seguido confiando en toda la artillería tecnológica que podríamos llegar a desplegar contra unas fuerzas de la naturaleza que no hemos querido conocer en dos décadas, pero que menos aún pudimos controlar. Por eso Geoconsult en 2019 afirmaba incluso que el FS podría caer por causa de fuertes lluvias hasta valores de 0,90 en un análisis de equilibrio límite convencional, sin incluir los efectos de la velocidad de corte y sin que se observe la rotura catastrófica del deslizamiento, sino un creep o un aumento de la velocidad de reptación por la componente viscosa. Algo que se aleja bastante de un deslizamiento amoldado al sinclinal.

En este sentido, en ingeniería, arquitectura y otras ciencias aplicadas, es común, y en algunos casos imprescindible, que los cálculos de dimensionado de elementos o componentes de maquinaria, estructuras constructivas, instalaciones, taludes o dispositivos en general, incluyan un coeficiente de seguridad tanto más generoso cuantas más incertidumbres o no linealidades gobiernen el comportamiento del sistema considerado. Éste debe garantizar que, bajo desviaciones aleatorias de los requerimientos previstos, exista un margen extra de prestaciones por encima de las mínimas estrictamente necesarias.

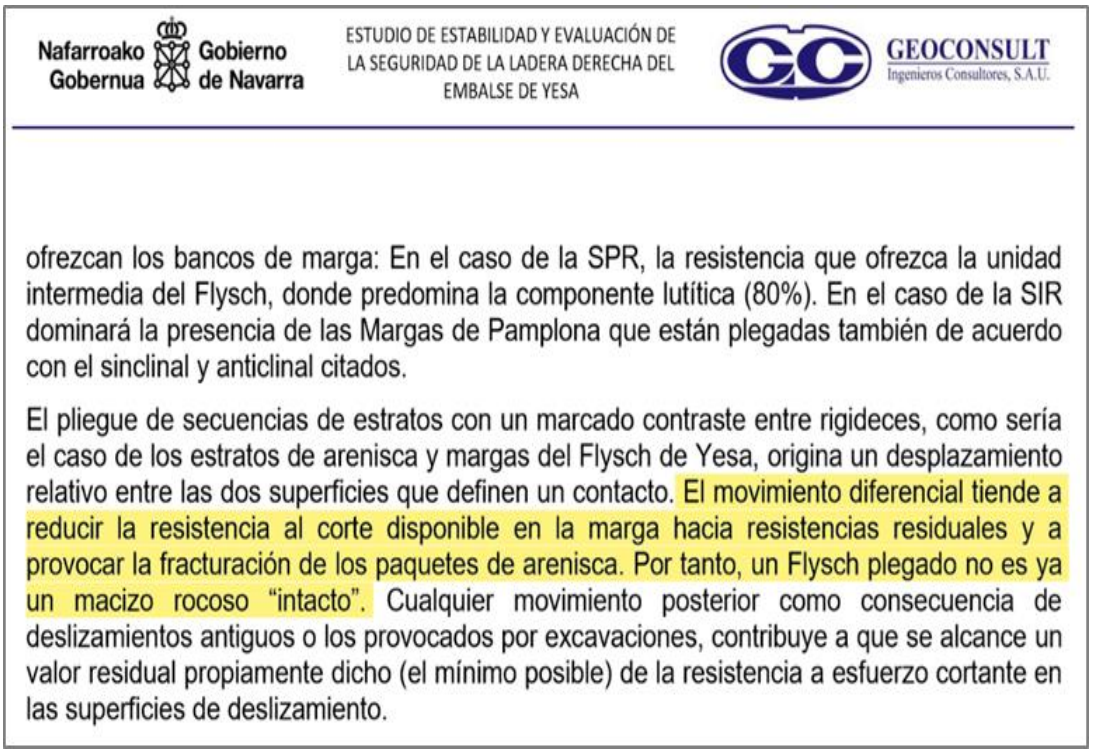


Figura 5.31. Uno de los varios extractos del informe del Gobierno de Navarra de 2019 donde se explica por qué el movimiento contribuye a la fracturación de los materiales rígidos (arenisca) y a la deformación de los blandos (margas y lutitas) y su influencia (negativa) en la resistencia al corte. No se incluye aquí la posibilidad de que, con el imparable avance del triturado, el segmento de la parte baja, que buza contra la ladera, haya dejado de seguir un movimiento ajustado a la estructura sinclinal y haya comenzado a sumarse al efecto desestabilizador por nuevas superficies de rotura. De esta manera se podría explicar por qué los FS calculados para un movimiento teóricamente ajustado a la estructura sinclinal, son notablemente superiores a lo que realmente está sucediendo.

El FS ha caído si lo comparamos con lo que era esa ladera hace años, antes de la catástrofe de 2013. También que las obras de 2013 ayudaron a reducir el movimiento inicial, el cual se desaceleró tras haber cesado el episodio de lluvias de febrero de 2013 (Picarelli, L. 2019), y en noviembre ya se habían reducido en uno o dos grados de magnitud.

Los valores usados como factores de seguridad, por lo general, provienen de la experiencia empírica o práctica, por lo cual están tabulados y contemplados en las normas o la literatura científica y técnica, además en el caso de Yesa puede hacerse un recorrido histórico de los valores adoptados en cada momento y por qué.

5.4.6. Yesa, ejemplo de no linealidad.

La no linealidad de todo lo descrito en la ladera derecha de Yesa está detrás de los sucesivos fracasos históricos derivados de la tentativa de reducción a algo lineal y ajustado a un modelo estructural que muy probablemente funcionó en el pasado, pero seguramente ya no funciona. Frecuentemente la no linealidad aparece ligada a la autointeracción, o el efecto sobre el sistema del estado anterior del propio sistema. El parámetro Ru es el que mejor relaciona la influencia del agua en el interior de la ladera. Es un coeficiente adimensional que se define como la razón entre la presión intersticial y la tensión total vertical. Por lo tanto, depende fundamentalmente de la presión intersticial, que no tiene por qué ser la hidrostática, puede ser mayor (o menor) si hay flujo de agua en movimiento, como es el caso de Yesa y dependiendo de su dirección no habría necesidad de contemplar un rebose.

La creciente permeabilidad con la brechificación del suelo no interviene para nada en el cálculo del Ru (salvo, lógicamente su peso específico). Sabemos que los FS de diferentes escenarios contemplaron un valor medio de Ru en el nivel máximo normal, por lo que éstos están implícitos en los cálculos de drenajes y obras complementarias futuras. Pero la subrayada incertidumbre en torno al movimiento del agua en el terreno nos lleva a pensar que en momentos cercanos al desequilibrio se sobrepasan los valores de presión de poro que impulsan la aceleración observada. Precisamente en un momento de lluvias fuertes, en una situación crítica, en que los drenajes no dan abasto o no funcionan y se rebasa el nivel que nunca ha conocido la ladera podríamos incluso hablar de valores locales bastante más elevados de los considerados hasta la fecha.

Independientemente de la naturaleza del suelo, esto podría suponer más roturas como las que se han venido observando con la instrumentación. La distribución de la presión de poros en la ladera inicialmente saturada y en algunas zonas parcialmente sumergida y rápidamente sometida a un desembalse, requiere un análisis en condiciones saturadas y no saturadas extremadamente complejo debido a que el sistema poroso va cambiando continuamente. Por lo tanto, estamos hablando de un descriptor altamente sustancial e ilustrativo que no se pudo y difícilmente se va a poder contemplar. Una vez solventado el problema de una inundación repentina por fuertes lluvias (con el desembalse rápido) podrían darse efectos muy negativos semanas o meses después.

La cada vez mayor apertura de las fracturas avanzando y propagándose según se mueve la ladera (hecho contrastado y bien expuesto no sólo ahora, sino en ocasiones e informes anteriores), sumado a la incierta orientación e interconexión de todas las discontinuidades, así como la probable presencia de relleno insaturado, sugiere que la propagación de la presión de poro debido a las precipitaciones podría ser bastante lenta, aunque cada vez lo es menos, según avanza la fracturación.

Este mecanismo descrito, actuando de manera aleatoria en diferentes volúmenes de diferentes tamaños y a diferentes profundidades por diferentes lugares de la ladera, dio pie a la hipótesis de *la piel de leopardo*, el símil del profesor Picarelli de la Universidad de Nápoles que aplicó en su análisis de Yesa en 2019 para el Gobierno de Navarra.

La naturaleza del Flysh propicia el avance de la brechificación, afectando a zonas aisladas y discontinuas del subsuelo (ver figuras 5.29, 5.30 y 5.31), de tal manera que podrían estar desarrollándose zonas aisladas y conectadas de inestabilidad latente, y entre otras Geoconsult también incluyó en 2019, como en el caso de la Universidad de Navarra en 2015, estas zonas aisladas en el interior de la ladera.

La *piel de leopardo* del profesor Luciano Picarelli, de la Universidad de Nápoles, apunta a retardos entre los picos de incremento de presión de poro debidos a lluvias importantes, pero no extraordinarias, y la aceleración del movimiento y de la propia fracturación, una dilación en el incremento de la presión de poro después de varias semanas y de hasta cuatro meses (ver figura 5.32). Por otro lado, la situación de desembalse rápido conlleva asimismo una bajada rápida del nivel del agua en el embalse y en la ladera inmediatamente en contacto con éste, ya que por mucha impermeabilización que se consiga, el conjunto analizado no es el de una ladera aislada, sino una unidad ladera-agua-presa. La situación de desembalse rápido determina una disipación completa de la presión intersticial en ciertas áreas más permeables, especialmente las más cercanas, algo cuya componente dinámica se puede visualizar en los ciclos de movimiento vertical y horizontal con los de embalse-desembalse detectados, por ejemplo, por Copernicus desde el EGMS (figuras 5.25 y 5.43c). Pero hay zonas profundas o más alejadas en las que simultáneamente al fenómeno de caída de las presiones intersticiales, ésta o no se produce o está muy amortiguada, y con el desembalse rápido no cae el nivel de agua ni la presión intersticial, por lo que se genera un desequilibrio de fuerzas que tienden a producir una situación de inestabilidad también en lo relativo a esfuerzos locales igualmente a modo de piel de leopardo.

En 2013 una precipitación total de 400-420 mm en el intervalo de tiempo comprendido entre el 10 de enero y el 10 de febrero, provocó un aumento de la tasa de desplazamiento superficial desde 0,2 mm/día (alrededor del 1 de febrero) hasta 3,7 mm/día. Geoconsult lo atribuyó en 2019 a una caída del factor de seguridad y por lo tanto vino acompañado de una aceleración del movimiento, FS<1.

En este sentido, cabe indicar que aquel informe del Gobierno de Navarra de 2019 no consideró la variación de esas presiones de poro en la entonces definida Superficie Inferior de Rotura a más de 100 m de profundidad (la SIR). Obviamente se iban a ver incrementadas ante un episodio de lluvias similar.

Podría simularse en un modelo informático como el de la situación transitoria para la Superficie Principal de Rotura (la SPR), pero ya comentaron en aquel informe que dadas las incertidumbres en relación a los datos de entrada que alimentarían cualquier simulación hidrogeológica, se optó por no modificar las hipótesis de entrada. Obviamente éstas iban a ser bastante menos optimistas.

El profesor Picarelli observa, no obstante, los cambios de velocidad sobre la SPR y también sobre la SIR:

> *"Básicamente, esos movimientos deberían ser de naturaleza esencialmente viscosa (aparentemente debido a una especie de fluencia secundaria, al menos en la escala temporal que podemos considerar), y estar regidos por el nivel de tensión con respecto a la fuerza residual, que opera a lo largo de estas superficies de corte. Sin embargo, estos movimientos básicos también deberían experimentar algunos cambios periódicos de velocidad debido a las pequeñas fluctuaciones de la presión de poro inducidas por los cambios en el nivel del embalse o por las precipitaciones. Nos inclinamos a pensar que en el subsuelo se producen cizalladuras aún mayores como resultado de las deformaciones de flexión y que, posiblemente, son localmente activas".* (Picarelli L, 2019).

Se detecta ya el desarrollo de nuevas zonas activas como se previó en los informes de 2013 y 2015 de la Universidad de Zaragoza y la de Navarra respectivamente, lo cual sugiere que el profesor Picarelli estaría expresando 6 y 4 años después lo previsto por estas universidades. Las medidas tomadas de alivio de peso han supuesto una mejora de las condiciones que se reflejan en un descenso de la velocidad de movimiento, pero al mismo tiempo en el interior de la ladera se está formando y desplegando esa *piel de leopardo*. Todas las actuaciones previstas en el proyecto de medidas de estabilización (pantalla de impermeabilización, muros jardinera, impermeabilización de la ladera hasta la cota 520 m, drenaje interno, etc.) se traducirían en un incremento del FS de 0,04 en la una "venidera" Situación 5 (Gobierno de Navarra 2019)[13].

---

[13] La Situación 5 es una de las siete analizadas. Se modelizan siete situaciones (Situaciones 1 a 7) de cómo ha evolucionado la ladera antes y después del deslizamiento de 2013 (Situaciones 1 y 2), cómo se encuentra (Situación 3) y cómo debería evolucionar según diferentes escenarios (Situaciones 4 a 7) el FS del futuro. Geoconsult concluyó en 2019 que la más favorable (Situación 7) abarcaría en el mejor de los casos un FS=1,25 y en el peor 1,17. La peor situación en que los drenajes no dan abasto o fallan sería la denominada Situación 6 o "Hipótesis Accidental" con FS=1,03-1,10. La situación 5 es previa a ambas y sus FS oscilarían entre 1,07 y 1,21. También se propuso una nueva manera de definición de la estabilidad que según Geoconsult sería "más útil" en algún caso, porque en el caso del significado del clásico FS absoluto, como el comentado en las Situaciones 1 a 7, se "pierde sentido" en una ladera en movimiento y sería "no aplicable" en esta ladera reactivada y en movimiento desde 2013 para finalmente definir la seguridad en función de una estabilidad basada en la velocidad de movimiento. Se trataba de una propuesta interesante para intentar comprender entonces la poca influencia de las obras realizadas, dejando una esperanza mirando al futuro, pero como veremos, aporta una problemática irresoluble en su planteamiento y además las previsiones derivadas no se están cumpliendo. Es decir, el FS no sería útil y perdería sentido en laderas de bajo FS, pero es aplicable y útil en laderas de alto FS. Se trata de una paradoja intencional irresoluble.

De esta manera, el FS final alcanzaría un valor de FS = 1,07 en el peor de los casos y de 1,21 en el más favorable, a pesar del problema conceptual de la aplicabilidad y sentido de este criterio en una ladera reactivada. Resulta así que las presiones intersticiales afectarían de una manera protagonista a la SIR una vez se pudiera "alcanzar una situación reconocidamente estable" (sic). Es por lo tanto este futuro estado el que va a gobernar la estabilidad y la seguridad, si se cree, sin tener ningún dato, que la SPR va a alcanzar y permanecer algún día en ese estado de estabilidad futura a reconocer. Por ello es importante intentar esclarecer qué pasaría con la SIR.

El seguimiento realizado por ejemplo con el SCI-7bis muestra que precipitaciones cercanas a los 200 mm en 2018 en dos intervalos seguidos, provocaron dos picos en la velocidad de desplazamiento un tiempo después. En el periodo de registro que comprende desde inicios de 2018 se ve una relación con las lluvias acumuladas (figura 5.32). En la última fase medida en 2018 la SPR se desplazaría (figura 5.32) con una tasa de 8 mm/año llegando en los momentos posteriores a las precipitaciones a valores cercanos a los 5 mm en algo más de tres meses, muy acordes con los datos que se pueden ver con el satélite Sentinel-1 del EGMS-Copernicus (5-10 mm/año).

La vinculación entre precipitación y evolución de los desplazamientos es cualitativamente clara desde el inicio de los registros, no así los tiempos, recordemos que el sistema no es lineal. Entre noviembre y diciembre de 2019 con 240 y 95 mm respectivamente, la estación meteorológica de Yesa (Gobierno de Navarra) registró valores de precipitación cercanos a 335 mm.

Las grietas fotografiadas y divulgadas por varios vecinos y periodistas en redes sociales y medios de comunicación de masas el día de año nuevo de 2020 y posteriores, sugieren que hubo un avance local del desplazamiento (figuras 5.33 y 5.34). Lo que además se corrobora con los datos de diciembre de 2019, cuando se produce una aceleración notable.

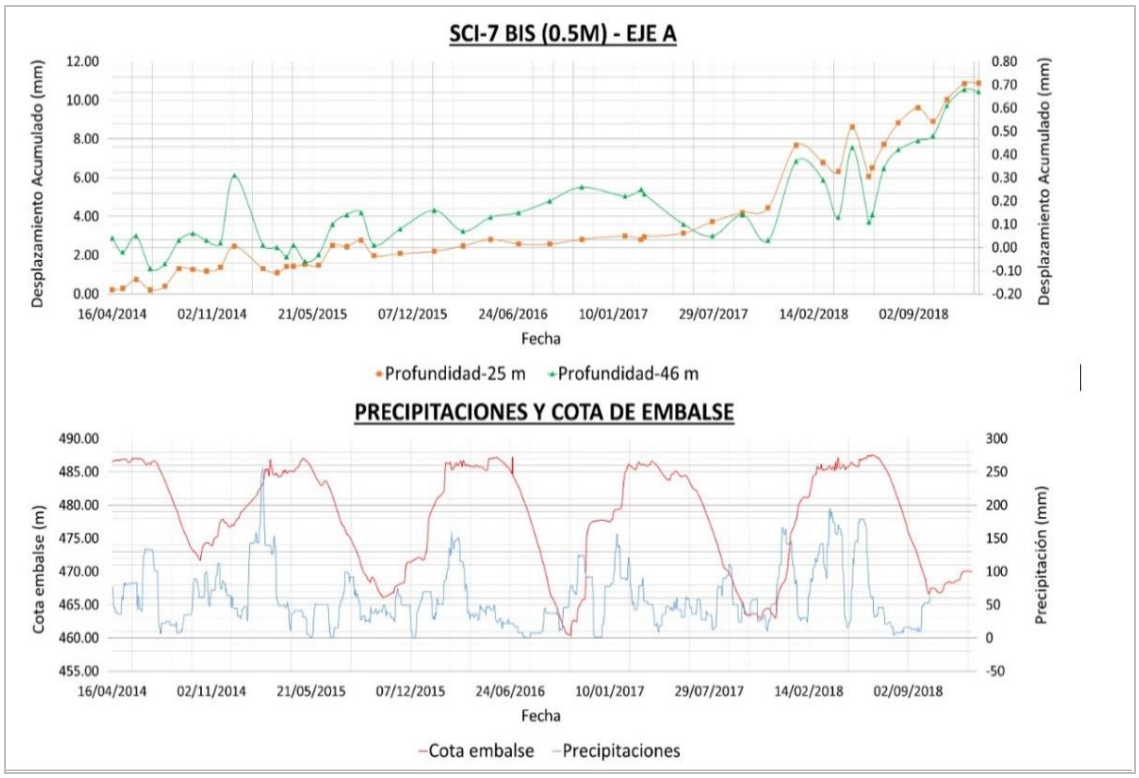


Figura 5.32. Este inclinómetro (SCI-7bis) aporta resultados entre el 10/04/2014 y el 09/01/2019. En el mismo se aprecian tanto la SPR (-25 m) como la SIR (-46 m), observándose con claridad que ambas superficies se activaron de forma simultánea, en especial desde 2018 a causa de un volumen de lluvias notable en la primavera. Las velocidades de movimiento son muy diferentes. Arriba el desplazamiento en mm: SPR a -25 m de profundidad y SIR a -46 m (se ha modificado la escala para ver la simultaneidad) y abajo en azul las precipitaciones en mm/mes y en rojo el nivel del embalse (fuente: Gobierno de Navarra, Geoconsult, 2019).

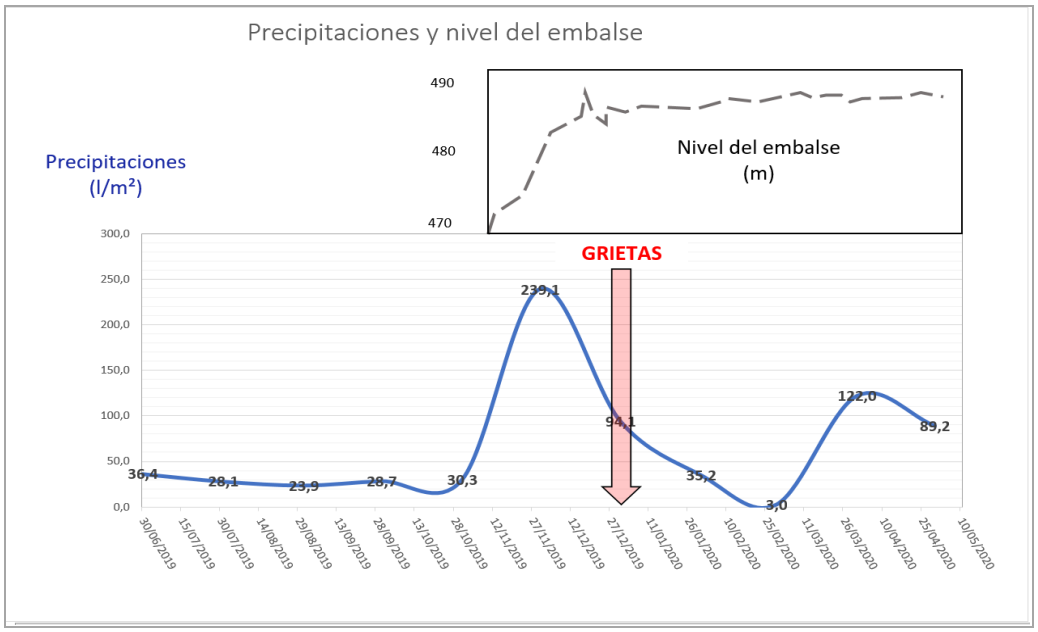


Figura 5.33. Entre noviembre y diciembre de 2019 con 240 y 95 mm respectivamente, la estación meteorológica de Yesa (Gobierno de Navarra) registró valores de precipitación cercanos a 335 mm. Las grietas se detectan en enero de 2020 tras un notable incremento del nivel del agua hasta casi el 100% y un desembalse a mediados de diciembre. Fotografías y vídeos se divulgan desde los medios de comunicación a nivel regional y nacional.

Figura 5.34. Grietas en la parte alta de la ladera derecha de Yesa a principios de enero de 2020 (El Confidencial).

La CHE también hizo un informe especial al respecto con un apunte y una nota de prensa afirmando que esas grietas ya existían, que no afectarían a la estabilidad global y que todas las laderas del mundo se mueven, por lo que procedió a su tapado. Desde los informes de las universidades y expertos consultados por la propia CHE, se afirma que esas grietas son vías de rotura y reapertura, por lo que se generan y crecen con el avance del movimiento, nunca se van a cerrar, siempre se van a ampliar y suponen nuevas vías de entrada de agua al seno de la ladera en movimiento. Por otro lado, la estabilidad global en 2023 ya se asume precaria con FS≈1 en un convenio del 100%, por lo que las grietas serían una manifestación, un resultado o un efecto de ese estado de equilibrio estricto, no una causa.

El agua de precipitación de noviembre y diciembre del orden de 335 mm ya habría tenido tiempo de infiltrarse y conformar las pequeñas dispersas inestabilidades del tipo "piel de leopardo", aumentando las presiones de poro.

El profesor Picarelli nos advirtió en sus conclusiones que *"… las excavaciones realizadas justo después de los eventos de febrero de 2013, con el fin de reducir los niveles de tensión habrían sido muy efectivas. Sin embargo, un problema importante es el control eficiente de las aguas poco profundas..."*. Serían pues las detonantes de las futuras inestabilidades que, tras unas fuertes lluvias, se van a activar semanas o meses después, alcanzándose casi sin esperarlo, escenarios más cercanos a la Situación 6 o "hipótesis accidental" que cualquiera de los futuros escenarios tanteados y afectando principalmente a las zonas poco profundas, tal y como vemos en la aceleración detectada en diciembre de 2019 en la SPR y la activación de nuevos deslizamientos por encima de ella.

Si se consiguiese desacelerar el movimiento hasta un valor a definir como "estable" como el propuesto en 2019 entre 0,5 y 1,5 mm/mes o 1,2 y 3,0 mm/año por Geoconsult, el incremento de la presión de poros con retardo, puede suponer acelerar esas zonas localmente activas semanas o meses después, a pesar de las excavaciones y otras medidas; por tanto, la activación de las alarmas cuando éstas estén instaladas, puede venir cuando menos se la espera si este efecto no queda bien definido. Lo más llamativo de la modelización de 2019 fue que se indicaba que las superficies críticas de rotura se darían a lo largo de la superficie inferior de rotura (SIR):

"El resto de excavaciones previstas, pero no realizadas (demolición de la urbanización Lasaitasuna y una excavación de 500.000 m³ aproximadamente..., aumentan el FS un valor de 0,02. Pero el cambio importante que se produce ahora es que la superficie crítica de rotura es la SIR. En efecto, bajo intensidades de lluvias considerablemente mayores que las introducidas en los cálculos efectuados..., el FS global no cambia porque la SPR permanece estable y el FS crítico corresponde a la SIR". (Geoconsult-Gobierno de Navarra, 2019).

El problema es que la naturaleza quiso ir por otros derroteros. Fue la superficie superior (SPR) y no la inferior (SIR) la que mostró y sigue mostrando mayor aceleración, en especial es llamativo el dato del 16 de diciembre de 2019 que, en cierto modo, corrobora la observación de vecinos y medios de comunicación sobre las grietas detectadas unos días después.

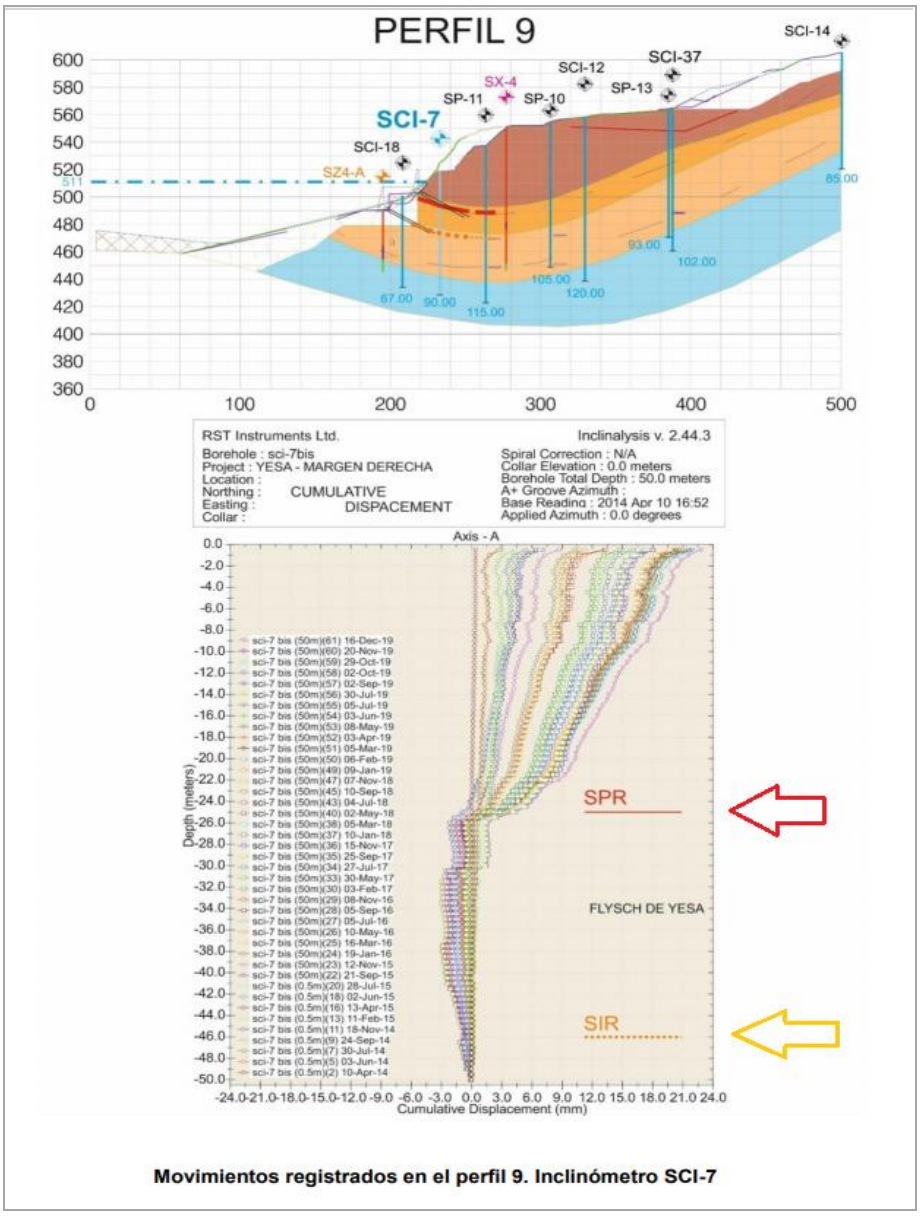
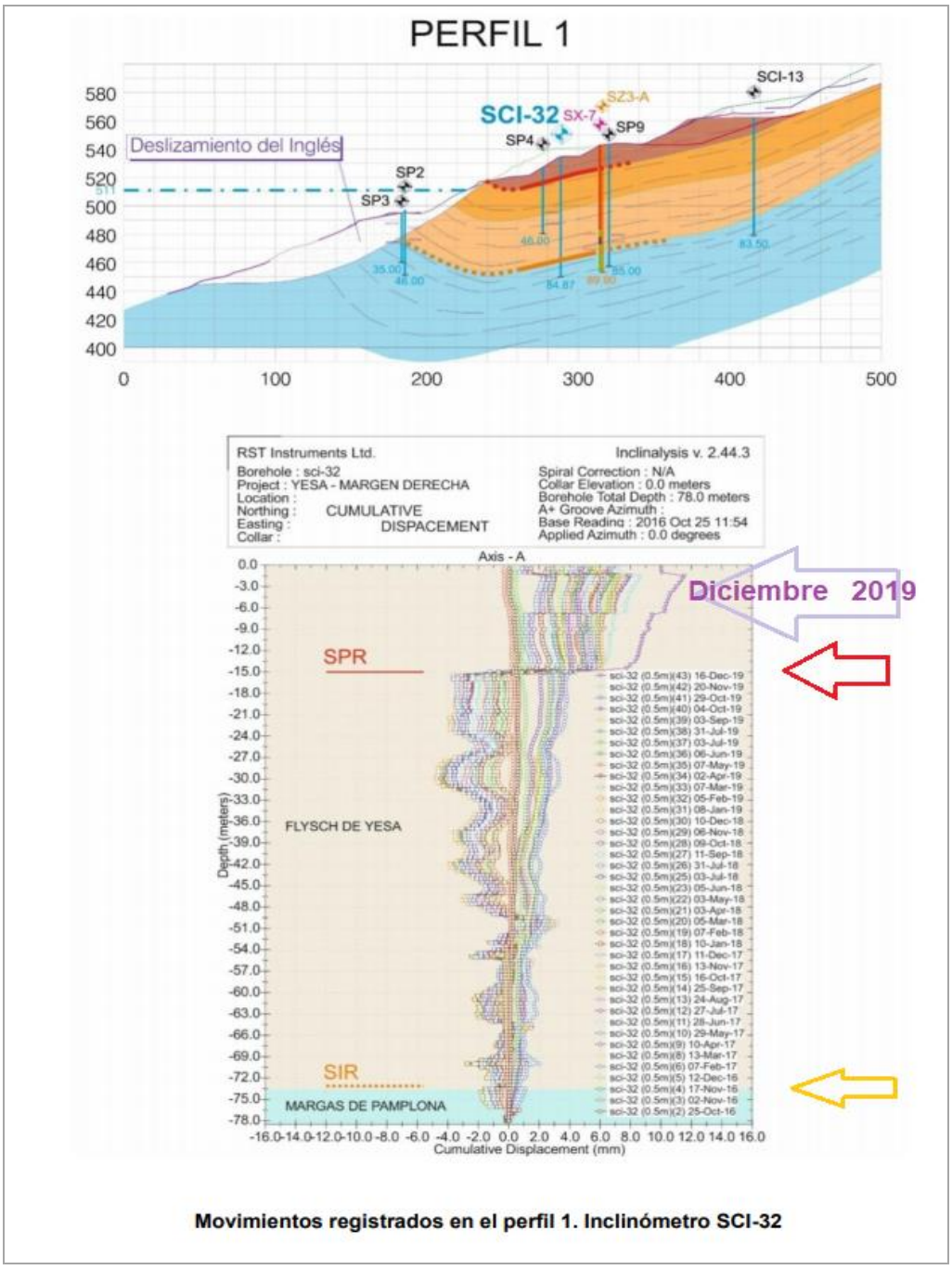


Figura 5.35. El perfil 9 fue el utilizado de referencia en la modelización del Gobierno de Navarra. En él, el sondeo inclinométrico SCI-7 seguía mostrando movimientos claros en la SPR y también por encima. Se observa la disposición de los futuros anclajes, cuyos bulbos estarían en pleno plano de rotura superior. Llama particularmente la atención el movimiento de los últimos registros del 16 de diciembre de 2019. (Informe del Ayuntamiento de Sangüesa-Ingeotyc, 2020).



Movimientos registrados en el perfil 1. Inclinómetro SCI-32

Figura 5.36. El perfil 1 recoge la situación aguas arriba de la presa, en el entorno del deslizamiento de El Inglés, cuyos movimientos estacionales han sido registrados por los hitos topográficos. El inclinómetro SCI-32 mostró, además, un movimiento importante en el último registro de 2019 a una profundidad de rotura de 15 m. Nuevamente fue la superficie superior de rotura (SPR) la superficie más inestable. Se pueden ver también por encima de SPR las nuevas superficies de rotura (Informe del Ayuntamiento de Sangüesa-Ingeotyc, 2020).

5.4.7. Medida de la velocidad del movimiento como definición de estabilidad.

En el aquel informe del Gobierno de Navarra de 2019 encargado a Geoconsult se sugiere que el umbral de velocidad a no traspasar (aunque sin especificar aún) podría estar entre 0,5 y 1,5 mm/mes, aunque también se propuso una cifra más amplia en el tiempo: entre 1,2 y 3,0 mm/año.

Durante los próximos años, apuntaba, no sólo se debería definir ese umbral, sino reducir a más de la tercera parte el movimiento detectado (2019-2022) para que no salten las alarmas si finalmente se aceptase la definición de "estable" y "en caso contrario" en aquellos nuevos términos, ya que actualmente se estarían saltando esos umbrales constantemente, tanto considerando intervalos de respuesta de 30 como de 365 días.

Sería necesario instalar un sistema de monitorización y control en toda la ladera derecha y sería necesario estudiar detenidamente el caso de la ladera izquierda. Una red de sensores funcionando a tiempo real que, desde la garantía de no fallar nunca en su funcionamiento, deberá estar funcional el resto de la vida útil de la infraestructura.

Mediría movimientos desde la superficie hasta más de cien metros de profundidad en varias zonas, coincidentes con la SIR, ya que en algunos puntos tendrá que descender por debajo de los 117 m en las Margas de Pamplona y no deberían romperse los dispositivos, como algunos de los inclinómetros que quedaron neutralizados. El sistema iría conectado a una centralita, que a su vez estaría directamente acoplado a una infraestructura de avisos, la cual haría saltar las alarmas si la cosa excede un umbral de velocidad que se debe concretar como se recomendó en 2019. Es decir, dependiendo del lugar de la ladera donde se coloquen los sensores, podremos tener una ladera más "estable" o más "en caso contrario".

Este entramado monitorizado de sensores, punto de control e infraestructura de alarma, sería el encargado de detectar uno, procesar e interpretar otro y ejecutar finalmente el último, los algoritmos previamente fijados de peligrosidad para hacer saltar las alarmas.

Este sistema se debería instalar tras finalizar las nuevas obras, además de las adicionales que siguen sin especificarse para alcanzar una situación que se pueda calificar de "reconocidamente estable" (Gobierno de Navarra 2019). Ese sería el punto de partida que más tarde habría de ser comprobado y verificado como efectivo y funcional.

En octubre de 2022 se da a conocer el informe del Colegio de Caminos, Canales y Puertos (CICCP) fechado en abril de 2021 que, en cierto modo, apunta también a una solución final de similares características, pero amparada bajo una nueva estrategia de avance de las obras: *el método observacional*.

Durante más de dos décadas de obras ha habido que reconsiderar los cálculos y expectativas y volver a ponerse manos a la obra para *"paralizar"* el movimiento que, por fin en 2021, se reconoce como una constante —aunque no se tiene claro si es monolítico o por partes—, pero que se afirmó en diferentes ocasiones haber conseguido parar, con lo cual ya sólo quedaba *"estabilizar la ladera"*. Solo ha cambiado una cosa: la estrategia, en la asunción de que el movimiento no parará.

Pero, realmente avanzar, excavar, construir, demoler, retirar, rehacer…, y observar las reacciones es lo que se ha venido realizando desde el principio (Morales T. 2023). Así que la propuesta del método observacional es prácticamente la misma, no encierra ninguna novedad que no sea un seguimiento *"cuidadoso"* del tipo ensayo-error, pero con la existencia de movimiento, ahora sí, constante (Gutiérrez, F. 2013, Casas, A. 2013, Aretxabala, A. 2013, Casas, A., Aretxabala, A. 2020).

Se asume abiertamente su presencia irreversible para ir avanzando en el llenado y la fase final. Sin embargo, se parte de la creencia (que no certeza) de que toda inconsistencia o imprevisión futuras, como las recogidas en los diversos informes de la última década que hemos analizado, debidas a la repentina aceleración hasta velocidades aún sin concretar, a partir de ahora serían reversibles.

En efecto, en 2013 tras superar el punto de no retorno o rotura (segundo escenario de Geoconsult 2019 o Situación 2 cuando se desata la rotura definitiva tras la Situación 1 o histórica más estable), por las dos superficies mejor estudiadas, la principal y la profunda, la CHE se planteaba ya un método observacional que creía reversible, a saber: dado que su segundo objetivo era *"la estabilización de la ladera"* se afirmaba entonces haber conseguido el primero: "*paralizar el movimiento*" (CHE 2013).

Pero en 2019 fue prácticamente lo contrario: primero lo que se buscó fue alcanzar una situación *"reconocidamente estable"* para, segundo: "*reducir el movimiento"* (que no pararlo). Paradójicamente, según la propia CHE, en 2013 estaba paralizado, pero ya asumimos que siempre se moverá (Gutiérrez, F. 2013, Casas, A. 2013, Aretxabala, A. 2013, Casas, A., Aretxabala, A. 2020) hasta valores que *quizás* pudiéramos admitir como definitorios de estabilidad (Gobierno de Navarra, Geoconsult 2019, CICCP, 2021).

En 2019 se sugirieron varias opciones para considerar "el movimiento" como "estable" (sic) en un orden de magnitud de mm/año, pero en 2020 se triplicaba esa expectativa. Desde entonces vivíamos atrapados en ese bucle. Hasta que llegó 2021…

Los autores del informe del CICCP han encontrado una salida que consideran satisfactoria, mira al futuro recomendando dejar de estudiar las etapas anteriores *ya superadas* y propone someter al conjunto presas-ladera a las *situaciones esperables en su futura explotación* sin que su informe diga la última palabra:

> *"Desde luego la historia técnica de las presas de Yesa no termina con este Dictamen ya que, aparte de las pruebas de embalse y desembalse es necesario un seguimiento, a lo largo de la explotación, del comportamiento de los sistemas de drenaje, de la evolución de los niveles freáticos y de los movimientos asociados a diversas condiciones de llenado y acciones climáticas".* (CICCP, 2021).

Y continúa:

> *"Dado el tiempo necesario para aclarar todos esos puntos y elaborar un modelo creíble y de errores acotados, deben estudiarse otras formas de avanzar. Creemos que la principal opción es el método observacional, ya comentado anteriormente. Hay que calibrar las obras en su estado actual y futuro, con todos los refuerzos y mejoras previstas, y dejar de investigar etapas anteriores ya superadas. Se trataría, por tanto, tal como se comenta en los capítulos 9 y 10, de someter las presas a las situaciones esperables en su futura explotación, pero de una manera muy cuidadosa y detallada y siempre con carácter reversible. Es un método ya utilizado en otros casos y desde luego mucho más fiable que los modelos numéricos. Hablando siempre del comportamiento de la ladera creemos que podrían establecerse hasta seis escalones de llenado y vaciado":*

FASE	COTA DE EMBALSE	COTA DE DESEMBALSE
1	488	--
2	494	490
3	499	495
4	504	500
5	509	505
6	514	513

Figura 5.37. Tabla para los escalones de llenado y vaciado del informe del CICCP, 2021. Pg.286

Los autores del informe del CICCP estiman una duración de unos seis meses para cada nivel (5.37), aunque los plazos podrían modificarse, especialmente después de los primeros escalones tras ver qué es lo que pasa, aunque actualmente, como nos movemos en velocidades de desplazamiento muy pequeñas (del orden de mm/año) creen los autores que no cabría esperar grandes perjuicios.

Creen importante que los desplazamientos y las velocidades a la que se produzcan las reacciones previstas o imprevistas, tanto de las presas como de la ladera, sean interpretados por técnicos muy cualificados, disponiendo de una auscultación prácticamente continua de la ladera que, hasta ahora no existe, y en la que se descartan los seguimientos con taquímetros o con los hitos topográficos actuales.

El seguimiento debería ser *"casi semanal"* en los primeros 3-4 años de explotación (es decir, si se entrega la obra en 2027, hablaríamos de 2030-2031), pasando posteriormente a una frecuencia menor que dictaría el comportamiento observado, pudiendo llegar así a un control mensual o después de lluvias importantes.

5.4.8. Someter a las presas a situaciones esperables en su futura explotación.

Como hemos leído más arriba, la propuesta sobre la que se fundamenta el método observacional es que*, … "Se trataría, por tanto, tal como se comenta en los capítulos 9 y 10, de someter las presas a las situaciones esperables en su futura explotación, pero de una manera muy cuidadosa y detallada y siempre con carácter reversible"*. Creemos que hay tres problemas graves de fondo en la propuesta de abril de 2021:

1) El primero sería que, según el Eurocódigo 7 cuando se utiliza el método observacional, se deben cumplir una serie de requisitos *antes* del comienzo de la construcción. La parte más delicada en cuanto a la geotecnia en Yesa (las laderas) ya han respondido en 23 años de diversas maneras que se pueden considerar como no esperadas. La obra ha superado el 90% de su itinerario constructivo, los límites admisibles de comportamiento debieron definirse y evaluarse, como indica la norma, *antes.* Además, se debió demostrar que había una probabilidad aceptable de que el comportamiento real se encontrara dentro de los límites aceptables previamente definidos. También se exige que, el (de momento inexistente) programa de instrumentación, debió haber demostrado entonces que el comportamiento real se encontraba dentro de los límites aceptables previamente definidos y que esa demostración instrumental debió y debe demostrarse claramente *en una fase suficientemente temprana* y con intervalos *suficientemente cortos* que permitan adoptar con éxito las medidas de contingencia requeridas. El movimiento extremadamente lento que se comenzó a reconocer tímidamente hace una década, y hoy ya es un consenso del 100%, no entraría dentro del tiempo de respuesta de los instrumentos y menos aún de los procedimientos de análisis de los resultados.

Éstos deben ser lo suficientemente rápidos en relación con la posible evolución del sistema. Incluso si respuestas geotécnicas inesperadas con acontecimientos *graves* (Morrás, J. 2014) como fueron el movimiento global de unos 30 cm, la expropiación forzosa y demolición de 104 viviendas, el levantamiento de la presa en el estribo derecho, probablemente empujada por la ladera que la sustenta o la continuidad del movimiento que presiona (sin saber la magnitud de dicha presión) sobre los nuevos muros y anclajes en la zona baja, se consideran acontecimientos *normale*s o *previsibles*, la propuesta oficial del método observacional llega con el final de la obra. Habría que reconsiderar si de verdad esta vez se prevé entregar en 2027 para tener datos de este método en 2030-2031; pero incluso así, la realidad es que tampoco hablaríamos de una fase temprana.

El método, generalmente se aplica antes de empezar (ab initio). Si se hace de manera sobrevenida (best way out), cuando la construcción está avanzada e incluso ha finalizado, es debido a que se ha producido un desarrollo inesperado, un fallo o un accidente.

Los autores del informe del CICCP de 2021 nos recuerdan, no obstante, que el factor de seguridad (FS) no se recoge en ninguna norma. Habría que indicar que, de acuerdo con el Eurocódigo 7, los factores parciales de minoración de parámetros geotécnicos en el análisis de estabilidad global y de taludes, van desde un mínimo de 1,40 en estabilidad global sin estructura de coronación, taludes de desmonte y obras hidráulicas de menor importancia, a 1,50 y 1,80 en estabilidad global con estructuras en coronación o talud, estructuras en obras viarias y edificación, respectivamente.

Como señalan Estiarte et al. (2016) los cálculos pueden seguir realizándose de acuerdo con la práctica geotécnica habitual en España, sin minorar los parámetros resistentes y obligando a que el coeficiente de seguridad sea superior al valor del factor parcial correspondiente a la actuación geotécnica de cada caso en estudio. En este sentido, es verdad que no se incluyen valores específicos de FS para el caso de Yesa, una obra excepcional de categoría 3 según el Eurocódigo y con unas condiciones de estabilidad inicial de la ladera *precarias*, pero obviamente, las limitaciones de seguridad deberán ser superiores, nunca inferiores a las indicadas previamente, teniendo en cuenta, además, que se reconoce explícitamente un elevado nivel de incertidumbre geotécnica e hidrogeológica.

2) El segundo problema es que, si se asume que los modelos numéricos y análisis computacionales no pueden garantizar que después de 23 años de obras se pueda culminar una puesta en servicio segura, se considere, sin embargo, aplicar este método de ensayo y error o método observacional. Y es que ya hemos visto, es el que se ha venido aplicando siempre. Pero se hará desde la creencia —que no certeza— de que, a partir de ahora, y no como hasta ahora, cualquier avance de las inestabilidades descritas en la literatura sobre Yesa (resumidas en el punto anterior), sería reversible. Se obvia así que esto sería inadmisible para materiales sometidos a fatiga o cuya pérdida de cohesión es irreversible, como se vio desde 2013. Por otra parte, se afirma que *esta metodología es habitual y tradicionalista*, pues se ha hecho en otras ocasiones, pero siendo el camino elegido tan delicado y cuidadoso no se proporciona ningún ejemplo, y es que, realmente Yesa es el mejor. Descartar las experiencias del pasado al creer superado lo peor, porque el movimiento es menor, supone una pérdida irreparable de información.

3) Y tercero. Tenemos que advertir del hecho incuestionable de que existen muchas *"situaciones esperables"* a las que no se puede someter artificialmente a las presas, y son precisamente las más desfavorables: sismos, oleajes por viento, lluvias torrenciales o avenidas importantes.

Ninguna se puede reproducir. La única manera de abordar la seguridad en estos casos es hacer cálculos técnicos basados en modelos científicos y en datos geohistóricos. Pero si los cálculos basados en las sólidas experiencias del pasado y los modelos que se derivan de ellas ya no valen, tal y como plantea el informe CICCP, resulta que el método observacional sustitutorio que se propone tampoco vale.

No se pueden recrear escenarios desfavorables de manera controlada y reversible. Un ejemplo: en el plan de llenado-vaciado que se propone (ver figura 5.37), el nivel 6 indica un llenado hasta la cota 514 m, pero el máximo nivel normal es 511 m y por encima de ese nivel el agua escaparía por los aliviaderos. La cota 514 m solamente se alcanza con avenidas de alto periodo de retorno, por lo que no puede formar parte de un plan de llenado-vaciado porque no se puede lograr ese nivel artificialmente, y mucho menos mantenerlo durante seis meses. De hecho, la cota del muro de Sigüés es 514,25 m y estaríamos al límite de rebosarlo con una simple brisa.

El argumento de la costumbre debe ser desarrollado. Sin ejemplos que justifiquen el uso de la experiencia tradicional queda ciertamente misterioso. ¿Dónde, cómo y con qué éxito se ha aplicado el método observacional para embalses con problemáticas similares al de Yesa y que no sean Yesa? Así que el proyecto se ha quedado sin cálculos justificativos, nuevamente sin garantía de seguridad ni análisis que la pudiesen avalar. Quizás por eso ahora está la obra parada a la espera de una recapitulación de todo lo sucedido en los últimos 23 años.

El avance así propuesto será a ciegas en cuanto al comportamiento de la ladera derecha, pero se irá viendo su reacción de manera cuidadosa en la creencia de la nueva reversibilidad que 23 años de experiencia contradicen. Es justamente lo que se propone, pero también es lo que se ha venido haciendo prácticamente desde el inicio de las obras.

5.4.9. La sismicidad en Yesa.

Los análisis posteriores al deslizamiento de 2013 utilizaron como aceleración básica ab = 0,04g tal y como indicaba la NCSE-02 de 2002. Recientemente, nuevos análisis fueron sustituyendo la actualización de los mapas de peligrosidad sísmica del IGN de 2012 y 2015, que para Yesa proporciona un valor de ab = 0,09g. Deberíamos tener en cuenta que al igual que en Pamplona, que pasó también de 0,04g a 0,09g, un terremoto tan habitual como el Mw4,2 con epicentro en Olave del 10 de marzo de 2017 arrojó un valor de ab de 0,16g en el acelerógrafo de la capital, casi el doble de la considerada en la actualización de 2012 y 2015. Además, el pasado sísmico de la Canal de Berdún es mucho más intenso que el conocido en la cuenca de Pamplona y la geohistoria así nos lo ha enseñado.

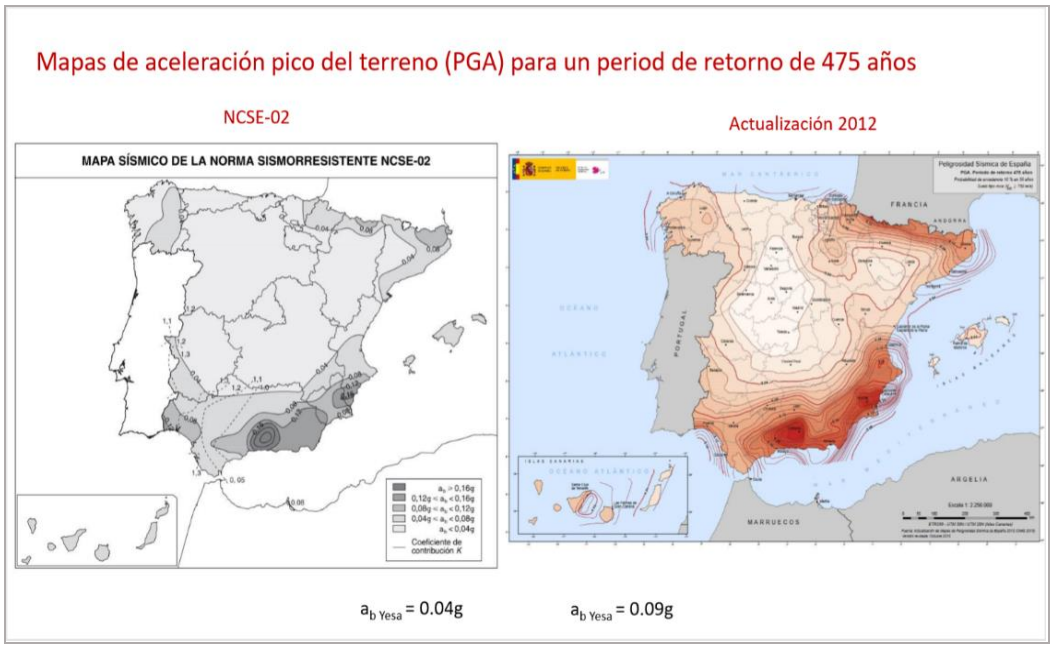


Figura 5.38. Mapa sísmico de la NCSE02 de 2002 (izquierda) y 2012 (derecha)

No sólo es difícil precisar e incluso definir el factor de seguridad de partida de una ladera en movimiento por lo visto en los apartados anteriores, sino que además en lo que atañe al impacto sísmico éste vuelve a ser necesario, como se indicó en 2019 por el Gobierno de Navarra para el resultado final y en el momento crítico.

Tras la calificación de "no aplicable" y "poco útil" al parámetro factor de seguridad (FS) que vimos en 2019, cualquier cálculo, supera en varios órdenes de magnitud todo desplazamiento que se pudiera catalogar como de "estable" (se mueve poco) o "en caso contrario" (se mueve más) si queremos evitar echar mano del propio FS absoluto como convenio internacional.

Sin embargo, tanto del lado de la seguridad como de la inseguridad, varios estudios han mostrado que el desplazamiento del terreno en laderas que sustentan presas de tierra es sensible a la aceleración de rendimiento crítico, la que propicia que FS<1 y como vemos no haría falta un terremoto especialmente grande para ello, es más, no haría falta ninguno, sólo las excavaciones de acogida del estribo y para labores de estabilización (CHE 2013) sumadas a unas lluvias importantes, ya lo habían conseguido.

El problema que vemos en los análisis, es que pequeñas diferencias en dicha aceleración pueden causar grandes diferencias en el desplazamiento predicho. Una pendiente se deformará durante la agitación, y más si ésta ya ha demostrado comportarse de manera viscosa, ya está triturada, y además no es rígida, tal es el caso de las laderas de la cerrada de Yesa, en especial la ladera derecha.

Por lo tanto, es claramente previsible que porciones adyacentes de la masa deslizante puedan estar fuera de fase durante la sacudida, máxime si el sismo esperado es de baja frecuencia como en la Canal de Berdún (fallas sismogenéticas relativamente cortas). Ello determina que diferentes áreas de la ladera pueden acelerar en diferentes direcciones.

En la página 161 y siguientes de aquel informe del Gobierno de Navarra de 2019 vimos la consideración que se le dio a un terreno al que globalmente se reconoce como viscoso y reptante y con la particularidad de que un FS<1, por ejemplo, los datos que se dan de 0,90 tras las fuertes lluvias de 2018, no llevarían a desprendimientos catastróficos, sino a un aumento de la velocidad.

Pero a la hora de calcular la aceleración de cálculo (ac) se le considera al global como un *Terreno tipo II*: una roca muy fracturada, suelos granulares densos cohesivos (el convenio científico al 100% es c'=0 en las zonas previamente deslizadas y en las fracturadas) o duros, con una velocidad de propagación de ondas elásticas transversales o de cizalla dentro del rango 750-400 m/s. El resultado es un valor de la variable S=1,28.

Hemos recalculado para el caso de tratarlo como un *Terreno tipo III* más acorde con un terreno brechificado con una componente viscosa, obtenemos un valor de S=1,35 considerando una ab de 0,16g como la registrada en el evento Mw4,2 del 10 de marzo de 2017. Para un *Terreno tipo IV* obtenemos un valor de la variable S=1,76. Las aceleraciones de cálculo ac oscilarían entre 0,28g y 0,37g, el doble que en aquel informe del Gobierno de Navarra.

En el caso concreto de Yesa se optó entonces por utilizar acelerogramas reales, seleccionados mediante el método propuesto por Vargas et al. (2013). Para ello utilizó una amplia base de datos europea de movimientos sísmicos fuertes (Ambraseys et al. 2002, Ambraseys et al. 2004) de donde se ha tomado la mayoría de los acelerogramas. Algunos acelerogramas adicionales para los espectros de tipo II se seleccionaron de la base de datos española, disponiéndose al final de 1000 registros de aceleración.

Desconocemos si el evento es2017cpdob del 10 de marzo de 2017 fue tenido en cuenta para determinar la muestra de los acelerogramas de los sismos seleccionados. Todos los acelerogramas presentan una aceleración pico de 0,20g (1,98 m/s^2) correspondiente al valor del PGA del espectro de amenaza considerado como dato de entrada.

Los desplazamientos máximos obtenidos para un periodo de retorno de 1000 años fueron cambiando en las diferentes versiones entregadas, de más de 3 m a desplazamientos del orden de 27 cm. Para un periodo de 5000 años en la última versión son de entre 14 y 60 cm.

Por ello se adelantaba en aquel informe del Gobierno de Navarra que *"… sería importante un análisis del comportamiento frente al sismo de las estructuras proyectadas en coherencia con la entidad de los desplazamientos deducidos en los cálculos dinámicos que consideran la acción sísmica. Es decir, dado que ha existido un 'desacoplamiento' entre las comprobaciones estructurales y las de movimientos esperados en la ladera ante un sismo, debe comprobarse que la estructura, y sobre todo las zonas singulares de la misma (encuentro con la presa, por ejemplo) responden de forma adecuada ante un sismo".*

Es la línea de estudio propuesta en el informe de la Universidad de Navarra (Aretxabala, A. 2015) presentada en el Ayuntamiento de Sangüesa, en el Parlamento de Navarra y en las Cortes de Aragón. En el análisis detallado de los cálculos incluidos para el *Proyecto de Actuaciones de Mejora*, se apuntaba a que la zona superior de la ladera quedaría en la situación final con factores de seguridad reducidos, porque al final el parámetro a tener en cuenta para evaluar en impacto sísmico no puede ser otro que el factor de seguridad. La utilización del Eurocódigo en 2019 asumió valores de la aceleración rebajados a la mitad y aplicados a zonas aisladas con factores de seguridad parciales, minoración de resistencias y mayoración de cargas, en vez de FS globales. El evento *es2017cpdob* Mw4,2 del 10 de marzo de 2017 en Pamplona, a 12,6 km del epicentro, generó una aceleración pico de 0,16g. Por precaución, parece razonable considerar ese valor en una zona cuyo pasado sísmico es el más violento del área prepirenaica occidental y mucho más que el área metropolitana de Pamplona.

Fecha	Hora	Prof. (km)	Intensidad	Magnitud	Epicentro	Estación	Distancia Epicentro (km)	Aceleración máxima (mg)			ab máx.	ab máx. NCSE02
								N-S	V	E-W	(g)	(g)
10/03/2017	8:43:37	12	V	4,2	NE OLAVE	Pamplona	12,4	108,01	50,39	161,33	0,16	0,04
10/03/2017	17:21:24	12	III-IV	3,4	E RIPA	Pamplona	14,1	32,66	10,98	33,93	0,03	0,04

Figura 5.39. Valores de aceleración N-S, V y E-W del evento es2017cpdob del 10 de marzo de 2017.

El profesor Luciano Picarelli ya lo tuvo en cuenta al apuntar que el bajo valor del FS es un problema que requiere cuidado y habilidad, porque realmente el otro problema, el de la sismicidad, a pesar de la suerte que ha supuesto que de momento no se haya manifestado, siempre ha estado latente, incluso antes de 2013:

> *"Teniendo en cuenta el bajo factor de seguridad de la masa de suelo debido a la presencia de distintas superficies de cizalladura, los posibles efectos de un terremoto son un aspecto completamente diferente del problema que hay que manejar con cuidado y habilidad, pero esto era un problema incluso antes del evento de 2013".* (Picarelli, L. 2019).

Los valores del FS parcial de las zonas altas de la ladera están por debajo de los alcanzados por la SIR o SPR en los escenarios o situaciones que se denominaron 5 y 7.

La zona sufriría movimientos muy elevados (>2 m) en caso de acción sísmica extrema (P. R. de 5000 años). Son datos que se obtuvieron en el informe del Gobierno de Navarra de 2019 *"a partir de procedimientos paralelos o alternativos que, en ambos casos, muestran un escenario más favorable"* que los anteriores, lo que llevó a afirmar que *"la acción sísmica no parece condicionar la viabilidad de la presa",* que es exactamente lo mismo que decir que la acción sísmica puede condicionar la viabilidad de la presa. El profesor Picarelli dio en 2019 un repaso a todos los temas cruciales que afectan a la estabilidad de las laderas del entorno de Yesa, no sólo al problema de la sismicidad, una manifestación de la actividad tectónica local residual responsable principal de la estructura geológica actual. Sobre la naturaleza del plegamiento en las capas del flysch de la ladera derecha afirmaba:

> *"Si esta interpretación fuera correcta, una serie de flexiones homotéticas por plegamiento podrían estar presentes a diferentes profundidades en las formaciones mencionadas, al igual que cuando se dobla una baraja de cartas. Esto parece ser más que una hipótesis. De hecho, es coherente con la presencia de numerosos deslizamientos encontrados, a diferentes profundidades y en las diferentes unidades".* (Picarelli, L. 2019).

La afirmación del profesor Picarelli indica en este caso el profundo desconocimiento que se tiene de la estructura geológica de la ladera de Yesa. Aunque no es un error o una falta de conocimientos exclusiva del profesor italiano, el comentario es indicativo de hasta qué punto llega la ignorancia en la estructura del flysch de Yesa más de dos décadas después de comenzadas las obras, y, por tanto, de las raíces del problema de la estabilidad. La homotecia aludida por el profesor Picarelli no puede aplicarse por dos cuestiones fundamentales: 1) el método de reconstrucción de pliegues no queda claro si es concéntrico o de tipo kink y estaríamos aplicando dos modelos cinemáticos y dinámicos muy diferentes y 2) la longitud de onda del plegamiento sigue siendo desconocida. Ambas cuestiones, aunque tienen que ver con la cinemática del plegamiento, son cruciales para determinar la estabilidad de la ladera (Casas, A. y Aretxabala, A. 2020).

De acuerdo con el modelo adoptado por los autores del informe del Gobierno de Navarra de 2019, e implícitamente por el profesor Picarelli, el flanco sur del sinclinal es responsable de que la desestabilización de la ladera no sea total. Las superficies son complejas, y combinan las superficies de estratificación con las de fracturación. En este sentido no pueden considerarse causas exclusivamente tectónicas. La distinción entre movimientos superficiales y profundos no tendría así mucho sentido puesto que los movimientos de 2013 y posteriores demostraron que la ladera está funcionando como un suelo sin cohesión. La migración de la discusión sobre la seguridad del embalse desde el factor de seguridad al movimiento de los deslizamientos no sería casual, aparece prácticamente en todos los estudios que hablan de la *"estabilidad de los deslizamientos"* (sic) desde los que se arrojaron factores de seguridad inadmisibles o incompatibles con los movimientos.

5.4.10. Situación actual y reflexión final.

Durante años, las laderas de Yesa han sido analizadas con valores que resultaron erróneos para algunos parámetros. El mejor ejemplo es el del ángulo de rozamiento y su impacto en el factor de seguridad. Siempre se garantizaba la estabilidad global hasta la siguiente sorpresa o nuevos datos de movimiento. Un ejemplo tremendamente significativo es la consideración de valores del ángulo de rozamiento efectivo de 25º hasta 2013 y de ahí valores que garantizaban la seguridad en su momento y en el futuro en cada análisis temporal. La *"estabilidad del deslizamiento"* (sic) se proyectó hacia escenarios futuros que la realidad desmintió una y otra vez.

El problema fue que después de cada movimiento importante había que reconsiderar todos los cálculos y expectativas y volver a ponerse manos a la obra para *"paralizar el movimiento",* cosa que se afirmó hasta 2013 haber conseguido, con lo cual ya sólo quedaba *"estabilizar la ladera"*.

Hasta hoy, en que la responsable máxima de Protección Civil del Gobierno de Navarra, la consejera de Interior, afirmó a una pregunta al respecto en el Parlamento de Navarra que *"si bien hay movimiento en Yesa, tiene una estabilidad suficiente"*, Amparo López, 21 de septiembre de 2023 (actas del Gobierno de Navarra).

Sabemos que la ralentización de finales de febrero de 2013 respondió más al cese de las precipitaciones que a la retirada de peso de la zona alta (Picarelli, 2019). También sabemos que el movimiento disminuyó momentáneamente, pero sin haber podido ser paralizado, por lo que, aunque *el movimiento* sea *suficientemente estable*, la ladera no se ha podido estabilizar, y por ello, como afirmó la expresidenta de la CHE, se ha parado la obra a la espera de una cuarta modificación que garantice esa estabilización.

Sin embargo, el deterioro avanza. Fue en 2013 tras superar el punto de no retorno que la propia Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) se planteaba como segundo objetivo *"la estabilización de la ladera"* afirmando en el informe de preguntas y respuestas colgado aquel año en su portal web, haber conseguido el primero: *"paralizar el movimiento"*. En 2019, sin embargo, fue al revés; lo primero se buscaba alcanzar una situación *"reconocidamente estable"* para segundo: *"reducir el movimiento"*, pero paradójicamente en 2013 estaba paralizado.

Hoy asumimos que siempre se moverá (Informe del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2021) hasta valores que quizás pudiéramos admitir como definitorios de estabilidad siempre y cuando se sea cuidadoso a la hora de llenar, vaciar, hacer mantenimiento, etc. Se han propuesto unos valores, pero se superaban tras episodios relativamente lluviosos. Desde entonces vivimos atrapados en ese bucle.

Desde 2013 se han consolidado dos canales de comunicación: un primer canal de carácter científico en torno a la inestabilidad generalizada, el avance del deterioro y la inseguridad que han llevado a la paralización temporal para buscar la solución aprobada en febrero de 2016; un segundo canal se ha desarrollado en el ámbito político arrojando en los medios de comunicación de masas expresiones como la suficiente *estabilidad del movimiento* o una seguridad que no tiene definición estructural.

Se pueden retorcer cifras y palabras y volver una y otra vez a prometer estados fallidos de estabilidad futura que nunca llegan, bien sea afirmando que no hay movimiento cuando éste se mide en intervalos de meses y años, o bien ajustando éstos de tal manera que una vez asumidos se les fuerce a encajar en una categoría futura a la que previamente se defina como "estable", aunque tampoco encaje, dejando una vez más de lado toda lógica y prudencia a la espera del siguiente sobresalto.

En lo sucedido con las inestabilidades de Yesa parece aflorar cada cierto tiempo una voluntad irreprimible de escapar de la realidad y censurar todo aquello que nos devuelva a ella. Muestra de ello es que entre 2013 y 2016 se habló de *haber detenido el movimiento*, de 2016 a 2019 que éste era *extremadamente lento*, de 2019 a 2022 que la ladera derecha de Yesa se encontraba en *equilibrio estricto* y a partir de 2022 ya se habla de un constante movimiento*, pero con estabilidad suficiente* (López, A. 2023, consejera de Interior del Gobierno de Navarra). A finales de 2023, la obra queda parada a la espera de un cuarto modificado aprobado en febrero de 2016. En ese momento, como bien apunta la máxima responsable de Protección Civil, lo único estable es el movimiento.

Sea como sea lo que suceda a partir de ahora, creemos que el debate lógico, científico y técnico tocó a su fin hace años. Sabemos mejor que nunca, en la historia de las inestabilidades de Yesa, que la ladera derecha se mueve de manera variable, lo hace reptando con una notable componente heterogénea y viscosa, que sus diferentes velocidades, tanto en el espacio como en el tiempo, son dependientes de condiciones externas entre las que cabe destacar el clima, y también sabemos que ni es estable ni nunca después de 2013 se logró alcanzar ninguna *situación reconocidamente estable* que no sea la del propio movimiento. Tampoco en la actualidad.

Al igual que antaño, los representantes políticos y responsables en las instituciones han lanzado mensajes contrarios a esta realidad. La ciencia, entre otras cosas, también se dotó de métodos que apuntasen con la mejor exactitud posible a la existencia de límites. El describir y señalar un límite es algo muy distinto de ponerlo. Hay un límite en la estabilidad de Yesa al que se llega por cualquier camino y ese límite es la realidad del movimiento, *lento o extremadamente lento*, en *equilibrio estricto* con el factor oscilando la unidad o siendo un *movimiento con estabilidad suficiente*.

Por eso, desde diferentes caminos y desde diferentes disciplinas, incluso económicas (como el Tribunal de Cuentas en 2018), todas las personas que se acercan con rigor al problema creado en Yesa, acaban en ese límite que es la unidad del FS. Hubo un tiempo bastante cercano que afirmarlo sin eufemismos suponía la crítica violenta, los científicos que mantuvieron este hilo de realidad que alcanza nuestros días y que siempre reaparece y reaparecerá, fueron tachados de alarmistas, de estar en contra del progreso, etc. Las sesiones de las comisiones de estudio, las actas del Tribunal Laboral, del Tribunal de Cuentas y la hemeroteca así nos lo recuerdan. Pero las personas que hace años retorcieron e incluso manipularon cifras y valores de parámetros como la cohesión o el ángulo de rozamiento, la altura de los niveles de agua o cualquier otro parámetro, han tenido que admitir siempre que al final quien manda son los acontecimientos y la realidad aflora de una manera u otra. Hoy, con la obra ya parada a la espera de un nuevo modificado, puede caerse por enésima vez en la tentación de volver a hacerlo.

Es bastante significativo que, en junio de 2016, cuando ya se había aprobado el cuarto modificado de febrero de ese año, el *"Informe técnico de evaluación de diversos aspectos de seguridad de las obras de recrecimiento de la presa de Yesa"* elaborado por la comisión de expertos del Gobierno de Navarra —que dio lugar a la contratación de Geoconsult— contase con dos votos particulares disconformes por el hecho de que no se habían incluido a la hora de estimar la estabilidad futura, las ampliaciones y obras previstas que estaban sin especificar, apuntando así una vez más a un futuro estable gracias a un gasto entonces desconocido. Pero, realmente tampoco el dinero pudo con todo.

El incremento en el gasto no trajo la seguridad, muy al contrario, como presentó en 2015 la Universidad de Navarra en su informe para el Ayuntamiento de Sangüesa y como vemos en la figura 5.40 se realizaron obras de reparación y acondicionamiento de accesos e infraestructuras mientras avanzaban las deformaciones y se iban arruinando las viviendas de las urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa.

Carreteras de acceso, instalaciones de ocio, tuberías, etc., fueron reparadas o reconstruidas durante los episodios con mayores índices de movimiento de la ladera hasta que se frenara, cosa que según la CHE se consiguió en el verano de 2013. Dichas obras siguieron en ejecución incluso tras haber decidido los vecinos no volver a sus ruinas (en junio de 2013 se reunieron para tomar esa decisión). Todas aquellas obras realizadas sin objetivos claros o incumplibles, tal y como los obviados informes periciales indicaban, han sido recientemente demolidas con objeto de vaciar la zona que ocupaban para aliviar peso, pero como hemos visto, ha servido de bien poco (figura 5.40).

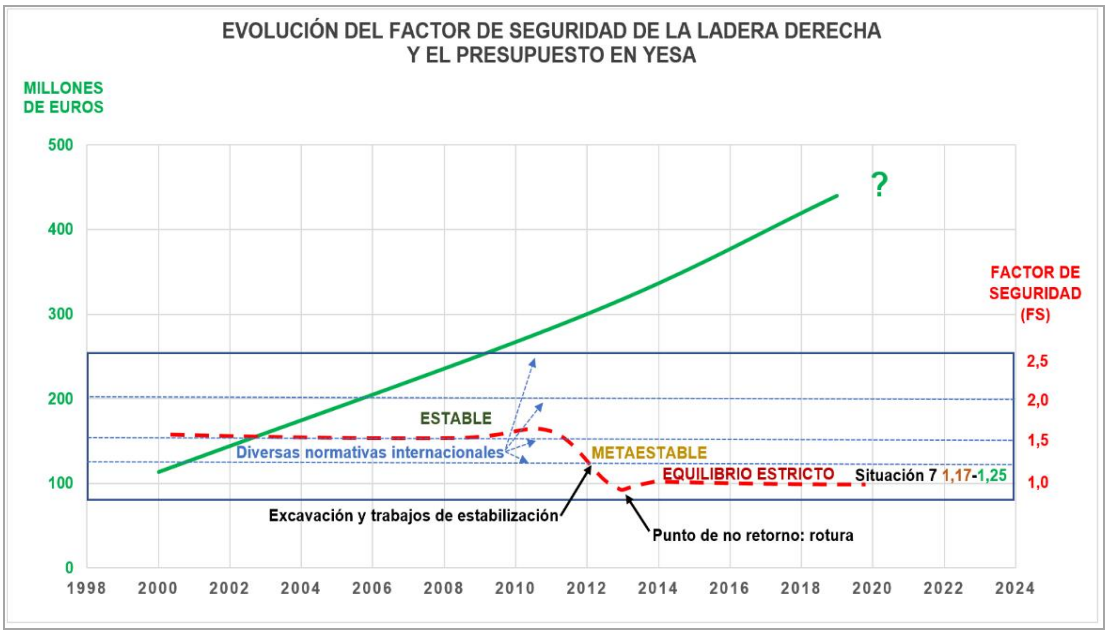


Figura 5.40. En 2015, la Universidad de Navarra presentó por primera vez en la historia de las laderas de Yesa, en su informe de carácter histórico pedido por el Ayuntamiento de Sangüesa, un gráfico que enfrentaba el presupuesto en millones de euros (BOE) con los factores de seguridad (FS) medios. Se consideraron los que se habían aportado en los informes publicados de cada época hasta 2014. Al igual que entonces, hoy también podemos añadir los datos de los nuevos informes del Gobierno de Navarra y del Ayuntamiento de Sangüesa y una estimación de lo publicado en conceptos como ampliaciones, arreglos, excavaciones, impermeabilizaciones o expropiaciones.

En los tiempos venideros miles de personas pueden ser condenadas a vivir bajo una ladera en movimiento a la que se le exige sustentar una presa. La evaluación ética, posiblemente con más necesidad que la evaluación sísmica o geotécnica, sigue esperando. La ladera derecha de Yesa sigue su movimiento descendente, aunque para la máxima responsable de Protección Civil de Navarra se trata de un *movimiento con estabilidad suficiente*. Si apenas fuimos capaces de intentar conocer la cinemática de la ladera en profundidad y después reconocerla, mucho menos la hemos podido controlar. Cabe destacar que en torno a Yesa se ha abierto un debate, especialmente entre los afectados, apelando al reciente trabajo *"El caso del retiro climático estratégico y gestionado"* presentado en 2019 y publicado en Science por varios investigadores de diversas universidades y centros de investigación climática, liderados por la profesora AR Siders de la Universidad de Harvard. Ella y sus colegas recomiendan una retirada de las áreas irracionalmente modificadas que se han convertido en inestables (Siders, A. R., Miyuki, H., Mach, K. J. 2019); esta retirada debe ser vista no como una derrota, sino como un avance. Se insta a las comunidades y a los gobiernos a reconceptualizar el retiro como parte del conjunto de herramientas utilizadas para lograr los objetivos sociales de seguridad y bienestar deseados.

Figura 5.41. Hay una década entre ambas tomas del satélite de Google. En este tiempo han desaparecido las urbanizaciones (104 viviendas) y una buena parte de la montaña para aliviar peso y evitar empujes. Todo ese material está depositado en su mayoría aguas arriba, a la derecha de la imagen de 2022 donde se pueden apreciar las tongadas. Hubo que hacer obras de emergencia para conseguir lo que se siempre se decía haber conseguido: parar el movimiento, pero los datos indican que la ladera derecha de Yesa sigue en movimiento. El área y volumen total afectados por los deslizamientos principales que cabalgan unos sobre otros son: una superficie de 237.418 m² con una máxima profundidad de 117 m y un volumen de 11.900.000 m³. Existen otras masas aparte de los cuatro lóbulos que se mueven en direcciones autónomas como el deslizamiento de El Inglés de medio millón de metros cúbicos justo a la derecha de la presa, además de otros de menor entidad, algunos ya excavados o enterrados. En total más de una docena. El volumen retirado bajo las urbanizaciones y en la montaña tras las obras de emergencia para aliviar carga se estima en cerca de 1.500.000 m³, aproximadamente el triple de lo removido en el deslizamiento de El Inglés. Todos los deslizamientos estudiados han sido provocados por el deficiente conocimiento de la geología y de los parámetros geotécnicos de los materiales involucrados, especialmente de los perfiles geotécnicos C.

La profesora AR Siders cree que necesitamos dejar de imaginar nuestra relación con la naturaleza como una guerra: *"no estamos ganando o perdiendo, debemos retroceder. Podemos hacerlo de la manera difícil, luchando por cada centímetro y perdiendo vidas y dinero mientras tanto. O podemos hacerlo de forma voluntaria y reflexiva y aprovechar la oportunidad para repensar la forma en que vivimos. Es por eso que el retiro debe ser estratégico y gestionado".* (Siders, A. R., Miyuki, H., Mach, K. J. 2019).

AR Siders y sus colegas no son los únicos expertos que apuntan en esa dirección, estas propuestas cada vez más profusas se adelantan a aquellas que se están instaurando por la fuerza. Desafortunadamente lo hacen tras las enormes desgracias humanas, económicas y sociales que no fueron ni son tan difíciles de prever. Las comunidades y los estados obtienen así opciones de adaptación adicionales y una mejor oportunidad de elegir las acciones más eficientes para ayudar a conseguir una mayor cota de prosperidad.

5.4.11. Conclusiones.

En la ladera derecha de Yesa, al igual que en el caso de Arre, pero a una mayor escala, se están produciendo varios deslizamientos de manera simultánea, en ciertas ocasiones están durmientes y de cuando en cuando se reactivan.

Se han podido contabilizar más de una decena en los diferentes estudios realizados, desde pequeños desprendimientos de baja entidad, algunos ya retirados, otros excavados o enterrados, hasta los dos mayores cuyas superficies de rotura se han denominado Superficie Inferior de Rotura (SIR) hasta unos 117 m de profundidad máxima; sobre él otra masa se desliza desde la superficie hasta unos 60 m de profundidad por la denominada Superficie Principal de Rotura (SPR). Actualmente se detectan nuevos deslizamientos activos por encima de la SPR. No se ha podido comprobar que ambas superficies de rotura tengan un segmento contrapendiente que se sume a las fuerzas estabilizadoras. El avance de los movimientos y los factores de seguridad deducidos de superficies que consideran la existencia dichos segmentos son incompatibles entre sí.

Es de destacar el denominado deslizamiento de El Inglés, un deslizamiento rotacional del que se tiene constancia desde los primeros informes de la presa aún existente; se ha venido activando en diferentes épocas.

Todos los deslizamientos, reactivados o recién formados han sido provocados.

El Factor de Seguridad (FS) absoluto cayó en 2013 a valores de inestabilidad cercanos a la unidad y/o por debajo ($FS \leq 1$) a causa de las excavaciones para la acogida del estribo y las labores de estabilización (informe CHE 09-01-2013).

Entonces la ladera quedó rota para siempre y en movimiento. Éste alcanzó cerca de los 20 cm/mes tras unas precipitaciones persistentes. El punto sin retorno fue traspasado y actualmente se están desarrollando nuevas superficies de rotura.

En febrero de 2013, al cesar las precipitaciones, se produjo una desaceleración del movimiento. Las obras de retirada de peso de la zona alta culminadas en noviembre de 2013 contribuyeron a esa ralentización.

Los últimos datos facilitados por el European Ground Motion Service (EGMS), del Proyecto Copernicus, a partir de las mediciones continuas del satélite Sentinel-1, indican movimientos verticales de rebote elástico (hacia arriba) en la zona alta de más de 5-10 mm/año, frente a otro en dirección vertical de similar magnitud en la parte baja (hacia abajo). Además, hay movimientos E-O que en la parte oeste son en dirección aguas abajo del orden de 2,5 mm al año y en la parte este en dirección contraria, aguas arriba hasta 5 mm/año (figura 5.43).

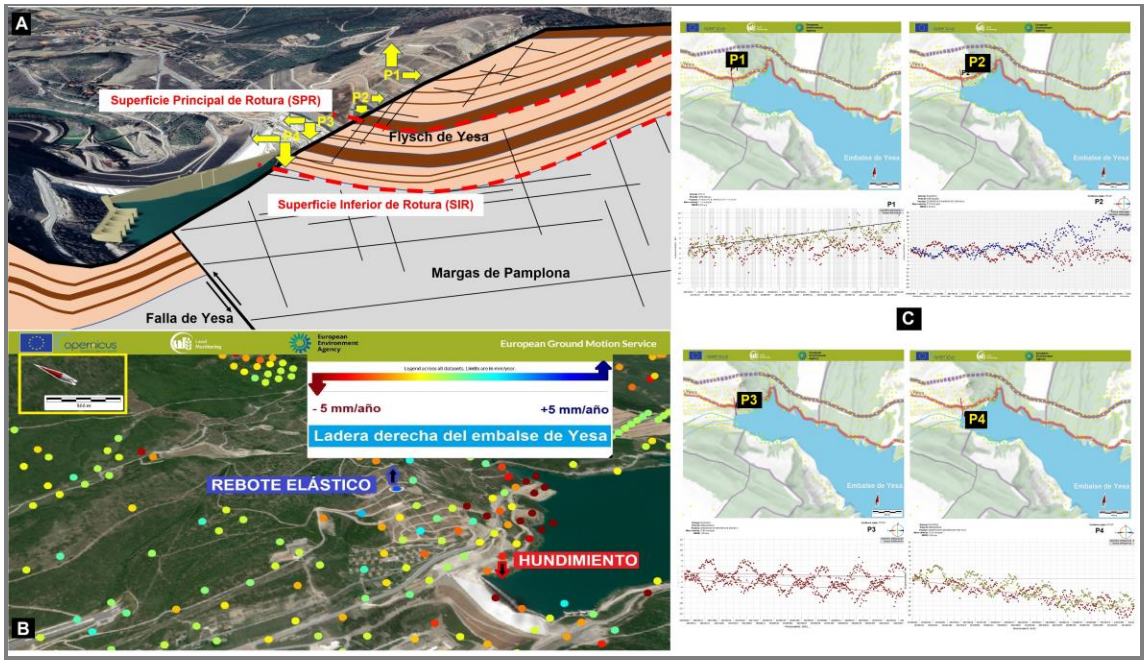


Figura 5.43. A: En amarillo se pueden ver cuatro puntos de referencia geotécnica (P1 a P4 de arriba a abajo) sobre la estructura geológica de la ladera derecha de Yesa. El seguimiento con el satélite Sentinel-1, del *European Ground Motion Service (EGMS)* del *Proyecto Copernicus,* desde mayo de 2016 hasta septiembre de 2021 muestra el movimiento hacia arriba y aguas arriba de P1, hacia abajo y aguas arriba de P2, hacia abajo y aguas abajo de P3, lo mismo, pero en mayor grado en P4. **B**: La componente de los puntos de referencia muestra hundimientos por movimiento vertical en la parte baja de la ladera y rebote elástico en la parte alta al haberle quitado peso para aliviar el empuje vertical. **C**: Situación de P1 a P4 y gráficas de seguimiento en vertical y E-O de mayo de 2016 a septiembre de 2021. Copernicus EU. En todos los registros se pueden ver las oscilaciones del terreno (arriba-abajo) y (E-O) con los embalses y desembalses.

El convenio internacional para determinar la estabilidad de una ladera, el factor de seguridad (FS), basado en el equilibrio de fuerzas cuando ésta ha sido previamente deslizada y reactivada, en Yesa es FS≈1, lo cual implica movimiento.

Las medidas tomadas de alivio de peso han supuesto una mejora de las condiciones que se reflejan en un descenso de la velocidad de movimiento. Al mismo tiempo en el interior de la ladera se están formando y desplegando, tras las lluvias, zonas inestables con incremento de la presión de poro interconectadas o *"piel de leopardo"* (Picarelli 2019), tal como las explicadas por la Universidad de Navarra en 2015.

La vinculación entre precipitación y evolución de los desplazamientos es clara desde el inicio de los registros, con un retardo que va de semanas a meses. En 2013 una precipitación total de 400-420 mm, en el intervalo de tiempo comprendido entre el 10 de enero y el 10 de febrero, provocó un aumento de la tasa de desplazamiento superficial desde 0,2 mm/día hasta 3,7 mm/día. Se atribuyen a una caída del factor de seguridad por debajo de la unidad y una aceleración del movimiento: FS<1.

La modelización realizada por el Gobierno de Navarra-Geoconsult indicaba que las superficies críticas de rotura se darían a lo largo de la superficie inferior de rotura (SIR), lo cual no refleja la evolución de la ladera que aportan los registros de la red actual de control. Ha sido la superficie superior (SPR) y no la inferior (SIR) la que está mostrando mayor aceleración, en especial es llamativo el dato del 16 de diciembre de 2019, que corrobora la observación de vecinos y medios de comunicación sobre las grietas detectadas unos días después; además, se detecta con claridad la formación y activación de nuevos deslizamientos como los previstos por las Universidades de Zaragoza y Navarra en 2013 y 2015.

Un sistema de seguimiento del movimiento, interpretación y alarma deberá ser instalado y desplegado por toda la ladera tras finalizar las nuevas obras, además de las adicionales que siguen sin especificarse para alcanzar una situación que se pueda calificar de *"reconocidamente estable"*. Ese sería el punto de partida que más tarde habría de ser comprobado y verificado como efectivo y funcional.

En cuanto al impacto sísmico, la zona sufriría movimientos muy elevados (>2 m) en caso de acción sísmica extrema (P. R. de 5000 años). Son datos que se obtuvieron *"a partir de procedimientos paralelos o alternativos que, en ambos casos, muestran un escenario más favorable"* que los anteriores presentados al Gobierno de Navarra, lo que llevó a afirmar que *"la acción sísmica no parecía condicionar la viabilidad de la presa"*.

Se han propuesto unos valores de movimiento para definir la nueva estabilidad, pero se superan dependiendo de las condiciones climáticas y los ciclos de embalse y desembalse.

En 2013 tras superar el punto de no retorno, la CHE se planteaba como segundo objetivo *"la estabilización de la ladera"* afirmando haber conseguido el primero: *"paralizar el movimiento"*. Desde 2020 buscamos, primero: alcanzar una situación *"reconocidamente estable"* para segundo: *"reducir el movimiento"* (que en 2013 estaba paralizado) hasta valores que quizás pudiéramos admitir como definitorios de estabilidad.

En Yesa, el debate técnico y científico lo ha dicho prácticamente todo: la ladera no es estable, se mueve y nunca desde 2013 alcanzó ninguna situación que se pueda reconocer como estable. Las últimas afirmaciones de los responsables de Protección Civil de Navarra son que sí existe movimiento pero que éste *es suficientemente estable*.

La obra está temporalmente parada desde octubre de 2023 a la espera de un cuarto modificado del proyecto aprobado en febrero de 2016 que soluciones todos los problemas detectados.

PARTE 6

SEGURIDAD SÍSMICA

SISMICIDAD HISTÓRICA Y GEOTECNIA

6.1. Fenómenos de sismicidad en una unidad alóctona. Seguridad.

En Navarra la sismicidad no se presenta como una amenaza inminente, sin embargo, la recurrencia de terremotos dañinos es un hecho histórico que precede a la evolución de las técnicas constructivas. En este apartado se sugiere reflexionar sobre la importancia de considerar la posibilidad de terremotos dañinos al planificar el territorio, especialmente en el área metropolitana.

Aunque la región no figura entre las zonas de alta sismicidad del planeta, la naturaleza dinámica de la corteza terrestre nos sugiere la prudencia de incorporar la probabilidad de eventos sísmicos significativos en la ecuación de diseño territorial, ya que una mirada al pasado muestra la recurrencia de terremotos moderados con daños en edificios y localizaciones expuestos a ciertas condiciones naturales o creadas desde el medio humano.

Pamplona y alrededores han recibido impactos sísmicos que, afortunadamente de momento, se pueden medir en decenas de miles de euros en reparaciones. El último evento del que tengamos cierta visibilidad histórica para poder aventurar que superó la intensidad VI sucedió en 1903, entonces en la comarca apenas vivían 30.000 personas y el hormigón armado todavía no había hecho su aparición.

Apenas un siglo después somos más de 367.000 personas (56% de la población de Navarra) donde prácticamente se vive o trabaja bajo alguna estructura hecha con el material tecnológico obsolescente más extendido y masivo de la historia del ser humano (lo ampliaremos en la parte ocho). Una buena parte del parque inmobiliario navarro convive con estructuras heredadas o diseñadas y ejecutadas en épocas en que las normas de construcción sismorresistente no existían o se quedaron obsoletas.

La inclusión de este apartado sobre sismicidad y seguridad es uno de los más importantes debido, entre otras cuestiones que comentaremos, a tres causas fundamentales:

1) El plan especial de Protección Civil ante el riesgo sísmico en la Comunidad Foral de Navarra (SISNA) data de 2011 y se dotó de artículos y protocolos para garantizar su efectividad atendiendo a tres cuestiones fundamentales: i) actualizarse tras cualquier evento de sismicidad que modifique los catálogos considerados e incorporarlos a las bases utilizadas, ii) dotarse de equipos formados para inspeccionar y hacer frente al impacto sísmico tras eventos considerados importantes, por ejemplo, con intensidades mayores de IV y iii) en cualquier caso actualizarse cada cinco años, es decir, debiera haber sido en 2016 y 2021 con la mirada puesta en la próxima fecha de 2026. La sociedad navarra no tiene constancia de ninguno de esos avances.

2) El estudio geohistórico y urbanístico, especialmente desde los terremotos de Lorca de mayo de 2011, avanzó notablemente rescatando eventos del pasado que esperan evaluación en el contexto del SISNA. Entre ellos destacaría lo sucedido en agosto de 1612 y marzo de 1903. Además, de incorporar estudios sobre los impactos y enjambres de 2013, 2017 y 2020-2022, los cuales suponen un cambio esencial en la consideración del fenómeno en la Cuenca de Pamplona y otras áreas de Navarra. La seguridad sísmica se basaba sobre todo en los impactos de los catálogos que podrían venir desde el oeste, pero los últimos acontecimientos ponen de manifiesto que hacia el este hay fuentes de sismicidad relevante prácticamente desconocidas.

3) Considerar la propuesta hecha a los sucesivos gobiernos de Navarra desde 2013 de un cambio de enfoque para nuevos estudios de carácter neotectónico que acompañen a las distribuciones epicentrales conocidas o por actualizar. La mayoría de los escasos trabajos se concentran fundamentalmente en áreas que sufrieron terremotos destructivos o relevantes. La geohistoria muestra que en el área sismotectónica considerada es raro que una misma fuente sismogénica dispare dos o más terremotos consecutivos a escala histórica. Así, la prevención de la peligrosidad sísmica basada, sobre todo, en el recuento y valoración de los catálogos, es claramente insuficiente en los alrededores de Pamplona, al menos en comparación con otras áreas con mayores tasas de deformación y menos fracturas por unidad de superficie. La distribución epicentral de los catálogos históricos ha dejado de ser una base efectiva para la prevención de futuros terremotos destructivos.

En esta exposición exploraremos cómo estas sugerencias podrían enriquecer nuestras estrategias de planificación, promoviendo así un desarrollo más resiliente y preparado ante posibles escenarios sísmicos. Incorporar la posibilidad de terremotos destructivos en la planificación territorial —y no solo en la aplicación de la normativa sismorresistente a las piezas del sistema, los edificios—, es un recordatorio de que la precaución y la preparación son aliados indispensables en el verdadero escenario de un terremoto: la ciudad.

Al adoptar estas perspectivas, podemos forjar un futuro donde la resiliencia, la economía y la seguridad sean los cimientos más sólidos. En última instancia, abrazar la sugerencia de considerar la seguridad sísmica desde este nuevo enfoque nos invita a construir no solo sobre la firmeza del terreno, sino también sobre la integración del conocimiento científico con el de quienes nos precedieron y así anticiparnos a los impactos que inexorablemente volverán.

6.2. Límites mecánicos de la Cuenca de Pamplona.

La formación eocena de Margas de Pamplona, dada su configuración estructural, no se puede caracterizar por la posibilidad de provocar sismicidad destacable, tampoco ha generado sismicidad reseñable conocida. Los no muy abundantes datos muestran que en la era instrumental prácticamente ningún epicentro de los terremotos más destacables se ha generado en su seno. Durante los siglos XX y XXI, si tomamos los límites desde el Puerto de Lizarraga al NO, hasta Sangüesa al SE, nos encontramos 29 terremotos M>4 o Intensidad >IV (figuras 6.01 y 6.02).

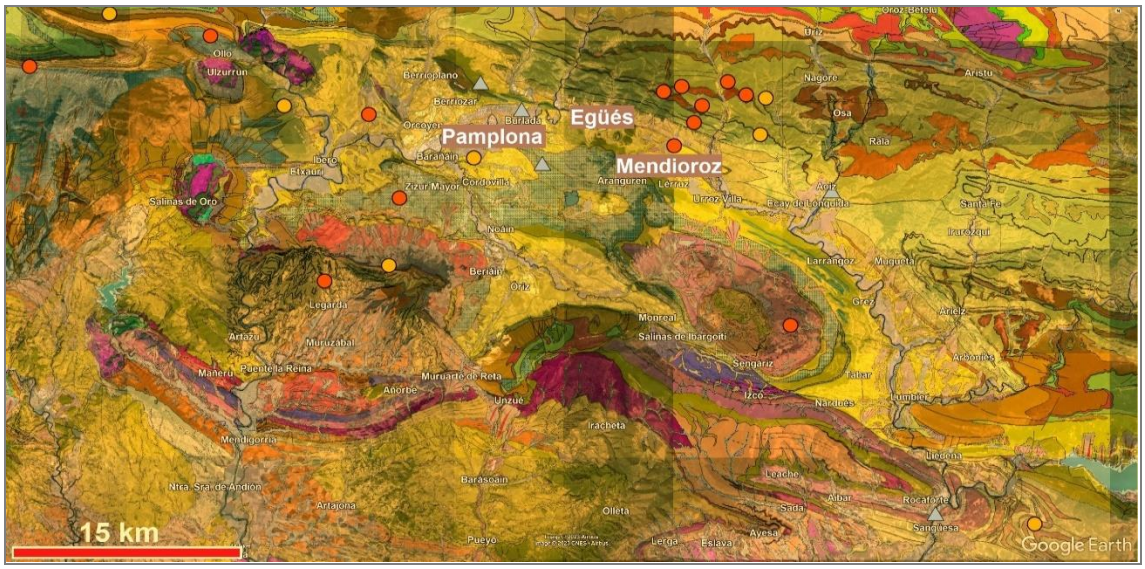


Figura 6.01. De los 37 eventos sísmicos sucedidos desde agosto de 1612 hasta el 31 de diciembre de 2022 con intensidad mayor de IV o magnitud M>4, encontramos 29 durante los siglos XX y XXI desde el Puerto de Lizarraga al NO, hasta Sangüesa al SE en una distribución espacial NO-SE.

Podemos encontrar la explicación a la existencia de una sismicidad continua y moderada en el hecho de que se combinan los empujes tectónicos con fenómenos de alocinesis, ya que durante el Oligoceno se dio en el área surpirenaica un régimen continental generalizado con otra fase compresiva caracterizada por sus vergencias al sur con algunas piezas alóctonas desplazadas varios kilómetros. La Cuenca de Pamplona, con las Margas de Pamplona en proceso de consolidación, quedaría englobada en uno de estos grandes bloques. Al oeste, esta gran pieza de la corteza que supone la cuenca, está limitada por la falla de Pamplona o Estella, un enorme accidente de zócalo de dirección NNE-SSO que soluciona el desplazamiento de la falla norpirenaica o falla de Leiza.

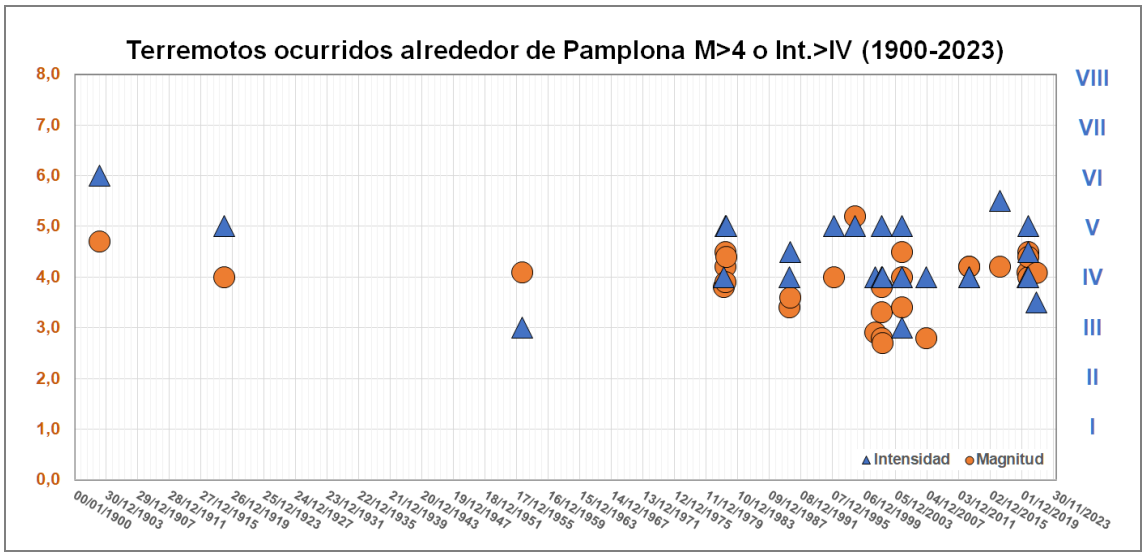


Figura 6.02. Distribución temporal de los 29 eventos sísmicos sucedidos desde el Puerto de Lizarraga al NO a Sangüesa al SE durante los siglos XX y lo que va de XXI (31/12/2022) con intensidad mayor de IV o magnitud M>4. Obsérvese que es a partir de la crisis sísmica de 1982 cuando se concentra el mayor número de ellos (90%).

A los terremotos históricos previos, incluso habiendo alcanzado intensidades superiores a IV, no podemos adjudicarles epicentros con la exactitud de la era instrumental. Incluso el evento (o eventos, puesto que fueron varios) sucedidos durante la madrugada del 10 de marzo de 1903, puede adjudicárseles una intensidad máxima de VI-VII (hablaremos de ello más adelante), no cabe duda de que merecerían un estudio mucho más detallado del que vamos a presentar aquí basado en hemeroteca y muy escaso trabajo de campo puesto que tras 120 años, prácticamente es imposible rescatar alguna grieta o acontecimiento de inestabilidad geológica como deslizamientos u otros. El único evento que sí podríamos situar en las Margas de Pamplona, con un hipocentro somero, entre 0 y 1 km de profundidad, es el M4,1 ocurrido en Mendióroz el 11/10/2021 a las 22:45 horas.

En superficie, al oeste del área metropolitana, la Falla de Pamplona produce una amplia banda de cizallamiento, que con la misma orientación NNE-SSO, discurre desde la Sierra de Andia, hasta la Sierra de El Perdón. Esta banda de cizallamiento ha permanecido activa, por lo menos, desde el Eoceno inferior (diapiro de Anoz) hasta el Mioceno como muestran las fracturas de los conglomerados superiores de la Sierra de El Perdón sobre la falla de Beriain y la zona estuvo activa de manera sensible para la población desde febrero a julio de 2013.

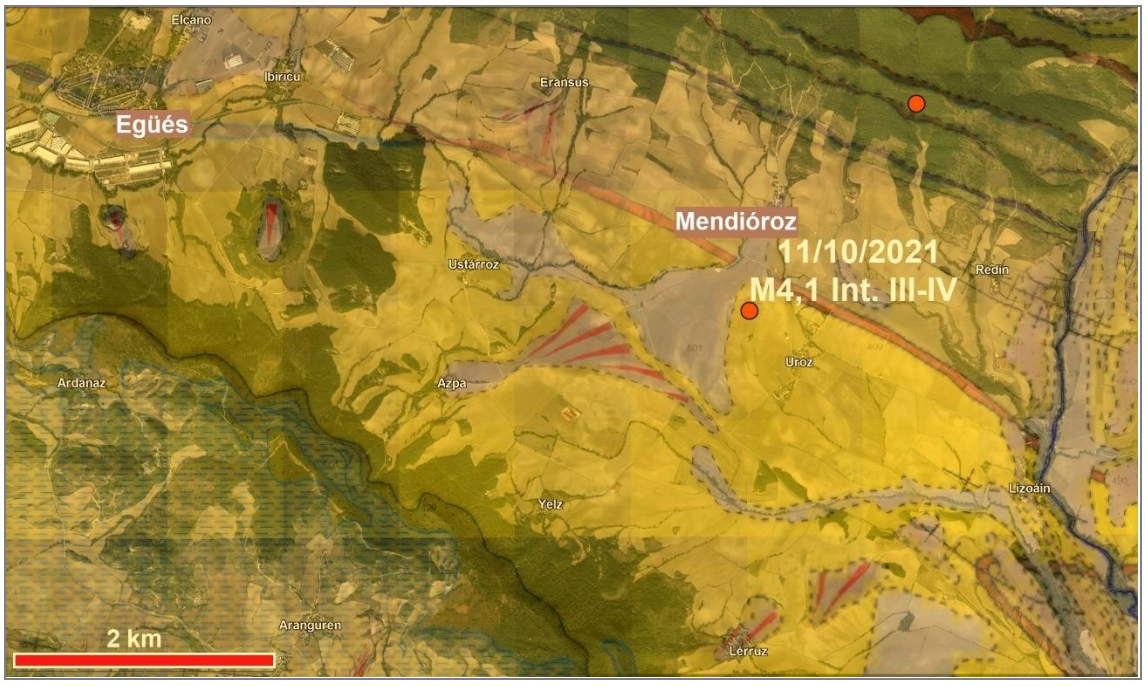


Figura 6.04. Única localización epicentral sobre las Margas de Pamplona de un terremoto en la era instrumental y por lo explicado en el texto, de la historia. Se trata del evento de magnitud 4,1 e intensidad III-IV sucedido entre 0 y 1 km de profundidad el 10/11/2021 a las 22:45 a sur de Mendióroz, unos 15 km al este de Pamplona.

En la traza en superficie de la Falla de Pamplona se encuentran los diapiros de Salinas de Oro y Arteta (ver figura 6.01). El de Salinas de Oro ha originado una serie de fallas concéntricas y radiales que penetran en la Cuenca hasta la parte occidental del área metropolitana de Pamplona. La falla más importante es la conocida como Falla de Etxauri que ha presentado movimiento recientemente en el enjambre sísmico de 2013 (ML4,2 el 18 de marzo de 2013).

Por el sur y sureste, la Cuenca de Pamplona está limitada por el cabalgamiento de la Sierra de Alaiz. Su traza en arco convexo hacia el norte representa al Cabalgamiento Frontal Pirenaico. De esta manera se resuelve la aloctonía de la Cuenca sobre el antepaís. Desde este punto de vista, la Cuenca de Pamplona se puede calificar como una cuenca "piggy back" al haber sido trasladada de manera pasiva simultáneamente a su desarrollo (Barnolas, A. y Pujalte, V. 2004). Finalmente, por el norte, se pueden considerar las estructuras E-O, seguramente originadas por el cabalgamiento de Roncesvalles, como límite septentrional de la Cuenca de Pamplona. La Cuenca de Pamplona aparece así encuadrada por límites mecánicos que, a merced de los movimientos corticales, friccionan por el nordeste con las estructuras pirenaicas del entorno del macizo de Oroz-Betelu. Éstas, al cabalgar hacia el SO originan el surco subsidente de Arre, zona terminal en la Formación de Margas de Pamplona al norte de la ciudad, que tal y como vimos, en última instancia, generó el siempre latente deslizamiento de Arre y otras áreas menos voluminosas de inestabilidad.

Este, aunque no es el único, sería el más importante de los focos que generan la reciente sismicidad cerca del área metropolitana de Pamplona. Varios de los episodios sísmicos vividos con epicentros en los alrededores de Lizoain, especialmente en 2004-2007 con el primer llenado del embalse de Itoiz y en 2017-2020-2021, algo más cerca de la ciudad, son achacables a estas estructuras, aunque aún no se sepa cuál o cuáles han sido las fallas que originaron unos episodios símicos de alrededor de un millar de eventos con impactos notables en la ciudad alcanzando intensidades mayores de V en 2017 y 2020.

6.3. El estudio geohistórico.

Además del estudio geológico y estructural, el estudio histórico con la sismicidad histórica, siguen su camino de la mano de la geohistoria. En este trabajo continuo se trata de hallar los terremotos ignorados, los sismos que han ocurrido y que nunca se han catalogado o los subestimados, tal y como vimos con los sucedidos entre Sangüesa y Pamplona en 1612 o en 1357 en Villarreal de la Canal o el de Pamplona de marzo de 1903 que tuvo, sin duda, un carácter similar al vivido la madrugada del 1 de octubre de 2020 en Pamplona, aunque por lo que nos deja la hemeroteca, se vivió con mayor intensidad no sólo en Pamplona, sino en lugares tan alejados como Aibar, Lekunberri, Sangüesa e incluso San Sebastián.

La investigación geohistórica, en general, no solo descubre terremotos de relativa importancia. A veces se han encontrado eventos importantes, como el inédito del 21 de octubre de 1880, de foco atlántico, al que se le ha adjudicado una magnitud ML7,5 (Rodríguez de La Torre, F. 1992). También hemos descubierto en los archivos diocesanos numerosos terremotos italianos como el caso de los estudios de Emanuela Guidoboni (2012) o con la lectura de antiguas publicaciones periódicas portuguesas, españolas o francesas por toda Iberia. Algo que también hemos encontrado en la ciudad de Sangüesa.

El área pirenaica presenta una sismicidad moderada. El más destacable es quizás el terremoto de intensidad IX-X de 1428 que destruyó Queralbs en Girona con cerca de 800 víctimas. También son de destacar tres terremotos de intensidad VIII-IX en 1373 en Ribagorça, entre Huesca y Lleida, el de 1427 en Olot (Girona) y en 1660 en Altos Pirineos (Francia).

Esta zona acumula terremotos importantes, por ejemplo, el de intensidad VIII en 1750 que sería el último destructivo conocido. Al oeste, en 1814 ocurrió un terremoto que alcanzó intensidad VII-VIII. En la época instrumental correspondiente al último siglo, destaca el terremoto de Martes (Huesca), del 10 de julio de 1923 en la cola de embalse de Yesa, cuya intensidad alcanzó VIII con una magnitud de M5,6 (una revisión reciente con motivo de un estudio de carácter sísmico para una actividad minera lo ha rebajado a VII y M5,4).

En el Valle de Arán (Lleida) ese mismo año se produjo un terremoto de intensidad VIII y M5,6, además de los terremotos de M5,4 y M5,1 ocurridos en 1967 y 1980 en Arette y Arudy (Francia) con intensidades VIII y VII respectivamente. En los catálogos de sismicidad histórica se registra un evento de intensidad VI el 24 de marzo de 1929.

En Navarra despunta un posible terremoto múltiple el 10 de marzo de 1903 del que se destaca el ocurrido al este de Pamplona sentido con intensidad de VI-VII y que posiblemente tenga su origen en las mismas fallas que generaron los enjambres sísmicos de 2004, 2017 y 2020 por el tipo de manifestación tan similar. Otro foco sísmico estaría relacionado con la falla de Leyre, donde hay registrados una docena de terremotos que muestran una alineación E-O, al igual que la falla. Cuatro de ellos superaron M3, en Aoiz, M4,1 el 2 de septiembre de 1956. Los terremotos de 1885 en Leitza, el de 1918 en Burguete y el de 1934 en Elizondo tienen asignadas intensidades de V (EMS).

Algunos terremotos navarros subestimados, como el comentado de Pamplona del 10 de marzo de 1903 asomaron a la luz los días en que se produjo el enjambre de 2013 con más de 300 eventos, luego en el de 2017 con casi 200 y más recientemente, en 2020-2021, con movimientos y enjambres importantes al este de Pamplona, entre Esteribar, Lizoain, Aranguren, Egüés y áreas colindantes con más de 800. Por ejemplo, este último enjambre destacable comenzó a finales de agosto de 2020, desde abril de 2022 no se registran intensidades por encima de III. Se trataría de la mayor concentración y densidad de sismicidad (histórica e instrumental) conocida hasta la fecha (figura 6.05) si comenzamos a contar desde el evento histórico del 1 de julio de 1390 rescatado por Mezquíriz M.A. y Unzu M. (2021) con el colapso de parte de la catedral de Pamplona.

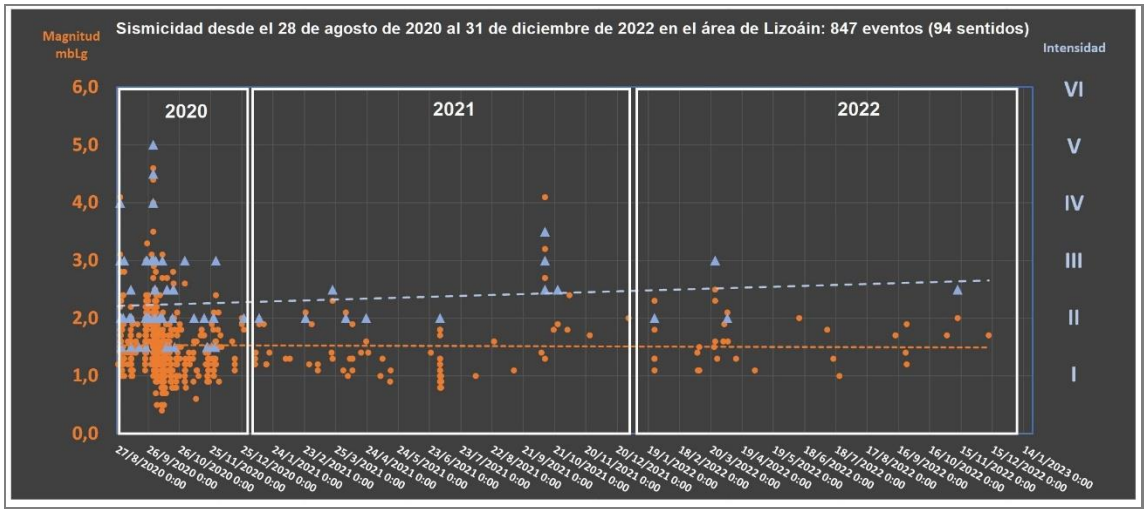


Figura 6.05. Magnitudes e intensidades de los 847 eventos sucedidos (94 sentidos) durante el enjambre sísmico sucedido en el área de Lizoain desde el día 28 de agosto de 2020 hasta el 31 de diciembre de 2022. Desde el 23/03/2022 no se alcanzaron intensidades >III.

6.3.1. Factores culturales.

En nuestro recorrido geohistórico pudimos corroborar algo que nos pareció muy significativo y por lo que se perdió valiosa información al respecto en los últimos siglos: muchas de las disposiciones psicológicas de quienes antaño vivieron lo que durante siglos se consideró uno de los más humillantes castigos divinos, los terremotos, respondían a un conjunto de creencias que apuntaban al hecho de que recibirlos, aparte de una desgracia, era clara señal de vicios y pecados contra Dios.

Ello ha supuesto una barrera de transmisión de esta información, pues, o bien se censuraba el fenómeno sísmico por esos (hoy) prejuicios, o bien directamente se hacía desaparecer todo vestigio de su impacto, tanto escrito como verbal ante los reinos vecinos.

Para más información, sobre este aspecto bastante oculto antes del siglo XVI, es recomendable lo relatado por el historiador y párroco de la ciudad de Sangüesa, Labeaga J.C. (1999) sobre la reacción de las autoridades religiosas de la ciudad de Sancho Garcés en el enjambre de 1612 y cómo el moralista y secretario del Ayuntamiento de Sangüesa, en agosto de ese año, apela a las manifestaciones de la ira divina, como también lo que había que hacer y dejar de hacer para calmar el enfado del Todopoderoso con el fin de que la tierra dejara de temblar.

En este tiempo se fue desarrollando el inestimable trabajo arqueológico e histórico de las investigadoras María Ángeles Mezquíriz y Mercedes Unzu, con la colaboración de muchas otras personas del ámbito histórico, de la arquitectura, la geología, el arte...

En 2016 revisamos una serie de planos de la época de la catedral románica de Pamplona con el trasfondo de varios documentos en que se narraba un acontecimiento histórico muy significativo. Era la descripción, a la manera medieval, de otro posible terremoto. Se relataba un evento acaecido el día 1 de julio de 1390 en la vieja Iruña. Entonces la ciudad de los burgos, apenas ocupaba los aledaños de la catedral y poco más.

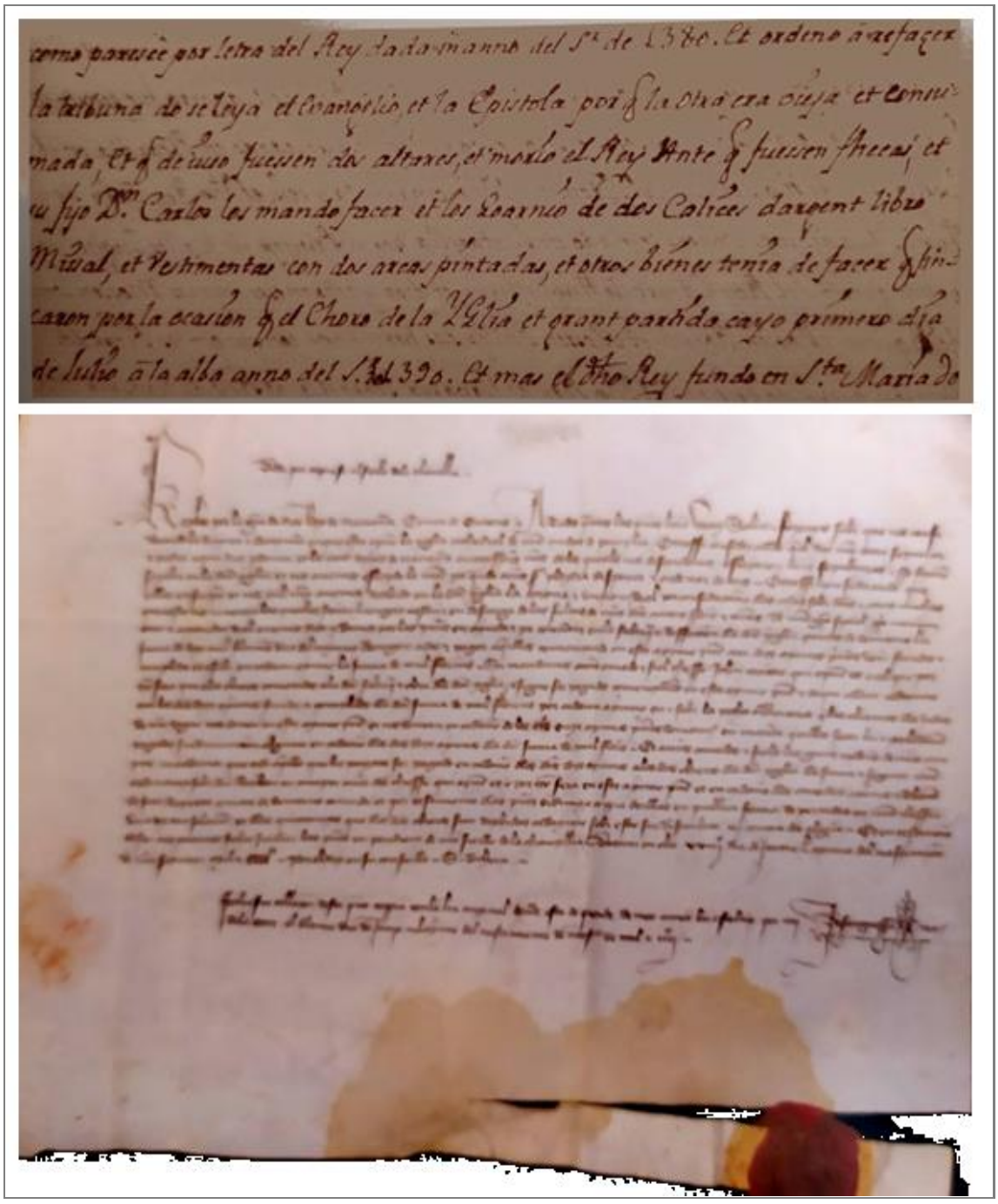


Figura 6.06. Arriba: Fragmento manuscrito de una copia de 1770 de la crónica de 1404 en que se narra la caída del coro y parte de la catedral de Pamplona (archivo de Navarra, fol. 63). Abajo: El pergamino conservado en el Archivo de la Catedral de Pamplona del 24 de junio de 1400 en que se muestran los motivos por los que el rey Carlos III hace una donación para reconstruir el lugar donde descansan sus antepasados a los que guarda un amor filial y cree conveniente arreglar la catedral tras el estado "inhonesto" en el que se encontraba después del evento sucedido el 1 de julio de 1390.

Tras décadas de trabajos, desde marzo de 2021 tenemos la publicación *'Arqueología en la catedral de Pamplona. El origen del culto cristiano'* (figura 6.07) donde se reponen algunas de las piezas del rompecabezas de una parte importante de la historia de Navarra y del devenir de la ciudad de Pamplona. Además, se complementa con los datos y un informe de una belleza singular de Teresa Alzugaray (Anexo III: ruina del templo románico), archivera y paleógrafa que descarta una serie de causas y apunta a la más probable para el derrumbe de la seo pamplonesa en la madrugada del 1 de julio del año 1390: un terremoto. El cronista Garci López de Roncesvalles en su *Colleccion de chronicas antiguas de Navarra*, en 1404, es el primer narrador (figura 6.06) del que se tenga testimonio de lo sucedido entonces. La autora lo verifica en los Registros de Comptos, dando cuenta de los gastos derivados de semejante ruina, el objetivo es restaurar el coro y la parte colapsada de la catedral.

Durante el siglo XVI se cita el suceso en una obra denominada Catalogus Episcoporum Eclesiae Pamplonensis (anónimo), conservado en la Catedral de Pamplona, posiblemente de 1570. En 1614 Fray Prudencio de Sandoval relata el suceso posiblemente como una transcripción del catálogo anónimo. A partir de entonces se transcribe en diversos documentos históricos tal y como ha investigado la paleógrafa y archivera Teresa Alzugaray, pero sin aportar nuevos detalles. No es hasta el siglo XX cuando se habla del temblor y el colapso por parte del investigador Mariano Arigita y Lasa, canónigo de la catedral en su obra *La Asunción de la Santísima Virgen y su culto en Navarra*. Juan de Albizu, en plena era científica, hace una descripción detallada del desastre, la nube de polvo, la caída de las estructuras, la reacción de la ciudadanía...

6.3.2. Perspectiva histórica y seguridad.

No existe ningún documento anterior al siglo XVIII que apunte directamente a nada sobre seguridad sísmica que no incluya la oración o la penitencia. La sismicidad se consideraba un castigo divino, pues no sólo era algo "inhonesto" (figura 6.06) y vergonzoso, sino que para esa época no se hacían las anotaciones pertinentes, menos aún que pudieran mostrar la vergüenza ante los reinos vecinos y otras figuras de la jerarquía. No es hasta después del siglo XVI en que las anotaciones sacramentales se hacen habituales tras la orden dada a tal respecto en el Concilio de Trento (1545-1563).

Sin embargo, a lo que sí hemos tenido acceso es a las pruebas de su censura. Es muy curioso y digno de mención un archivo conservado en el Archivo diocesano de Pamplona, del Tribunal Episcopal, en el que se ordena borrar la anotación de un terremoto de un libro de bautizos de Urroz-Villa. Se puede ver también el documento tachado. Desde hace siglos la Iglesia Católica tiene la costumbre de invocar en sus letanías Mayores o Rogativas una súplica como las que vimos en Sangüesa en 1612 para que Dios nos libre de los terremotos: *A flagello terremotus, libera nos Domine.*

En cualquier caso, como explican Teresa Alzugaray, María Ángeles Mezquíriz y Mercedes Unzu tras años de investigación del acontecimiento, el estudio de los diferentes textos históricos pone en contexto que no hubo una causa estructural o vicio constructivo en la Catedral de Pamplona y sí una transcripción histórica de *un suceso repentino e inesperado* que cruza la historia con diferentes perspectivas más o menos veladas por los diferentes contextos y modas religiosas y culturales.

Tampoco, como pudimos comprobar in situ, hay una deficiencia geotécnica manifiesta, pues observando el terreno de apoyo, el dimensionado de los cimientos románicos y la presencia en esos días de maestros constructores de afamado prestigio, y por cierto, muy bien pagados por el rey, llegamos a la conclusión al ver las diferentes descripciones (por lo que suponía desde el punto de vista moral el ser objeto de semejante castigo), de que la causa debió ser un terremoto, tal y como sugieren las tres investigadoras.

Los convencionalismos históricos, un fenómeno tabú en ámbitos religiosos —prácticamente los únicos capaces de transmitir de manera escrita los acontecimientos hasta tiempos muy recientes—, y los escrúpulos de las personas involucradas, nos permiten también, y sobre todo, vislumbrar la mentalidad de cada época y la manera de vivir el fenómeno sísmico. Sin duda el estudio continuará. Hay que agradecer a las investigadoras el haber abierto la puerta de este episodio histórico que se suma al conocimiento del medio que nos sustenta y tener muy en consideración la sismicidad histórica local en pleno siglo XXI, la única manera de conocer el medio que garantiza nuestra existencia y adaptarnos a su, a veces, vehemente dinámica.

Una de las asignaturas pendientes es la de seguir despojándonos de la herencia que tiende a ocultar el fenómeno sísmico y sus estereotipos históricos, antaño religiosos, por la vergüenza del castigo divino, hoy quizás más de carácter economicista, por la de reconocer la especulación y el beneficio cortoplacista que miran al fenómeno de la seguridad sísmica como un obstáculo para sus fines lucrativos. Así lo pusimos de manifiesto tras corroborar el descuido de unas instituciones que siguen sin actualizar, tal y como obliga el *PLAN ESPECIAL DE PROTECCIÓN CIVIL ANTE EL RIESGO SÍSMICO EN LA COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA* (SISNA) las bases de datos y el propio SISNA (obligatorio cada cinco años).

La mayoría de las veces esta investigación acaba siendo vital. Cada pueblo, cada barrio, su folclore, sus leyendas, las historias que contaban los viejos, sus refranes y, sobre todo, su modo de vida, muchas veces se han visto impactados por el fenómeno sísmico. Algunas comunidades que no le dieron importancia quedaron afectadas por años, por décadas, a veces para siempre. Otras, tras sufrir los terribles impactos supieron aprovechar esa peculiaridad para poner en valor esa dinámica de sus territorios y compartir sus experiencias con los demás.

Hoy asistimos a uno de estos generosos momentos en que la suma del esfuerzo de tantas personas nos acerca con más detalle a conocer de dónde venimos y en dónde estamos.

Figura 6.07. *Arqueología en la catedral de Pamplona. El origen del culto cristiano*. M.ª Ángeles Mezquíriz Irujo y Mercedes Unzu Urmeneta (2021).

Es obligatorio además de necesario acometer la revisión acorde con los tiempos y las nuevas investigaciones históricas del Plan Especial de Protección Civil sobre Seguridad Sísmica de Navarra (SISNA), como el propio plan especial indica:

> *"Se deberán llevar a cabo programas de formación destinados a los órganos y servicios actuantes y a la población en general"... "Se realizarán revisiones extraordinarias cuando ello se estime necesario para adaptar el Plan a la realidad del momento de la Comunidad Foral de Navarra. Estas revisiones deberán ser informadas favorablemente por la Comisión de Protección Civil de Navarra y aprobadas por el Consejo de Gobierno del Gobierno de Navarra. En su caso, deberán ser homologadas por la Comisión Nacional de Protección Civil"...* (página 76 del SISNA).

Lo relatado en el estudio arqueológico en la catedral de Pamplona es fruto de muchos años de trabajo, de excavaciones arqueológicas que comenzaron en 1991, de una gran labor estratigráfica y de realización de planimetrías, de ir uniendo restos de cosas muchas veces inconexas.

Todas las grandes obras históricas tienen su contexto estratigráfico y, sobre todo, sus materiales asociados, y eso es lo que es irrefutable para poder fechar acontecimientos con la ayuda de la investigación arqueológica, histórica y geohistórica. Por eso podemos hablar con certezas y no con meras suposiciones tal y como apuntan las autoras en 2021. La peligrosidad sísmica no es sólo una cuestión geológica, ni siquiera de la aplicación de normas constructivas, como vamos a ver.

6.4. El impacto sísmico. El concepto de aceleración del suelo y su aplicación.

Desde hace unos años, cuando hablamos de impacto sísmico, hablamos en términos de "g" que es la aceleración de la gravedad, el latigazo que golpea las estructuras y construcciones sobre el que calculamos los posibles efectos negativos de un terremoto. Cuanto mayor sea "g" mayor suele ser el daño; cada lugar tiene adjudicado un valor previo de la "g" esperada en función del conocimiento que tenemos de la geología y de la historia. Con ese valor se proyectan los edificios y las infraestructuras. Cada municipio tiene su valor y los mapas que lo reflejan, éstos aparecen en las normas y sus actualizaciones. Por ejemplo, a Pamplona en la última actualización de 2012-2015 se le adjudicó 0,09g (el 9% de la aceleración de la gravedad).

Este valor de la aceleración básica (ab) mapeada, se ve incrementado como aceleración de cálculo (ac) si el tipo de terreno que sustenta el edificio, presa, central de energía, palacio de los deportes, circuito de velocidad o campo de fútbol, se considera poco competente y susceptible de amplificación de ese valor y si la construcción es importante o normal. La expectativa en Pamplona es de ab=0,09g en la norma NCSE-2002 en su última actualización de 2015 que no es de obligado cumplimiento (ab=0,04g en la NCSE de 2002); la inversión en la mejora de las estructuras aplicando la actualización de 2015 es ridículamente pequeña y a largo plazo supone un gran ahorro por la seguridad que acarrea.

Es muy significativo lo sucedido con el evento del 10 de marzo de 2017, el acelerógrafo de Pamplona registró una aceleración instrumental de 0,16g durante el terremoto M4,2 de las 8:43 horas de la mañana. El valor quedó bastante cerca del de la aceleración espectral de periodo 0,2 segundos (SA 0,2s) para un período de retorno de 475 años, que para Pamplona es de 0,18g.

Desde 2011, es bastante habitual referenciarse a los terremotos de Lorca de mayo de 2011 (4,5 y 5,1 Mw) como contraste para resaltar diferencias en el daño a edificios e infraestructuras o en los parámetros geofísicos, tales como la aceleración del suelo en Pamplona. Recordemos que Lorca, desgraciadamente, fue el mejor laboratorio de estudio de que dispusimos en lo que va de siglo XXI en España; el mortal impacto de 0,38g de mayo de 2011 con el terremoto M5,1 de la tarde, vino dos horas después del 0,25g generado por el M4,5 previo, y es que en Lorca —según la normativa vigente en 2011— lo que se esperaba era ab=0,12g.

Ello eximía de toda sospecha inicial al sector de la construcción y a los proyectistas y ponía en el centro del debate un cierto desconocimiento histórico y geológico. Apuntaba, como se puso sobre la mesa en el proyecto *Lorca Resiliente* (Secretaría General Técnica del Ministerio del Interior, Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2014) a una falta de inversión pública y, sobre todo, del sector más directamente implicado: el de la construcción. Recordemos también que el terremoto superficial típico europeo, español, francés o italiano, poco o nada tiene que ver con el latinoamericano, japonés o californiano profundo, porque si atendemos exclusivamente a la magnitud, podríamos malinterpretar el daño que los terremotos ibéricos son capaces de generar.

Los expertos en esos países, cercanos a zonas de subducción, al ver las magnitudes (4,5 y 5,1) se sorprendían de los daños ocurridos en Lorca (fueron 9 víctimas mortales, más de 300 heridos y unos 1.650 millones de euros en pérdidas). Así es la sismicidad superficial (1-2 km de profundidad) a escasos 1,5 km de una ciudad histórica y con una cierta direccionalidad. La aceleración generada en el medio urbano, o el golpe explosivo de cinco segundos, fue más letal que muchos de los terremotos profundos (20-40 km de profundidad) con bastante mayor magnitud que no afectan tanto a las estructuras modernas o al patrimonio cultural. Por eso las normativas se basan en diagnósticos cartografiados sobre un valor esperado de la aceleración y su posible amplificación por suelos blandos, sueltos, terrenos cuaternarios, que se comportan como "amplificadores sísmicos".

En 2011, tras los mediáticos terremotos de Lorca, la sociedad en general comenzó a interesarse por estos temas y se realizaron cursos especializados y una intensa campaña pedagógica se puso en marcha. En el mundo empresarial, especialmente en el sector de la construcción, se hizo un esfuerzo por comprender qué es lo que había pasado y cómo paliar tan dañinos efectos si se volviese a repetir. Tras publicar a finales de 2011 y en 2012, varios artículos académicos: "*Why was it so damaging?"* (Aretxabala A., Sanz C. 2011) y, sobre todo, el proyecto de recuperación y resiliencia *Lorca Resiliente* disponible en el Catálogo General de Publicaciones de la Administración General del Estado, Secretaría General Técnica del Ministerio del Interior, Dirección General de Protección Civil y Emergencias, la Confederación de Empresarios y la Universidad de Murcia (con participación del Parlamento Europeo) se organizaron encuentros con científicos y arquitectos.

Los aspectos geotécnicos, geofísicos y, sobre todo, geohistóricos fueron motivo de interés como nunca antes. Y es que la experiencia nos muestra que cada vez que sucede un terremoto destructivo se produce un pico de interés como el vivido en 2011, también que los informes sobre las causas de los daños y la pérdida de vidas humanas, apuntan a una serie de vulnerabilidades que no son exclusivas de la ingeniería sísmica, la geología o la arquitectura. Las normas de construcción sismorresistente no han sido, no son y nunca serán suficientes.

Cada vez que volvemos a publicar los informes posteriores a esas desgracias por causa de otros terremotos posteriores, volvemos a poner una y otra vez las mismas vulnerabilidades sobre la mesa. Rara vez se han tomado medidas como las propuestas cada vez que ocurre un terremoto con cierto impacto, dejando que sea el cumplimiento de las normas de construcción la única cuestión a tener en cuenta. Pero los factores que determinan la amenaza sísmica, como muestra la historia, son más, y en cada evento adquieren más o menos importancia.

6.5. Factores que determinan la amenaza sísmica.

Cuatro son los factores que van a determinar la amenaza sísmica repartida en el tiempo en un determinado lugar y para una población concreta:

a. La actividad sísmica local es la más importante de las cuestiones a considerar, por eso conocer y no olvidar la historia es vital.

b. Las características del terreno que acogerá las ondas, la geología, la topografía, las formaciones cuaternarias locales (terrenos sueltos) y la interacción terreno-cimiento.

c. La posibilidad de ocurrencia de sismos a determinada distancia de la ciudad, es decir, la presencia de accidentes tectónicos destacables cerca de los núcleos englobados en su zona de acción, los cuales, en interacción con los terrenos que acojan las ondas con características dinámicas determinadas, pueden amplificar la aceleración en superficie.

d. La educación sísmica de la población, una cultura que salva vidas.

En Navarra, y especialmente en lo que concierne a la Cuenca de Pamplona con algo más de 367.000 personas, los cuatro factores aún no están ni muy desarrollados ni tampoco actualizados. La amenaza y la vulnerabilidad son variables que dependen la una de la otra. Los terremotos y las tipologías de suelos o rocas, por sí mismos, no tienen por qué ser una amenaza para la ciudad. Las tormentas, las nevadas, las inundaciones o el viento son también fenómenos naturales que de por sí no son dañinos, hemos aprendido más o menos a convivir con ellos.

Para que se produzca una desgracia tienen que darse cita una serie de componentes físicos, sociales y culturales que se mantengan expuestos y que no se hayan identificado. Un edificio o un barrio puede ser vulnerable a un tipo de terremoto mediano, pero a otro de mayor magnitud y diferente manera de propagación no tiene por qué serlo. Probablemente no sería tan dañino un terremoto profundo de magnitud 6 en las Bardenas Reales (si algo así pudiera darse) como uno somero de magnitud 4 bajo la plaza del Castillo de Pamplona.

Una de las mejores herramientas para evaluar y actuar en consecuencia es la zonificación geotécnica-sísmica. Es un pronóstico basado en los accidentes tectónicos, el estudio de la historia y las características dinámicas de los terrenos, una división que puede hacerse por barrios, manzanas... Nos permite conocer el medio sobre el que construimos nuestras casas, barrios, negocios, en definitiva, nuestro hábitat. Debemos mantener la idea de que ciertas disposiciones y actitudes a la hora de asumir este fenómeno natural, pueden paliar los efectos negativos de un evento catastrófico y nunca deberemos descartarlo.

6.6. Configuraciones urbanas y geotecnia. La experiencia de Lorca para Navarra.

Las configuraciones urbanas son decisivas a la hora de prever y paliar el daño sísmico. Se llegó a afirmar desde el Colegio de Arquitectos de Navarra que los edificios que colapsaron en Lorca eran antiguos y de materiales de baja calidad. No son ciertas en absoluto ninguna de esas afirmaciones. Existe una tendencia a subestimar la experiencia y la ciencia de nuestros antepasados. El mejor ejemplo lo tenemos en un descubrimiento que han hecho los arqueólogos que aún trabajan en el yacimiento íbero de la Alcudia, el lugar en el que se encontró la dama de Elche. Allí, hace 2.500 años, los habitantes de este poblado construyeron una muralla con características sismorresistentes apostando por la ductilidad con juntas de arcilla persistentes, cajones de grava y arcilla en las cimentaciones, simetrías en alzado y planta y otras tecnologías enfocadas a paliar un impacto sísmico vistas en Oriente e incluso en la América precolombina y que hasta ahora se consideraba de carácter militar (resistencia a arietes, proyectiles, etc.).

También en Alcudia, los habitantes aprendieron a prevenir daños por inundaciones elevando la cota tras dos sucesos de inundación bien datados estratigráficamente, elevando unos dos metros la cota de las viviendas y dejando los antiguos edificios afectados bajo el subsuelo. La realidad es que en Lorca solo colapsó un edificio de viviendas y no era antiguo ni estaba hecho con materiales tradicionales, fue construido en el año 2001 cumpliendo estrictamente la NCSE de 1994, era de hormigón armado y estaba en el barrio de la Viña. Pero su diseño no era el más adecuado para la geomorfología a la que intentó adaptarse. Contiguo a él pudo verse el origen del daño, el mismo o muy parecido, de otros bloques que no colapsaron.

En la figura 6.08 también se puede ver otra solución acorde con lo sucedido y que fue muy dañina, también afectó a edificios modernos, y aunque no se dieron colapsos por "columnas cautivas" queda claro que el problema no son los materiales ni la antigüedad de los edificios, sino diseños inadecuados trazados en los proyectos que desconocen —o simplemente obvian— la realidad del medio físico donde se pretenden implantar.

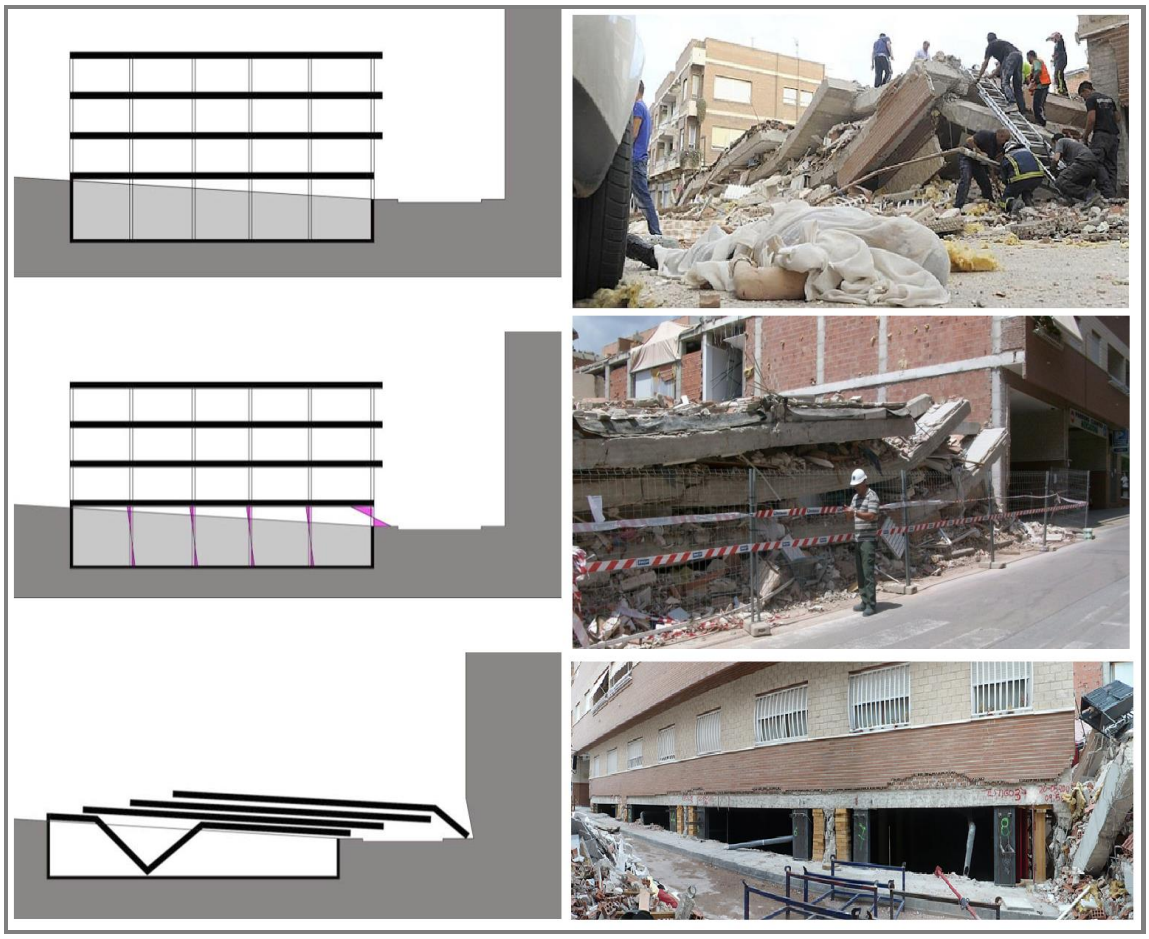


Figura 6.08. Las causas últimas del desplome del único edificio de viviendas que colapsó en Lorca, construido en el año 2001 en el barrio de la Viña, fueron debidas al resolver la pérdida de cota con un pilar demasiado corto. Éste tuvo que absorber las deformaciones generadas por la aceleración del suelo (0,38g), y como la mayoría de las veces ocurre, esa falta de simetría y homogeneidad, en concreto a la diferencia de longitud de los pilares (que fallaron también en esa calle como se ve en las figuras del edificio adyacente que se mantuvo en pie en la última foto), con períodos de oscilación diferentes propició la ruina definitiva. Esto fue algo que se repitió en los edificios que en esa calle habían optado por soluciones similares y que posteriormente hubo que derribar, pero no colapsaron. Arriba a la izquierda: croquis del encaje del edificio con la cuesta y el último pilar corto, debajo la deformación y el colapso del edificio. Los dibujos son de Patrick Murphy. A la derecha una foto de EFE instantes después del terremoto con el edificio recién colapsado, debajo, toma de datos durante los días posteriores de estudio y finalmente el edificio contiguo cuesta abajo con similar solución que no colapsó. El único edificio colapsado era moderno y de hormigón armado. Afortunadamente estaba vacío durante el segundo terremoto M5,1. Había dos personas en la azotea que resultaron con heridas leves, no hubo víctimas por colapso. El 100% de las víctimas fue debido a la caída de objetos no estructurales, cornisas, antepechos, etc.

Sin embargo, el colapso del edificio entre la calle Infante Juan Manuel y Calle Talleres (con tres alturas y semisótano) fue uno de los escenarios donde vivimos las mejores lecciones los investigadores sobre el problema de adecuar las estructuras a una zona de geomorfología inclinada en una suave ladera en un área propensa a la sismicidad y sobre terrenos cuaternarios de gravas ligadas a terrazas altas como las P1 sobre las que se apoya la vieja Iruña. A los pilares se les dimensionaba con diferentes longitudes para compensar la pérdida de cota.

Los datos históricos sobre la sismicidad de la zona son una fuente de experiencia que pareció olvidada en la era del hormigón armado que comenzó hace poco más de un siglo. De esa manera, que resultó perniciosa, fue como los proyectistas resolvieron —sin formación en los potenciales efectos de la sismicidad— la edificación en un terreno con desnivel en terrenos cuaternarios (figura 6.08).

Una buena parte de los edificios que quedaron en pie en la Viña presentaba tantos daños que debieron ser demolidos. Este es uno de los objetivos de la NCSE-02: aunque el edificio quede arruinado la estructura debe aguantar en pie con el objeto de salvar el máximo número de vidas. La demolición posterior es cuestión aparte... Al igual que los automóviles, pueden quedar inservibles tras un accidente, pero preservan en lo posible el espacio donde nos encontramos los humanos.

No obstante, ese objetivo que los ingenieros, geólogos, planificadores, arquitectos, hemos casi culminado gracias a la investigación tras los terremotos que afectaron a entornos urbanos, es completamente insuficiente.

En las comunidades, ayuntamientos, autonomías, regiones, fuera y dentro de las casas puede no estar presente la cultura de la protección, tanto individual como colectiva. Y eso, en conjunción con otras carencias técnicas, pero, sobre todo, de formación de los arquitectos, geólogos e ingenieros, sobre qué significa proyectar y resolver la adecuación de los edificios a, por ejemplo, características topográficas peculiares, fue determinante.

Esta falta de consideración con la realidad geológica del medio puede ser letal. Así se fraguó lo que mató, no sólo en Lorca, también en Emilia Romaña y otros lugares del planeta; en el trasfondo yace una falta de formación y conocimiento del medio que en el momento menos esperado se vuelve contra nosotros.

Figura 6.09. Barrio de La Viña de Lorca mostrando la extendida disposición del piso débil por los barrios nuevos de la ciudad. Fotografía realizada por el autor de esta tesis antes de la demolición. El croquis explicativo es de Patrick Murphy.

Figuras 6.10. Iglesia de Santiago de Lorca, un colapso por una restauración inadecuada de 1994/95 consistente en una desmesurada cubierta de hormigón armado demasiado pesada y rígida. Fotos del autor de la tesis. Abajo a la izquierda una radiografía de una prótesis lumbar facilitada por Manuel Fortea para explicar por qué en un segundo accidente, si la prótesis es más resistente que el hueso, es éste el que vuelve a romper.

El otro edificio que colapsó no eran viviendas, fue la iglesia de Santiago (figuras 6.10) de las que ya hablamos cuando vimos el ejemplo de la iglesia de San Miguel Arcángel de Noáin (S. XIII). La explicación de la calamidad vino tras conocer que la restauración en 1994-1995 de la cubierta con hormigón armado de muy alta resistencia y mucho peso fue contraproducente.

Este caso inspiró un brillante análisis por parte del arquitecto Manuel Fortea. El ejemplo propuesto es el de una prótesis lumbar tras un accidente con la que se abusa de refuerzo con la resistencia de la misma y en un segundo accidente lo que rompe es nuevamente el hueso.

Este tipo de incongruencia mecánica está mucho más extendida de lo que creemos y lo hemos podido estudiar en la iglesia de Artaiz en Navarra sobre las lutitas del Terciario Continental. La iglesia de Artaiz no colapsó, pero ha sufrido un deterioro significativo en, al menos, dos episodios sísmicos desde su "restauración" en 1997.

El caso de la iglesia de Artaiz, a unos 6 km al sur de Lizoain, es muy significativo de cómo la sismicidad de 2004 relacionada con el primer llenado de Itoiz y la intensa actividad sísmica de 2020 han afectado a la estructura de mampostería y han dejado al monumento en un estado vulnerable.

En el siglo XVI se amplió la zona de la sacristía adosada al lado norte del ábside, y se reformó la bóveda del cuerpo de la iglesia. Entre 1956 y 1962 se realizaron diversas obras de restauración, ampliándose éstas en 1997, donde se sustituyó la antigua cubierta de madera por una nueva mucho más rígida y pesada de hormigón y teja cerámica que es la que observamos actualmente. Durante esta misma reforma fueron sustituidas las bóvedas de los dos primeros tramos de la nave.

En la actualidad dichos tramos presentan bóveda de terceletes y los dos últimos tramos conservan lo que se considera su configuración original de cañón ligeramente apuntado y reforzado con un fajón de idéntico perfil que apoya sobre las ménsulas. Este cambio de comportamiento mecánico ante el impulso dinámico puede explicar no sólo lo que vemos en las imágenes, también en el interior.

Los proyectos de restauración del Patrimonio Histórico han pecado en ocasiones de refuerzos desmedidos que más tarde han sido fuente de problemas en relación a la sismicidad y a las vibraciones de una maquinaria de compactación por vibración muy pesada diseñada para la obra civil, como hemos visto, por ejemplo, en la iglesia de Noáin o en Tabar.

Figura 6.11. Iglesia de San Martín de Artaiz del siglo XII. En el XIII se construyó la torre campanario (claramente diferenciada por una sillería más pobre que la del cuerpo de la iglesia) y en tiempos recientes "sufrió" una restauración similar a la de la iglesia de Santiago de Lorca. Con los episodios sísmicos de 2004 y 2020 se han producido las típicas patologías en aspa o X por el movimiento del terreno fácilmente reconocibles en el ábside (arriba a la izquierda), además de las grietas en las escuadras y desplazamiento horizontal de sillares (arriba a la derecha). Abajo a la izquierda la situación geológica de Artaiz sobre el Terciario Continental de lutitas y a la derecha una vista frontal del templo.

Los impactos en la comarca de Lorca en el Patrimonio Histórico fueron enormes, además de las vidas humanas, se calcularon inicialmente daños a recuperar por valor de 1.650 millones de euros. Fue una primera estimación que más tarde, tras las elecciones de 2012, se revisó a la baja no sin polémica. En julio de 2011, en la World Conference On Civil Engineerinig And Urban Planning (WCEUP 2011) en Hanghzou, China, presentamos el trabajo *Why Was It so Damaging? The Lorca earthquake, 2011 May 11th* publicado en el International Journal of Environmental Protection (IJEP) ISSN: 2224-7777; 2011, donde analizamos este tipo de daños en edificaciones patrimoniales y actuales. Es de destacar que tanto elementos modernos como antiguos suelen presentar la mayoría de las veces —debido a su uso, diseño y funciones— daños muy similares.

El daño a cortante con su inconfundible firma en aspas o en "X", como se puede ver en Artaiz, es el sello característico del impacto por sismo en todo tipo de estructuras y materiales, antiguos y modernos (figuras 6.12).

También el hecho de que el casco antiguo de Pamplona se haya calificado como el más vulnerable de Navarra (SISNA, 2011), tiene que ver con decisiones urbanísticas tomadas a través del tiempo en un contexto de *amnesia sísmica* de casi siglo y medio. En el casco antiguo de la capital navarra conviven edificios que se sustentan sobre los mismos cimientos de hace siglos y sobre otros edificios, tal y como vimos en el recorrido histórico de algunos edificios emblemáticos de la vieja Iruña.

Más tarde se añadieron las nuevas estructuras de madera, después metálica o de hormigón en diferentes épocas y no se construyeron siguiendo precisamente criterios de resistencia a terremotos, sino impulsadas desde las necesidades de una ciudad que creció hacia arriba y no salió de las murallas hasta la moda de "los ensanches" bien entrado el siglo XX. Recientemente la propuesta de incluir este tipo de consideraciones estructurales ha sido debatida con los responsables de Protección Civil por el autor; más adelante, cuando hablemos de la revisión del SISNA volveremos sobre este aspecto relacionado con el Patrimonio Histórico y las nuevas condiciones ambientales y de conocimiento.

Figuras 6.12. Sistemas tradicionales y modernos sufren los mismos daños durante un terremoto, independientemente de si están hechos con hormigón o sillería, elementos decorativos incluidos. Ver el efecto del vapuleo horizontal a cortante con las típicas roturas en aspas o "X" en el convento de las Clarisas de Lorca y en las ya demolidas viviendas de la Plaza de San Mateo. Fotos propias. Croquis de Patrick Murphy.

Estas consideraciones y experiencias fueron además corroboradas más tarde en Emilia Romaña, por ejemplo, en la histórica ciudad de Ferrara y otros lugares afectados por los terremotos de 2012. Pero quizás las más peligrosas sean las herencias de pisos débiles y plantas bajas diáfanas o completamente abiertas que destacaban tanto en La Viña, como hemos visto, pero especialmente llamativos fuero los impactos en el barrio de San Fernando. A ambos barrios de Lorca que pudimos visitar los investigadores, accedimos con ayuda y supervisión de las fuerzas de seguridad y Protección Civil para recorrer y estudiar los daños antes de ser demolidos. Las configuraciones urbanas de planta libre se han extendido por toda la geografía del planeta. Desafortunadamente también en zonas sísmicas y propensas a cierta sismicidad moderada como Navarra y la Cuenca de Pamplona (figuras 6.13).

Los años posteriores fueron cruciales para consolidar una nueva perspectiva sobre el fenómeno natural de la sismicidad en España y en Europa. Lorca marcó un antes y un después.

Figuras 6.13. Pisos débiles en el barrio de San Fernando (Lorca). Tras las riadas de 1973, se construyó un barrio completo con cuatro plantas elevadas sobre una planta abierta y así evitar la inundación de las viviendas. Las familias afectadas fueron acogidas en San Fernando y desde 1973 hasta 2011 vivieron en ellas. Tras los terremotos del 11 de mayo de 2011 el barrio quedó clausurado y fue demolido. Actualmente se está reconstruyendo teniendo en cuenta lo que se explica en este aparatado y se visualiza en el croquis central de Patrick Murphy. La diferencia de comportamiento con la planta baja libre y cuatro plantas de viviendas sobre ellas produjo daños irreversibles. Si la planta baja, en vez de libre, tuviera un comportamiento similar a las superiores, probablemente el problema quedaría muy amortiguado.

Esta evolución histórica se ha explicado a nuestros dirigentes en el Ayuntamiento de Pamplona, en el Parlamento de Navarra en sendas comisiones y en numerosas ocasiones en los colegios profesionales y universidades, también a las personas más influyentes del sector de la construcción. Lo que realmente mató, y esa es la gran experiencia de Lorca, es una combinación de elementos no estructurales y la falta de una mínima cultura sísmica en una población que no sabe cómo reaccionar. Muchos de los elementos ornamentales o constructivos, que son los que desafortunadamente, en combinación con la falta de cultura sísmica, siguen siendo los que más muertes acumulan, cayeron sobre una ciudadanía asustada que salió corriendo. Las 9 víctimas de Lorca responden a este perfil. Concienciar a los responsables de las administraciones en tomarse esta cuestión en serio es una asignatura todavía pendiente, a pesar de las actividades sectoriales, universitarias, científicas y culturales a que se les invita, especialmente tras episodios de terremotos como los de 2013, 2017 o 2020-2021 y a pesar también de la cantidad de trabajo desinteresado que se les sigue facilitando. Como se puede ver en la página 55 del SISNA, el casco viejo de Pamplona necesita una campaña de inspección técnica como la que se hace, por ejemplo, a los automóviles a partir de cierto tiempo de uso.

6.6.1. La educación en sismicidad. Una cultura que salva vidas.

En abril de 2013 se aprobó por unanimidad, tras la comparecencia de quien suscribe en la comisión de seguimiento del fenómeno sísmico de aquel año, incorporar en los colegios, además de los conceptos básicos sobre sismicidad, cuáles deben ser las actuaciones que se deben seguir, tal y como se hace en caso de incendio, inundación, escape químico, ataque terrorista u otros, algunos de ellos se hacen todos los años con simulacros.

Actualmente están incluidos en colegios, institutos y universidades, pero nos consta que no llegó a desarrollarse la iniciativa con respecto a la sismicidad. El hecho de saber qué hacer en caso de terremoto es una educación muy tenida en cuenta en países que comparten zonas símicas con zonas que no lo son, como EEUU, México o China.

El ejemplo de EEUU y del director del Colegio Cardenal Ilundáin, del barrio de la Rochapea de Pamplona, que vivió y ejerció de profesor en Carolina del Norte, es muy significativo. Cuando supo de la iniciativa fue el primero en pedir que se diesen charlas en su colegio en pleno enjambre sísmico de 2013. Aunque Carolina del Norte no es un área especialmente propensa a los terremotos, en EEUU la media de movilidad es de unas nueve veces en la vida de una persona, por lo que este tipo de educación suele ser obligatoria en los estados y se hacen simulacros tanto en Carolina como en la sísmica California, al igual que un niño de Valladolid puede acabar trabajando de adulto o ir de vacaciones a Granada o Lisboa y en caso de vivir un terremoto sabría qué hay que hacer, pero sobre todo, qué no hay que hacer.

En Lorca fue muy significativo y comentado el comportamiento de la gente que murió al salir despavorida en comparación con otras personas, generalmente inmigrantes latinoamericanos o de países del norte de África que, rápidamente y educados en la cultura sísmica, reaccionaron como les habían enseñado, se quedaron quietos bajo un dintel, apoyados o cerca de un pilar o debajo de una mesa. Quienes murieron o resultaron heridos habían salido corriendo alarmados y fueron víctimas de la caída de elementos no estructurales.

En Lorca también pudimos corroborar que existe una manera de vivir de espaldas a la sismicidad en áreas propensas a ella. Lo vimos no sólo en la educación, sino en la manera de desarrollar el hábitat familiar o laboral. La colocación de espejos aparatosos, grandes cuadros, enormes librerías insuficientemente ancladas u objetos como bicicletas estáticas o el banco de abdominales en lo alto de un armario, cerca de donde se suelen sentar las personas a leer, ver la TV o a dormir, fueron fuente de desgracias con el segundo terremoto M5,1 que alcanzó un pico de 0,4g de aceleración del terreno.

6.6.2. Elementos no estructurales

A los elementos que fueron los que mataron en Lorca (y en otros lugares), apenas se les dedica una página y media de 67 en la norma de construcción sismorresistente española (NCSE02). La conjunción de estos elementos y la falta de pedagogía son letales, la mayoría de la gente no estaba educada en la cultura sísmica, salió corriendo y le cayeron antepechos, lucernarios, parapetos...

Figura 6.14. "Otros elementos constructivos". Fueron los que mataron en Lorca y en otras experiencias en las que se dieron circunstancias similares. NCSE-02. Capítulo 4.

Sobre los elementos no estructurales (recordemos que fueron los que ocasionaron 8 de las 9 víctimas en Lorca), la norma NCSE-02 en su capítulo 4.7 hace, entre otros, los siguientes apuntes:

> *4.7.2. Cerramientos, particiones y otros.*
>
> *Todos los paños, particiones interiores, falsos techos y otros elementos singulares, como por ejemplo paneles de fachada, etc., deben enlazarse correctamente a los elementos estructurales para evitar el desprendimiento de las piezas durante las sacudidas sísmicas, especialmente si se ha supuesto que la ductilidad de la construcción es alta o muy alta.*
>
> *4.7.3. Antepechos, parapetos, chimeneas y cercas.*
>
> *Los elementos con el borde superior libre, como antepechos, parapetos y chimeneas, deben enlazarse correctamente a la estructura para garantizar su estabilidad, calculándose con la acción sísmica correspondiente a la planta donde están ubicados. Además, cuando ac ≥ 0,12 g los muros o petos con el borde superior libre y con más de un metro de altura, se rematarán con un encadenado de coronación, disponiendo refuerzos verticales anclados a la estructura o a la cimentación.*

Puede observarse tal y como hemos subrayado y enfatiza la NCSE-02 que el denominador común para todo elemento no estructural es que debe enlazarse o anclarse a la estructura. En los proyectos de los edificios y en su posterior construcción este detalle no siempre ha estado presente. Y es que la propia norma NCSE-02 tiene como primer objetivo la reducción sustancial de las usualmente cuantiosas pérdidas físicas y económicas, y sobre todo de las víctimas, especialmente las que genera el daño a los elementos no estructurales. Por ello, considera que *"los valores de cálculo y el diseño sismorresistente deben asegurar que terremotos pequeños, de período de retorno del mismo orden que la vida de la construcción, no ocasionen daños significativos a los elementos no estructurales"* (NCSE-02, 4.7.1). Es decir, las disposiciones urbanísticas que engloban muchos de los elementos no estructurales, así como la distribución del espacio urbano, deberán tener en cuenta también el fenómeno sísmico y lo harán especialmente cuando la aceleración de cálculo alcance o sobrepase $a_c \geq 0{,}12$.

6.7. Urbanismo, sismicidad en Navarra y actualizaciones de la NCSE-02.

Tras cada episodio sísmico como los de 2004, 2013, 2017 o 2020-2021 en Navarra, se suele escuchar o leer a técnicos y a algunos expertos (o no tanto) en los medios de comunicación, afirmando a veces que como en el casco antiguo de Pamplona unos edificios se apoyan sobre otros, se confiere estabilidad al conjunto. Esta afirmación es falsa en la mayor parte de los casos y no corrobora el grueso de las observaciones. La convivencia de diferentes estructuras, y sobre todo alturas, convierte al conjunto de edificios de buena parte del casco antiguo en más vulnerables, tal y como se publicó y divulgó en varias ocasiones y se presentó a sus señorías en el Parlamento de Navarra con motivo de la comisión de seguimiento de la crisis sísmica ocurrida en 2013. Si no fuese así, no aparecería perfectamente señalado en el SISNA (página 55). Un ejemplo: después de la noche de temblores y desasosiego que se vivió en la cuenca de Pamplona la madrugada del 1 de octubre de 2020, con más de un centenar de eventos en 24 horas de los cuales media docena fueron bien sentidos en toda la ciudad, además dos de ellos en las cuencas del Ebro y del Bidasoa desde Gipuzkoa a Tarragona y Barcelona, todas estas cuestiones fueron motivo de cierta inquietud para las personas que viven en el área epicentral de Egüés y Lizoain y se organizaron conferencias y debates al respecto subrayando que poco o nada se había hecho respecto de la inspección técnica de edificios tras los acontecimientos de 2013, 2017 y los de 2020-2021.

El caso es que no es nuevo y sabemos que varias ciudades englobadas en el área sísmica pirenaica han sido golpeadas en el pasado por terremotos destructivos. De ellos, al menos cuatro grandes terremotos lo han hecho con magnitudes mayores de 6 e intensidades VIII a X durante los últimos siete siglos, el último hace casi tres siglos; aun así, no se han desarrollado planes especiales de carácter urbanístico o de inspección técnica de edificios acordes con esa realidad natural, especialmente en poblaciones con más de 10.000 habitantes de Navarra.

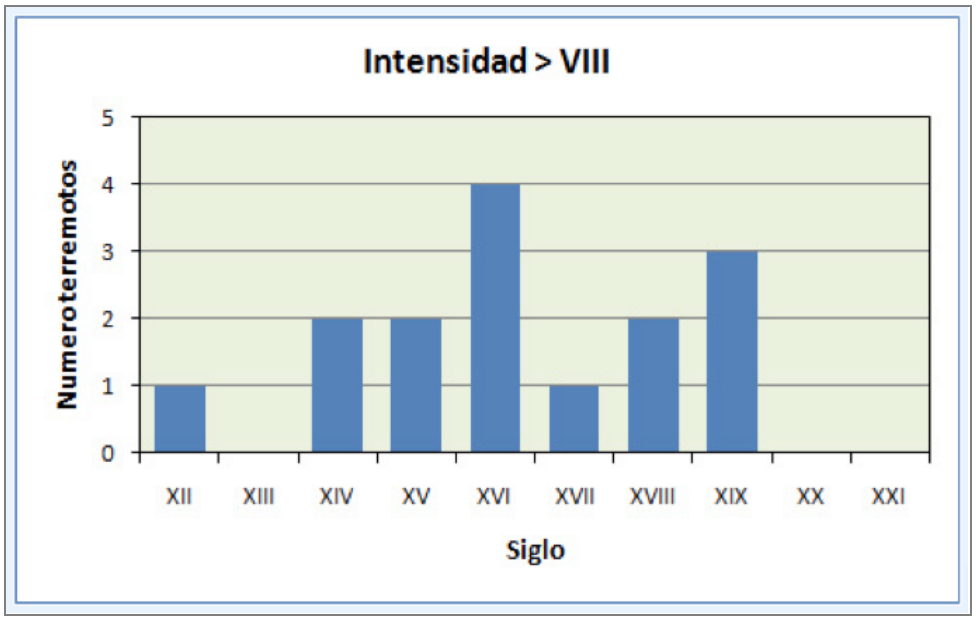


Figura 6.15. Terremotos en la Península Ibérica con intensidad superior a VIII desde el siglo XII al XXI.

Desde el siglo XV hasta hoy, en que gracias a los estudios geohistóricos tenemos un catálogo bastante completo de la sismicidad histórica y sus efectos, hemos tenido de media dos impactos sísmicos destructivos cada siglo, con la excepción del siglo XX y lo que va de XXI, en el que no se produjo ningún sismo catastrófico, lo que ha hecho perder la conciencia del riesgo.

El terremoto de Lorca no contaría ya que, como hemos mostrado, se dieron cita las peores condiciones posibles de tipo geológico y cultural. El último terremoto catastrófico fue el terremoto de Arenas del Rey (Granada), en 1884 y es conocido como terremoto de Andalucía, su magnitud estimada fue M6,8. Hubo cerca de 1.200 víctimas mortales.

Una parte significativa de las poblaciones de Europa y España están localizadas cerca de regiones de conocida (o aún no) actividad sísmica. Ello sugiere la necesidad de repensar el urbanismo y desarrollar nuestras mejores herramientas de mitigación como la ley del suelo de 2008. Como afirmamos e insistimos, las normas de construcción sismorresistente no han sido, no son, y nunca serán suficientes.

Aunque las fallas españolas activas aparecen implícitas en las normas sismorresistentes, sin embargo, las que consideramos inactivas o aún no conocemos, como en el caso de Lizoain, no lo estarían. Las primeras afectarían a un total de 2.618 localidades situadas en zonas con riesgo sísmico, en 724 se aglomeran más de 5.000 habitantes, una población de más de 20 millones de personas. De las segundas poco sabemos, de hecho, existen muchos epicentros "sin falla" entre los miles de ellos sucedidos al este de Pamplona.

A pesar de ser España un país sísmico, no existe una conciencia histórica sectorial o de una altura científica en el sector con cierta proyección popular, tampoco universitaria, sobre el riesgo sísmico y su importancia en la era de tránsito del urbanismo que cambió las ciudades del siglo XIX al XX. El largo tiempo transcurrido, casi 140 años, desde el catastrófico terremoto de Andalucía de 1884 con cerca de 1.200 muertos y una destrucción que llegó al grado X, ha conformado también nuestra amnesia sísmica.

En general, la población más especializada, o cultivada al respecto, cree que son los ingenieros y los dirigentes los encargados de mitigar desastres a través de cumplir y hacer cumplir normas sismorresistentes cada vez más refinadas. Los ingenieros también creen que son ellos los designados a conducirnos hacia ese fin aplicando teóricos postulados que la naturaleza siempre supera, como por ejemplo en Lorca en 2011 con 0,38g, cuando la expectativa era 0,12g u Olave 2017 con 0,16g cuando se esperaba 0,04g.

Ello es debido, entre otras cosas, a que normalmente tendemos a creer que el sismo actúa única y exclusivamente sobre el objeto de los estudios de ingeniería: los edificios y sus estructuras, es decir, las piezas del sistema. Pero el verdadero escenario sísmico del siglo XXI es la ciudad. La realidad es que la historia de España, salvando este lapso de 140 años justo a la entrada de la era del hormigón armado y más recientemente las burbujas inmobiliarias, en los últimos siete siglos, está repleta de ejemplos de terremotos destructivos con intensidades por encima de VIII. Así, "los temblores de tierras" y el qué hacer si brotaban, eran temas de estudio en las escuelas y universidades hasta hace algo más de un siglo. La cultura de la sismicidad es un fenómeno que no se ha actualizado tanto como otros aspectos. Simplemente se olvidó.

La amnesia sísmica de la población, medios y dirigentes, domina sobre los esporádicos brotes de interés cuando algo como lo de Lorca o enjambres persistentes como los de Lizoain nos despiertan la curiosidad. Luego remite y otra vez se duerme. Sin embargo, arquitectos y urbanistas aún tienen mucho que proponer y aportar, aunque buena parte de ellos no sean conscientes del enorme campo de actividades profesionales que las ciencias de la tierra brindan a la Arquitectura en su expansión y encuentro con ella, sobre todo en este siglo recién estrenado, y especialmente con el emergente interés (y necesidad) de volver la mirada a nuestro patrimonio y sus nuevos contextos físicos y de uso, pues los primeros han cambiado como lo han hecho los segundos.

Es oportuno recordar que un terremoto es un fenómeno natural, pero que la catástrofe a la que puede derivar no lo es y se puede evitar con ciertas disposiciones humanas, urbanísticas, medidas preventivas y de actuación.

Aunque en la Cuenca de Pamplona la vulnerabilidad no es tan alta como en el sur o sureste español, existen edificios construidos en los años en que no se aplicaban normas sismorresistentes o con normas antiguas, y que hoy (ver SISNA, 2011) sabemos que serían vulnerables con cierta probabilidad de colapsar en caso de un sismo severo.

Actualmente se está completando la norma NCSR-23 (2023) con enorme controversia por la cantidad de lagunas que está dejando con respecto a la aplicación de la normativa estructural española y el Eurocódigo. En la mayoría de los países de Europa se fueron sustituyendo las normativas nacionales por los Eurocódigos. España todavía no lo ha integrado, a pesar de que los Eurocódigos son un conjunto ya integrado de normas coherentes y seguras en las que se incluyen disposiciones urbanísticas de diseño sismorresistente. Precisamente uno de los motivos que han llevado a los países europeos más castigados por la sismicidad a adoptar los Eurocódigos es el fenómeno sísmico. Portugal, por ejemplo, derogó toda su normativa estructural y adoptó los Eurocódigos para optimizar el cálculo de estructuras frente a terremotos como el de Lisboa de 1755 (M8,8 y cerca de 100.000 víctimas).

Una de las cuestiones más importantes que introdujo en 2008 el Código Técnico de la Edificación (CTE) es que el estudio geotécnico (EG) es el "*compendio de información cuantificada en cuanto a las características del terreno en relación con el tipo de edificio previsto y el entorno donde se ubica, que es necesaria para proceder al análisis y dimensionado de los cimientos de éste u otras obras"* (CTE, 2006).

Es decir, toda actuación tiene una repercusión en entornos y edificios adyacentes y cualquier estudio geotécnico debe tenerlo en cuenta. En el caso de Pamplona se han vivido afecciones importantes a edificaciones adyacentes tras actuaciones que no lo consideraron como propio. Además, es mucho más acentuado en áreas que poco a poco están siendo modificadas como son *los Ensanches* (primero y segundo ensanche de principios y mediados del siglo XX), dada su madurez.

La afección a edificios que, en su mayoría, están cimentados sobre los terrenos cuaternarios definidos en esta tesis como P serían los más afectados. Por ello, para la programación del reconocimiento del terreno dice el CTE *"se deben tener en cuenta todos los datos relevantes de la parcela, tanto los topográficos o urbanísticos y generales del edificio, como los datos previos de reconocimientos y estudios de la misma parcela o parcelas limítrofes si existen, y los generales de la zona realizados en la fase de planeamiento o urbanización."* (CTE, 2006).

Además de definir tipo, profundidad, terreno y características de la cimentación de los edificios que se van a ver afectados en una actuación urbanística, se ha dado el caso de afecciones por las propias vibraciones con la ejecución de micropilotes, bulonados, etc., en excavaciones.

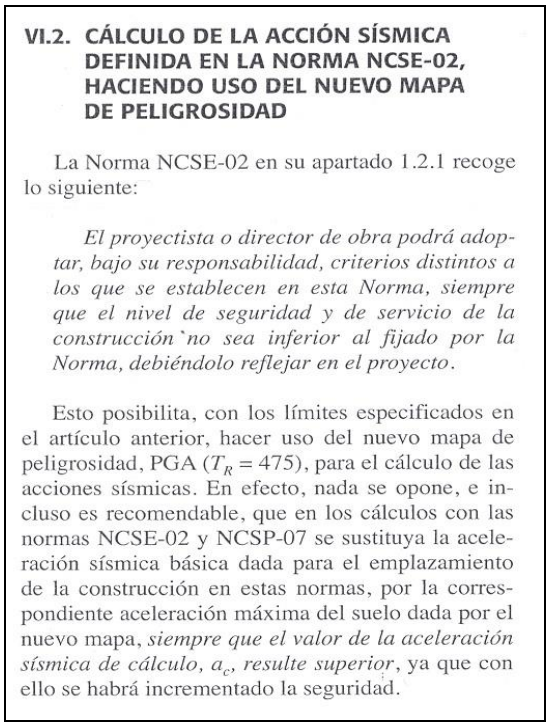
Se debe considerar en Pamplona el movimiento inevitable de la excavación en un macizo rocoso de Margas de Pamplona con RMR típico alrededor de 40-55 (Beniawski, 1989) para la ejecución de obras subterráneas. El módulo de deformación se encontraría en el entorno de los Em=10 GPa (figura 7.05) algo que los muros de micropilotes anclados, por ejemplo, no han neutralizado al 100% como hemos visto en experiencias previas para edificios adyacentes cimentados sobre los cuaternarios de gravas con perfil tipo Pamplona P1 y P2. Por tanto, los edificios cercanos a excavaciones importantes se ven "arrastrados" por la expansión horizontal del macizo rocoso hacia la excavación, el movimiento sobre él de los terrenos cuaternarios y el compactado inducido de las labores de ejecución, siempre, contando con que el bulbo de presiones de las cimentaciones de los edificios afectados no sea interceptado en ningún momento. El papel del macizo rocoso de Margas de Pamplona en este tipo de obras es especialmente importante.

La NCSE-02 ha tenido algunas actualizaciones, tanto de la memoria como de los mapas. En ellas, es precisamente la zona prepirenaica, en especial la Cuenca de Pamplona y concretamente, nuestra ciudad, la que mayor incremento de aceleración básica (ab) del terreno esperable ha experimentado en la geografía del Estado, pasando del 0,04g de 2002 al 0,09g de 2012 y 2015 tras nuevas investigaciones geohistóricas, especialmente los episodios sísmicos vividos en 2004-2007 (primer llenado de Itoiz) y 2013 (Sierra de El Perdón). El proyecto típico de Pamplona no suele incluir la actualización de 2015 para el cálculo estructural y solemos leer cómo se justifica la no implementación de los nuevos valores de aceleración porque *"no son de obligado cumplimiento"*. También en un Proyecto del Ayuntamiento de Pamplona de carácter público:

> *"Pamplona (Navarra), presenta unas características sísmicas tales que la aceleración sísmica básica es de ab=0,04g, siendo g la aceleración de la gravedad, y el coeficiente de contribución Kv=1, si bien, en la actualización del mapa de riesgo sísmico realizada a fecha de octubre de 2015, se incrementa el valor de la aceleración sísmica básica para esta zona a ab=0,09g. Si la aceleración sísmica básica (ab) es igual o mayor de 0,04g deberá tenerse en cuenta los posibles efectos del sismo en terrenos potencialmente inestables*".

Para finalmente, aplicar el valor de ab=0,04g. Es probable que este valor de ab aumente con el tiempo dada también la sorprendente medición instrumental de 0,16g recogida el día 10 de marzo de 2017 en el acelerógrafo de Pamplona con el vespertino evento M4,2 (Int. V-VI) de Olave y las del centenar de réplicas posteriores.

Dice el Ministerio sobre la aplicación de este valor:



VI.2. CÁLCULO DE LA ACCIÓN SÍSMICA DEFINIDA EN LA NORMA NCSE-02, HACIENDO USO DEL NUEVO MAPA DE PELIGROSIDAD

La Norma NCSE-02 en su apartado 1.2.1 recoge lo siguiente:

El proyectista o director de obra podrá adoptar, bajo su responsabilidad, criterios distintos a los que se establecen en esta Norma, siempre que el nivel de seguridad y de servicio de la construcción no sea inferior al fijado por la Norma, debiéndolo reflejar en el proyecto.

Esto posibilita, con los límites especificados en el artículo anterior, hacer uso del nuevo mapa de peligrosidad, PGA (T_R = 475), para el cálculo de las acciones sísmicas. En efecto, nada se opone, e incluso es recomendable, que en los cálculos con las normas NCSE-02 y NCSP-07 se sustituya la aceleración sísmica básica dada para el emplazamiento de la construcción en estas normas, por la correspondiente aceleración máxima del suelo dada por el nuevo mapa, *siempre que el valor de la aceleración sísmica de cálculo, a_c, resulte superior*, ya que con ello se habrá incrementado la seguridad.

Figura 6.16. Extracto de *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España, 2012, IGN: VI.2. CÁLCULO DE LA ACCIÓN SÍSMICA DEFINIDA EN LA NORMA NCSE-02, HACIENDO USO DEL NUEVO MAPA DE PELIGROSIDAD* (ISBN 948-84-416-2685-0).

En el documento de 2012 (figura 6.16) se indica que:

> *"Esto posibilita, con los límites especificados en el artículo anterior, hacer uso del nuevo mapa de peligrosidad, PGA (TR = 475), para el cálculo de las acciones sísmicas. En efecto, nada se opone, e incluso es recomendable, que en los cálculos con las normas NCSE-02 y NCSP-07 se sustituya la aceleración sísmica básica dada para el emplazamiento de la construcción en estas normas, por la correspondiente aceleración máxima del suelo dada por el nuevo mapa, siempre que el valor de la aceleración sísmica de cálculo, ac, resulte superior, ya que con ello se habrá incrementado la seguridad".*

No tiene por tanto ningún respaldo técnico el utilizar un mapa desactualizado que situaría, además, los cálculos del lado de la inseguridad. No sólo es difícil precisar e incluso definir el factor de seguridad de partida, por ejemplo, de una excavación que se deforma por descompresión, sino que además en lo que atañe al impacto sísmico, éste hace necesario recalcular el FS como se indica en la NCSE-02 para el resultado final y en el momento crítico de una excavación.

Es decir, tanto si estamos del lado de la seguridad como de la inseguridad, varios estudios han mostrado que el desplazamiento del terreno en excavaciones y laderas, especialmente al lado de edificios, hace a éstos sensibles a la aceleración de rendimiento crítico, la que propicia que FS<1.

El problema que vemos en estos análisis sin actualizar, y se dan en muchos ámbitos, es que pequeñas diferencias de aceleración pueden causar grandes diferencias de desplazamiento en los edificios colindantes. La excavación para sótanos, parkings, almacenes, etc., que se llevan a cabo, se deformarán durante la agitación al haber sido inevitable el fenómeno de la descompresión en perfiles tipo Pamplona P12 y P22 mientras se ejecutaban las obras. Es previsible que porciones adyacentes de excavación que ya se han "esponjado" durante las obras subterráneas puedan estar fuera de fase durante una sacudida sísmica con otra que no tiene sótano, por ejemplo. Ello determina que diferentes áreas pueden acelerar en diferentes direcciones. De esta forma, asumir como se suele indicar un valor de 0,04g, supone situar los trabajos del lado de la inseguridad, obviando los avances técnicos y normativos que en esta materia se han desarrollado en los últimos años.

En macizos de calidad buena (80<RMR<61, terreno tipo II) y muy buena (RMR>80, terreno tipo I) los fenómenos inestables se dan principalmente por la formación y caída de cuerpos de roca desde las discontinuidades que forman cuñas o bloques (se han visto estos fenómenos en Gorraiz, Cemborain o Pamplona en la misma formación, con sismos de intensidades medias IV-VI), por lo que resulta necesario realizar un análisis de su estabilidad con el objeto de comprobar la eficacia de los sostenimientos previstos en dichos casos.

En el caso de macizos de calidad media (60<RMR<41, terreno tipo III) que son los más abundantes en la Cuenca de Pamplona, es necesario un seguimiento de la excavación con comprobaciones continuas del cambio del sistema fractográfico. El proyecto arriba comentado, para una obra del Ayuntamiento de Pamplona, clasifica el macizo rocoso de *calidad media* con terreno tipo III y en la misma página lo considera como de *calidad buena* con terreno tipo II para el cálculo de los asientos en las Margas de Pamplona. Este detalle no tiene demasiada transcendencia para el cálculo estático de los asientos en la formación, pero es relevante a la hora de considerar las acciones dinámicas de un sismo.

Si introducimos el valor de ab actualizado a 2012 y 2015 (figura 6.17) de la NCSE-02 (ab=0,09g) y consideramos que el parámetro S=C/1,25 con C entre 1,3 y 1,6 para una roca fracturada o un terreno de compacidad media o cohesivo de consistencia firme como los descritos en nuestros perfiles E1, E2, P1 y P2 y no de roca compacta de calidad buena, obtenemos que S varía de 1,04 a 1,28 y por lo tanto la aceleración de cálculo (ac) con los mapas actualizados de la NCSE-02 variarían entre 0,094g y 0,115g, más del triple que la calculada y al límite para comenzar a considerar actuaciones de anclaje de elementos no estructurales como los que mataron en Lorca, con encadenados de coronación y disponiendo refuerzos verticales anclados a la estructura o a la cimentación.

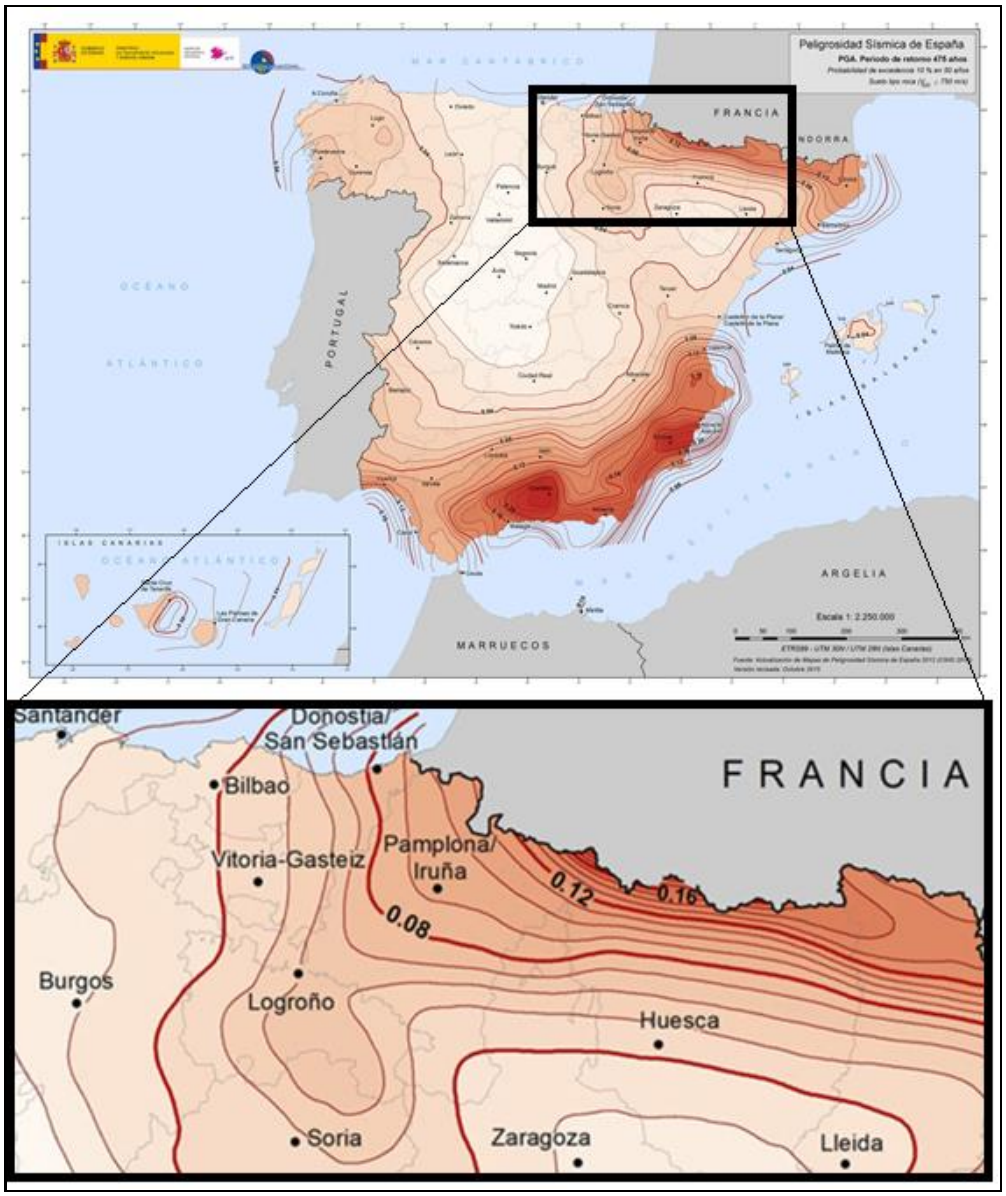


Figura 6.17. Detalle de ab en la Cuenca de Pamplona. *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España, 2012,* IGN. (ISBN 948-84-416-2685-0).

Zona	τ (4.0)	Región	Máxima verosimilitud		Mínimos cuadrados		Función de distribución de la magnitud máxima			
			β	σ_β	β	σ_β	MM_{med}	σMM	$MM_{mín}$	$MM_{máx}$
14	0.033	Pirineos	2.726	0.046	2.672	0.060	4.9	0.2	4.7	5.1
15	0.738						6.5	0.3	6.2	6.8
16	0.027						5.5	0.4	5.1	5.9
17	0.369						6.7	0.2	6.5	6.8
18	0.023						6.2	0.3	5.9	6.6
19	0.055						5.2	0.3	4.9	5.4
20	0.036						6.0	0.3	5.7	6.3
22	0.019						6.3	0.3	6.0	6.5
23	0.043						5.2	0.2	5.0	5.4

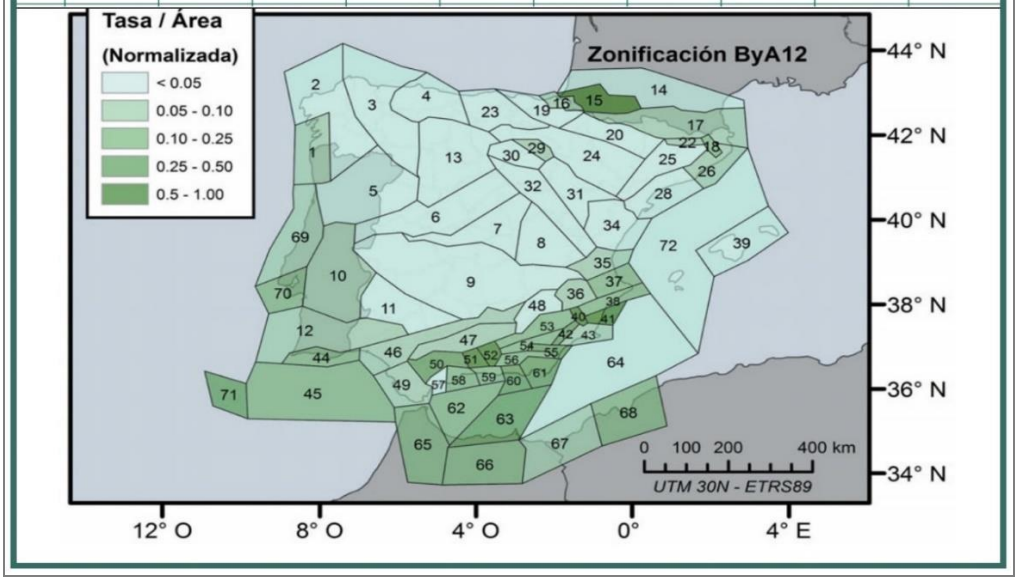


Figura 6.18. Mapas de actualización de la norma NCSE-02. Arriba: tabla de los parámetros de sismicidad de la zonificación de Bernal et al. como resultado de diferentes trabajos de peligrosidad realizados por sus autores en ByA Estudio de Ingeniería S.L. (Zonificación ByA12) para el área de Pirineos: tasa τ (4.0), beta de la ley de Gutenberg-Richter, valor medio β y desviación estándar σ_β de los catálogos simulados, obtenidas mediante los dos tipos de ajuste —máxima verosimilitud y mínimos cuadrados— y parámetros de la función de distribución de la magnitud máxima —valor medio MM_{med}, desviación estándar σ_{MM} y límites mínimo $MM_{mín}$ y máximo de truncamiento $MM_{máx}$—. Abajo, tasa normalizada de ocurrencia de terremotos (por unidad de área) en cada una de las zonificaciones ByA12 (Zonas 14 a 23). En el mapa de actualización de 2012 se han usado la Magnitud máxima mínima: Magnitud máxima observada en catálogo (MMO). Magnitud máxima máxima: Magnitud máxima esperada por el tamaño de las fallas de la zona (MMG). Magnitud máxima media: Magnitud máxima observada más la mitad de la incertidumbre asociada a ella (MMO + σMobs/2). Desviación estándar: Mitad de la incertidumbre de la magnitud máxima observada σMobs/2. En la tabla de arriba se muestran los parámetros de sismicidad resultantes de modelizar la recurrencia con las variantes expuestas. Asimismo, se indican los valores de la tasa normalizada, la magnitud máxima media y cuál ha sido el criterio para determinar la magnitud máxima (tectónica y sismicidad) para las zonificaciones empleadas. La Cuenca de Pamplona se encuentra entre las zonas 19 y 20 donde el sismo máximo esperable alcanzaría una magnitud de 6,3 acorde con el M6,5 del Mapa Tectónico de España 1:200.000 del IGME de 2004. *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España, 2012,* IGN. (ISBN 948-84-416-2685-0).

6.8. Acontecimientos sísmicos históricos que afectaron a poblaciones situadas sobre las Margas de Pamplona y terrenos asociados.

Navarra, como en España y otros países, fue expulsando a los historiadores del estudio de los fenómenos sísmicos, el *PLAN ESPECIAL DE RIESGO SÍSMICO DE NAVARRA* (SISNA) es un gran protocolo de actuación en caso de un terremoto dañino en la Comunidad Foral de Navarra, pero muestra, como en otros casos anteriores, esas dramáticas carencias históricas que subestiman el riesgo sísmico real.

Varios países ven reincorporando a historiadores en los equipos que conforman estos trabajos, Japón, Italia, Francia, Alemania, Suiza, Turquía, Irán o EEUU ya lo hacen. Estos eventos históricos se siguen subestimando y a pesar de haber sido publicados hace un cuarto de siglo, siguen sin ser mejor estudiados. Sangüesa es la primera ciudad de Navarra en los registros históricos oficiales golpeada por un terremoto (15-11-1755), esto sucedía dos semanas después del terremoto más destructor jamás vivido en Europa: el terremoto de Lisboa (M8,8) que supuso entonces cerca de 100.000 víctimas. Sin embargo, los estudiosos de la historia religiosa apuntan a un acontecimiento mucho más espectacular que el catalogado terremoto de intensidad V-VI de ese noviembre de 1755, un episodio que aconteció un siglo y medio antes, y precisamente desde esa localidad nos llegan los testimonios de sus damnificados. Es posible que el fenómeno afectara a una franja entre Sangüesa y Pamplona.

6.8.1. Pamplona y Sangüesa, 1612 y 1755.

Una importante aportación para el mejor conocimiento de la sismicidad es la evolución de la toponimia del territorio, además del estudio de los sismos históricos. Es un estudio que realizan lingüistas, geógrafos o historiadores, y en las zonas de estudio, como vimos en el caso del principal terreno de cimentación histórico de Pamplona, el cascajo o kaskallueta, han convivido al menos en los últimos siglos, corrientes latinas, castellanas, francesas y euskaldunes. La actividad sísmica en la zona de La Canal de Berdún y en Sangüesa también ha quedado grabada en el lenguaje y ha provocado algún tipo de toponimia (toponomástica o proceso de génesis del nombre de un lugar) en la zona. Dos de los ejemplos más conocidos de España están aquí, en Biniés y Villarreal de la Canal uno, y en Sangüesa el otro. Cabría esperar que hubiera más dentro de las corrientes lingüísticas apuntadas, apasionante tarea que se brinda para futuros estudios geohistóricos.

Un terremoto en 1357 (ignoramos más datos) destruyó Bahón y Ena, pequeñas localidades próximas a la actual de Villarreal de la Canal (de Berdún). Según relata Alfonso Rey Pastor, en un documento medieval (no identificado); en él se dice:

"el terremoto fue tan intenso que en Biniés se partió un monte con estrépito enorme" y añade el geógrafo: *"A este monte se le conoce actualmente con el nombre de "El Trueno"* (ver figura 6.20). El otro apuntado es el paraje conocido como *"Los Terremotos"* al sur de la ciudad de Sancho Garcés, concepto claro que no alberga ninguna duda sobre el mensaje que nos trae del pasado. Otra toponimia interesante desde el punto de vista geotécnico sobre su resistencia a fenómenos telúricos es "*Rocaforte*".

6.8.1.1. Pamplona y Sangüesa 1612.

Entre Sangüesa y Pamplona hemos encontrado en los escritos religiosos y en la toponimia, las referencias de aquellos fenómenos sísmicos entonces achacados a la voluntad divina; el hoy conocido como paraje de *"Los Terremotos"* de Sangüesa (figuras 6.19) nos recuerda aquellas penurias que además quedaron dramáticamente relatadas.

Descubrimos daños en edificaciones, caída de laderas, cambios morfológicos que no dejaron impasibles a esas personas y una reacción psicológica acorde con su tiempo. Además de lo comentado en 1357, en 1612 un significativo episodio de varios terremotos tuvo lugar en Sangüesa (también se cita en Pamplona), episodio que se extendió durante varios días.

Este fenómeno no está recogido en las bases históricas del SISNA, ni siquiera en el catálogo del IGN, pero su contundencia y el reflejo de lo que pudo acontecer es demasiado rotundo como para pasar desapercibido. El irrebatible trabajo histórico está recogido en el estudio *"El Ayuntamiento de Sangüesa (Navarra) y algunos cultos religiosos; (The town hall of Sangüesa [Navarre] and some religious cults)"* de Juan Cruz Labeaga Mendiola, 1999, muchos años párroco de la ciudad y con quien tuvimos el placer de visitar los archivos.

El 4 de agosto (de 1612) y siguientes, ocurrieron en la localidad *grandes terremotos, ruidos y movimientos de tierra que hicieron temblar los edificios*. La gente quedó afligida y temerosa, creyendo que era un presagio de otra catástrofe mayor, castigo de los pecados públicos y escandalosos.

El bando municipal propuso a los vecinos, como el mejor de los remedios, acudir a Dios Nuestro Señor, con gran devoción, para que, usando de su misericordia divina, librara al pueblo de su aflicción.

Determinaron los corporativos las procesiones y actos religiosos que debían celebrarse en cada iglesia y algunas medidas como la prohibición de tocar instrumentos musicales, jugar a todo tipo de juegos y hacer sacrificios, oraciones y ayunos.

Este pregón municipal manifiesta claramente la mentalidad de la época y en particular la de su redactor, un secretario de Ayuntamiento metido a predicador y moralista (Labeaga J.C., 1999):

> *"... El alcalde y regidores hacemos saber que en esta villa y sus términos ha havido muy grandes terremotos, ruidos y movimientos de la tierra con demostración y amenazas de muy grande ruina, y particularmente hoy día sábado, fiesta de Santo Domingo. Por la mañana ha habido mayor terremoto que nunca, en que se han movido todos los edificios y fábricas, que, por ser tan grande y general, ha quedado toda la república muy afligida y desconsolada. Y porque el remedio de cosas de esta condición no lo hay tan cierto y verdadero como acudir a Dios Nuestro Señor, con grande devoción, a suplicalle sea servido de socorrer, con su auxilio y amparo, usando de su divina misericordia, y porque esto sea con la devoción que es justo, se harán por la tarde procesiones cada uno por su parroquia, y mañana domingo una procesión general saldrá de la parroquia de Santa María, a donde habrá oficio solemne.*
>
> *Y a todos se les manda acudir al tenor de las campanas a procesiones y misa con muy grande reverencia y deboción, suplicando al Señor sea servido usar de su divina misericordia, y amparándonos en su divina gracia dándonos aquello que fuese para su santo servicio...*
>
> *Dada en Sangüesa a, 4 de agosto de 1612...".*

Días después el fenómeno se vuelve más violento:

> *"... A todos es notorio los terremotos que ha habido y hay todos los días y hoy miércoles particularmente, que continúan tan de ordinario, que parescen que no han seido y son apercibimientos de alguna grande y peligrosa ruina que ha de haber por castigo de nuestros pecados, cometidos contra la divina majestad de Dios Nuestro Señor. Y porque paresce que para remedio deste tan grande y general daño ninguno habrá más a propósito como es procurar ebitar los pecados, mayormente los públicos y escandalosos, con que Dios Nuestro Señor más se ofende y la república más se escandaliza, que así a todos se les manda lo hagan evitando evitándolos. Y a todos se les manda que de día ni de noche no tañan guitarra, ni anden con otro ningún instrumento que cause alboroto ni regocijo, ni de noche ni de día. En los campos no anden boceando ni echando pullas, ni diciendo gracias, ni en público ni en secreto nayde juegue a nengún género de juego, porque es justo que en tiempo de tanto peligro todo cese. Y porque a causa de los grandes temblores y terremotos toda la gente está afligida, y para su consuelo y remedio de tan gran daño, los Muy Ilustres Señores Prior y Cabildo de esta villa, como tan celosos del bien y aprovechamiento de toda esta villa, con muy particular cuidado en sus sacrificios y oraciones, encomiendan a todos a Dios Nuestro Señor, suplicando a su Divina Majestad sea serbido de librar a este pueblo de tan grande afligimiento, con cuyo amor, como de padres espirituales, no cansándose de amparar a su pueblo, todos los días de aquí al sábado, al tiempo de la misa conventual, se sacará el Santísimo Sacramento, y harán sus preces y rogativas cada uno en su parroquia, se tañerán las campanas. Y asimismo el viernes primero se harán procesiones cada parroquia a su monasterio a las cinco de la tarde. Y el domingo primero procesión general con oficio solemne en la iglesia de San Salvador, a donde habrá sermón. A todos se les ruega y exorta que los que pudieren el viernes y sábado ayunen, y si se confesaren y comulgaren, será más a propósito. Y todos, con la mayor devoción que pudieren en sus oraciones, supliquen a Dios Nuestro Señor que con su divino auxilio y socorro ampare y socorra a esta república en el presente peligro en que se ve. Y para que esto venga a noticia de todos, se manda publicar por las calles y cantones de esta villa a son de trompeta y voz de pregón.*
>
> *Dada en Sangüesa, a 8 de agosto de 1612...".*

Al sur de la ciudad de Sangüesa se nos recuerda que hace siglos ya se vivieron caídas de laderas como las reportadas desde 1357 en el caso de "*El Trueno"* y hasta la era científica en los análisis de Alfonso Rey Pastor con la crisis sísmica de 1923-1925. El paraje denominado *"Los Terremotos"* trae a la memoria el efecto directo de la sismicidad sobre las laderas en los terrenos inclinados locales de formaciones margosas y formaciones Flysch de las áreas periféricas de la formación de Margas de Pamplona, como vimos en el caso de Cemboráin y Yesa.

Hoy, la zona denominada *"Los Terremotos"* (figura 6.19) se ve como un gran cortado debido al desprendimiento de la ladera que a la sazón coronaba esa circunscripción y con siglos de actuación fluvial, pero todavía nos recuerda el porqué de su nombre y sus efectos; esta zona, por la espectacularidad de su cambio morfológico, se creyó como el lugar donde se generaron los fenómenos sísmicos que impactaron en Sangüesa y alrededores.

Sangüesa y alrededores fueron azotados por terremotos, como consecuencia de ello, en las épocas precientíficas cuando se atribuían semejantes fenómenos a la acción divina, San Sebastián se erigió como patrono protector para mitigar el daño y el dolor derivados de las faltas y pecados de la población que azotaban en forma de terremotos.

La iglesia de San Salvador de Sangüesa sería la meta con oficio solemne y sermón donde se lanzarían las prerrogativas y oraciones para que Dios Nuestro Señor calmara su ira y dejara de hacer temblar la tierra. También en el libro *"HISTORIA DE LA VIDA Y HECHOS DEL ÍNCLITO MONARCA DON FELIPE TERCERO"*, *obra posthuma del Maestro Gil Gonzalez Davila cronista de los Señores Reyes D. Felipe III y IV y Mayor de las dos Castillas y de las Indias* (capítulo LXI, página 182), se recoge aquel temblor múltiple en Pamplona y Sangüesa, pero habla de 1614. Puede que el desfase de dos años sea un error en el que cayó quien reporta la noticia del fenómeno o bien podría tratarse de otro episodio sísmico más aún pendiente de estudio por parte de los historiadores. Nos inclinamos a pensar que se trataría de un desfase en la fecha.

Como se puede leer a partir de las expresiones y toponimias, el fenómeno de *"partir un monte"* como en el caso de *"El Trueno"* en Biniés o llamar a una zona *"Los Terremotos"* como al sur de Sangüesa, el fenómeno sísmico y la caída de laderas en las zonas propensas marginales del Eoceno y del Terciario Continental ha venido siendo una observación histórica desde mucho antes de la existencia de la era científica y de la fundación de las ciencias de la tierra.

Figura 6.19. Arriba a la izquierda: el cortado de *Los Terremotos* con las cicatrices de las caídas se ubica prácticamente sobre la falla inversa que cruza el sur de Sangüesa y vemos superpuesta al mapa geológico abajo a la izquierda. Podría haber sido la responsable del episodio sísmico de varios días de duración de aquel agosto de 1612 y otros más de la zona sucedidos recientemente. Derecha: *Los Terremotos*, espacio rústico según el catastro. (SITNA).

Figura 6.20. Arriba: Biniés y El Trueno. Abajo: geomorfología de los deslizamientos relatados en El Trueno.

6.8.1.2. Pamplona y Sangüesa 1755.

El primer episodio sísmico que aparece en los catálogos es de 1755, lo hace diez días después del devastador terremoto de Lisboa del 1 de noviembre (M8,8), siendo preguntados los responsables de muchas localidades españolas por cómo había afectado el terrible terremoto a sus circunscripciones, del más destructivo de los terremotos vividos en Europa.

[651] PAMPLONA

Pamplona, 20 de noviembre de 1755.
El Virrey.
Ilustrísimo Señor:
Muy Señor mío:

En ejecución de la Orden de S. M. que me comunica V. I. en carta de 8 del presente, para que por su dirección pase a la Real noticia los efectos que haya causado el terremoto que se experimentó el día primero del corriente, con la individualidad que contiene el piadoso celo de S. M. en su Real Orden, debo decir:

Que por el menor número de los habitadores de esta capital se advirtió el expresado terremoto en el citado día primero, a las diez de la mañana, poco más o menos, sin que su temblor hubiese causado temor o susto ni subseguido la menor desgracia en moradores, ni haberse reconocido posteriormente que los edificios hayan padecido perjuicio alguno.

Sin que anteriormente se hubieran previsto en la región del aire, ríos o fuentes, señales que anunciasen dicho terremoto, el que parece, según algunas noticias, se notó su estrépito más perceptible en la ciudad de *Tudela*, y otros pueblos de la Ribera, por los que celebraban los Divinos Oficios, y asistían a estos, de forma que les motivó el susto desamparar la Iglesia, aunque fue tan leve éste, que prontamente se restituyeron a continuar, y a asistir [a] aquellos, con el sucesivo consuelo de que no se ha reconocido haber experimentado el más leve daño en sus personas, cosas y patrimonio.

Posteriormente se ha notado por algunos habitantes de esta ciudad, que el día 15 del presente, y a las tres de la mañana, hubo otro terremoto, el que se conceptuó menos perceptible que el anterior, por los pocos que lo oyeron, experimentándose el mismo consuelo de no haber ocasionado daño alguno, y el especial de que en otros pueblos de este Reino, no se haya advertido el terremoto de este día.

Reconociendo esta capital la especial piedad Divina celebró ayer, 19, con la solemnidad acostumbrada, y singular devoción en la Iglesia de su Patrón San Fermín, misa solemne en acción de gracias por principio de su reconocida piedad, y posible satisfacción de ésta.

Para cumplir la intención de S. M. solicitaré, en conformidad de su Real Orden, las noticias más específicas, dirigiendo estas con la puntualidad que se me previene e individualidad debida.

Dios guarde a V. I. muchos años.
Pamplona, 20 de noviembre de 1755.
Besa la mano de V. S. I. su mayor servidor,

El Señor Marbellán de Amposta,
Fc.º de Maridela y Antillón

[652] PAMPLONA

Pamplona, 11 diciembre 1755.
El Virrey.
Ilustrísimo Señor:
Muy Señor mío:

En respuesta a la de V. S. I., de 8 de noviembre, en que me comunicaba la Orden de S. M. para que le informase de la entidad del terremoto con la especificación que contenía de daños, perjuicios o señales que hubiesen precedido al que se experimentó en este Reino, después de las diez de la mañana del día primero del referido mes, avisé a V. S. I. por entonces no haber llegado noticia de daño alguno y, para más perfecta instrucción, remití copia de la Real Orden a las Cabezas de Merindad para que, comunicándola a sus respectivos pueblos, me informasen con puntualidad.

Y habiendo llegado respuestas de la mayor parte de los pueblos, contestan en que, a la misma hora, fue muy perceptible el movimiento y ocasionó un grave temor en todos que les precisó a desamparar el templo, donde se hallaban los más, con el motivo de la festividad del día, pero, habiendo cesado el terremoto, continuaron en las más partes los Oficios, sin haberse notado daño en personas ni perjuicio en los edificios.

Se avisa de la ciudad de *Sangüesa* que el día once del mismo mes, se observó a las dos de la noche otro terremoto, bastante violento, y a sus resultas, *se arruinó una casa*, pero dando lugar a sacar dos niños de tierna edad, *y otras dos* se apuntalaron, de orden de la Justicia, hasta tomar mayor providencia.

Parece que las religiosas del convento de San Benito de la ciudad de *Estella* advirtieron la noche del día quince de noviembre algún movimiento de la misma especie, a las tres de la mañana; sin que en ninguno de los temblores se avise otro daño que el expuesto, y aunque faltan cartas de algunas repúblicas, no se espera noticia que altere el concepto universal.

Nuestro Señor guarde a V. S. I. muchos años.
Pamplona, y diciembre 11 de 1755.
Besa la mano de V. S. I. su reconocido y mayor servidor,

El Señor Marbellán de Amposta,
Fc.º de Maridela y Antillón

Figura 6.21. Extracto del catálogo de 1932 de José Galbis Rodríguez, Inspector general de Ingenieros Geógrafos. Transcripción de los documentos del Archivo Histórico Nacional.

En Sangüesa y Pamplona no dejó un panorama tan desolador como en Portugal, Andalucía occidental, Castilla Occidental, Extremadura o Galicia, pero en la respuesta dada al Virrey se facilita un dato importante referente a una característica que apenas comenzamos a conocer sobre la sismicidad de las zonas propensas, y es que éstas suelen activarse después de terremotos más o menos intensos y lejanos, días o semanas después. Se produjeron terremotos posteriores al de Lisboa del día 1 de noviembre de 1755, los días 11 y 15 de ese mes y el 11 de diciembre.

6.8.1.3 Conclusiones.

El fenómeno sísmico y su afección al desprendimiento de laderas en terrenos marginales a las Margas de Pamplona, Flysch, Terciario Continental y formaciones con alternancias y disposiciones estructurales desfavorables, ha quedado implícito en uno de los mejores vehículos de transmisión que poseemos los seres humanos: el lenguaje. La toponimia recuerda dichos acontecimientos que, una vez cotejados con el relato histórico, muestran los mismos mecanismos que actualmente describimos desde un marco conceptual geotécnico y que, hace tres o cuatro siglos, eran de índole sobrenatural como resultado de la cólera divina.

Por ello, como comentamos en el apartado del estudio geohistórico en la ciudad de Pamplona, y más concretamente en el colapso de parte de la catedral el 1 de julio de 1390, estos acontecimientos telúricos solían ser borrados deliberadamente por la vergüenza que suponían, pues se trataba de castigos divinos como consecuencia de pecados y vicios que era importante ocultar ante las autoridades y los reinos vecinos. El caso de Sangüesa y el paraje de Los Terremotos, Biniés y el monte que se partió: El Trueno, así como el relato de lo acontecido en agosto de 1612 por un pregonero moralista, relatan simples observaciones que hoy hacemos desde el ámbito geotécnico.

La búsqueda adecuada de documentación histórica puede traer más datos como los de 1357, el del 1 de julio de 1390 o lo sucedido la semana del 4 de agosto de 1612. Es un campo de investigación que deberemos estudiar en el futuro.

6.8.2. Pamplona 1903.

Algo que no ha dejado nunca de sorprender al investigador en geohistoria, especialmente en tomo a la sismicidad, es la tremenda facilidad para el olvido de este fenómeno entre la población. Un elemento importante, sobre todo en los últimos años, es la falta de información sobre el riesgo sísmico en la población navarra. Cualquier temblor proveniente de alguna falla de las tantas que nos circundan produce pánico. Calcular el riesgo sísmico sin conocer algunos detalles importantes del pasado se convierte así en una tarea muy limitada.

Hay un claro problema de subestimación de los impactos históricos y cuando se hace, se catalogan y suelen ser los únicos acontecimientos a tener en cuenta. No hay diálogo con los historiadores. Además, hay un problema de método de evaluación de los peligros (sismicidad histórica seleccionada de acuerdo a ciertos criterios como más la aceleración básica). El resultado es que no se revela el riesgo a quienes toman las decisiones, los administradores y tampoco a los ciudadanos.

6.8.2.1. El evento sísmico del 10 de marzo de 1903 en Pamplona desde la hemeroteca.

Los datos históricos más asequibles se encuentran en las publicaciones del IGN.

1903-02-26	02-00-00.0	00-39.0 W	38-18.0 N	SSIS	III	R	ELCHE.A
1903-03-05	12-50-00.0	00-39.0 W	38-18.0 N	SSIS	III	R	ELCHE.A
1903-03-10	14-00-00.0	01-36.0 W	42-48.0 N	SSIS	VI		PAMPLONA.NA
1903-03-21	00-00-00.0	01-36.0 E	42-57.0 N	SSIS			FOIX.FR
1903-04-17	01-00-00.0	03-17.0 E	42-18.0 N	SSIS		P	ROSAS.GE

Figura 6.22. 10 de marzo de 1903: Terremoto de intensidad VI en Pamplona, Navarra. IGN.

1.269 *10 de marzo.*—En Pamplona, entre las 14 h. y 17 h. 5 m., tuvo lugar trepidación repetidas veces, siendo alguna de ellas tan fuerte que muchos acudieron atemorizados a los balcones. No ocurrieron desgracias personales, aunque sí se cuartearon algunas casas de modo alarmante. Hubo réplica débil. A las 16 h. 3 s. se sintieron en San Sebastián dos ligeras sacudidas.

-Periódico La Unión Mercantil, de Málaga.
M. M. S. NAVARRO-NEUMANN (S. J.). I., de los terr. más not. sen. en la P. I.
SIEBERG. Cat. Estrasburgo.

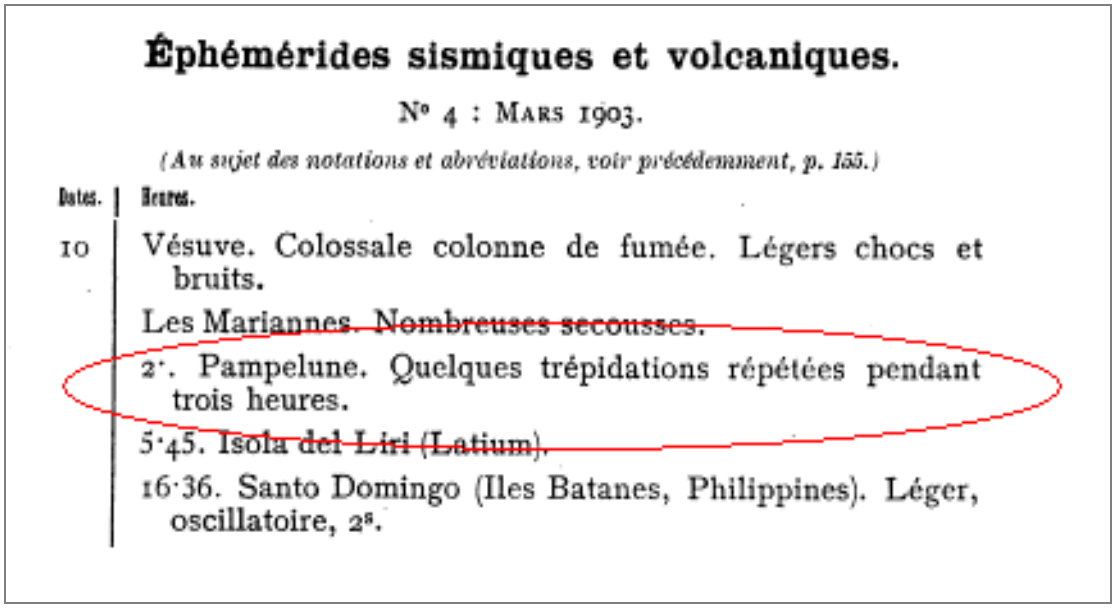
1.270 *11 de marzo.*—En San Sebastián ocurrió un movimiento sísmico.

SIEBERG. Cat. Estrasburgo.

Figura 6.23. Información del catálogo sísmico de José Galbis de 1932 (tomo I) IGN

En el catálogo del *GLOBAL SEISMIC HAZARD ASSESSMENT PROGRAM (GSHAP)* para la ONU, encontramos información histórica que nos da las coordenadas en la parte oeste de Badostáin, a un kilómetro del cerro de Santa Engracia de Sarriguren que hemos estudiado. Se puede ver también que el movimiento se dio cerca de esa localidad de la cuenca de Pamplona, a un escaso kilómetro la capital navarra, y en este caso la magnitud considerada llega, por conversión de la intensidad a M4,7 según este catálogo histórico del GSHAP.

También encontramos información sobre la duración del evento de varios impactos en la base de datos que mantiene la Universidad de Harvard del SAO/NASA *Astrophysics Data System (ADS)* que ya nos habla de una noche de tres horas de temblores.



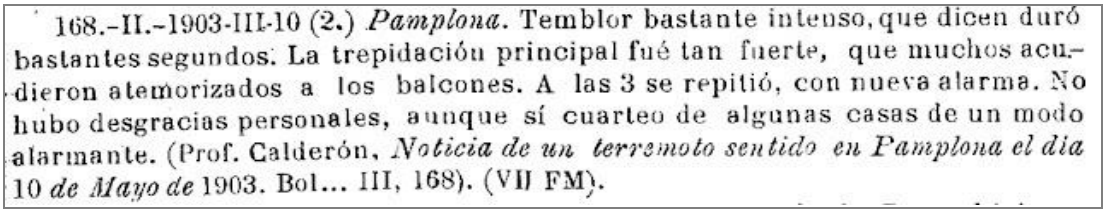
Éphémérides sismiques et volcaniques.

Nº 4 : MARS 1903.

(Au sujet des notations et abréviations, voir précédemment, p. 155.)

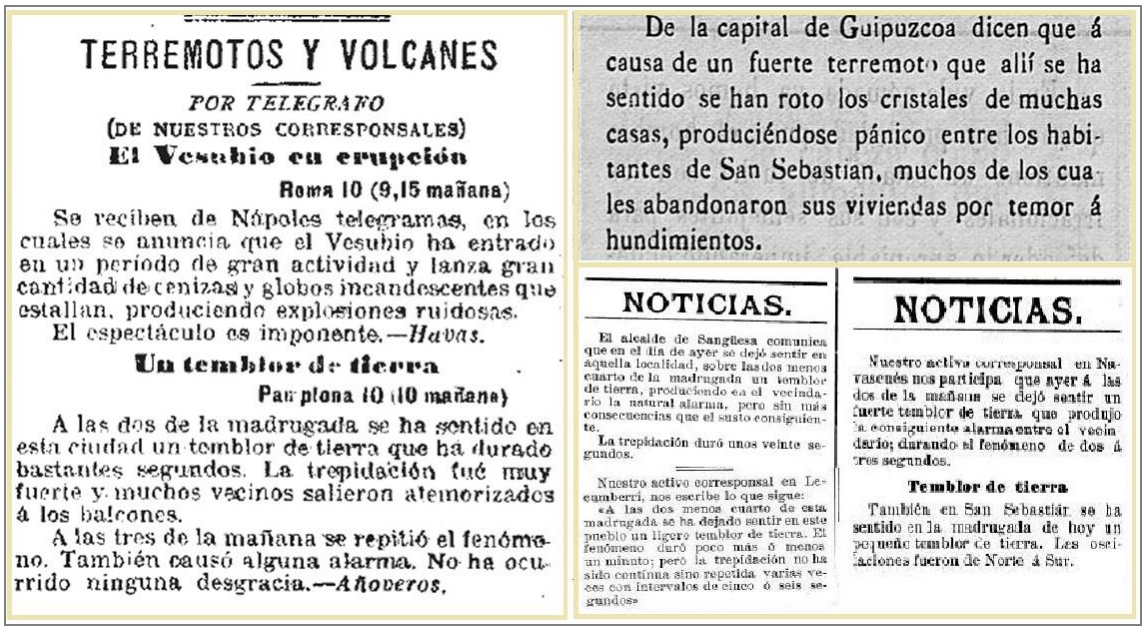
Dates.	Heures.
10	Vésuve. Colossale colonne de fumée. Légers chocs et bruits.
	Les Mariannes. Nombreuses secousses.
	2ᵉ. Pampelune. Quelques trépidations répétées pendant trois heures.
	5ᵉ45. Isola del Liri (Latium).
	16ᵉ36. Santo Domingo (Iles Batanes, Philippines). Léger, oscillatoire, 2ˢ.

Figura 6.24. *Efemérides sísmicas y volcánicas nº4: marzo de 1903-2ª Pamplona. Varias trepidaciones repetidas durante tres horas.* SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS).



168.-II.-1903-III-10 (2.) *Pamplona*. Temblor bastante intenso, que dicen duró bastantes segundos. La trepidación principal fué tan fuerte, que muchos acudieron atemorizados a los balcones. A las 3 se repitió, con nueva alarma. No hubo desgracias personales, aunque sí cuarteo de algunas casas de un modo alarmante. (Prof. Calderón, *Noticia de un terremoto sentido en Pamplona el dia 10 de Mayo de* 1903. Bol... III, 168). (VII FM).

Figura 6.25. Extracto del trabajo de Sánchez-Navarro-Neumann: *Terremotos más notables de la Península Ibérica* (1921).



TERREMOTOS Y VOLCANES

POR TELEGRAFO

(DE NUESTROS CORRESPONSALES)

El Vesubio en erupción

Roma 10 (9,15 mañana)

Se reciben de Nápoles telegramas, en los cuales se anuncia que el Vesubio ha entrado en un período de gran actividad y lanza gran cantidad de cenizas y globos incandescentes que estallan, produciendo explosiones ruidosas.

El espectáculo es imponente.—*Havas.*

Un temblor de tierra

Pamplona 10 (10 mañana)

A las dos de la madrugada se ha sentido en esta ciudad un temblor de tierra que ha durado bastantes segundos. La trepidación fué muy fuerte y muchos vecinos salieron atemorizados á los balcones.

A las tres de la mañana se repitió el fenómeno. También causó alguna alarma. No ha ocurrido ninguna desgracia.—*Añoveros.*

De la capital de Guipuzcoa dicen que á causa de un fuerte terremoto que allí se ha sentido se han roto los cristales de muchas casas, produciéndose pánico entre los habitantes de San Sebastian, muchos de los cuales abandonaron sus viviendas por temor á hundimientos.

NOTICIAS.

El alcalde de Sangüesa comunica que en el día de ayer se dejó sentir en aquella localidad, sobre las dos menos cuarto de la madrugada un temblor de tierra, produciendo en el vecindario la natural alarma, pero sin más consecuencias que el susto consiguiente.

La trepidación duró unos veinte segundos.

Nuestro activo corresponsal en Lecumberri, nos escribe lo que sigue:

«A las dos menos cuarto de esta madrugada se ha dejado sentir en este pueblo un ligero temblor de tierra. El fenómeno duró poco más ó menos un minuto; pero la trepidación no ha sido continua sino repetida varias veces con intervalos de cinco ó seis segundos»

NOTICIAS.

Nuestro activo corresponsal en Navascués nos participa que ayer á las dos de la mañana se dejó sentir un fuerte temblor de tierra que produjo la consiguiente alarma entre el vecindario; durando el fenómeno de dos á tres segundos.

Temblor de tierra

También en San Sebastián se ha sentido en la madrugada de hoy un pequeño temblor de tierra. Las oscilaciones fueron de Norte á Sur.

Figura 6.26. Izquierda y arriba a la derecha: la noticia en Heraldo Astorgano. *Periódico católico bisemanal, defensor de los intereses morales y materiales de esta región*. Año V. Volumen 605 - 1903 marzo 13. Abajo a la derecha: Diario de Navarra del 11 de marzo de 1903. El medio castellano cita Pamplona y San Sebastián con una repetición del fenómeno y rotura de cristales de muchas casas en la capital donostiarra. En Sangüesa, el alcalde dice que el temblor duró unos 20 segundos, mientras que en Navascués unos 2 o 3. El movimiento en San Sebastián mostró oscilaciones de norte a sur. La Dinastía de Barcelona del 11 de marzo de 1903 también comenta en su apartado Terremotos*: "Esta madrugada, á las 12 se ha dejado sentir en Pamplona un fuerte terremoto. Media hora después percibióse el fenómeno sísmico en San Elias".*

SIX PAGES — CINQ CENTIMES

Mercredi 11 Mars 1903

Le Matin

DERNIERS TÉLÉGRAMMES DE LA NUIT

TREMBLEMENTS DE TERRE

Une secousse de tremblement de terre a été ressentie à Pampelune, hier matin, à deux heures.

Quelques trépidations se sont renouvelées, avec moins d'intensité, pendant près de trois heures.

Figura 6.27. Le Matin (Paris) últimos telegramas de la noche miércoles 11 de marzo de 1903: *Terremotos. Una sacudida de terremoto se ha sentido en pamplona, ayer a la mañana, a las dos horas. Se han reproducido algunas trepidaciones, con menos intensidad durante cerca de tres horas.*

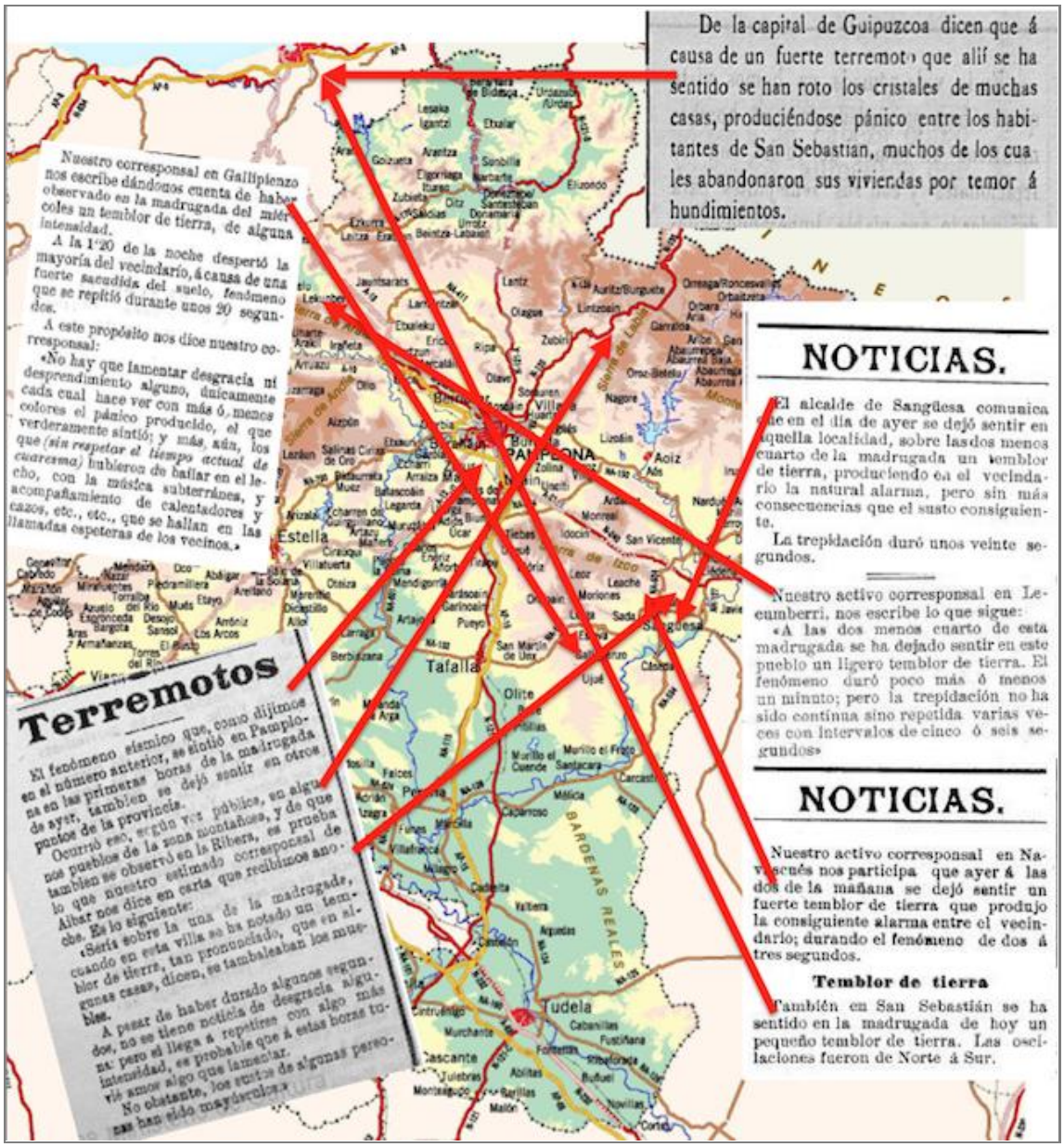


Figura 6.28. Un rastreo de la prensa y los lugares donde se ubica cada testimonio indica que las noticias encontradas en la prensa local, castellana o francesa, no concuerdan muy bien en duración, daños u horarios. Tenemos datos desde San Sebastián con pánico generalizado, rotura de cristales y abandono de edificios al norte, hasta Gallipienzo al sureste con movimientos de objetos y crujidos durante unos 20 segundos, como en la cercana Sangüesa al este. En Lekunberri, al noroeste, el fenómeno se describe como durante un minuto, pero en intervalos repetidos de cinco o seis segundos. Las horas a las que se produjeron los temblores son subjetivas, como la duración de los mismos, o el mismo origen de las diferentes sacudidas que se sucedieron en varios lugares de Navarra y Guipúzcoa durante unas horas. En Pamplona, en el centro del evento, se habla de cuarteo de edificios y *desperfectos alarmantes* en algunas edificaciones antiguas. En la Ribera, al sur y en la Montaña al norte, también fueron sentidas las repetidas trepidaciones con diferentes interpretaciones.

6.8.2.2. El testimonio científico del terremoto de Pamplona del 10 de marzo de 1903.

Es muy difícil afrontar una investigación histórica de este evento sísmico de 1903, ya que se recogen muy pocos datos y a veces, bastante inconexos, como hemos visto. La prensa local se hace eco de ello en varias ocasiones en los días posteriores, pero con criterios muy subjetivos en cuanto a duración, hora o intensidad, hay incluso relatos escritos en prosa que referencian a Julio Verne.

Llama la atención que el corresponsal de Gallipienzo, a más de 30 km de los epicentros, hable de pánico, movimientos de objetos en las casas, el baile de las camas, etc. Gallipienzo mostraría un marcado efecto topográfico en el impacto de las ondas que además podrían haber llegado ya reconducidas o encañonadas por la morfología.

También se ve que hay cierta diferencia en las horas a las que se produce el evento principal, por ejemplo, en Gallipienzo a la una y veinte minutos de la madrugada, en Sangüesa y Lecumberri a las dos menos cuarto, en Navascués a las dos, etc.

Era habitual en aquella época este tipo de descoordinación de los relojes. Sin embargo, el fenómeno puede tener otra explicación, los archivos de efemérides sísmicas y volcánicas de la NASA de aquel 10 de marzo, apuntan a unas tres horas de trepidaciones ese día en Pamplona y los testimonios de los corresponsales, alcaldes y periodistas parecen indicar algo parecido. En otros casos se habla no sólo de horas distintas, sino de duraciones bien diferentes. Todo lo cual nos hace pensar que se trataría de diferentes terremotos o un episodio sísmico múltiple de varias horas de activación con epicentros que podrían tener una línea marcada que iría desde San Sebastián hasta Gallipienzo, como se puede ver rastreando los testimonios en la figura 6.28.

Por otro lado, en Pamplona al menos, se da testimonio de una réplica algo más de una hora después y de desperfectos "alarmantes" en algunas edificaciones antiguas. En cuanto a la duración del evento, la incertidumbre es mayor. Salvador Calderón y Arana destaca los "muchos segundos" que duró; seguramente porque los típicos temblores de tierra bien conocidos desde siempre en la zona de Pamplona, suelen ser muy cortos, de apenas 2 a 6 segundos, por lo que llamó la atención a este catedrático de Mineralogía Descriptiva un tiempo sensiblemente más largo, sin especificar, pero resaltando ese aspecto anómalo.

En Sangüesa, el alcalde habla de unos veinte segundos y alarma general. En Navascués, también con alarma general, de dos a tres, y el corresponsal de Lecumberri lo dilata hasta un minuto, pero en intervalos repetidos de cinco o seis segundos. En San Sebastián, a 70 km, además de cristales rotos, pánico y desperfectos, se dan datos de que las oscilaciones fueron de norte a sur. Quizás éste sea el primer testimonio de la historia que refleja el marcado efecto local y de resonancia y repetición que la ciudad donostiarra desarrolla cuando se dan este tipo de fenómenos naturales.

Más tarde, en 1923 con el terremoto de Martes (Huesca), se presentó el mismo patrón, se repitió en 1929 con el de Turruncún (La Rioja), y en 1931 D. Alfonso Rey Pastor se da cuenta de este fenómeno y lo publica con motivo del trazado de isosistas del terremoto de 1923 en su trabajo *"El período sísmico de La Canal de Berdún (Pirineos) 1923-1925"*, entonces le adjudica a San Sebastián el calificativo de *"foco periférico"*. Hemos comprobado en 1967 con el terremoto de Arette y los de 1982, 2004, 2013, 2017 y 2020-2021 el mismo fenómeno. San Sebastián es un foco con *"emergencia de nuevas ondas de retroceso"* con un marcado efecto de *"resonancia macrosísmica ligado a la costa vascongada"* como había apuntado O. Mengel en su tesis.

Otra de las observaciones que nos lleva a pensar en un terremoto múltiple está en el apunte hecho por el corresponsal de Lekunberri: *"... el fenómeno duró poco más o menos un minuto; pero la trepidación no ha sido continua, sino repetida varias veces en intervalos de cinco o seis segundos..."*. El estudio detallado de los apuntes, de las fuentes históricas, de los archivos de los familiares, podría darnos luz sobre lo que se presume que pasó ese día y el siguiente en Navarra y Guipúzcoa. Comenta Salvador Calderón y Arana, entonces catedrático de Mineralogía Descriptiva y jefe de la Sección de Mineralogía del Museo de Ciencias Naturales:

> *"... Por carta recibida de Pamplona, tengo noticia de que ocurrió en aquella capital, á las dos de la madrugada del día 10 de Marzo último, un temblor de tierra de cierta intensidad, y que dicen, duró bastantes segundos. […] La trepidación principal fué tan fuerte, que muchos vecinos acudieron atemorizados á los balcones. A las tres de la madrugada del mismo día se repitió el fenómeno, causando nueva alarma. No han ocurrido desgracias personales, pero se han cuarteado algunas casas viejas de un modo alarmante..."*. Boletín de 1903 de la Real Sociedad Española de Historia Natural, página 168.

Después de 120 años, la faz de la comarca de Pamplona es ya otra (figura 6.30). Hablamos de una ciudad distribuida durante más de un siglo con criterios urbanísticos muy dispares en la que los fenómenos sísmicos nunca estuvieron presentes sobre papel (hablamos de criterios urbanísticos, a partir de 1968 se aplican las primeras normativas estructurales que hasta 1994 pueden considerarse anticuadas).

Aunque pocos y olvidados, los testimonios históricos de la recurrencia de impactos sísmicos sí han estado presentes sobre el territorio natural. De 30.000 habitantes rurales y desperdigados se ha pasado a 367.000 urbanos y concentrados en barrios o núcleos residenciales. Recordemos que, por ejemplo, Pau, apenas aglutina en su área metropolitana a 180.000 habitantes, prácticamente la mitad de Pamplona.

Figura 6.29. Salvador Calderón y Arana (1851- 1911) fue el primer científico que describió los efectos de un terremoto en Navarra en térmicos de intensidad y efectos cosísmicos. Era catedrático de Mineralogía Descriptiva y jefe de la Sección de Mineralogía del Museo de Ciencias Naturales. A los pocos días, en la sesión del primero de abril de 1903, se hace eco de la noticia que recibió por carta dando algunos detalles sobre los daños a edificaciones, duración del evento, réplicas y reacciones de los habitantes de la capital de Navarra, aparece en el Boletín de 1903 de la Real Sociedad Española de Historia Natural, página 168.

En Navarra existe un avanzado trabajo que necesita ponerse al día sobre la sismicidad de toda la región; está enfocado hacia las actuaciones de emergencia. El SISNA, 2011, destaca varios trabajos, entre ellos el de Lacan y Ortuño de 2011: *"Active Tectonics of the Pyrenees: A review. Revisión de la tectónica activa de los Pirineos"*, un trabajo muy completo para el *Journal of Iberian Geology* que comienza así:

> *"... En los últimos 400 años, los Pirineos han sufrido al menos siete terremotos de magnitud M > 5. Durante las últimas décadas, varios estudios de sismotectónica, neotectónica y paleosismología han tratado de identificar las principales estructuras activas en las zonas epicentrales de los terremotos destructivos. A pesar de estos estudios, el estado de esfuerzos sigue bajo debate, sin que haya un modelo sismotectónico unívoco a la escala de la cordillera...".* Y luego sigue: *"... A pesar de que son sismos moderados los que caracterizan el registro instrumental, la sismicidad histórica es indicativa del potencial de las estructuras sismogénicas de los Pirineos, con al menos cuatro grandes terremotos con magnitudes (M = 6 - 7) durante los últimos 650 años (por ejemplo: Vogt, 1979; Lambert et al, 1996; Olivera et al, 2006). Estos eventos destructivos tuvieron intensidades MSK entre VIII y IX y el último se produjo en 1750, hace más de 250 años. La ausencia de terremotos catastróficos en el último siglo se refleja en la falta de conciencia social de este peligro, y también en la escasez de investigación científica dedicada al estudio profundo de las estructuras sismogénicas...".* Active Tectonics of the Pyrenees: A review. Lacan P, Ortuño M, 2011.

Figura 6.30. Después de 120 años sólo nos queda el cerro de Santa Engracia de Sarriguren para hacer una arqueología de las grietas. Como en otras ocasiones, son las escuadras cuarteadas que relataba Salvador Calderón y Arana las que nos pueden poner en contacto con aquellos eventos. Deberíamos discriminar lo que hayan podido sufrir los edificios desde el tiempo que permanecieron abandonados, hasta la acelerada conversión de Sarriguren en la ecociudad del siglo XXI, pero las grietas no son de techumbre, cambios de volumen ni asientos, son las típicas de origen sísmico (muy parecidas a las que aún podemos ver en Martes tras la crisis sísmica de 1923-1925). Obsérvense los testigos de seguimiento que se activaron ligeramente tras los terremotos de 2020.

Figura 6.31. Una comparativa de las típicas grietas de terremoto en las escuadras que aún se pueden estudiar en un edificio de Martes (izquierda) lucidas con mortero y Escó (centro) tras la crisis sísmica de 1923-1925 que comenzó el 10 de julio de 1923 con el evento M5,8 e intensidad VIII (una reciente revisión le adjudica M5,4 e intensidad VII) al que siguieron dos años de réplicas. A la derecha una de las edificaciones que han permanecido desde 1903 a 1 km del lugar que se considera epicentro del terremoto de Pamplona del 10 de marzo de 1903 M4,7 e intensidad VI-VII en el cerro de Santa Engracia, núcleo histórico desde el que se desarrolló Sarriguren, también rellenadas de mortero y con testigos de seguimiento.

6.8.2.3. Conclusiones.

A partir de estos datos históricos, teniendo en cuenta las observaciones de los científicos como las reportadas por Salvador Calderón y Arana, Sánchez-Navarro-Neumann, los pocos datos recogidos en catálogos como el de José Galbis, además de las observaciones de los testigos de varias de las localidades afectadas, quizás deberíamos considerar una mayor intensidad que la asignada (VI) en principio a este evento de marzo de 1903. La escala de Mercalli modificada, por ejemplo, nos indica que los daños considerables en edificios pobres pertenecerían a la intensidad VII.

Por tanto, las afirmaciones hechas por científicos y testigos: "... *No han ocurrido desgracias personales, pero se han cuarteado algunas casas viejas de un modo alarmante...*" podrían entrar dentro de esa categoría VI-VII. Esto puede ser transcendental desde el punto de vista de la seguridad sísmica de la ciudad de Pamplona, porque este evento sísmico se ha podido subestimar en relación a no haberlo considerado en los inputs realizados para la confección del SISNA, 2011. Y es que, en este trabajo enfocado a la seguridad sísmica de Navarra, que data de febrero de 2011, generalizado para toda la Comunidad Foral, tienen un peso específico importante los terremotos que hayan sucedido en terreno navarro con intensidades mayores de VIII o magnitudes mayores de 4,5.

El denominado terremoto de Pamplona de 1903 no aporta mucha relevancia como sí lo hace, por ejemplo, el que en el SISNA se denomina "*el terremoto de mayor magnitud ocurrido en territorio navarro*" (SISNA página 14) que sería el del 18 de septiembre de 2004, con epicentro al NE de Lizoain y magnitud 4,5 (está dentro de la serie de terremotos relacionados con el llenado de Itoiz de lo que profundizaremos más adelante).

Se trataría una vez más de una pérdida histórica posiblemente influyente que no puede pasarse por alto (he ahí uno más de los recurrentes problemas en los equipos técnicos sin historiadores), además de ser injusta con la sismicidad navarra en general y en particular con la Cuenca de Pamplona, pues encierra no uno, sino dos posibles lagunas históricas por defecto. Una es que el terremoto más fuerte no es de 2004, sino de 1998; es el conocido como terremoto de Lizarraga del 27 de octubre de 1998 (Mb 5,2). Cualquier persona familiarizada con la sismicidad ibérica conoce la relevancia del terremoto de Lizarraga de 1998 del que hablaremos más adelante, se produjo en una época en que se estaba afinando la medida de la magnitud e instalando mejores tecnologías de medida. También veremos que algunos departamentos franceses lo han incorporado a su normativa sectorial y departamental de Protección Civil y en la normativa de construcción. Un segundo aspecto a destacar es que el evento histórico adjudicado a Pamplona en 1903, sería precisamente el segundo más contundente y enérgico.

Existe un terremoto de igual magnitud (o mayor dependiendo de la escala escogida), y que debiera ser una referencia mucho más importante por afectar directamente a la cuenca de Pamplona, pero paradójicamente no aparece explícitamente contemplado en el SISNA (es probable que lo haga como herencia del trabajo de la consultoría Prospección e Ingeniería de 1992 *"Estudio Sísmico de Navarra"* pero en el SISNA no se habla de él), además es de más duración y algo más cercano a la capital, Pamplona: es el terremoto de Legarda del 22 de mayo de 1982, del cual hablaremos también más adelante. Se trata del terremoto más sentido, recordado y comentado por los pamploneses que lo vivieron, pues fue ampliamente notado en aquella Pamplona de 1982 con 175.000 habitantes (240.000 entonces en el área metropolitana) donde las torres (los denominados "rascacielos") de Barañáin se hicieron famosas por sus balanceos de hasta 7 cm. Exactamente un mes después, el 22 de junio de 1982 volvió a temblar la ciudad con otro sismo de intensidad V y réplicas recurrentes.

6.8.3. Terremotos históricos al suroeste y oeste de Pamplona: 1982 y 1998.

El verano de 1982 es especialmente recordado en Pamplona por la primera actividad sísmica con una relevante proyección mediática. Coincidiendo con el mundial de fútbol *España 1982* de *Naranjito*, se recuerdan las primeras imágenes de televisiones portátiles enchufadas en los dispositivos para encendedores de los coches con objeto de ver los partidos fuera de los edificios por temor a más terremotos. Incluso llegaron las imágenes de familias enteras durmiendo en los vehículos y en tiendas de campaña. Mucha gente se negaba a entrar en sus viviendas por miedo a los continuados temblores. Aunque apenas han llegado registros de intensidades, en Pamplona podríamos hablar de intensidad V el 22 de mayo y el 22 de junio de 1982.

6.8.3.1. Pamplona 1982.

El epicentro del terremoto principal del 22 de mayo se localiza en Legarda, en la Sierra de El Perdón, área donde más tarde y en unas condiciones especiales (meteorológicas, hidrológicas y antrópicas) que analizaremos detenidamente, se darán dos enjambres, uno en 2007 (unos 60 eventos) y otro especialmente notorio, en 2013 (más de 300 eventos durante seis meses). Aquel impacto de mayo de 1982, que provocó algunos derrumbamientos, fue seguido por, al menos, media docena de réplicas.

PAMPLONA

Ayer se registraron tres seísmos

Tres temblores de tierra se han registrado ayer en Navarra con una magnitud, en escala de Richter: de 4,7 el primero; de 3,9 el segundo y de 3,6 el tercero.

Según han confirmado con carácter definitivo a «Efe» en el observatorio geofísico de Toledo el primer temblor se registró a las 6 horas, 3 minutos 54 segundos; el segundo a las 6-38'42'', y el tercero a las 8-0'25''.

TRES TEMBLORES DE TIERRA EN PAMPLONA, ZARAGOZA Y HUESCA

No hay daños ni víctimas

Pamplona (Efe). — Tres temblores de tierra se han registrado esta mañana en Navarra con una magnitud, en escala de Richter: de 4,7 el primero, de 3,9 el segundo, y de 3,6 el tercero.

Según han confirmado con carácter definitivo a "Efe" en el Observatorio Geofísico de Toledo el primer temblor se ha registrado a las 06 horas 3'54", el segundo a las 06 horas 38'42" y el tercero a las 08 horas 0'25"

El epicentro de estos temblores está situado a 320 kilómetros en línea recta desde este observatorio hacia el Sureste de Pamplona.

Por su parte, el Gobierno Civil de Navarra ha facilitado una nota a primera hora de la tarde en la que se informa de que no se han producido víctimas ni daños, y que el primer temblor también ha afectado a Zaragoza y Huesca.

"Con carácter inmediato —subraya la nota— se han puesto en marcha los dispositivos previstos en el Plan de Terremotos de Protección Civil.

Los temblores de tierra causaron alarma a los habitantes de Pamplona al observar que se movían los muebles de sus domicilios, así como las paredes.

El temblor hizo que se dispararan las alarmas instaladas en las entidades bancarias y otros edificios.

En este año se han registrado en Navarra otros temblores de tierra, si bien han sido de magnitud inferior a los de hoy.

El epicentro estaba en Navarra

Tres leves temblores sísmicos en Zaragoza

ZARAGOZA, 23 (ARAGONexpres). — Los temblores de tierra registrados ayer por la mañana en Navarra, afectaron también a Zaragoza, si bien con una incidencia apenas perceptible. Concretamente en la ciudad, según indicaron en el Aeropuerto, se registraron tres temblores sísmicos: el primero y más intenso ocurrió a las 6 horas y 3 minutos de la madrugada, el segundo a las 6 horas y 38 minutos, y el tercero a las 6 horas, siendo decreciente su intensidad.

El Gobierno Civil de Pamplona informó, que no se habían producido víctimas, ni daños materiales en la provincia de Navarra a causa del temblor. Estos se registraron en la mañana de ayer sábado en Navarra, con una magnitud, en escala de Richter: de 4,8 el primero; de 3,9 el segundo, y de 3,6 el tercero. El movimiento se observó especialmente en las localidades de Tafalla, Olite y Estella.

Según informaron, con carácter definitivo, en el observatorio geofísico de Toledo, el primer temblor se registró a las 6 horas, 3 minutos; el segundo a las 6 horas, 38 minutos, y el tercero a las 8 horas de ayer.

La duración del temblor fue de unos veinte segundos, y dado el alarmismo de la noche, los consiguientes nerviosismos ayer por la mañana, ante de haberse tranquilizado con el movimiento telúrico.

Por su parte, el Gobierno Civil de Navarra facilitó una nota, a primera hora de la tarde de ayer, en la que se informaba de que no se produjeron víctimas ni daños, y que el primer temblor y más fuerte, también afectó a Zaragoza y Huesca.

EL EPICENTRO NO ESTABA EN EL PIRINEO

El epicentro de estos temblores está situado a 320 kilómetros en línea recta desde este observatorio hacia el sureste de Pamplona. Especificando más, otras fuentes confirman que el epicentro se ha detectado a unos sesenta kilómetros en línea recta entre Pamplona y Zaragoza. Esto puede explicar que en algunas zonas de la provincia, como es el momento, rona poluma el Pirineo, donde tres sido sentidos los temblores en otras ocasiones, este no se ha dejado sentir el movimiento de tierra.

EN PAMPLONA SE DISPARARON LAS ALARMAS DE LOS EDIFICIOS

Los temblores de tierra, acompañados de un fuerte ruido y movimientos en los edificios, causaron alarma a los habitantes de Pamplona al observar que se movían los muebles de sus domicilios, así como las paredes. El temblor hizo que se dispararan las alarmas instaladas en las entidades bancarias y otros edificios.

Se da la circunstancia de que éste es el cuarto sísmo sentido en Navarra en lo que va de año. El registrado ayer alcanzó la cifra de 5 de magnitud superior respecto a los anteriores.

4'9 grados en escala Richter

Temblor de tierra en Navarra

Un fuerte temblor de tierra –de una magnitud provisional de 4,9 grados en escala de Richter– se registró en Pamplona y diversas localidades del Sur de Navarra a las 21 h. 51 minutos 15 segundos, según confirmó el observatorio geofísico central de Toledo, dependiente del Instituto Geográfico Nacional.

Precisaron que el epicentro del seísmo se localiza a una distancia provisional de 350 kilómetros en línea recta desde Toledo hacia Navarra.

Tanto en protección civil como en los parques de bomberos no tienen noticias, según señalaron a Efe, de que se hayan producido desgracias personales, ni tampoco materiales. Al parecer, el temblor sólo originó el correspondiente susto en la población al oírse un fuerte ruido y notar vibraciones en los edificios, de cuyas fachadas se desprendieron algunas piedras y en el interior de algunos también se cayeron al suelo lámparas y objetos de adorno.

EL PAÍS ESPAÑA

NAVARRA

Escenas de pánico e histeria en Pamplona tras el temblor de tierra

CARMELO C. RIDRUEJO

Pamplona - 24 JUN 1982 - 00:00 CEST

El movimiento sísmico registrado a últimas horas de la noche del martes en Pamplona y su comarca, que alcanzó una magnitud de 5 en la escala de Richter, fue el más intenso de los que se han producido hasta ahora en Navarra. El temblor, que fue seguido durante la madrugada del miércoles de seis réplicas, provocó escenas de histerismo y de pánico, así como el abandono de viviendas y algunos derrumbamientos. "Hay posibilidades", declaró el geólogo Joaquín del Valle, jefe de la sección de Minas de la Delegación de Industria de Navarra, "de que estos movimientos puedan volver a repetirse, aunque serán con escasa intensidad y no hay porqué alarmarse. Los temblores se deben, posiblemente, a un desplazamiento hacia el sur de algunos estratos, lo que se viene produciendo desde el Mioceno."

Figura 6.32. A la izquierda la noticia de los terremotos del 22 de mayo en Mediterráneo del día siguiente y en El País, en el centro en Aragón Exprés. A la derecha, Mediterráneo y El País del 23 de junio de 1982.

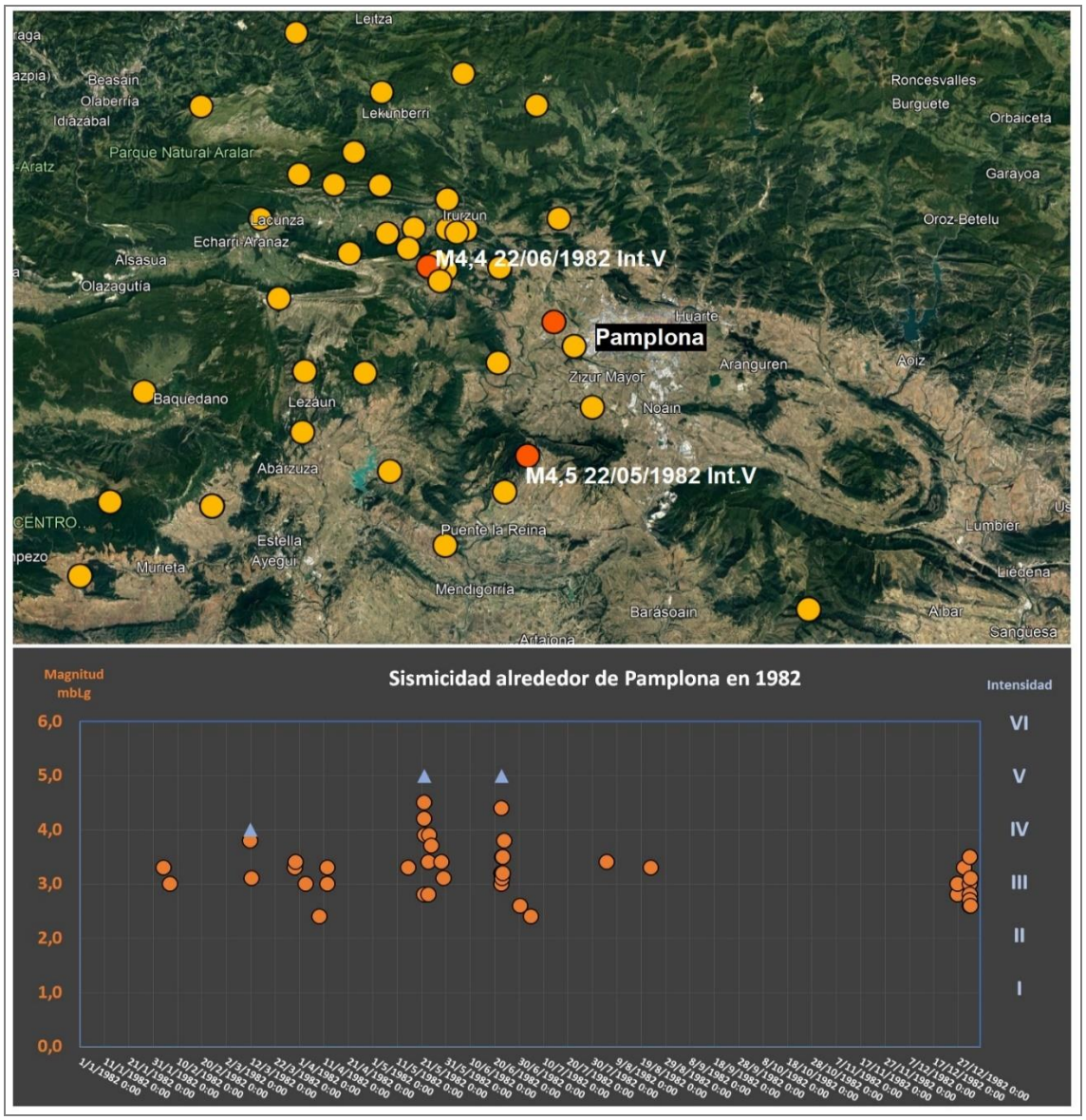


Figura 6.33. Distribución espacial y temporal de la sismicidad en 1982 alrededor de Pamplona. Entre mayo y junio de aquel año se produjeron los ocho eventos más enérgicos e intensos destacando los del 22 de mayo y 22 de junio con intensidades V cerca de la ciudad de Pamplona. En ese momento el área metropolitana albergaba a unas 240.000 personas (el 65% que 40 años después en 2022). Se registra un pequeño brote a finales del año entre el 26 y el 31 de diciembre con 9 eventos que pasaron bastante desapercibidos dado que se estaban produciendo lejos de la ciudad como una sismicidad profunda (entre 55 y 67 km) que había acompañado todo el año a la más somera cercana a la ciudad por debajo de los 10 km. Este episodio de 1982 deja clara la conexión de la sismicidad local entre la franja de cizalla denominada Falla de Pamplona que delimita el oeste de la cuenca y la de las fallas locales más superficiales relacionadas con el diapirismo (Falla de Etxauri y otras) y las de reciente actividad como las de alrededor del El Perdón.

Si nos fijamos en las profundidades de los 45 eventos registrados alrededor de Pamplona en 1982 y tres más los días 1 y 2 de enero de 1983, encontramos que los más profundos (55 a 67 km de profundidad) se producen al SO de Estella, en la traza de la franja de cizalla que llamamos Falla de Estella-Pamplona y que delimita la cuenca. Se dan en Zudaire y Muez en marzo y junio y en Abárzuza, Galbara y Mendaza entre el 26 y el 31 de diciembre acompañados de terremotos someros más al norte. Éstos últimos (el fenómeno continúa el 1 y 2 de enero de 1983) se dieron en los alrededores de Lizarraga en la misma traza, lugar donde en 1998 se registrará el evento M5,2 que permanecerá hasta 2010 en el podio de la sismicidad ibérica cuando el terremoto de Lecrín (Granada) de foco profundo y magnitud 6,2 lo relega a la segunda posición.

La Sierra de El Perdón y el área de Etxauri estarían sísmicamente relacionadas, tanto entre ellas mismas, como ambas con la actividad profunda. A unos 60 km de profundidad se detecta ese año en la periferia de la Cuenca de Pamplona por el oeste y suroeste (figura 6.34).

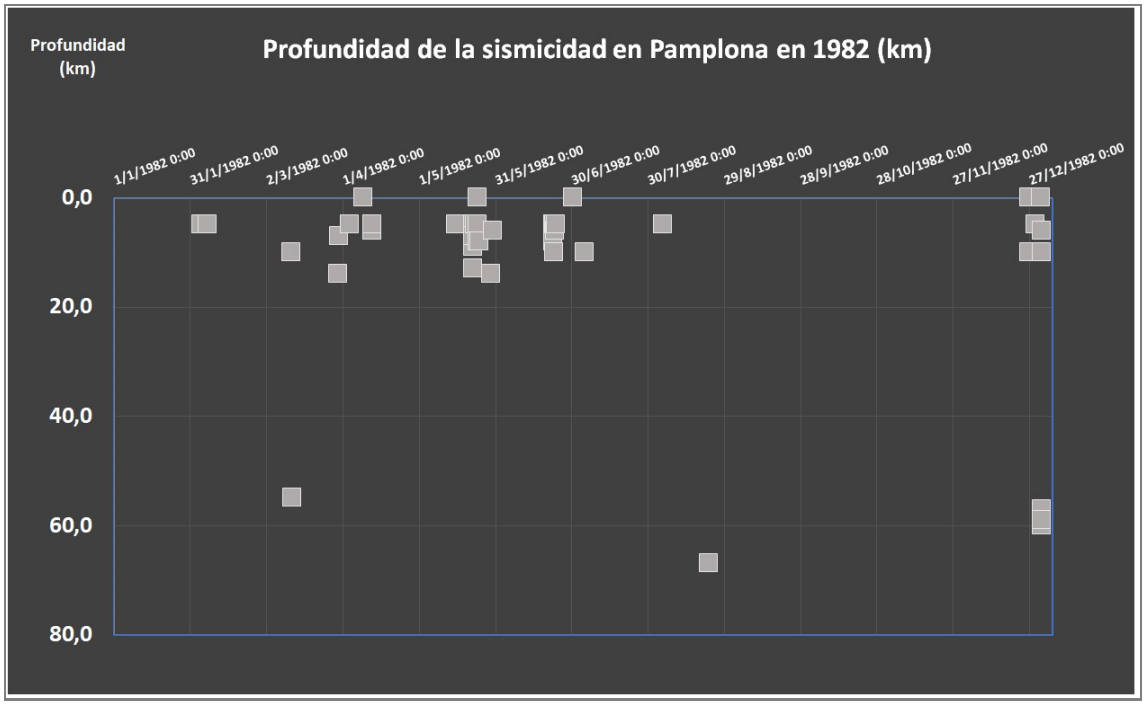


Figura 6.34. Al final de la actividad sísmica de 1982 se registra un pequeño brote entre el 26 y el 31 de diciembre con nueve eventos que pasaron bastante desapercibidos dado que se estaban produciendo lejos de la ciudad. Es de destacar la existencia de una sismicidad profunda (entre 55 y 67 km) que había acompañado todo el año a la más somera cercana a la ciudad por debajo de los 10 km. Este episodio de 1982 dejó clara la conexión de la sismicidad local entre la franja de cizalla denominada Falla de Pamplona que delimita el límite oeste de la cuenca, la de las fallas locales más superficiales relacionadas con el diapirismo (Falla de Etxauri y otras) y las de reciente actividad como las de alrededor del El Perdón que actuaron de manera notable en 2013.

6.8.3.2. Lizarraga, martes 27 de octubre de 1998.

Por su relevancia, este terremoto del 27 de octubre de 1998 de magnitud 5,2 mb[14] e intensidad V-VI al SE de Lizarraga, tuvo la ventaja de desencadenarse en una zona ampliamente despoblada, moderadamente lejos de Arbizu, Huarte o Echarri, y a unos 40 km al oeste de Pamplona. Fue sentido especialmente en la capital navarra y en prácticamente toda la Comunidad Foral, Vizcaya, Guipúzcoa y sur de Francia. Tuvo un impacto social remarcable, tanto en medios de comunicación habituales como técnicos y se incluyó como referencia en 2003 por primera vez para la confección del *"Dossier Départemental des Risques Majeurs Cellule d'Analyse du Risque et de l'Information Préventive de la PRÉFECTURE DES PYRÉNÉES-ATLANTIQUES de la République Française"* 2003.

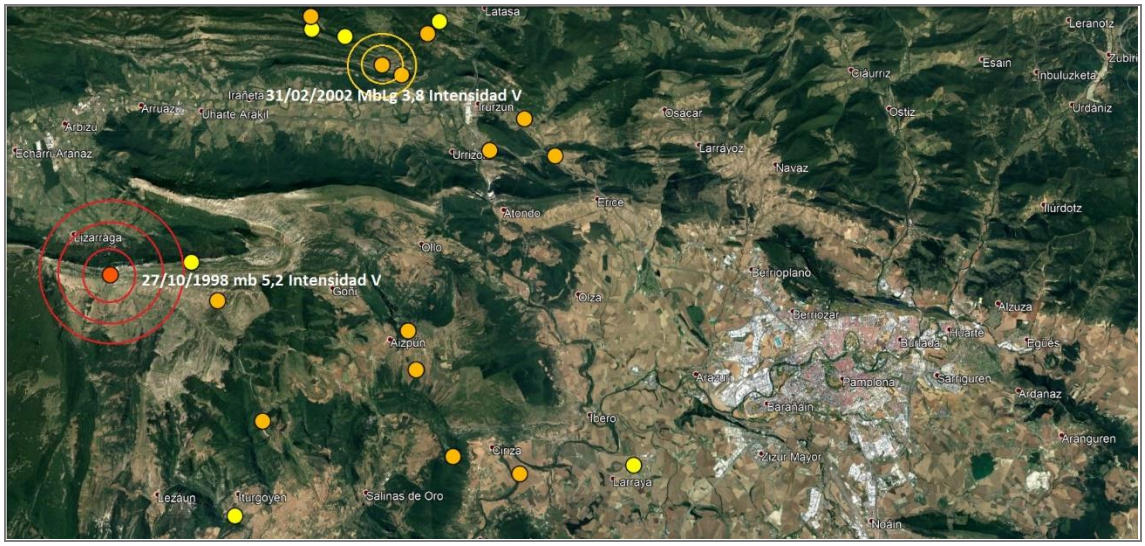


Figura 6.35. Terremotos más destacables sucedidos en el área oeste de Pamplona entre el 27/10/1998 y el 02/04/2003 y la convivencia de tres tipos de magnitudes: mb, MbLg y mbLg que se usaron esos años.

La lejanía a zonas urbanas propició una intensidad moderada de V. Más tarde, aparece en la base de datos de la norma de construcción sismorresistente francesa que entró en vigor el 1 de mayo de 2011 (décrets n° 2010-1254 et n° 2010-1255 de la RF) diez días antes del terremoto de Lorca.

---

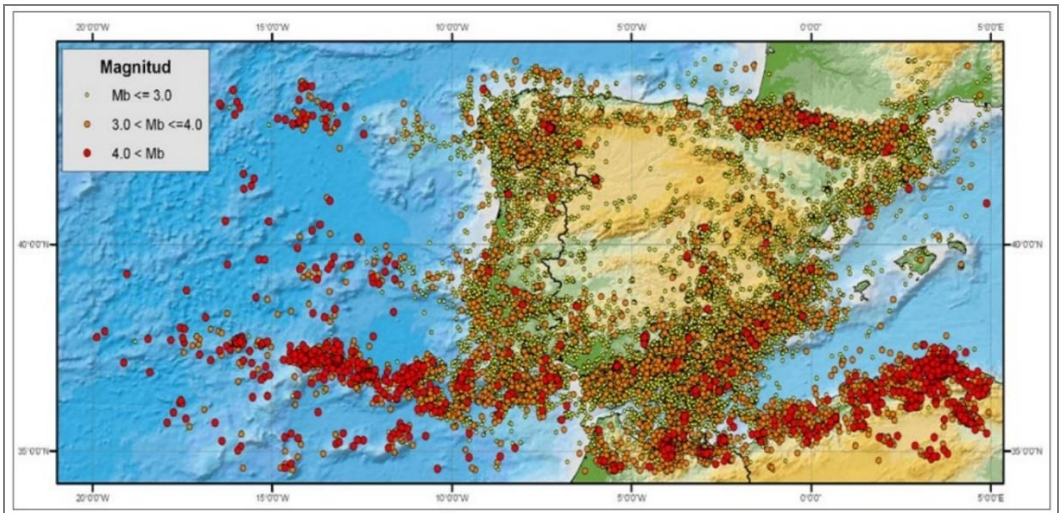
[14] La magnitud mb o magnitud de ondas internas (Veith y Clawson, 1972) fue utilizada para terremotos ocurridos a partir de 1998 hasta marzo de 2002. Desde marzo de 2002 prácticamente todos los terremotos vinieron con la mejor afinada mbLg y la amplitud de la fase Lg (López, 2008), utilizada para terremotos sucedidos a partir de marzo de ese año. Esta fórmula de magnitud ha sido referida a la fórmula de magnitud local de Richter, de manera que, para un periodo de un segundo, ambas escalas coinciden a una distancia de referencia de 100 kilómetros.

La relevancia sobre papel del terremoto de Lizarraga de 1998 está sobre todo más al norte, vimos en las sucesivas actualizaciones cómo algunos departamentos franceses, sobre todo el Departamento de los Pirineos Atlánticos, lo incorporaron sucesivamente a su normativa sectorial y departamental con magnitud local ML.

La magnitud MbLg (M-MS), es la Magnitud a partir de la amplitud de la fase Lg (Mezcua y Martinez Solares, 1983). Fue utilizada para terremotos ocurridos entre 1962 y marzo de 2002. La fórmula utilizada para cada registro depende de la distancia epicentral. Para más información ver la publicación *"Descripción del tipo de Magnitud"* en la web del IGN. Desde 1969, en Francia existe una normativa sísmica, incluida en el código medioambiental (artículos R563-1 a R563-8), desarrollada sobre la base del *conocimiento de los movimientos del terreno y de las técnicas constructivas* que fue afinada y mejorada en 1982 y en 1991 incluyendo terremotos españoles. Este reglamento evoluciona con el desarrollo de los Eurocódigos y distingue una zona de sismicidad 1 sin requisitos sísmicos particulares para edificios con riesgo normal y cuatro zonas de sismicidad 2 a 5, donde las reglas de construcción son aplicables a edificios nuevos y antiguos en condiciones específicas. Las más restrictivas son el área pirenaica, Martinica y Guadalupe.

6.8.3.3 Instalaciones digitales de banda ancha.

A partir del año 1999 se comenzaron a instalar estaciones digitales de banda ancha. Una buena parte de la Península ibérica queda en áreas con sensibilidad demasiado alta para terremotos relevantes que den información sobre la actividad cercana a núcleos de población importantes. Es el caso de Lizarraga y Pamplona que quedaron englobadas en el área M3,2 (figura 6.36). La mala calidad del registro analógico, generalmente por ruido cultural o por problemas de telemetría, fue forzando el cese en la adquisición de datos de todas las estaciones analógicas para Iberia cuando toda la red era de adquisición analógica y período corto.



AÑO	SERÍE SÍSMICA SIGNIFICATIVA	MÁXIMA MAGNITUD
1985	Espejo (Córdoba)	5.1
1989	Ayamonte (Huelva)	5.0
1993	Berja (Almería)	5.0
1996	Saint-Paul-de-Fenouillet (Francia)	5.0
1997	Triacastela (Lugo)	5.1
1998	Lizarraga (Navarra)	5.2
2002	Bullas (Murcia)	5.0
2004	Golfo de Cádiz	5.0
2006	Golfo de Cádiz	5.1
2009	Cabo de San Vicente	5.0
2010	Lecrín (Granada)	6.2
2011	Lorca (Murcia)	5.1

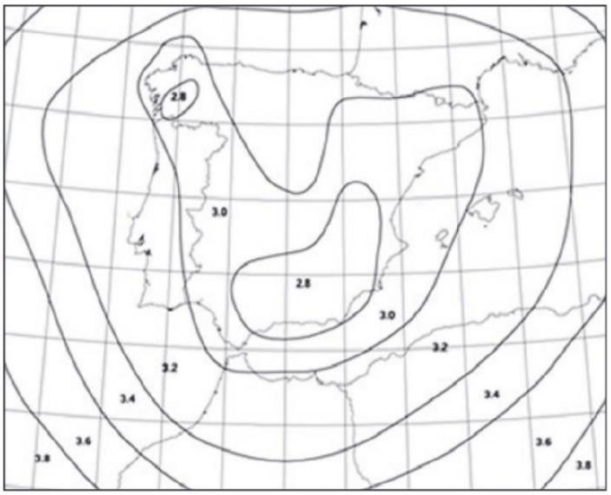


Figura 6.36. Arriba: sismicidad de la Península Ibérica y áreas adyacentes en términos de escala Mb (1998-2002) para sismos con profundidad hipocentral menor o igual a 30 km. Abajo a la izquierda: series sísmicas más significativas registradas por la red sísmica desde 1985, año del establecimiento de la red sísmica analógica, hasta el 12 de diciembre de 2011, registradas en la península Ibérica y alrededores. Entre 1998 y el terremoto M6,2 de Lecrín, Granada, a más de 200 km de profundidad en 2010, fue Lizarraga el terremoto de mayor magnitud registrado por la red sísmica nacional. A la derecha: nivel de sensibilidad de magnitudes de la red sísmica analógica en 1995 (Mezcua, 1995). Las líneas engloban el mínimo nivel de magnitud detectable con seguridad en el área y cuyo valor viene indicado mediante un número. *Sismicidad de la Península Ibérica en el periodo instrumental 1985-2011.* Carreño E, Valero J. F. 2011.

Solamente las estaciones que proporcionaban datos en tiempo real aparecen contabilizadas en la imagen (figura 6.36, abajo a la derecha). Este nivel se mejoraba incluyendo datos procedentes de estaciones de interrogación y datos auxiliares de otras agencias como la francesa, así como nuevas estaciones que se fueron incorporando a la red analógica a través de los años.

A partir del año 2000 se instalaron estaciones digitales de banda ancha. Navarra comenzó a vivir los enjambres sísmicos más notables alrededor de Pamplona tras las más tempranas publicaciones sobre Lorca. Primero en El Perdón en 2013, en 2015 en Irurzun y en 2017 en Olave con más de un centenar de eventos. Hasta el año 2020 en el área de Lizoáin-Egüés-Esteríbar, no se daría una concentración tan intensa y frecuente de terremotos.

El 14 de febrero de 2013 comienza bajo Uterga-Adiós-Salinas una actividad sísmica de una densidad nunca antes conocida que pronto se extendió por la Sierra de El Perdón al sur de la ciudad y poco a poco hacia Etxauri al oeste. Esta vez, la alta densidad de datos no fue sólo debida a la mejora instrumental o a la inmediatez de redes sociales y medios digitales, salvado lo sucedido en el primer llenado de Itoiz en el período 2004-2008, en 2013 se produjeron enjambres de una densidad sin precedentes que la población sintió y padeció durante meses, forzando una comisión parlamentaria para tratar el *"problema de los terremotos"* en abril de 2013.

En las entrañas de la sierra, con más de 300 terremotos, se vivieron días con hasta una treintena de impactos que alcanzarían el verano de aquel año. Dos impactos principales de magnitud local ML 4,2 (uno el 23 de marzo y otro el 20 de abril) sentidos con cierta intensidad en el sur de Pamplona, pero también en toda Navarra y comunidades limítrofes, fuerzan la comentada comisión parlamentaria de la que nacen varias propuestas y promesas. En el capítulo sobre la sismicidad de 2013 trataremos este tema con mayor profundidad y la trascendencia histórica que arrojó sobre la consideración de la peligrosidad sísmica en el área metropolitana de Pamplona. Sin embargo, en 2020 se superaron las frecuencias, las magnitudes e intensidades y la importancia que se otorga al fenómeno sísmico a nivel institucional. No obstante, el SISNA de 2011, que quedó desactualizado con los nuevos acontecimientos sísmicos de la segunda década del siglo XXI, tal y como veremos, aún aguarda una actualización de la que daremos una serie de recomendaciones.

6.8.3.4. Conclusiones.

El terremoto de Lizarraga de octubre de 1998 (Mb5,2) se sumaría al de Legarda de 1982 (ML5,0) y al de Pamplona de 1903 (M4,7), Olave 2017 (Mw4,2) así como los tres ocurridos la madrugada del 1 de octubre de 2020 —con magnitudes mbLg 4,6, 4,1 y 4,4 en un intervalo de dos horas de un total de 107 eventos sucedidos ese día— como terremotos representativos de episodios sísmicos a tener en cuenta para la necesaria y obligatoria revisión y actualización del Plan especial de Riesgo Sísmico en Navarra (SISNA, 2011). Por lo tanto, varios retos quedan establecidos para la sociedad navarra del siglo XXI que deberán ser los pilares de actuación institucional en cuanto a la renovación de la seguridad sísmica, especialmente en el área metropolitana de la capital a través del SISNA:

I) Análisis de los riesgos que pudieran incrementar la vulnerabilidad y aumentar considerablemente el daño (aludes, desprendimientos de laderas, inundaciones, casos como Yesa o las laderas caídas tras el enjambre de 2013 en toda la cuenca...).

II) Análisis de vulnerabilidad y daños estimados en la actividad económica (contempla catastro y el uso). No sólo bienes inmuebles, también negocios comerciales.

III) En referencia a la guía de actuación se tendría que introducir un curso de formación de profesionales (arquitectos, arquitectos técnicos e ingenieros, esto se puede coordinar con los colegios y organizar cursos donde se acreditan técnicos, etc.) para la evaluación rápida de daños tal y como se ha realizado en otras comunidades del Estado y en los cursos que, con Protección Civil, ofrecimos en 2020 cuando se sucedía el enjambre con casi un millar de eventos cerca de Lizoain.

IV) Una vez formados los profesionales en evaluación rápida de daños, hay que facilitarles una herramienta o app de dispositivo móvil que les permita la coordinación para la evaluación, dotándoles de la información que ya tenemos en el SIG del catastro, e incluso de la vulnerabilidad. Cuanta más información, mejor podrán hacer su trabajo y menos riesgos correrán ellos y toda la sociedad.

6.8.4. El primer llenado del embalse de Itoiz. Año 2004 y siguientes.

Con el primer llenado del embalse de Itoiz en 2004 vino un aumento notable y repentino de una sismicidad desconocida hasta entonces al norte-este de Pamplona. Culminaría con el evento M4,6 del 18 de septiembre de aquel mismo año. El llenado se asoció posteriormente a un aumento de la sismicidad en horizontal, abarcando cada vez más áreas afectadas (Durá-Gómez, I. 2010). El 18 de septiembre de 2004 se produjo el terremoto de 4,6 mbLg que fue ampliamente sentido en toda la comarca de Pamplona y en buena parte de Navarra, Zaragoza y Guipúzcoa. Las sucesivas relocalizaciones pusieron el epicentro a unos 4 km del embalse de Itoiz y a unos 20 km al este de Pamplona. El embalse se había comenzado a llenar en enero de ese año y era la primera vez constatada que se daba un terremoto de esa magnitud en el área de Lizoain-Aoiz.

Hasta ese momento era una zona que aparentemente carecía de actividad sísmica significativa. Tras el terremoto principal (que había sido precedido por varios sismos premonitorios de hasta M3,4) se desplegaron estaciones para monitorear la serie de réplicas y delimitar el patrón hipocentral. Los eventos se concentraban principalmente entre 3 y 9 km de profundidad. Para entonces comenzaron las indemnizaciones, gestión de seguros, etc., en viviendas afectadas en Urroz, Lizoain y áreas cercanas a los epicentros. También hubo que hacer diversos trabajos de patologías (ver, por ejemplo, el caso de la iglesia de Noáin o el desplome de Cemboráin) para descartar que los terremotos de Itoiz fueran los responsables únicos de innumerables patologías denunciadas en edificaciones históricas sobre terrenos fundamentalmente del tipo E1, E2 y C.

6.8.4.1. Marco tectónico

En un trabajo presentado en Techtonophysics por varios autores de IJA-CSIC y la Universidad de Oviedo, liderados por Ruiz M. et al (2006), se calcularon soluciones focales para el evento principal M4,6 y una docena de réplicas, incluida la más enérgica M4,0 en octubre en Nagore, que mostraron fallas principalmente normales con cierto desgarre y con uno de los planos nodales orientado en dirección NO-SE e inclinado hacia el NE. Estos autores usaron técnicas de correlación cruzada para detectar y asociar eventos con formas de onda similares, proporcionando hasta 33 familias que relacionan el 67% de las 326 réplicas estudiadas. Los autores, liderados por Ruiz M. (2006) señalan que esta sismicidad pudo ser debida a la modificación del estado de esfuerzos en una zona de falla de esfuerzo crítico. Roeloffs (1988) concluía en el estudio general de eventos inducidos por embalses que el tipo de fallas sobre las que se ubiquen las presas determinarán si los terremotos tienden a ocurrir o no y habrá actividad sísmica cuando éstos se ubican sobre fallas normales muy inclinadas, en fallas de strike-slip muy verticales, y en el hanginwall de cabalgamientos de bajo ángulo, que es el caso del embalse de Itoiz.

En efecto, este es el caso de Itoiz, descansa sobre el hanginwall de un cabalgamiento vergente al sur y con cierta karsticidad. Las familias de hipocentros muestran grupos de eventos agrupados por períodos y que migran del NO al SE. La estrecha zona epicentral se pudo situar a menos de 4 km de la presa de Itoiz (111 m de altura). Estos resultados hipocentrales y la correlación observada entre las fluctuaciones del nivel del agua del embalse y la actividad sísmica (ver figura 6.37) favorecieron la primera explicación clara de esta serie como un caso de respuesta rápida de sismicidad inducida provocada por el llenado de un embalse en España.

Este tipo de sismicidad, al ser disparada por el primer llenado de un embalse, tuvo fuertes respuestas desde al ámbito político y mediático. Las miradas se dirigieron entonces hacia el este de la ciudad, ya que hasta ese momento toda la región había asumido que los terremotos de que vez en cuando impactaban en las edificaciones del área metropolitana de Pamplona, venían del oeste y alguna vez del norte. Entonces, se contrastaron dos hechos: uno, que la zona al norte-este de la ciudad está plegada y dos, a veces está afectada por corrimientos de buzamientos poco profundos que son los que entran en resonancia con este tipo de sismicidad inducida (Roeloffs, 1988).

6.8.4.2. Seguimiento de las primeras fases de llenado.

En efecto, el embalse de Itoiz se sitúa en una de esas áreas de bajo buzamiento con empuje hacia el sur, lo que sugiere que, además de los empujes inherentes a la zona, el llenado se daría en unas circunstancias muy sensibles a las fluctuaciones del nivel del agua. Si hacemos un seguimiento de las cinco primeras fases de llenado, vemos que ya en la primera se dispara la sismicidad con una subida de unos 35 m de columna agua (35 t/m^2) en apenas tres meses en un área extensa, fallada y con formaciones kársticas (ver figuras 6.37 y 6.38). Las profundidades afectadas son una distribución continua desde prácticamente la superficie hasta unos 12 km de profundidad. Una vez estabilizado el nivel hasta 2005, queda una sismicidad de fondo que en las fases de llenado 2 y 3 (2005 y 2006) generan menos terremotos, todos ellos M<3.

Al incrementar un nuevo llenado en la fase 4 con otras 35-40 t/m^2 en unos ocho meses, se observa una sismicidad muy densa y notablemente superficial hasta el M3,1 del 29/08/2007. Tras la fase 5, en 2008 se produce un leve incremento de las magnitudes con epicentros cada vez más alejados del embalse. La sismicidad que afectaba a Pamplona, hasta 2004, era un fenómeno que solía situarse al oeste de la ciudad y se asociaba a la falla de Estella-Pamplona, pero con este episodio comenzó, especialmente a partir de 2017, y mucho más a partir de 2020-2021, a ser un fenómeno que se situaba al norte y este del área metropolitana.

Incluso considerando el episodio de 2013, concentrado al sur y oeste de la cuenca, que se dio en circunstancias muy especiales como vamos a ver, toda actividad sísmica desde 2004 ha venido siempre acompañada de la actividad sísmica al norte y este de Pamplona. La densidad de instrumentación, posiblemente, nos ha proporcionado una visión más real de lo que antes desconocíamos, algo que presentaremos en los apartados siguientes.

El incremento más espectacular tras el llenado de Itoiz alcanzaría unos 17 km al oeste y hasta unos 35 km al este del embalse de Itoiz dentro del eje de la Cuenca Jaca-Pamplona tras un nuevo aumento en los niveles del embalse en 2007 por encima de los 35 m (Durá-Gómez, I. 2010).

Todo indica que la difusión de la presión de poro fue la causa principal de la sismicidad inducida por el llenado de Itoiz. La citada autora y sus colaboradores cotejan los epicentros con los mapas geológicos y concluyen que las presiones de poro se pudieron difundir lejos del embalse a través de las brechas carbonatadas del Eoceno del Grupo de Hecho con la serie de fallas del cabalgamiento casi verticales en la zona que se fue saturando con cada episodio de llenado. Por eso hemos querido cotejar estas fases con la sismicidad (figura 6.37).

En la siguiente figura 6.38 vemos el resultado que vamos a comentar. Los bajos valores estimados de presiones de poro (<10 kPa) debidos a las recargas muestran un desfase de tiempo entre los llenados anuales y la aparición de epicentros en áreas más alejadas del embalse. Por eso la sismicidad se atribuyó a un frente de presión de poro que se difundió hasta varios kilómetros del vaso con el aumento de dichas presiones hasta niveles críticos (Durá-Gómez, I. 2010). Así es como pudo producirse la difusión de la presión hasta profundidades previamente estresadas que reaccionaron reajustándose a nuevas condiciones tensionales (ver figuras 6.38, 6.39 y 6.40).

Utilizando el lapso de tiempo entre el embalsado, el inicio de la sismicidad y la tasa de expansión de los epicentros, las estimaciones hidráulicas arrojaron una difusividad del orden de 1 a 10 m^2/s, que son valores de permeabilidad sismogénica (Talwani et al. 2007). Con estos valores, desde el Embalse de Itoiz hacia las localizaciones hipocentrales, encontramos que un exceso de presiones alrededor de 100–500 kPa serían suficientes para inducir terremotos M>3 en este tipo de terrenos fracturados. Por ejemplo, el terremoto del 18 de septiembre de 2004 y el del 29 de agosto de 2007, presentarían un exceso de presiones intersticiales del orden de 100-200 kPa lo cual, según los autores Inmaculada Durá Gómez y Pradeep Talwani, sería suficiente para inducirlos.

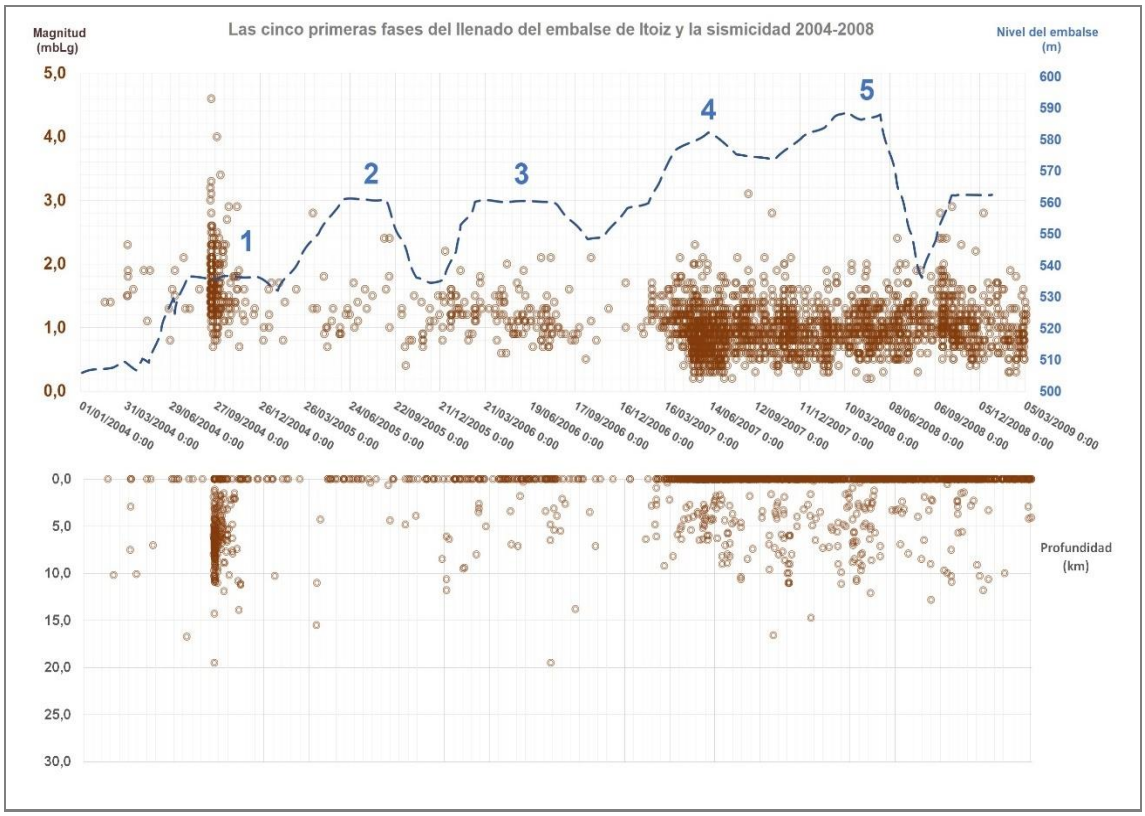


Figura 6.37. Las cinco primeras fases de llenado del embalse de Itoiz están bien ajustadas a cada año sucesivo. La sismicidad 2004-2008 es un reflejo distorsionado con cierta dilación del aumento de presiones de poro en el terreno. En la fase 1 se dispara la sismicidad con una subida de unos 35 m de columna agua (35 t/m²) afectando al volumen de corteza fallado hasta unos 12 km de profundidad. Tras la estabilización de 2005 (fase 2) queda una sismicidad remanente de reajuste tensional generalmente somera. En las fases de llenado 2 y 3 (2005 y 2006) se generan menos terremotos, todos ellos M<3 y con el desembalse del verano de 2006 se estabiliza y prácticamente se paraliza hasta que comienza el llenado de principios de 2007. Para entonces las zonas adyacentes estarían ya bastante estresadas. Es con el nuevo llenado de la fase 4 (2007), unos 35 m de altura en ocho meses, cuando se observa una sismicidad densa y superficial hasta el M3,1 del 29/08/2007. Tras la fase 5, en 2008 se produce un leve incremento de las magnitudes con epicentros cada vez más superficiales y alejados del embalse.

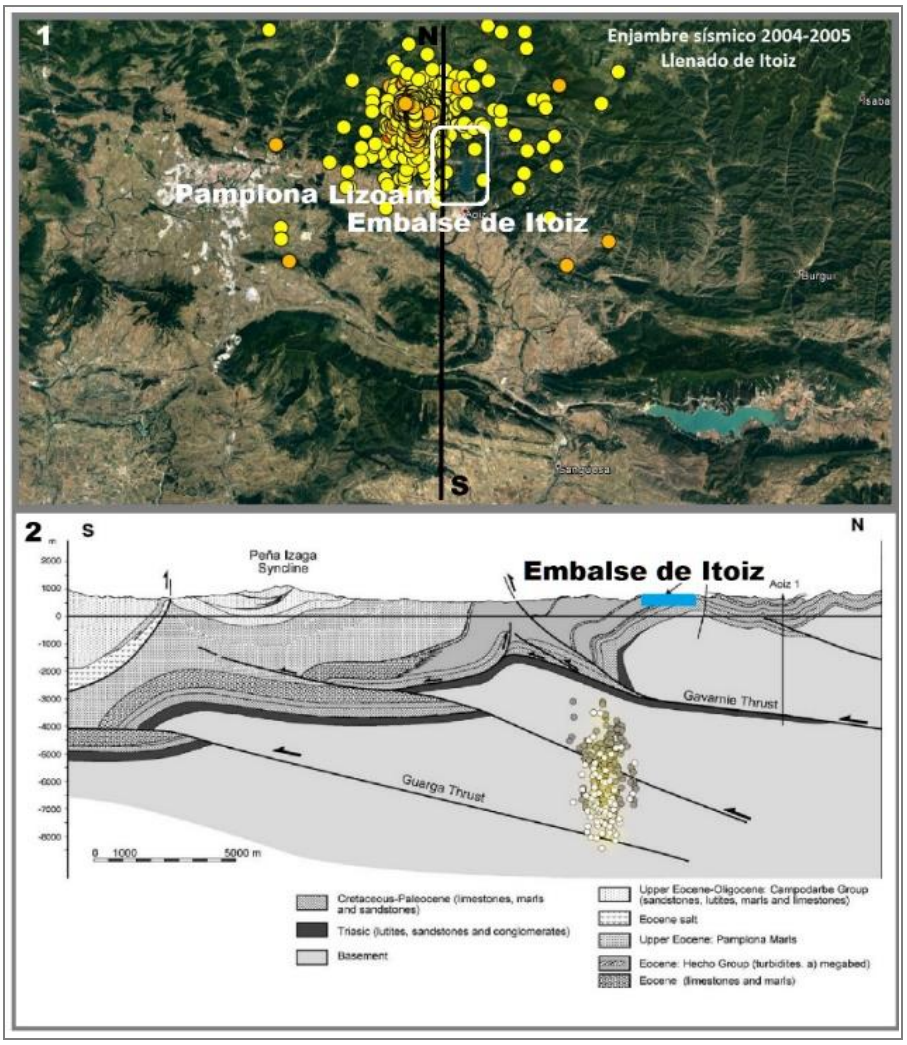


Figura 6.38. 1. Epicentros de los terremotos M>0 sucedidos en 2004 y 2005 proyectados sobre fotografía satelital. En el recuadro blanco se encuentra enmarcado el embalse de Itoiz, unos 20 km al este de Pamplona y unos 7 km al este de Lizoain. 2. Sección transversal, aproximadamente en dirección S-N, con los hipocentros de 2004 superpuestos que muestran la ubicación del embalse respecto a las fallas que generarían el enjambre: se trata de la figura 12 del trabajo *Aftershocks series monitoring of the September 18, 2004 M = 4.6 earthquake at the western Pyrenees: A case of reservoir-triggered seismicity?* de Ruiz M. et al publicada en Tectonophysics 424 (2006) páginas 223 y siguientes.

También estos autores investigaron si el terremoto ocurrido en octubre de 2008 a 18 km de distancia más de un año después en lo que sería una sexta fase, pudo ser debido a esos cambios de presión. Los autores previeron que, si las fluctuaciones del nivel del embalse de Itoiz seguían manteniendo una periodicidad con amplitudes anuales del orden de 20 a 30 m o más, las presiones de poro difusas podrían acumularse aún más a lo largo de las brechas carbonatadas de alta permeabilidad del Grupo de Hecho y de las fallas de cabalgamiento subyacentes, con la posterior continuación y migración de la sismicidad.

Hemos filtrado los terremotos M<1 con objeto de eliminar una zona del umbral que no siempre estuvo presente (algunas unidades móviles y nuevos sismógrafos se instalaron cuando ya había comenzado la serie) y fijándonos solamente en los de magnitudes superiores, podemos visualizar en la siguiente figura 6.39 cómo tras el incremento de presión, especialmente de la fase 4 en 2007, la expansión epicentral dibuja perfectamente la dirección preferente de las fallas NO-SE.

Los terrenos clasificados como P12 y P22 localizados al norte y este del área metropolitana de Pamplona, así como los de tipo E2 que presenten importantes espesores de alteración, a partir de estas consideraciones podrán incluir en cada proyecto un análisis más exhaustivo a la hora de considerar el efecto de la aceleración. Recordemos que entre 2007 y 2010 se detectó una migración importante de epicentros en la dirección NO-SE que alcanzó localidades tan al oeste como Olave (figuras 6.40).

En 2017 este sistema de fallas, como veremos en el apartado correspondiente, generó un valor PGA de 0,16g registrada el 10 de marzo de ese año a 12,6 km del epicentro (figura 6.40, 6.50, 6.52 y 6.56). Considerando los 3006 terremotos sucedidos desde 2004 hasta 2009 alrededor de Itoiz (ambos años incluidos) y eliminamos los M<1 (1287) dado que su seguimiento no abarca zonas más o menos alejadas ni ha sido continuo, especialmente al principio, nos quedan 1719 terremotos M>1 de los cuales fueron sentidos 59 (3,4%). La recta de regresión de ocurrencia considerando el R^2 de la intensidad se acerca a la unidad, algo que suele ser normal cuando hablamos de sismicidad natural en cualquier parte del planeta, sea considerando la magnitud o la intensidad. Sin embargo, para la magnitud es apenas la mitad, lo cual nos indica que desde 2004 existe una importante actividad sísmica de baja intensidad en relación a terremotos mayores. El parámetro b de la Ley de Gutenberg Richter del área norte-este de Pamplona, que estuvo activa a partir de 2004 y evolucionó los años posteriores desde Olave a Aoiz aproximadamente (latitud 42,769 a 42,889 y longitud -1,628 a -1,273) fue variando con el tiempo desde valores iniciales de 0,78 para alcanzar su máximo en 2007-2008 en torno a 1,75 y ya caer hasta 1,35 (figura 6.41). Ello da la idea de la cantidad de pequeña sismicidad que se produjo después del llenado.

Para un estudio amplio en el tiempo y determinar parámetros de la Ley de Gutenberg-Richter habría que esperar unos años, aunque las dos décadas que van desde 2004 a 2023 (ambos incluidos) arrojan en esa área de Olave-Aoiz un valor de b=0,87, volveremos sobre ello. La investigadora Alba Díaz González (2015) hizo una estimación histórica de varias áreas del norte peninsular incluidas las áreas de influencia pirenaica.

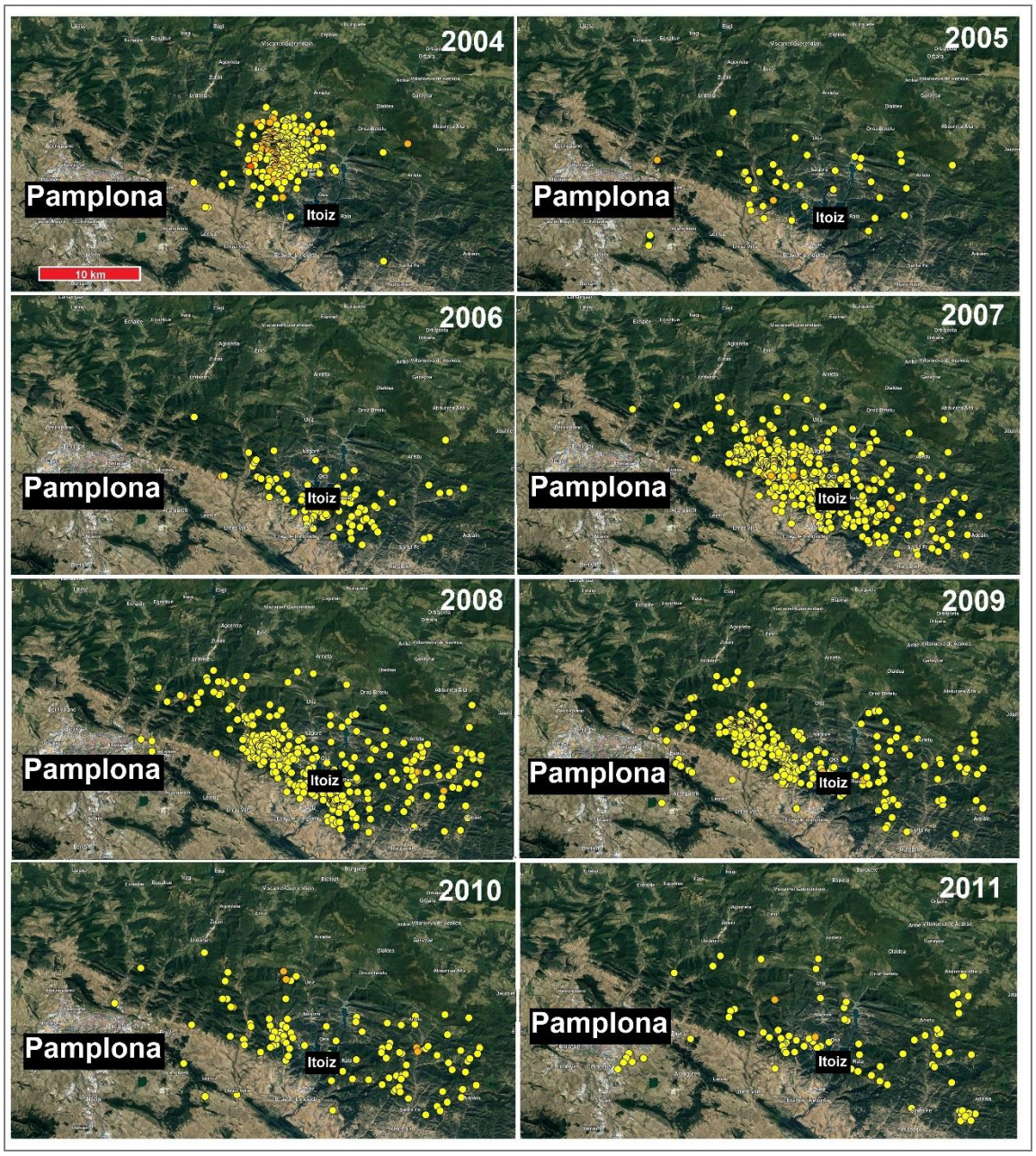


Figura 6.39. Epicentros de los terremotos M>1 sucedidos entre 2004 y 2011 proyectados sobre fotografía satelital (latitud 42,769 a 42,889 y longitud -1,628 a -1,273). Obsérvese que como comentan los autores Inmaculada Durá Gómez y Pradeep Talwani, con el llenado de la fase 4 (2007) después de la relajación que suponen las fases 2 (2005) y la fase 3 (2006) se da una expansión de epicentros hacia el SE. Tras la subida del nivel de agua unos 35 m en ocho meses, se observa una sismicidad notablemente más densa y superficial hasta el M3,1 del 29/08/2007 cada vez más alejada del embalse, es congruente con la dirección que marcan las fallas de la zona: NO-SE. Tras la fase 5 (2008) se produce un leve incremento de magnitudes con epicentros cada vez más superficiales y alejados del embalse hacia el NE que se alarga hasta 2009 y continúa produciéndose con cada vez menos recurrencia, al menos hasta 2011.

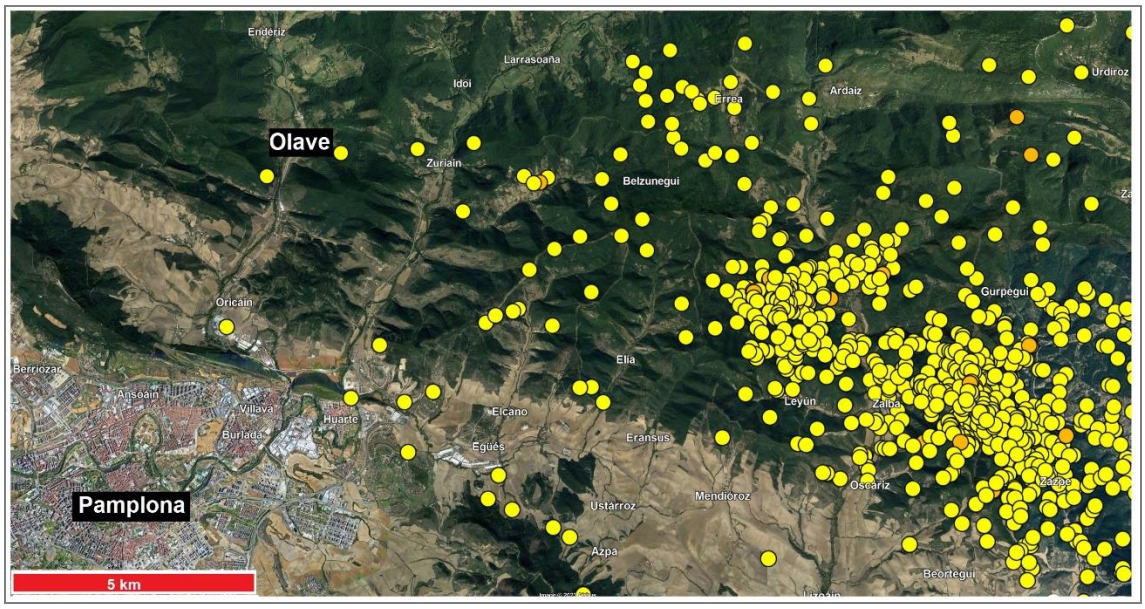


Figura 6.40. Epicentros de los terremotos M>1 sucedidos entre 2007 y 2009 proyectados sobre fotografía satelital al NE de Pamplona (latitud 42,769 a 42,889 y longitud -1,628 a -1,273). La influencia en el avance de la presión de poro tras la fase 5 o bien el reajuste de áreas colindantes debido a ello se dispersa en la dirección NO-SE correspondiente a la dirección de las fallas y alcanza áreas tan alejadas como Olave. Esta parte del área activada generará en 2017 una PGA de 0,16g en el acelerógrafo de Pamplona situado a 12,6 km del epicentro del evento del 10 de marzo de 2017.

La autora encuentra valores similares para los terremotos históricos ocurridos hasta 2013. En la zona norpirenaica b=1,41. En la zona de los Macizos Vascos b=1,02, aquí la sismicidad aparece asociada a estructuras E-O como en el caso de la falla de Leiza, la de Ollín, las láminas cabalgantes de Aralar, el límite oeste de la falla de Hendaya o la zona norte-este de Pamplona.

En el área de la Falla de Pamplona al oeste de la ciudad b=0,78 como lo sucedido en 2004 en la estrecha área epicentral al oeste de Itoiz. Al oeste de Pamplona, con la influencia de la Falla de Estella-Pamplona la actividad sísmica también presenta cierta orientación NO-SE como la sismicidad histórica vista desde Lizarraga hasta Sangüesa, pero hemos visto también que ocurre de manera más dispersa en el tiempo y en el espacio. Estos detalles sugieren que en 2004 hubo un adelanto de la sismicidad y que el ruido de fondo seguiría por años.

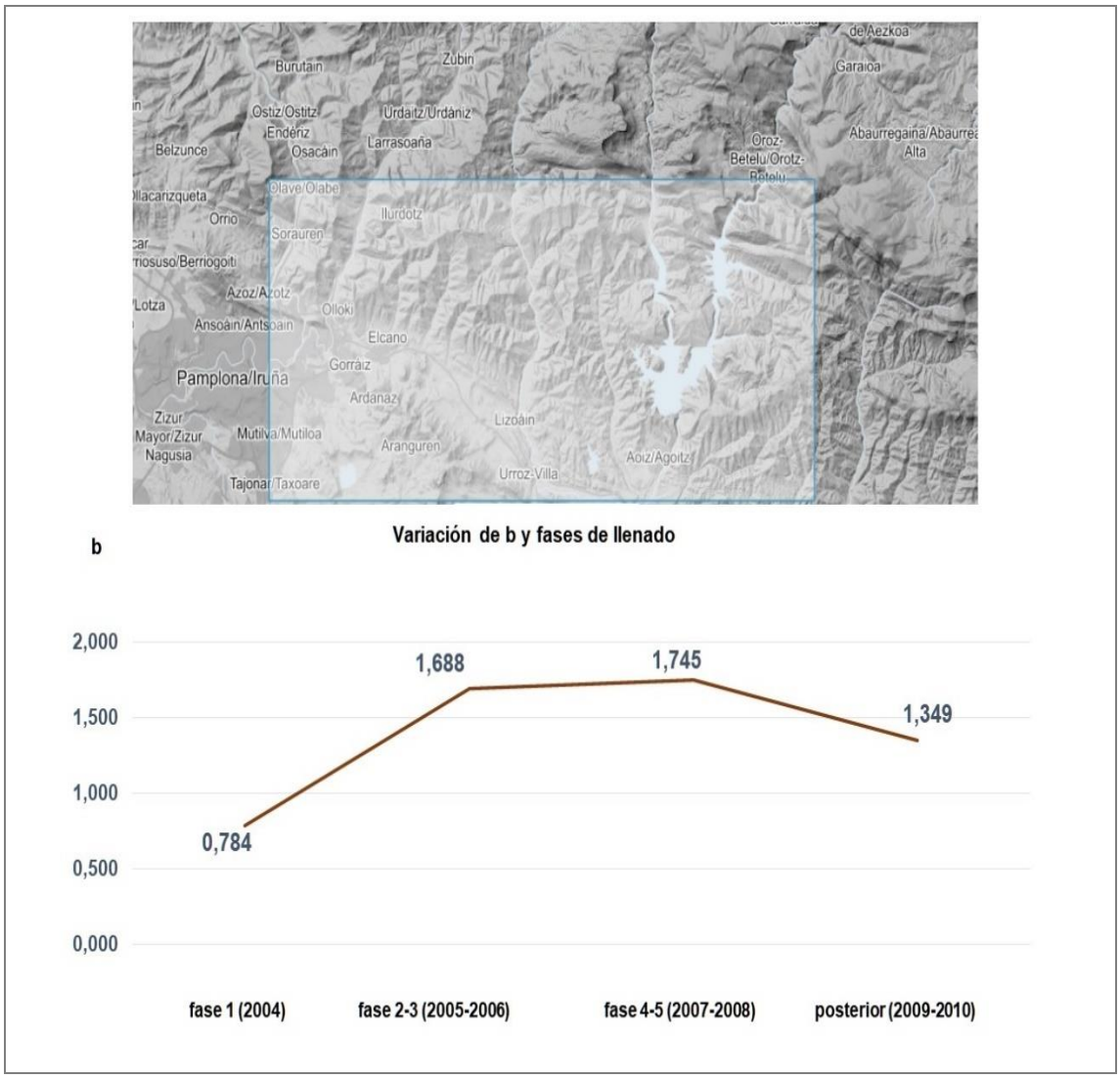


Figura 6.41. Variación de los valores del parámetro b en el área de Itoiz (latitud 42,769 a 42,889 y longitud -1,628 a -1,273) en 2004, 2005-2006, 2007-2008 y 2009-2010.

Los resultados de varios estudios posteriores mostraron la existencia de un incremento de tensión por la carga de agua superficial en el principal terremoto de la serie, pero en dos sentidos diferentes: la tensión de rotura elástica de Coulomb y el cambio en la presión de poro (Santoyo M.A. et al, 2010). Sin embargo, debido a las diferentes incertidumbres sobre los posibles valores del coeficiente de fricción aparente para el área donde su ubica el embalse, no hubo una indicación clara que pudiera satisfacer el desencadenante del terremoto principal M4,6 del 18 de septiembre de 2004 debido exclusivamente a los cambios de tensión elástica por el peso del agua superficial. El efecto sí fue más claro sobre el posible desencadenamiento de réplicas como un efecto dominó debido a los desajustes tensionales que introdujeron los mayores terremotos de la serie (figura 6.39).

Lo que sí encontraron todos los autores que investigaron el caso de Itoiz los años posteriores a 2004 fue la influencia de la presión de poro, especialmente en los dos eventos más enérgicos y en la mayoría de las réplicas (Santoyo M.A., García-Jerez A., Luzón F., 2010). Nuestras investigaciones dejan claras varias cosas que vamos a ver en las conclusiones, pero hay que destacar sobre ellas que la sismicidad inducida de Itoiz descubrió el potencial de un área sismogénica que no había sido prácticamente tenida en cuenta hasta ese momento. El hecho de que aquellos días los terremotos principales vinieran desde el este, y no desde el oeste, cambió completamente la perspectiva de la seguridad sísmica en el área metropolitana de Pamplona. Además, forzó a los científicos a una necesaria reflexión: que alrededor de una ciudad de 367.000 habitantes los terremotos históricos repetidos en una estructura determinada son raros.

Basar los nuevos estudios en distribuciones epicentrales ya conocidas para prevenir la peligrosidad sísmica se vio como algo que perdió efectividad en la zona y llevó a una parte de los geólogos de Navarra a considerar la necesidad de estudios de campo que aún no se han realizado. La efectividad del trabajo centrado en gabinete, sobre todo con el recuento y valoración de los catálogos, es claramente menor en los alrededores de Pamplona que en otras áreas con mayores tasas de deformación y menos fracturas por unidad de superficie. La distribución epicentral de los catálogos históricos dejó de ser una base efectiva para la prevención de futuros terremotos destructivos. Probablemente la fecha de inflexión de esa realidad sea el 18 de septiembre de 2004.

6.8.4.3. Conclusiones.

La sismicidad sucedida en los alrededores de Itoiz comienza con el primer llenado en 2004 y se produjo por un fenómeno de difusión de la presión de poros, en rocas más o menos permeables hasta profundidades previamente estresadas, que reaccionaron reajustándose a nuevas condiciones tensionales y de presión de poro. Varias investigaciones han mostrado que la sismicidad se suele disparar bajo los embalses cuando éstos se ubican sobre fallas normales muy inclinadas, en fallas de strike-slip muy verticales, y en cabalgamientos de bajo ángulo, que es el caso de la presa de Itoiz, sobre un cabalgamiento vergente al sur en rocas con cierta karsticidad. (Ruiz et al., 2006; Jiménez et al., 2009; Durá-Gómez and Talwani, 2010; Santoyo et al., 2010; García-Mayordomo and Insua-Arévalo, 2011). Antes de 2004, la amenaza sísmica en el área metropolitana de Pamplona se identificaba al sur y oeste de la ciudad, coincidiendo con la Falla de Estella-Pamplona y accidentes asociados. A partir de 2004 la mirada sobre la amenaza sísmica se vuelve al norte y este de la ciudad. Con una mayor densidad de instrumentación se corrobora que existe un registro prácticamente continuo de la sismicidad y que de cuando en cuando (1995, 2004, 2007, 2013, 2017, 2020, 2021) alcanza intensidades y frecuencias notables que han supuesto generalmente daños menores en las edificaciones y de momento, escasos daños estructurales.

Los bajos valores estimados de presiones de poro (<10 kPa) debidos a las recargas iniciales muestran un desfase de tiempo entre los llenados anuales y la aparición de epicentros en áreas más alejadas del embalse de Itoiz. Por eso la sismicidad se atribuyó a un frente de presión de poro que se difundió hasta varios kilómetros del embalse con el aumento de dichas presiones hasta niveles críticos. La expansión preferente siguió un patrón NO-SE.

Los terrenos clasificados como P12 y P22 localizados al norte y este del área metropolitana de Pamplona, así como los de tipo E2 que presenten importantes espesores de alteración y los C susceptibles de inestabilidades, a partir de estas consideraciones podrán incluir en cada proyecto un análisis más exhaustivo al considerar el efecto de la sismicidad. Recordemos que entre 2007 y 2010 se detectó una migración importante de epicentros en la dirección NO-SE que es la que marcan las fallas hasta lugares como Olave. En 2017 ese sistema de fallas generará el mayor valor de aceleración pico del suelo (PGA) registrada en el acelerógrafo de Pamplona: 0,16g.

Parece oportuno añadir unas reflexiones del profesor John K. Costain del Virginia Tech, extraídas de una de las largas conversaciones por correo que tuvimos respecto del fenómeno en el área de Torreperogil-Sabiote, El Perdón e Itoiz, que conocía muy bien. John nos dejó en 2015.

> *"Antonio, gracias por esta dedicación. Como bien sabes, he sugerido que sólo hay dos tipos de sismicidad natural: (1) la relacionada con la dinámica de la tectónica de placas, y (2) la relacionada con la dinámica del ciclo hidrológico (hidrosismicidad). Esta última incluye cambios transitorios en la superficie que separa la atmósfera de las aguas subterráneas, e incluye cambios en la capa freática, pero también se da en ciclones y temporales. Los resultados de los más de 30 estudios en todo el mundo (Costain y Bollinger, 2010) de las correlaciones entre la lluvia y los terremotos, que hemos publicado durante los últimos 25 años, se llevaron a cabo en ambos ambientes, tanto en los intraplaca como en ambientes marginales de placa, en los cinco continentes; en conjunto proporcionan un fuerte apoyo para la hipótesis de la hidrosismicidad como una explicación satisfactoria para los terremotos intraplaca; produciéndose a través de la variación de la presión de poros, independientemente del régimen tectónico. Son nuestras hipótesis de trabajo, debemos reconocer que todos vivimos en un área frágil entre la atmósfera y la Tierra. Tiene mucho sentido el intentar entender qué es lo que provoca los terremotos intraplaca en ambientes de todo el mundo. Comprendemos mejor los terremotos interplaca, como la falla de San Andrés en mi país, pero aún no hay un acuerdo general sobre lo que provoca los terremotos intraplaca. En pocas palabras, creo que es el clima, o tal vez mejor dicho: el ciclo hidrológico. Pero en mi país hemos respondido bien, estableciendo normas de construcción sismorresistente en ambientes interplaca. Sin embargo, no hemos tomado las mismas precauciones en ambientes intraplaca. Tenemos que pensarlo cuanto antes y planificar en consecuencia. Ya no podemos asumir más que no se derivará daño alguno con la reducción y cambios de la capa freática, pensando de esa manera seguir con esas prácticas sin tomar medidas que se incluyan en las normas de construcción. Espero que con el tiempo los gobiernos reconozcan que el daño antropogénico puede convertirse en una realidad; y peor si seguimos evitando aportar fondos de investigación que deberíamos dedicar a la comprensión de la frágil interfaz en la que vivimos. Gracias por tus traducciones al español, especialmente la palabra hidrosismicidad".*
>
> John K. Costain, 2013.

6.8.5. El Perdón-Etxauri, 2013.

El día 14 de febrero de 2013 comenzó en la Sierra de El Perdón, al sur de Pamplona, una serie sísmica con varios terremotos pequeños, algunos sentidos por la población y que fueron aumentando en frecuencia e intensidad durante los meses siguientes hasta alcanzar su cenit con sendos eventos ML4,2 sucedidos el 23/03/2013 y el 20/04/2013. Fueron 332 los eventos registrados hasta noviembre de aquel año que la prensa local denominó *"el año de los terremotos"*.

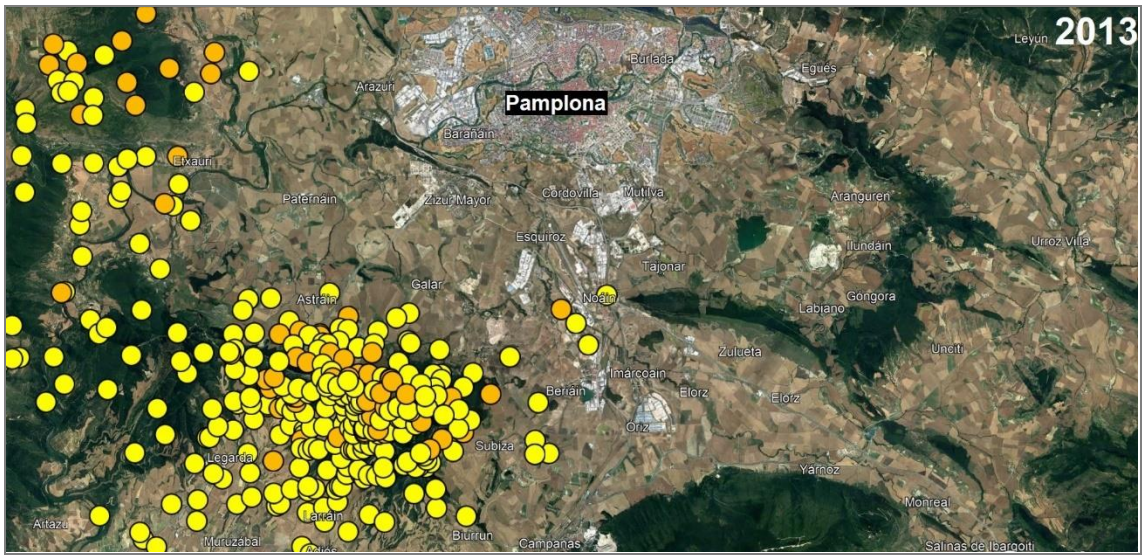


Figura 6.42. Los 332 eventos sísmicos superficiales registrados entre febrero y noviembre de 2013 al sur y oeste de la ciudad de Pamplona. De ellos fueron sentidos por la población 36 con dos impactos ML4,2 ampliamente sentidos en Navarra y otras comunidades cercanas.

El entonces director general de Interior del Gobierno de Navarra, Patxi Fernández, apoyado en los datos que le suministraba el IGN, la Universidad de Navarra y ICOG, argumentaba el día 24 de marzo de 2013 ante la creciente preocupación de la población que:

> *"... La actividad sísmica reciente pudiera estar asociada a colapsos ligados a circulación de aguas subterráneas, teniendo en cuenta también la forma de las ondas registradas..."*. Y como se comunicó por parte del Gobierno de Navarra a los ayuntamientos afectados: *"... De la información del IGN se desprende que los sismos actuales son superficiales (la profundidad oscila entre 1 y 4 km) y que su origen parece no estar ligado a una falla, sino a hundimientos de cavidades producidas por la disolución de sales provocada por circulación de aguas subterráneas..."* (figura 6.43).

Antonio Aretxabala se dirige a los vecinos de Uterga ayer en la sociedad. JAVIER SESMA

La profundidad de los seísmos de El Perdón, de entre 1 y 4 km

El Gobierno remitió ayer a doce ayuntamientos de la zona datos de un primer análisis del IGN

A.V.
Pamplona

El director general de Interior del Gobierno de Navarra, Patxi Fernández, remitió ayer una carta a doce ayuntamientos del entorno de la sierra de El Perdón para exponerles la situación actual en torno al episodio de seísmos y los datos de los que se disponen. Se acercarán a la zona para dar más información a los vecinos.

Aseguraba en la misma que "el Gobierno de Navarra está en contacto permanente con el Instituto Geográfico Nacional para hacer el seguimiento a través de la Red Sísmica Nacional y activar si procediera el Plan de Emergencias, situación que hasta el momento no se ha considerado necesario".

Recordaba que, hasta ayer (día en que repuntó la actividad y se registró el movimiento más fuerte hasta la fecha, de 3.7 grados), se llevaban "más de 140 sismos desde el 14 de febrero". La máxima magnitud había sido de 2.9 grados el día 18 de marzo con epicentro en Uterga, con una intensidad (cómo ha sido sentido por la población) de III en la Escala Macrosísmica Europea. Hasta la fecha se tenía constancia que hubieran sido sentidos por la población un total de 15 sismos claramente identificados.

"En la base de datos sísmica del IGN se encuentran registrados 257 terremotos anteriores a esta serie, el más antiguo de 1844 y el de mayor magnitud (4.5 grados) en 1982", explicaba.

"De la información del IGN se desprende que los sismos actuales son superficiales (la profundidad oscila entre 1 y 4 km) y que su origen parece no estar ligado a una falla, sino a hundimientos de cavidades producidas por la disolución de sales provocada por circulación de aguas subterráneas", afirmaba Fernández.

Más registros, más seísmos

"La no constancia de series similares a la actual en la zona no significa que no hayan existido, pues la mayoría de los sismos registrados se deben a la notable cobertura de la actual red sísmica y la precisión de la instrumentación. Teniendo esta referencia, y aunque no sea probable, no se puede descartar que se produzcan terremotos de mayor magnitud", expresaba.

En cuanto a la distribución epicentral de los sismos, señalaba que desde el IGN "no observan ninguna dirección privilegiada que se pudiera asociar a ninguna estructura geológica concreta".

"Han consultado diversas fuentes, tales como el Colegio Oficial de Geólogos y las Universidades del País Vasco y Navarra, deduciendo que no hay fallas superficiales conocidas, si bien se sabe, a partir de perfiles, que hay discordancias geológicas en torno a los 1.500 m de profundidad y, sin descartar ninguna otra hipótesis, parece que la actividad sísmica reciente pudiera estar asociada a colapsos ligados a circulación de aguas subterráneas, teniendo en cuenta también la forma de las ondas registradas".

La carta se envió a los ayuntamientos de Artazu, Añorbe, Beriáin, Biurrun-Olcoz, Enériz, Adiós, Muruzábal, Legarda, Uterga, Obanos, Cendea de Galar y Cendea de Cizur.

Figura 6.43. Fue precisamente cuando se preparaba esta notica aquel 23 de marzo de 2013, que un terremoto de magnitud ML4,2 con epicentro cerca de Etxauri, confirmó el contagio a otras zonas cercanas propensas, además, quedaba claro que se podía incrementar una actividad con una energía desatada cada vez mayor y que entraron en juego las fallas después de los colapsos de oquedades. Recorte del Diario de Navarra que recogió la noticia el 24 de marzo de 2013. El terremoto fue sentido en toda la cuenca de Pamplona y otras zonas de Navarra y comunidades colindantes como Euskadi y La Rioja.

6.8.5.1. Colapsos de galerías, deslizamientos y terremotos.

La crisis sísmica hizo que la prensa local hablase del *"año de los terremotos"*, los epicentros fueron extendiéndose hacia la zona de Etxauri y el 23 de marzo, un evento ML4,2 se adjudicó a la Falla de Etxauri. Se alcanzó el cenit de la serie el 20 de abril de 2013 con otro terremoto ML4,2 con epicentro en Uterga, ampliamente sentido en varias comunidades autónomas colindantes (figura 6.44). Inspeccionando la zona, en un primer análisis de campo se pudo evidenciar la inhabitual persistencia de campos anegados, un nivel del río Arga mantenido por varios meses un par de metros por encima de lo normal, el brote de agua por fuentes que se consideraban secas y la proliferación de manantiales incluso por depósitos cuaternarios en laderas dedicadas al cultivo. Enormes deslizamientos se dieron por toda Navarra al comenzar 2013 (ver la lista en la página 308), incluido el espectacular deslizamiento de Subiza (figura 6.46), otros en la zona de El Perdón, en Noáin, el de Ilurdotz, en los túneles de Belate que estuvieron meses cerrados o los comentados anteriormente como reactivaciones en Arre o el acelerón de 30 cm que sufrió la ladera derecha del embalse de Yesa. Un fenómeno de incremento de las presiones intersticiales en la zona epicentral con una mantenida disminución de las presiones efectivas, puede indicar el hecho de que el estímulo desde la Sierra de El Perdón contribuya a ser una causa complementaria a los cambios de esfuerzo debidos a las disoluciones apuntadas por el director de Interior del Gobierno de Navarra.

También hay que tener en cuenta el fenómeno de lubricación y cambio de esfuerzos debidos a cambios en la presión de fluidos y disoluciones. Costain, Bollinger, Heinzl, Kraft, Doblas, Aretxabala, etc., han reportado este fenómeno con incrementos mantenidos de tan sólo 1 o 2 metros en la subida de los niveles freáticos.

La Cuenca de Pamplona está limitada por el noreste por las estructuras pirenaicas del entorno del macizo de Oroz-Betelu, que, al cabalgar hacia el SO origina el surco subsidente de Arre, provoca así el desplazamiento de las sales del Keuper, acumulándose en la estructura de Noáin a Zuasti, dando posteriormente lugar a los diapiros de Iza y Anoz, varias fallas asociadas a estas estructura salinas, como la de Etxauri, se reactivaron con aquellas condiciones climáticas extremas.

Las fuerzas isostáticas, la erosión o el levantamiento cortical por pérdida de peso debida a la erosión del agua juegan un papel fundamental en la distribución de esfuerzos corticales y tarde o temprano la transferencia de esfuerzos se reparte entre las piezas del sistema (a través de las fallas), pero sólo un pequeño cambio en la presión de poros puede modificar esa transferencia de esfuerzos, como vimos en Itoiz, lo cual supone que el agua jugó un papel primordial en la configuración espacial y temporal de la sismicidad en 2013 en El Perdón y alrededores, precisamente en las zonas salinas.

Inicialmente fue a favor de las zonas solubles como afirmaba el entonces director general de Interior del Gobierno de Navarra (figura 6.43) y así lo muestran los registros de los sismógrafos. Aquel episodio sísmico pareció ser favorecido por las galerías y cavidades de las antiguas explotaciones de potasa que fueron abandonadas, y aunque aún debe ser demostrado el mecanismo físico, y más estudiado el fenómeno de transferencia de esfuerzos, algún paso ya se avanzó al respecto de la sismicidad en zonas de explotación de sal asociadas al agua (Wang, Manga, Heinz, Sirnagesh, Miller, Doblas, Costain, Bollinger, Kraft, Aretxabala, por citar a algunos). Pero no olvidemos el papel jugado por la Falla de Beriáin al sur de la sierra y la de Etxauri al norte, ambas asociadas a los depósitos salinos relacionados con la Falla de Pamplona. Lo que comenzó reflejado en los sismogramas como colapsos de cavidades acabó en terremotos ML4,2 como los del 23 de marzo y del 20 de abril (figura 6.44). Entonces quedó muy claro el alto grado de contagio en la zona de El Perdón y alrededores a través de las estructuras salinas asociadas a la Falla de Pamplona y a la alocinesis de la Cuenca de Pamplona.

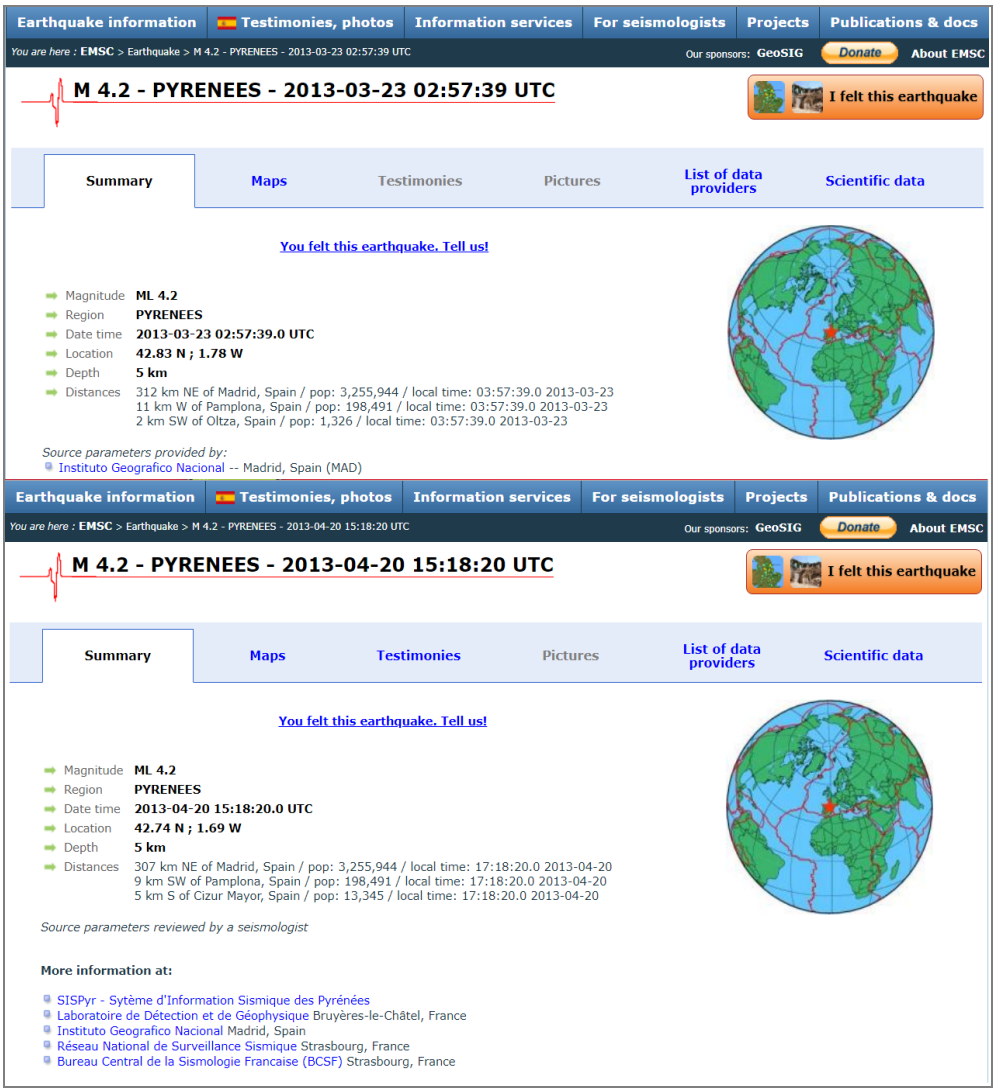


Figura 6.44. Registros del European Mediterranean Seismological Centre (EMSC) de sendos terremotos de magnitud local ML4,2. Arriba el 23 de marzo de 2013 en Etxauri. Abajo el 20 de abril de 2013 en Uterga.

Cuando ocurre un terremoto, éste puede aumentar los esfuerzos de Coulomb entre las fallas colindantes, como la de Etxauri y la de Beriáin, lo que aumenta a su vez el momento de ocurrencia de la próxima sacudida. Sobre todo, si la falla sobre la que influye está cerca —tal y como debió ser el caso— del esfuerzo de rotura. Sería el agua, entonces, como en otros casos ya estudiados y como vimos en Itoiz, el detonante del cambio en la distribución y transferencia de los esfuerzos.

Los terremotos pueden ser desencadenados por cambios de esfuerzos tanto como por el cambio de presión del agua. Las réplicas posteriores se suelen asociar a cambios en los esfuerzos transferidos usando la misma ley.

La transferencia de esfuerzos estáticos y la interacción entre fallas satisfacen un papel de mecanismo físico que puede explicar la formación de enjambres, terremotos compuestos, premonitorios, principales, réplicas; los intervalos pueden ser horas, días, meses, años o décadas. Hubo propuestas de estudio en 2013 que no llegaron a materializarse, incluida la comisión de seguimiento de la sismicidad del Gobierno de Navarra cuando en marzo y abril, los temblores en las localidades afectadas eran continuos.

Al llegar el verano de aquel año los impactos sísmicos se habían reducido en intensidad y cantidad, detectándose alrededor de una docena coincidiendo con la traza de la Falla de Beriáin durante el verano de 2013 (figura 6.45). Pero, aunque los terremotos perdieron protagonismo en el debate político y ambientalista en la Comunidad Foral, la preocupación de las poblaciones que sufrieron aquel invierno y la inquieta primavera de 2013, continúa latente, porque de cuando en cuando la tierra sobre la que viven les vuelve a recordar el mundo de galerías y fallas sobre el que viven. El fenómeno sísmico ha venido conviviendo con el de la subsidencia y colapsos del terreno con aparición de socavones, a veces de decenas de metros de diámetro (ver figura 6.50).

Figura 6.45. Los 11 terremotos registrados a finales de mayo hasta principios de julio de 2013 se ajustaban a la traza de la Falla de Beriáin al SE de la Sierra de El Perdón.

En las zonas intraplaca, como en la Sierra de El Perdón o el oeste del área metropolitana de Pamplona, las estructuras geológicas heredadas son inseparables de las condiciones hidrogeológicas, fundamentales para comprender el alcance de nuestras acciones en la zona. Ello hace que sea más complicada la comprensión de las interacciones asociadas exclusivamente a la variación de esfuerzos, pues las tasas de acumulación de éstos son muy lentas, por lo tanto, esas condiciones heredadas, incluidas las hidrogeológicas, son primordiales para comprender el brote de aquellos enjambres sísmicos después de las copiosas lluvias de 2012 y 2013.

En la traza en superficie de la Falla de Pamplona o Estella evolucionaron los diapiros de Salinas de Oro y Arteta. El de Salinas de Oro ha originado las fallas concéntricas y radiales de empuje ascendente, cuyo carácter sismogenético penetra en la cuenca y parece reactivarse de cuando en cuando. La más importante es la de Etxauri a la que se responsabilizó del terremoto de magnitud 4,2 del 23 marzo de 2013 (figura 6.44).

Desde un punto de vista geológico, el marco que se activó se localiza en el extremo suroccidental de las Zona Surpirenaica constituida aquí por materiales paleógenos marinos, limitando al sur con los depósitos oligo-miocenos continentales de la Depresión del Ebro, integrantes de la mayor parte de la superficie. En las proximidades del borde occidental, la Falla de Estella-Pamplona separa los dominios citados del Arco Vasco.

6.8.5.2. Geomorfología de la Sierra de El Perdón.

La Sierra de El Perdón ofrece una forma alargada con orientación EO, prolongándose al este con las Sierras de Alaiz e Izco y al oeste perdiendo altura hacia el cauce del río Arga. Se encuentra incluida en la denominada geológicamente como Cuenca de Pamplona, cuyo límite está definidos al oeste por la falla de Pamplona. Esta estructura está formada por dos fallas de desgarre diferentes, una que afecta únicamente a la cobertera y otra profunda, que afecta al zócalo y que es la que desplaza la falla norpirenaica al "Manto de los Mármoles" o falla de Leiza. En realidad, este accidente no es neto, sino que se trata de una amplia banda de cizallamiento orientada de NNE a SSO que afecta a la cobertera desde la Sierra de Andia hasta la zona oriental de la Sierra de El Perdón. El relieve de esta zona se encuentra marcado por la presencia de una alineación montañosa, que, con dirección E-O, recorre la parte sur del área metropolitana de Pamplona girando hacia el sur. Esta alineación denominada Sierra de El Perdón, alcanza una altura máxima de 1034 m en el Alto de El Perdón y los 1039 en Nuestra Señora de El Perdón. Desciende en suave pendiente hasta Puente la Reina recuperando las alturas medias de 400 m como en el área de Pamplona.

El resto de la zona presenta relieves suaves y alomados descendiendo hacia el sur debido a la erosión de los materiales más blandos que afloran, así como su disposición estructural, constituyendo una serie monoclinal con buzamiento hacia el sur. El principal curso fluvial es el rio Arga. Las vertientes tienen mayores pendientes en la ladera sur. Varios arroyos la atraviesan en dirección N-S. En la ladera norte se desarrolla un amplio piedemonte. Lomas y relieves suaves al sur de la sierra conforman una zona bastante llana entre 450 y 660 m. Las formas que más destacan son una serie de glacis de formas alargadas, NE-SO, diseminadas por valles con esa dirección. La vertiente norte ha dado bastantes problemas con deslizamientos que suelen reactivarse tras la fusión de fuertes nevadas o intensas lluvias. Los vecinos de Zariquiegui lo han vivido en varias ocasiones.

6.8.5.3. Tectónica del área de El Perdón.

La Cuenca de Pamplona está limitada por el noreste por las estructuras pirenaicas del entorno del macizo de Oroz-Betelu, que al cabalgar hacia el S.O. origina el surco subsidente de Arre, provoca así el desplazamiento de las sales del Keuper, acumulándose en la estructura de Noáin a Zuasti, dando posteriormente lugar a los diapiros de Iza y Anoz. Estos diapiros tienen una génesis semejante, mega-sigmoides de desgarre. Por el oeste está la Falla de Pamplona como una banda de cizallamiento activa (1982-1998). Lo que parece seguro es que ha permanecido activa por lo menos desde el Eoceno inferior (Sierra de Andia y diapiro de Anoz) hasta el Mioceno (diaclasamiento de los conglomerados superiores de El Perdón, sobre la falla de Beriain) permitiendo el desplazamiento siniestral del Cabalgamiento Frontal Pirenaico y la transferencia del movimiento hacia el Cabalgamiento Frontal Cantábrico. Asociados a la traza en superficie se reconocen también los diapiros de Salinas de Oro y Arteta. El de Salinas de Oro ha originado fallas concéntricas y radiales típicas, su carácter sismogenético parece reactivarse de vez en cuando, penetran en la Cuenca y el agua debe jugar un papel importante como en 2013. La falla más importante es la de Etxauri (figura 6.44). Otra zona que vivó terremotos destacables en los últimos tiempos.

La fuente, o las fuentes, sismogénicas que actúan en la zona no son bien comprendidas, no hay estudios dedicados y ello a pesar de haber generado terremotos destacables. Existen precedentes históricos en 1982 con terremotos M>4,5 (Legarda, 22 de mayo de 1982). Una de las posibilidades que se barajó sobre el episodio sísmico de marzo de 1903 fue que su origen estuviese ligado a estas fuentes sismogénicas, pero como hemos visto, el epicentro estaría al este de Pamplona y el tipo de sismicidad es más acorde con lo vivido en 2020-2021. En 1903 vivían 30.000 personas en la cuenca en edificaciones bajas de carácter rural, no se había desarrollado aún el efecto ensanche ni había irrumpido el hormigón armado.

6.8.5.4. Precipitaciones sin precedentes y sismicidad.

No puede pasar desapercibida la observación de que durante algo más de un mes, cerca de 400 litros por metro cuadrado caídos en la comarca (prácticamente lo habitual en un año) estaban ya provocando corrimientos, inestabilidades, grandes deslizamientos, cortes de carreteras, roturas de tuberías en el suministro y evacuaciones de viviendas y negocios, fenómenos éstos extendidos por toda la zona. Subiza, precisamente en la zona afectada, fue el caso más espectacular e incluso se publicó por parte del ICOG el hecho de que los temblores detectados se debían a este enorme deslizamiento cuando ya se había adelantado en comisión parlamentaria que éste no era la causa, sino parte del efecto de los recurrentes terremotos que alcanzaron la treintena diaria a finales de marzo. Ver el avance de la *Memoria de 2013 de la Sección de Geología y Geotecnia de la Dirección General de Obras Públicas del Departamento de Fomento del Gobierno de Navarra* en la página 308.

El más espectacular, el deslizamiento de Subiza, seguramente no alcance la treintena de metros de profundidad a pesar de su aspecto tan alargado (unos 800 m) y tan ancho (unos 500 m). Movimientos tan superficiales es muy raro que generen a tanta intensidad sísmica, así lo comunicamos a la delegación de Madrid. Preguntando a la gente de Subiza, afirmaban, sin lugar a dudas, que los terremotos que notan (todavía de vez en cuando), son un fenómeno profundo, los escuchan como una explosión muy fuerte, todo tiembla y comprueban que posteriormente a esos impactos, las laderas se mueven. Sería un comportamiento tixotrópico tan típico de las arcillas involucradas en los desequilibrios desplegados por toda el área. Por ejemplo, el deslizamiento de Subiza (figura 6.46) fue tan espectacular y mediático que abrió noticiarios locales y portadas de periódicos, pero por el tipo de reptación muestra continuidad y se cuarteaba y se reactivaba con los temblores (tixotropía), al menos así lo testificamos quienes lo visitábamos tras los mayores impactos en el área local.

Figura 6.46. Localización del deslizamiento de Subiza de unos 800 x 500 m en la ladera este de El Perdón.

El deslizamiento de Yesa, por ejemplo, no alcanza esa longitud ni anchura, pero llega a más de 100 m de profundidad tratándose de otra tipología. Sin embargo, en Yesa, los movimientos fueron a mediados de enero muy aparatosos y constantes (hasta más de 2 cm a la semana) y no se registraron en los sismógrafos. En El Perdón no se producen movimientos tan espectaculares ni capaces de generar sismicidad tan densa e intensa. El deslizamiento de Yesa avanzaba en el momento de mayor velocidad a 1 cm/día, así que en Subiza deberían haberse dado fuertes deslizamientos generadores de sismicidad hasta seis, ocho o veinte veces al día. En la zona afectada, además se dieron corrimientos no tan grandes donde no se registran epicentros, pero sobre todo hay demasiados epicentros en zonas en las que no se ven deslizamientos. Lo que sí es posible y mucho, es que se dieran grandes colapsos por disolución de sales en el Trías, tal y como concluyeron los responsables del IGN y de Protección Civil de Navarra en las primeras etapas.

No era la primera vez. Hay sales del Trías, cloruros, sulfatos, además de todo un mundo de galerías que colapsaron reblandecidas y disueltas tras las intensas lluvias sucedidas desde octubre de 2012 hasta marzo de 2013. Supusieron un récord que aún no se ha vuelto a superar, tal y como vimos en el análisis de la reactivación del deslizamiento de Arre y de Yesa. Los fenómenos de subsidencia son comunes en esta área y a veces aparecen grandes socavones en el terreno por disolución y colapso (figura 6.50).

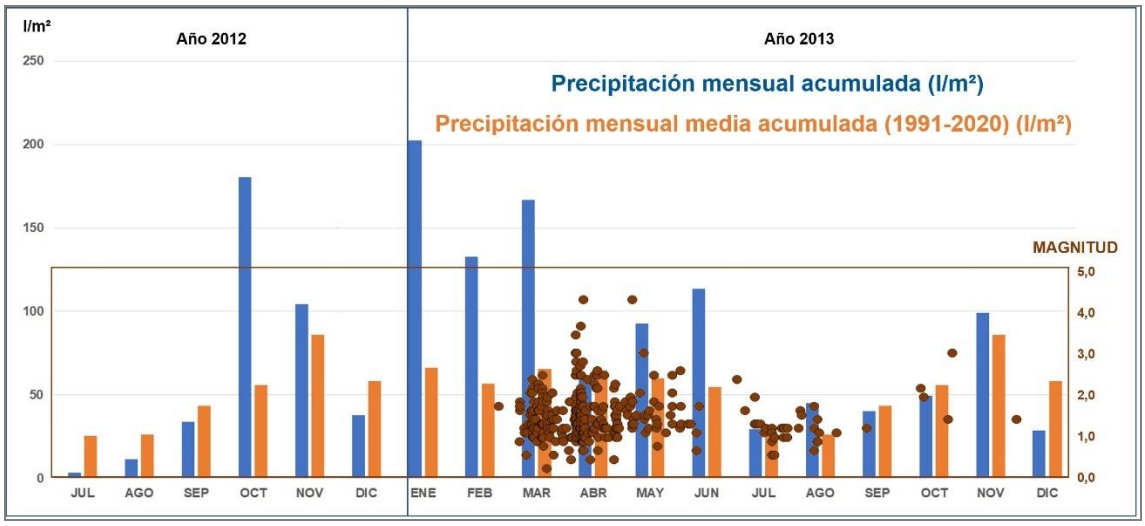


Figura 6.47. La sismicidad comienza a mediados de febrero con un sismo de M1,8 cuando se habían superado los récords de lluvias en los meses de octubre de 2012 que triplicó la media, enero de 2013 que también la triplicó y además superó los 200 l/m² y febrero de 2013. Durante 2013 se puede correlacionar, primero el colapso de cavernas y galerías con la saturación y cientos de deslizamientos por la geografía foral y posteriormente los terremotos de falla que afectaron también a zonas salinas como Etxauri y ya en julio y agosto al área de Beriain.

Por otro lado, hubo epicentros en Obanos y al sur de Uterga, también en Belascoáin, incluso en Artajona, justo sobre una traza de falla más o menos conocida, no sabemos a ciencia cierta hasta dónde llegaron las minas, pero está claro que tan lejos no. Además, justo donde se sabe que hay más red de galerías como en Guendulain o Astráin, no hubo epicentros. Por lo tanto, la ecuación *agua+sales=disolución+colapsos* fue la firme candidata que se asumió. Pero no la única.

La lluvia récord y mantenida de aquellos meses supuso un cambio tensional, disoluciones, peso, lubricaciones, presión de poro, inestabilidades afectando a un amplio abanico de elementos, no se suele concentrar en un solo objeto, aparecen deslizamientos, disoluciones, colapsos, aumento de peso, pérdida de cohesión y rozamiento, tixotropía, lubricación de fracturas, aumento de la presión de fluidos, disminución de las presiones efectivas..., son parte de un largo conjunto de perturbaciones y fenómenos que unas precipitaciones excepcionales pueden inducir.

Para encontrar precedentes de un enero y febrero iguales (más de 360 litros por metro cuadrado) habría que remontarse al año 1880. La posibilidad de un caso de *hidrosismicidad* natural habría que tenerla en cuenta a pesar de que aún no hay muchos estudios dedicados en España ni haya sido objeto de análisis pormenorizados aún en nuestras universidades, ésta sería una de las primeras investigaciones a poner en marcha. Un estudio que podría desvelar una buena información para conocer mucho mejor nuestro medio, su dinámica y sus potenciales amenazas.

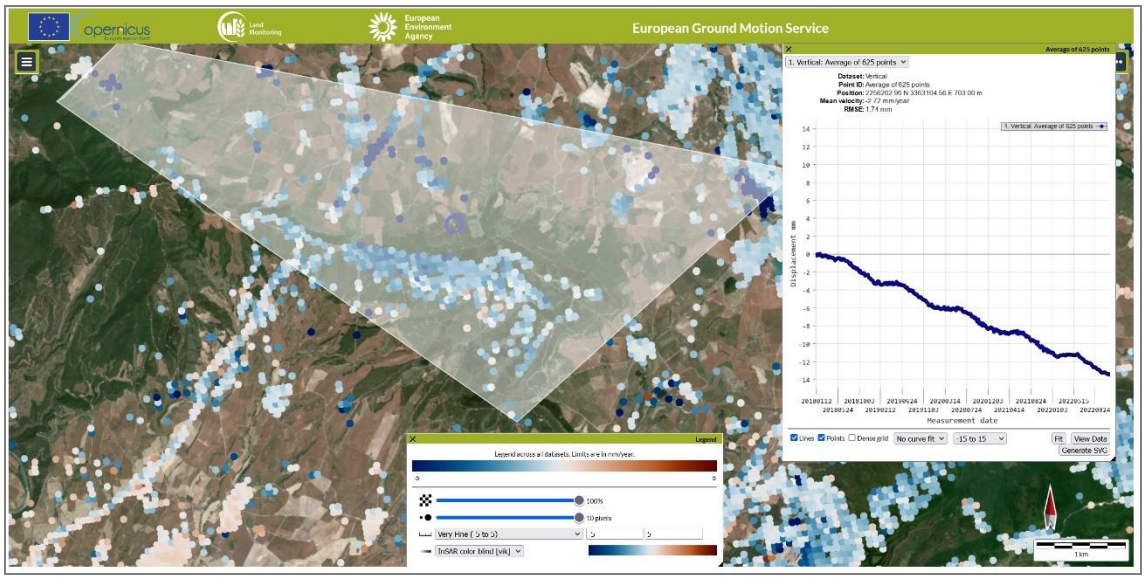


Figura 6.48. Subsidencia registrada por el satélite Sentinel-1 del Programa Copernicus para el European Ground Motion Service (EGMS-EEA) entre enero del 2018 y octubre de 2022 en 625 puntos que engloban la Sierra de El Perdón. Se produce un hundimiento rítmico del terreno cercano a 1,5 cm en una media de unos 2,7 mm/año. El hundimiento tiende a estabilizarse e incluso revertirse levemente durante los meses de verano para incrementarse nuevamente durante los meses de invierno.

Algún paso por parte del IGN y de alguna universidad como la Universidad de Barcelona ya se ha dado. En 2010 un estudio histórico realizado por Eva Font, José Manuel Martínez-Solares, Eulalia Masana y Pere Santanach, investigadores del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y del Departament de Geodinàmica i Geofísica, Grup RISKNAT, de la Universitat de Barcelona, analiza la serie sísmica de Tivissa y Vandellós de 1845 en Cataluña, para la *Revista de la Sociedad Geológica de España, nº 23(1-2)* de 2010. Dicho estudio presenta un avance importante a la hora de considerar institucionalmente los fenómenos hidrosísmicos en la Península Ibérica, aunque popularmente esté aceptado desde siempre en lugares tan alejados como Granada o Navarra. Se puede aún hacer una arqueología de la hidrosismicidad a través de la cultura popular en dichos como *año de lluvias año de temblores* que escuchamos a una mujer mayor en nuestras visitas a la Sierra de El Perdón.

Estos autores analizan las series sísmicas que tuvieron lugar durante la lluviosa década de 1840 a 1850; días después de los aguaceros que ocasionaban graves inundaciones se producían los fenómenos sísmicos. La serie mejor estudiada empezó el 30 de septiembre y finalizó el 14 de octubre de 1845. La geología de la zona y las condiciones climáticas extremas conforman un marco demasiado parecido a lo que ocurre en El Perdón como para pasar desapercibido.

Dichos autores apuntan:

> *"...como hipótesis de trabajo no debe excluirse la posibilidad de una serie de sismos más superficiales causados por el movimiento del cabalgamiento de Vandellòs o fallas asociadas. Éstos podrían haber sido inducidos por las fuertes lluvias del 9 de septiembre y las correspondientes grandes avenidas de los cursos de agua de esta región, por la variación transitoria local del estado de esfuerzos debido a un mecanismo de aquifer forcing análogo a los sugeridos por Kraft et al. (2006) en el monte Hochstaufen, en el SE de Alemania o por Bollinger et al. (2010), para la sismicidad de la Castellane, en la Provenza. En esta región, que presenta una estructura de cabalgamientos despegados a nivel del Trías, con una potente serie evaporítica, que presenta fuertes analogías con la región de Tivissa-Vandellòs, Bollinger (2010) ha podido mostrar que el 41% de las avenidas extremas son seguidas al menos por un evento sísmico al cabo de 7-28 días, y que esta correlación no es debida a la casualidad...".*

Cada vez más, las hipótesis que relacionan las condiciones meteorológicas con la actividad sísmica en áreas intraplaca, como la zona afectada en la Sierra de El Perdón, cobran una mayor relevancia, cobrando una aceptación considerable, especialmente después de los casos estudiados en Alemania, Suiza, EEUU, India, Brasil, Haití, China, Francia, Australia o Italia, por autores como J.K. Costain, Bollinger, Kraft, Miller, Heinz, Assunpçao, Doblas, Wang, Manga, Sirnagesh, etc.

Es la transferencia de esfuerzos el agente que genera la sismicidad. Las fuerzas isostáticas o el levantamiento cortical por pérdida de peso debida a la propia erosión, juegan un papel fundamental, y tarde o temprano la transferencia de esfuerzos de Coulomb se reparte entre las piezas del sistema (las fallas), así que un pequeño cambio en la presión de poros puede modificar esa transferencia de esfuerzos como vimos en Itoiz, lo cual supone que el agua juega un papel primordial en la configuración espacial y temporal de la sismicidad, y aunque aún debe ser más estudiado, algún paso se está dando en ámbitos de la ingeniería civil y los embalses.

Además, cuando ocurre un terremoto, éste puede aumentar los esfuerzos de Coulomb entre las fallas colindantes, lo que aumenta a su vez el momento de ocurrencia del próximo. Sobre todo, si la falla sobre la que influye está cerca del esfuerzo de rotura, como estaría siendo el caso de los alrededores de El Perdón. El agua en este caso, como en otros ya estudiados, sería el detonante del cambio en la distribución y transferencia de los esfuerzos.

La transferencia de esfuerzos se ha venido identificando como el mecanismo más importante en la generación de terremotos. Dicho mecanismo está basado en el bien conocido criterio de rotura de Coulomb (CRC); en el caso de que esperemos un tipo de rotura como es la ocurrencia de un terremoto, tendríamos que:

$$CRC = \sigma - \mu\ (\sigma - P) > 0 \text{ (ver figura 6.49).}$$

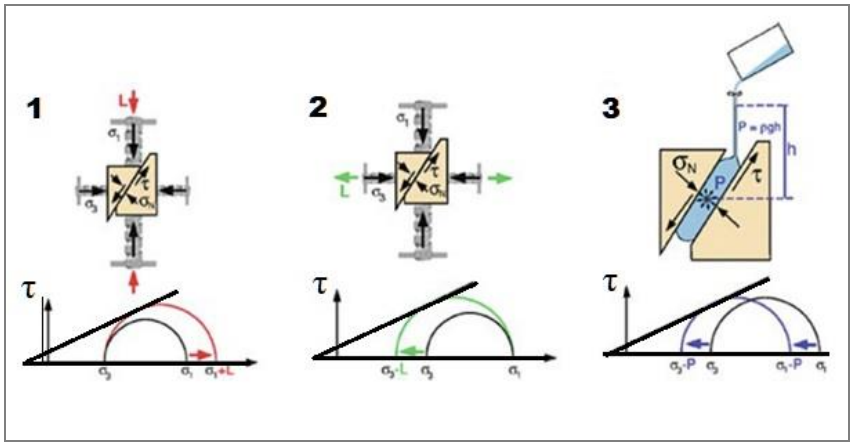


Figura 6.49. Indicando que un valor positivo de CRC puede generar la fractura, hay tres formas de disparar una falla (cuando el semicírculo toca la recta envolvente) según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb: 1) aumentando la presión principal σ_1, 2) disminuyendo la presión de confinamiento σ_3 y 3) aumentando la presión de fluidos P que reduce la presión efectiva σ_1 y la σ_3. Hay dos formas de aumentar la presión de poros (caso 3), la natural por lluvias o inundaciones y la tecnológica: embalses e inyecciones de fluidos en las rocas. En todos los casos, las fallas se disparan y provocan sismicidad. Aquí τ define el esfuerzo cortante y σ el normal, sobre el plano (suponiendo que una falla pueda asemejarse a un plano), σ es positivo para la compresión, μ es el coeficiente de fricción y P la presión de poros. Por lo tanto, los terremotos (al igual que los deslizamientos) pueden ser desencadenados por cambios de esfuerzos ($\Delta\sigma$) tanto como por el cambio de presión del agua o de poros (ΔP). Las réplicas posteriores se suelen asociar a cambios en los esfuerzos transferidos usando la misma ley. La transferencia de esfuerzos estáticos y la interacción entre fallas, satisfacen un papel de mecanismo físico que puede explicar la formación de enjambres, terremotos compuestos, premonitorios, principales, réplicas; los intervalos pueden ser horas, días, meses, años, décadas.

6.8.5.5. Hidrogeología, potasas, galerías abandonadas y lluvias extraordinarias.

Los estudios hidrogeológicos realizados hasta la fecha no son muy esclarecedores de la dinámica hídrica en el marco de la Sierra de El Perdón. Se han diferenciado tres conjuntos con un funcionamiento hidrogeológico prácticamente independiente, pudiéndose dar conexiones de carácter puntual entre las diferentes unidades. Las operaciones humanas de extracción, sin embargo, pusieron en contacto las masas de agua cambiando la dinámica que durante milenios esculpieron la tectónica y la geomorfología. Tendríamos tres unidades:

1. Conglomerados de El Perdón

2. Areniscas y niveles areniscosos aislados

3. Formaciones permeables del Cuaternario

La recarga del sistema se produce a partir de la infiltración directa del agua de lluvia en las superficies aflorantes de la propia sierra. El drenaje se produce a través de los manantiales que descargan a favor del contacto con materiales finos e impermeables de las facies distales. Los manantiales de Subiza y Elorz son las surgencias más masivas. La variación de los caudales es significativa en estas descargas, lo cual apunta al funcionamiento *"pseudokárstico"* de estos materiales, a favor de las descalcificaciones que se fueron formando.

No hay datos suficientes que permitan calcular valores concretos de permeabilidad y transmisividad, sí ha sido posible, al menos, distinguir diferentes sectores en función de su capacidad para albergar agua y permitir circulación. El alto grado de consolidación y cementación de los conglomerados limita la existencia de almacenes destacables. No obstante, la presencia de una mayor densidad de fracturación explica la existencia de una cierta circulación de agua en su seno. Los acuíferos superficiales cuaternarios presentan recursos muy limitados, su reducida extensión y potencia no permite grandes reservas. Excepto al norte de Adiós, donde se captan en estiaje unos caudales mínimos de entre 1,5 a 2,0 l/sg (Departamento de Fomento del Gobierno de Navarra).

El origen de estos recursos debe atribuirse a una conexión entre estos depósitos cuaternarios y niveles acuíferos en los conglomerados a más de 100 m de profundidad. Esta conexión se hizo a través de un sondeo de Potasas de Navarra, S.A. La influencia del agua en áreas donde las rocas solubles disparan la sismicidad es otra de las investigaciones pertinentes en la zona desde que se fueron cerrando las minas de Potasas S.A. en 1997. Otra cuestión que sería interesante estudiar para conocer el papel que pueden estar jugando las galerías de explotación de las antiguas minas, además de la persistente subsidencia, es que cada cierto tiempo aparecen socavones en las áreas bajo las cuales existieron galerías de explotación. El ejemplo de junio de 2019 en Esparza fue bastante mediático y no se estaba produciendo sismicidad. Se trataba de un colapso del terreno de unos 15 m^2 del que se percató un helicóptero de la Policía Foral en unas labores rutinarias. Más tarde se acordonó y se vieron otros menos llamativos en zonas cercanas.

El Gobierno de Navarra promovió entonces un estudio del riesgo. En la Sierra de El Perdón se está produciendo un hundimiento rítmico del terreno cercano a 1,5 cm desde 2018 en una media de unos 2,7 mm/año (Proyecto Copernicus) algo que, obviamente, debió de existir antes que el satélite. El hundimiento tiende a estabilizarse e incluso revertirse levemente durante los meses de verano para incrementarse nuevamente durante los meses de invierno (ver figuras 6.48 y 6.50).

Figura 6.50. El socavón en un campo de cultivo de Esparza de junio de 2019, acordonado por la Policía Foral. Tras inspeccionar la zona se encontraron no demasiado lejos un par de ellos más de menor entidad.

Las galerías, grietas y fisuras no sólo serían guías de percolación hacia los niveles solubles de sales (potasa y otras), sino también directamente hacia fallas tensadas por el hecho de que esa zona, al atravesar unas condiciones climáticas extremas sin precedentes, ante las que la existencia de esas galerías, podría tener cierta influencia en la desestabilización vivida en 2013 a través de la transmisividad en la presión de poros. Ello sugiere que podrían volver a generar el fenómeno sísmico si se dieran condiciones no tan extremas como las de 2013, como los socavones que se producen cada cierto tiempo sin necesidad de lluvias extraordinarias. Una cuestión cuya trascendencia nunca ha quedado aclarada y que en 2013 demandó una respuesta.

En otras ocasiones ya se han reportado efectos sísmicos en condiciones geológicas similares a partir de circunstancias hídricas extremas en los cinco continentes en presencia de niveles salinos. Como ocurrió en 2013 en la Sierra de El Perdón, después de unas lluvias de carácter extraordinario y sin precedentes históricos. La acción de solubilidad con colapso de cavernas, oquedades e incluso galerías de origen antrópico, sugiere que el exceso de agua fue el detonante. Sin embargo, en 2007 esta zona de El Perdón fue el escenario de otro enjambre sísmico con algo más de 60 terremotos, la mayoría de escala inapreciable, en aquella ocasión no hubo lluvias extraordinarias (figura 6.51). Solo un evento de magnitud 3,0 cerca de Salinas produjo varios sustos en la población.

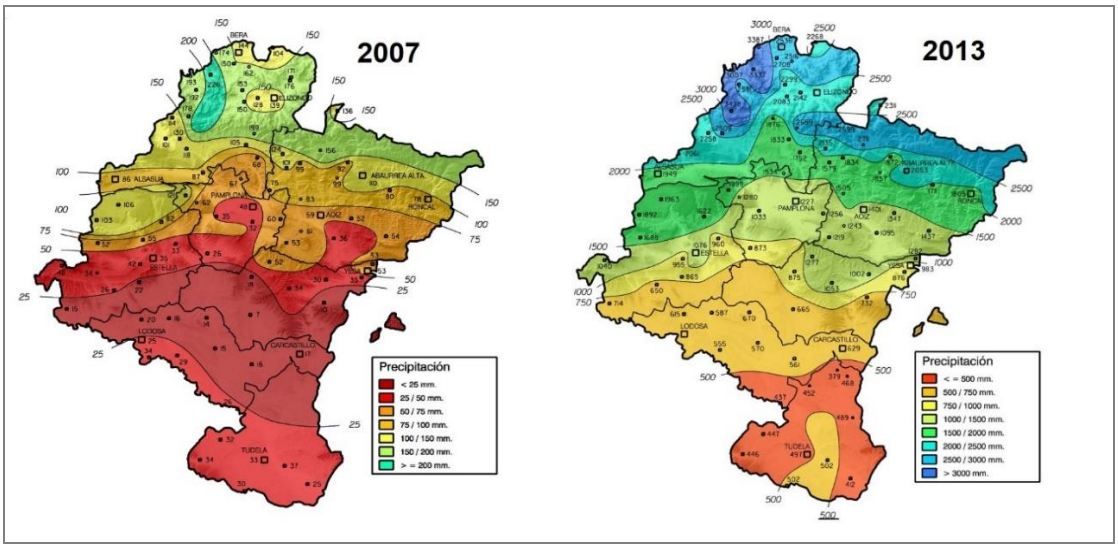


Figura 6.51. Comparativa de la pluviometría de 2007 y 2013 en Navarra, ambos años de actividad sísmica en el área de la Sierra de El Perdón. En 2007 no se vivieron lluvias extraordinarias. El año 2013 sigue siendo el año más lluvioso de la historia en Navarra.

En 2013 no se superó la magnitud ML4,2 (23 de marzo y 20 de abril de 2013). El enjambre de 2013 tiene precedentes más violentos en esa zona, por ejemplo, el 22 de mayo de 1982 en el área se generaron varios terremotos seguidos cuyas magnitudes se han reportado hasta 4,6 mblg. Un mes después volvieron a repetirse esas *"escenas de pánico en Pamplona"* (El País, junio de 1982), pero especialmente los daños fueron relevantes en Asträin y el ayuntamiento encargó un estudio dedicado en el que se incluyera el papel de la subsidencia detectada en el entorno y los daños observados en su iglesia (ver el caso de la iglesia de Noáin). Parece oportuno y necesario no bajar la guardia ante la potencial fuerza de dichos eventos. La comarca, que ya aglutina a 367.000 personas, puede y debe ir preparando su urbanismo y la educación de una ciudadanía del siglo XXI de la manera menos vulnerable posible, es una propuesta razonable que se consensuó en el Parlamento de Navarra en abril de aquel año y que deberá enfocarse hacia la seguridad estructural en un siglo que será —también en Navarra— fundamentalmente urbano.

6.8.5.6. El enjambre de 2013 y la primera actualización del SISNA.

Tras los más de 300 terremotos vividos en la Sierra de El Perdón en 2013 con dos impactos ML4,2 uno en marzo y otro en abril (figura 6.44) ya era suficiente para haber actualizado el SISNA (2011), como el propio Plan Especial especifica tras la ocurrencia de acontecimientos sísmicos de cierta relevancia o, sin que ocurran, cada cinco años, por lo que en 2016 debería haberse revisado todo el protocolo, además de ir planteándose una red de monitorización. Nuevamente en 2021 (otros 5 años más sin actualización) sin que hubiera ocurrido nada relevante debería haberse revisado y actualizado toda la base de datos por segunda vez, pero tampoco se encuentra dicha información.

Durante ese tiempo se vivieron los enjambres más densos, numerosos y violentos cerca de la capital. En 2017 se produjo el enjambre de Olave con el evento del 10 de marzo que superó en cuatro veces la aceleración básica esperada (de 0,04g según la NCSE-02 a 0,16g) y en 2020-2021 se produjo la mayor y más densa actividad sísmica vivida en Navarra desde que se tienen registros, superando tres veces al enjambre de El Perdón de 2013 cuando se dispuso en sede parlamentaria, en la comisión de seguimiento de la sismicidad creada en abril de aquel año, la posibilidad de una red propia de seguimiento. La presión realizada en las instituciones por personas influyentes y alcaldes de las zonas afectadas fue importante en aquellos días, dada la preocupación de los habitantes de Erreniega-El Perdón y Pamplona sur. Sin embargo, cuando los temblores cesaron en el verano de 2013, como habitualmente sucede, la cuestión se olvidó. Esta manera de actuar se vivió igualmente en 2017 y en 2020.

6.8.5.6.9. Conclusiones.

En las zonas intraplaca, como en la Sierra de El Perdón, las estructuras heredadas inseparables de las condiciones hidrogeológicas, son fundamentales para comprender lo sucedido tras las históricas lluvias de 2013.

Esto hace que sea más complicada la comprensión de las interacciones asociadas exclusivamente a la variación de esfuerzos, pues las tasas de acumulación son muy lentas, y, por lo tanto, como se afirma, las condiciones heredadas incluidas las hidrogeológicas, son fundamentales para comprender el brote de estos enjambres después de copiosas lluvias.

Los más de 300 terremotos vividos en la Sierra de El Perdón en 2013 con los dos impactos ML4,2 de marzo y abril (figura 6.44), habrían sido entonces motivo suficiente para una primera actualización del SISNA (2011) tan solo dos años después de su implantación, tal y como el propio Plan Especial de Protección Civil especifica.

6.8.6. Olave 2017.

El 10 de marzo de 2017 a las 07:43h de la mañana, coincidiendo con los 114 años del terremoto del 10 de marzo de 1903, conocido como *terremoto de Pamplona*, comenzó un episodio sísmico, cerca de la capital, que tuvo un importante impacto al generar, el terremoto principal, una aceleración pico del suelo (PGA) de 0,16g (lo esperado para Pamplona en la NCSE-02 era ab=0,04 g y en los mapas de actualización de 2015 ab=0,09 g). Se trataba de un evento que rápidamente puso en movimiento a la prensa y llenó espacios informativos en todo el país. Desde muy temprano comenzaron a escucharse opiniones científicas y desde el ámbito social (ver, por ejemplo, el hashtag o etiqueta *#TerremotoPamplona* en las redes sociales que inaugura una nueva era en la comunicación del fenómeno sísmico y el intercambio de sensaciones, fotografías, cuestionarios y mapas de intensidad de carácter inmediato con amplia participación ciudadana).

Durante unas horas se desborda el trabajo de Protección Civil. Esta vez todo comienza por un terremoto de escala mbLg 4,2 (ML 4,5 s/EMSC de Francia; Mw 4,2 s/IGN del Mº de Fomento y 4,1 mwr e intensidad VI s/USGS de los EE.UU.); se producen varias réplicas que se extienden durante varios meses con 14 eventos bien sentidos por la población.

La diferencia entre este nuevo episodio y el vivido, por ejemplo, al sur de la capital, en 2013 en la Sierra de El Perdón, conocido como *"el año de los terremotos"*, es que aquel fue mucho más numeroso y denso en eventos, disipándose más energía en más de 300 terremotos pequeños de los que sólo dos alcanzaron M>4, de hecho, pasado un mes desde el 14 de febrero de 2013 hasta el 14 de marzo de ese mismo año ya se habían superado la centena de impactos, varios habían sido sentidos y hasta bien pasado un mes de temblores no se dieron los sismos M>4.

En aquella ocasión la componente climática fue considerada importante como pusimos sobre la mesa en el informe preliminar del ICOG que se realizó mientras duraba el fenómeno sísmico que amainaría en el verano de 2013.

Durante ese tiempo hubo nuevos episodios de sismicidad alrededor de Pamplona, como el acontecido en octubre de 2015 también al sur de la capital, o los que se vivieron en un episodio en julio de 2016 en los alrededores de Irurtzun al oeste de donde comenzó la serie de 2017 y que conectará con el enjambre de 2020-2021. En cualquier caso, una revisión de lo acontecido en 1995, 2004, 2013, 2015 y 2020-2022 pone de manifiesto que el área que va desde Olave hasta Aoiz no dejó de temblar, al menos desde 2004. La mejor red de auscultación tras lo sucedido en Itoiz sacó a relucir esta certeza.

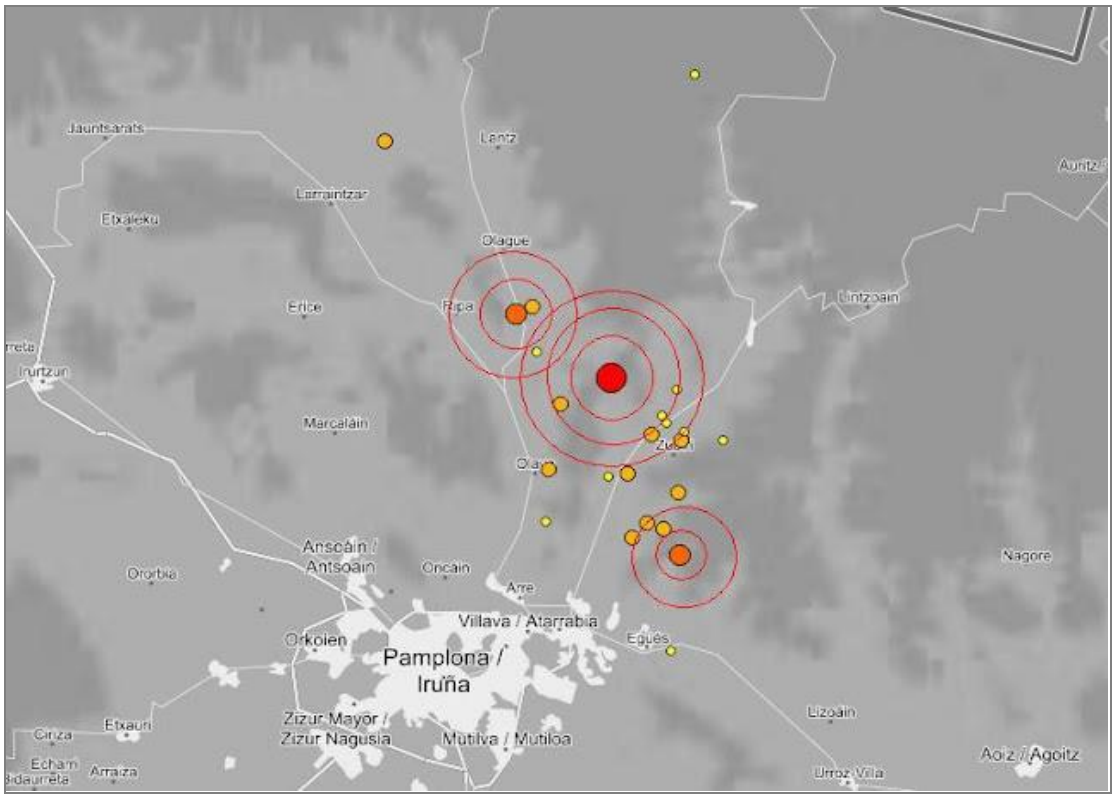


Figura 6.52. Localización de los tres epicentros de los terremotos más importantes en el episodio vivido al norte de Pamplona durante marzo de 2017 de M4,2, M3,7 y M3,3.

A grandes rasgos, la zona que genera estos terremotos es en superficie un conjunto de margas, areniscas, arcillas, calcarenitas y algunas brechas de edad Eoceno Inferior, Cuisisense que se ubica en el sector occidental de la Zona Surpirenaica, caracterizándose por una serie de pliegues paralelos al eje longitudinal de la cadena pirenaica, vergentes hacia el sur que la pone en contacto con los materiales eocenos de las Margas de Pamplona.

La estructura geológica resulta bastante simple si la comparamos con los límites mecánicos que generaron los terremotos de 1982, 1998 e incluso 2013, en los que la presencia de cabalgamientos, diapiros o fallas de zócalo (con hipocentros a más de 60 km de profundidad) derivan en una gran complejidad estructural a la hora de interpretar la sismicidad. Conviene señalar la proximidad de dos importantes accidentes: por un lado, al norte se localiza la prolongación occidental del cabalgamiento de Roncesvalles y al oeste, la franja de cizalla o Falla de Pamplona-Estella que manifestó cierta actividad profunda en 1982 y 1998. Ambos accidentes han condicionado las características tectónicas del área de Olave situada al oeste de Lizoáin y del embalse de Itoiz. Son muy pocas las manifestaciones de la deformación frágil en superficie. Se trata de fallas normales de orientación cercana a E-O y salto poco pronunciado.

De entre ellas, cabe destacar por su longitud, cercana a 7 km, la falla de Sarasíbar de la que apenas tenemos información superficial (figura 6.54). Por lo que respecta a la evolución tectónica más reciente, posterior al Eoceno, poco puede decirse de la zona ante la ausencia de materiales generados durante el intervalo Oligoceno-Plioceno, pero por consideraciones regionales, parece probable que la compresión perdurase al menos hasta el Mioceno inferior, siendo su acción más espectacular en la región el desplazamiento de la Cuenca de Pamplona hacia el sur.

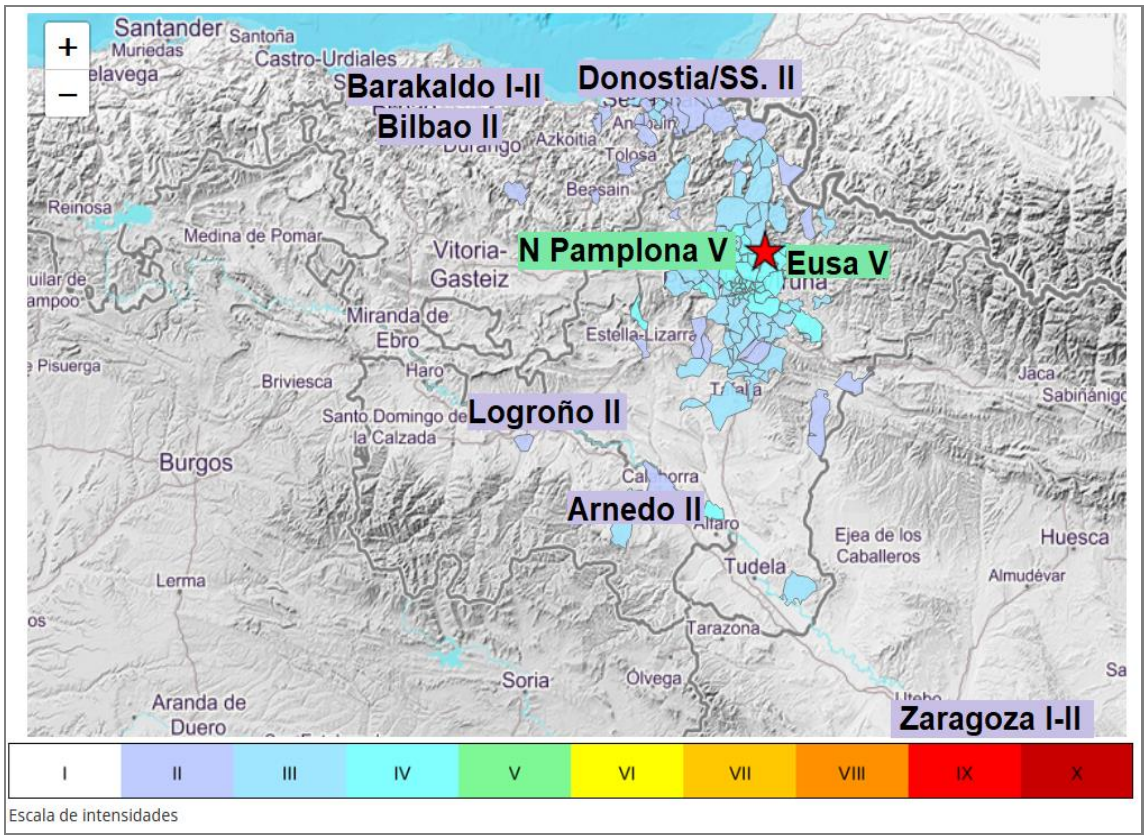


Figura 6.53. Mapa de intensidades del evento M4,2 del 10/03/2017 elaborado a partir del cuestionario del IGN que ese mismo día por la tarde ya estaba prácticamente confeccionado. A las 07:43h de la mañana del 10 de marzo de 2017, exactamente el mismo día que se cumplían 114 años del terremoto de Pamplona del 10 de marzo de 1903, comenzó una crisis sísmica al norte de Pamplona que se extendería hasta el comienzo de la serie de 2020-2022 (el 31 de agosto de 2020).

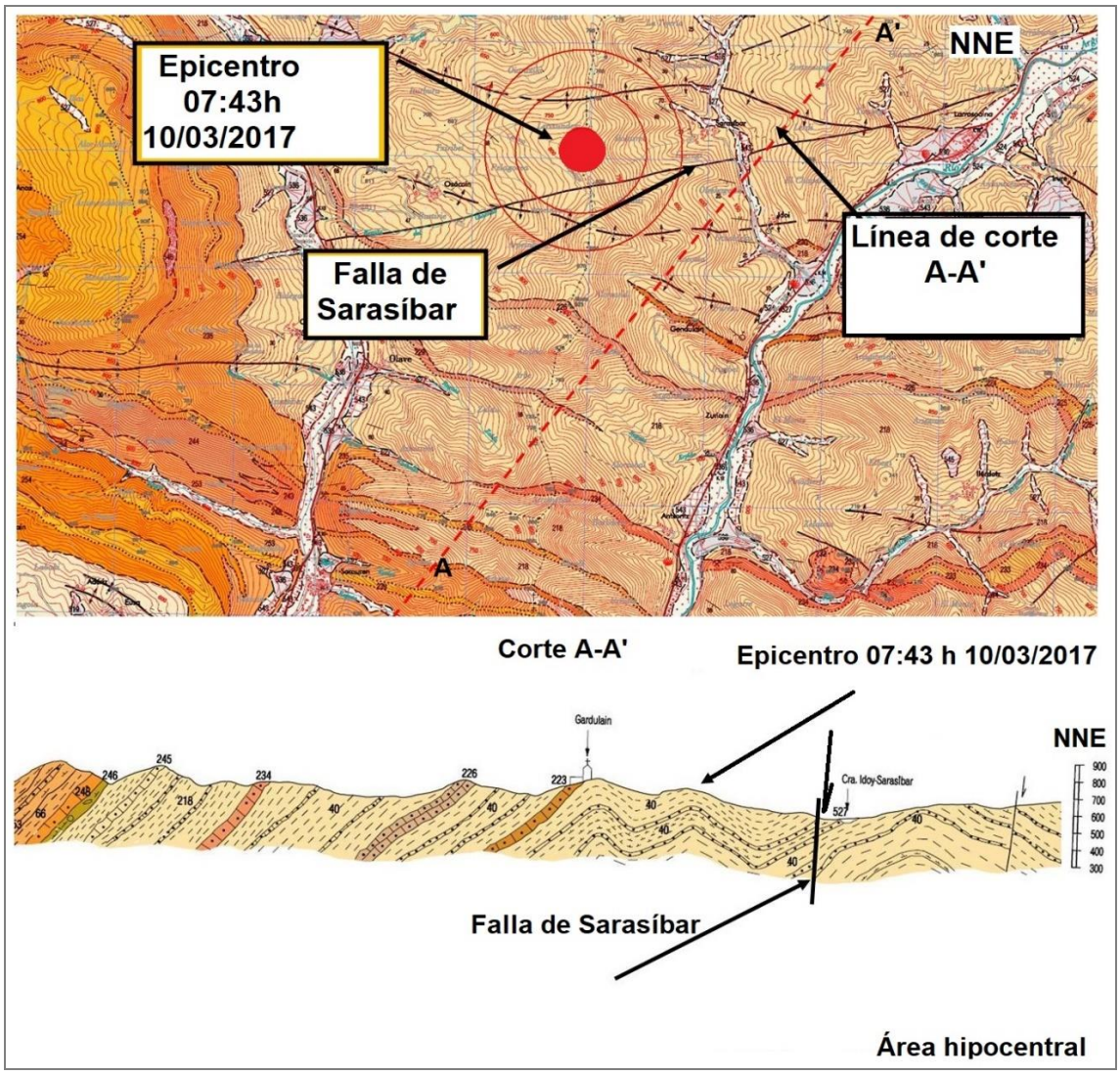


Figura 6.54. Mapa geológico y epicentro al NE de Olave del terremoto Mw4,2 del 10 de marzo de 2017. En naranja claro los materiales del Eoceno Inferior (Cuisisense) y con dirección diagonal NE-SO la falla de Sarasíbar (línea negra continua) que intercepta por debajo a ambos círculos del evento Mw4,2. (Mapa Geológico 1:25.000 115-IV Gobierno de Navarra). Corte Geológico de la zona superior al hipocentro a unos 12 km de profundidad, la formación de color naranja pálido corresponde a los niveles descritos de margas, areniscas, arcillas, calcarenitas y algunas brechas de edad Eoceno Inferior, Cuisisense. La falla situada justo encima de la zona hipocentral es conocida como *Falla de Sarasíbar*. En los primeros momentos que nos dieron profundiades de 1 km parecía la candidata a la generación del terremoto principal, tras las revisiones por parte del EMSC (2 km) el USGS (2,6 km) y el IGN (11-12 km), no podemos derivar información sobre la fuente sismogenética, dado que a esas profundidades desconocemos qué accidentes tectónicos podrían estar actuando. (Mapa Geológico 1:25.000 115-IV, Gobierno de Navarra).

Los datos más importantes de la evolución de los 198 eventos sucedidos se recogen en la siguiente figura 6.55. Fueron sentidos por la población un total de 14 terremotos, siendo el más notorio el evento principal del día 10 de marzo a las 07:43h con intensidad IV (s/EMSC), V (s/IGN) o VI (s/USGS) que se sintió en toda la zona metropolitana de Pamplona, algo que no es de extrañar atendiendo al valor de la aceleración básica (ab = 0,16g) registrada en dirección E-W en el acelerógrafo de Pamplona situado a unos 12,6 km del epicentro (ver figura 6.52). Con el tiempo, los epicentros fueron migrando hacia el suroeste y concentrándose en el área de Lizoain. Podemos concluir que a partir del 30 de agosto de 2020 comienza otra serie, la serie de Lizoain que, con casi un millar de eventos, supone la mayor concentración de sismicidad en Navarra desde que se tienen registros instrumentales.

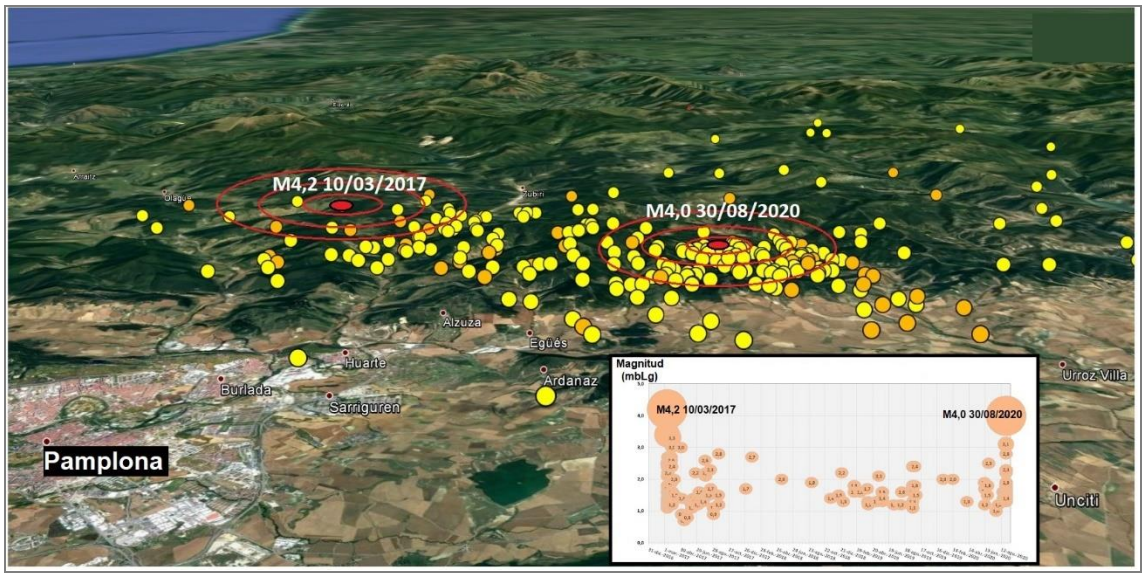


Figura 6.55. Evolución espacial y temporal de epicentros y magnitudes de 198 eventos sucedidos desde el de 10 de marzo de 2017 (M4,2) hasta el 30 de agosto de 2020 (M4,0). Durante este tiempo los epicentros fueron migrando al este y concentrándose en el área de Lizoain. Entonces comenzó la serie sísmica más densa e intensa en la Comunidad Foral desde que se tienen registros.

Es importante destacar el valor de PGA porque se cuadruplica la esperada ab = 0,04g de la norma de construcción sismorresistente en vigor desde 2002, NCSE02 y casi duplica su actualización de 2015 que, aunque no es de obligado cumplimiento debería tenerse muy presente a la hora de proyectar una buena parte de los proyectos más ambiciosos de Navarra. Recordemos que en Lorca se triplicó la expectativa de 0,12g a 0,36g. En Pamplona, en 2017, a más del doble de distancia desde el acelerógrafo hasta el epicentro, ésta se cuadruplicó. Es por lo tanto esperable que en la zona epicentral se hayan alcanzado aceleraciones cercanas o superiores a 0,2 g.

Se explica entonces, que tras las inspecciones que hicimos en el área epicentral, las grietas de las que se habla por parte de los vecinos en Olave, Egüés, Ripa, Orikain..., o las caídas de cuadros, portafotos, botellas, vasijas, libros y los crujidos en muchas viviendas de Pamplona, como en San Jorge o Santa Lucía, por ejemplo, con caídas de copas y frascos, rotura de algunos jarrones, etc.

Parece oportuno recordar que es precisamente 0,16g como aceleración de cálculo (ac) y no la esperada o básica (ab), el umbral desde el cual deberían comenzar a tomarse medidas especiales según se indica en la norma de construcción sismorresistente NCSE-02, atados en cimentación, estribos, nudos, etc.

Este terremoto dejó una importante experiencia: Pamplona disfruta de cimentaciones y construcción de calidad. Se reportan movimientos en Zaragoza capital, Logroño, Bilbao, Baracaldo y por supuesto, San Sebastián que vuelve a cumplir el patrón de foco repetidor periférico.

Fecha	Hora	Prof. (km)	Intensidad	Magnitud	Epicentro	Estación	Distancia Epicentro (km)	Aceleración máxima (mg)			ab máx.	ab máx. NCSE02
								N-S	V	E-W	(g)	(g)
11/05/2011	17:05:13	2	VI	4,5	N LORCA	Lorca	4,8	270,65	75,16	128,18	0,27	0,12
11/05/2011	18:47:26	4	VII	5,1	NE LORCA	Lorca	4,6	360,40	115,26	150,80	0,36	0,12
10/03/2017	8:43:37	12	V	4,2	NE OLAVE	Pamplona	12,4	108,01	50,39	161,33	0,16	0,04
10/03/2017	17:21:24	12	III-IV	3,4	E RIPA	Pamplona	14,1	32,66	10,98	33,93	0,03	0,04

Figura 6.56. Comparativa entre los dos terremotos de Lorca de mayo de 2011 con aceleraciones pico de 0,27g para el evento M4,5 y 0,36g para el M5,1 y los del día 10 de marzo en Pamplona 0,16g para el M4,2 y 0,03g para el M3,4. Las distancias del epicentro al acelerógrafo son más del doble en el caso de Pamplona, lo que hace suponer que pudieron darse valores mayores en la zona epicentral.

Se puede considerar que toda la serie dispersó una energía equivalente a la de un terremoto M4,6. No existen datos suficientes para hacer una aproximación de los parámetros a la Ley de Gutenberg Richter, en especial el parámetro b que estimaremos al final de este capítulo, pero la pendiente de la relación que representa la proporción entre el número de sismos más grandes con los más pequeños registrados en un mes en la zona, a partir de la cual se puede estimar la tasa temporal de terremotos que superarían una magnitud o intensidad de referencia, es $R^2=0,98$, lo que indicaría si dispusiéramos de muchos más datos, que podríamos conocer algo sobre la fuente sismogenética natural.

De momento, la relación de terremotos mayores con respecto a los más pequeños aparenta una ligerísima tendencia a favorecer la ocurrencia de terremotos mayores en relación a los de menos energía, es decir, se produciría cierta trabazón en las fallas que facilita la ocurrencia de terremotos mayores. Con el avance de las mediciones, en un futuro se podría estudiar esta recurrencia.

6.8.6.1. Sobre el favorable comportamiento general de las edificaciones del área metropolitana de Pamplona. Aspectos geotécnicos, geofísicos y estructurales.

El terremoto del 10 de marzo de 2017 nos brindó el mejor laboratorio a escala real para comprender el comportamiento de la ciudad al completo ante un impacto que cuadruplicó las expectativas de la aceleración del suelo en los siete tipos de terreno descritos, especialmente en las áreas urbanizadas sobre los perfiles E2, P12 y P22. Además del valor PGA de 0,16g, es destacable por sorpresivo el valor de ab = 0,11g en dirección N-S (figura 6.56).

Los perfiles vistos en la clasificación geotécnica elaborada para Pamplona tienen en general una respuesta bastante positiva ante el impacto sísmico; las Margas de Pamplona son un sustrato competente que no suele originar efectos adversos como amplificaciones o colapsos. Hemos visto que la cercana Vitoria, con un sustrato de margas aún más competentes (las localmente denominadas cayuelas) ni siquiera es sensible a terremotos de magnitud media generados en Navarra; es el polo opuesto a San Sebastián, que sí amplifica las ondas y por ello los terremotos navarros allí son más intensos.

En el caso de Yesa y Sangüesa habría que añadir unos terrenos mucho menos favorables, con comportamientos históricos conocidos menos benévolos que en la Cuenca de Pamplona o Vitoria. El caso de Yesa es especial, y como vimos, habría que contar con el triturado que se ha generado con las obras de ampliación a la hora de considerar el tipo de terreno y el parámetro S de la norma NCSE-02.

Por lo tanto, Pamplona ha demostrado que es, en general y salvando pocas excepciones, una ciudad configurada de manera resistente a terremotos imprevistos, tanto urbana como estructuralmente. Pero también es hora de interiorizar el hecho incontestable de estar rodeada de fuentes sismogenéticas capaces de generar aceleraciones del terreno que superan todos los pronósticos considerados a fecha de hoy, lo cual debe ponernos en guardia por el hecho de que un terremoto Mw4,2 alrededor de la ciudad es bastante más habitual de lo que creemos, y terremotos de hasta M6,3 serían posibles, como vimos con la actualización de los mapas de peligrosidad de la NCSE-02 de 2012 o hasta 6,5 del mapa tectónico de la Península Ibérica del IGME de 2004.

Con motivo del análisis de la peligrosidad sísmica en el cercano embalse de Itoiz, considerando la aceleración pico del suelo (PGA) en el trabajo *Seismic hazard assessment for the Itoiz dam site (Western Pyrenees, Spain)*. García-Mayordomo J. e Insua-Arévalo J.M. 2011, concluyen que la normativa española NCSE-02 subestima el impacto de la aceleración en esta área prepirenaica. Quizás el hecho de haber precedentes publicados como el que traemos a colación, supuso que el valor de la aceleración pico PGA de 0,16g no fuera tan sorprendente en círculos especializados.

Los cálculos de peligrosidad de la norma NCSE-02 se realizan considerando períodos de retorno de 1000 y 5000 años. Estos autores estudian el caso de la peligrosidad del embalse de Itoiz en el contexto de la sismicidad pirenaica y siguiendo la terminología de las *Federal Guidelines for Dam Safety. Earthquake Analyses and Design of Dams. U.S. Federal Emergency Management Agency (FEMA) de 2005*, calculan las acciones para una respuesta ante un terremoto denominado de base de operación (OBE) en contraste al de las normas de seguridad de evaluación sísmica (SEE), la primera representa el nivel del movimiento del suelo en el lugar donde se encuentra la presa y sólo se producen daños menores aceptables. En el segundo caso se produciría el nivel máximo de movimiento del suelo y es con este valor con el que se debería diseñar la presa para evitar catástrofes.

Considerando condiciones no acotadas, el valor PGA correspondiente al periodo de retorno de 1000 años oscilaría de 0,125g a 0,128g respectivamente. Sin embargo, para el periodo de retorno de 5000 años las diferencias serían mayores, oscilando entre 0,263g y 0,337g. Estos autores lo expresan de esta manera:

> *"Nuestros resultados sugieren que el peligro sísmico en esta área del Pirineo está infravalorado por la actual normativa sísmica española. Esta es una observación relevante, ya que las acciones sísmicas para el diseño de la mayoría de las presas de la zona han sido tomadas directamente del mapa incluido en la norma utilizando la conversión de intensidad a PGA o utilizando la ecuación de conversión de intensidad a PGA indicada en dicha norma".* Seismic hazard assessment for the Itoiz dam site (Western Pyrenees, Spain). García-Mayordomo J. Insua-Arévalo J.M. 2011

Si tomamos los datos de 9 acelerogramas registrados en marzo de 2017 de terremotos cuyas magnitudes variaron entre 2,5 y 4,2 y tomamos el M4,2 como referencia, de tal manera que la distancia de 12,6 km al epicentro vaya corregida por la relación d/D donde d es la distancia de cada evento sucedido al acelerógrafo de Pamplona y D la del terremoto de referencia (12,6 km), la variación, a pesar de ser minúscula, fuerza a que la falla o fallas que generaron el evento sean consideradas virtualmente dentro de la misma fuente sismogénica. Los resultados están muy en consonancia con lo aportado por estos autores para períodos de 5000 años. La relación PGA=81M-219 arroja valores de hasta 0,2g para terremotos generados en esa fuente M5 y hasta 0,3g si llegasen a M6,3. Volveremos sobre este tema más adelante.

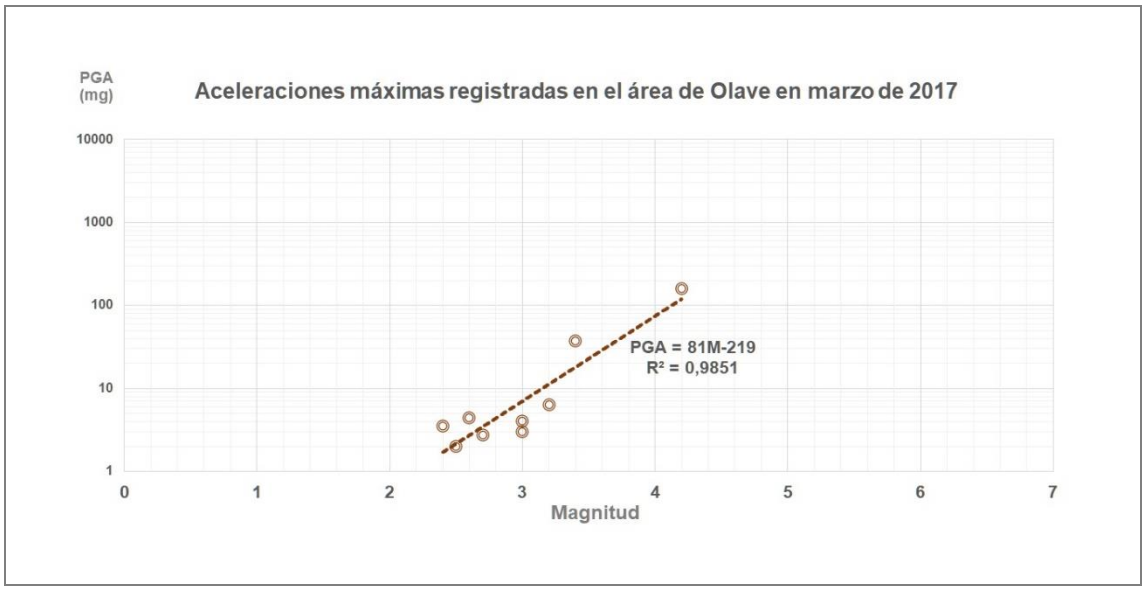


Figura 6.57. Extrapolación del valor de PGA recogida en el acelerógrafo de Pamplona a 12,6 km del evento del 10 de marzo de 2017 en Olave, desde el valor pico de 161,33 mg. Los datos de aceleración, admitiendo la linealidad en la rotura de una falla más grande, queda en el entorno de 0,2g-0,3g, para terremotos M5 y M6,3 acordes con los calculados por los autores citados para periodos de 5000 años.

Como pronóstico, la confección de mapas de riesgo sísmico locales o microzonificación sísmica (especialmente de aceleraciones pico) ha demostrado ser la mejor de las herramientas para adelantarse a estos fenómenos naturales, su uso salva vidas y supone un importante ahorro para la ciudadanía. El reto del futuro urbanismo, por tanto, incluirá este cambio de perspectiva histórica que parece tener su inicio en 2004 con motivo de lo sucedido alrededor de Itoiz. Es sólo cuestión de tiempo que lo haga, y esperemos que, como en caso de Lorca, no sea después de una desgracia.

Es un hecho contrastado que esta área ya había temblado en ocasiones anteriores (ver figura 6.65), pero no con la magnitud y frecuencia que la ha venido haciendo desde 2004. La no existencia de una red digital como la que se fue implantando con la entrada del siglo XXI nos puede dar una idea equivocada del potencial sísmico de las fallas alrededor de Pamplona, especialmente las situadas al N, NE y E de la ciudad.

Al igual que en el caso de Pamplona y Lizarraga, el área de Olave-Aoiz quedó delimitada por la línea de sensibilidad M3,2 (figura 6.36) así que la mala calidad del registro analógico, la mayoría de las veces debido al ruido cultural o falta de telemetría, dejó, inexorablemente, muchos eventos menores que a veces, la gente sentía, pero nunca daba el salto al mundo científico ni al de Protección Civil.

En este caso el nivel se mejoraba incluyendo datos procedentes de estaciones de interrogación y datos auxiliares de agencias como la francesa, así como nuevas estaciones que se fueron incorporando a la red analógica a través de los años, especialmente hubo un cambio de percepción tras la construcción el embalse de Itoiz. Fue a partir del año 2000 que se instalaron estaciones digitales de banda ancha y tuvimos una nueva visión de lo que significa un registro continuo por debajo de magnitudes M3, por ejemplo.

Una manera de visualizarlo es considerando un umbral (subjetivo) de sensibilidad extraído de los datos de intensidad en la zona de Olave y Lizoain; como veremos, éste puede considerarse de manera probabilística en torno a la magnitud 2,4 cuando comienzan los enjambres de esa área y hasta 2,2 según avanzan (más adelante profundizaremos en este aspecto psicológico).

Las personas que sienten la intensidad de un terremoto en el área de Olave-Aoiz suelen sentir los terremotos a partir de esa magnitud y con el tiempo ésta disminuye hasta 2,2 e incluso menos (tenemos datos en Ibiriku y Egüés, al NE de Pamplona, con sensibilidades a magnitudes tan bajas como de 0,9 a 1,3), mientras los datos de intensidad se incrementan levemente para finalmente caer ambas (las personas que viven en el área y sienten terremotos $0,5<M<2,0$ pasan días y semanas rellenando cuestionarios hasta que se aburren).

El fenómeno ya se había vivido con un enjambre en abril de 1995, pero apenas teníamos información al respecto. En la siguiente figura 6.58 se puede ver un antes y un después de la irrupción de la era instrumental digital, el espectro abarca los 40 años que van desde 1980 hasta 2020 y el cambio que supuso para esta área sísmica de Olave-Aoiz la entrada en la era digital con el inicio del siglo XXI.

Si comparamos lo que podemos extraer de lo vivido por las personas entre los episodios de sismicidad (por encima de la línea amarilla) en abril de 1995, en 2004-2005, 2017 y el de 2020-2022, la sismicidad de fondo (por debajo de la línea amarilla) a partir de 2002 está presente por una cuestión técnica. Fue entonces cuando comenzaron a instalarse más aparatos de medida y a medirse con mejor precisión cada vez menores magnitudes.

Otro aspecto a destacar es que el área de Olave-Aoiz no suele presentar grandes periodos de tranquilidad sísmica. Desde que se desplegó la red digital tenemos las evidencias de un ruido de fondo constante que apenas se interrumpe con intervalos de uno o dos meses sin sismicidad. Si observamos lo sucedido desde 2004 con el primer llenado de Itoiz, considerando solamente los años 2004 y 2005, vemos que los epicentros se proyectan muy cerca del embalse a un par de km al oeste.

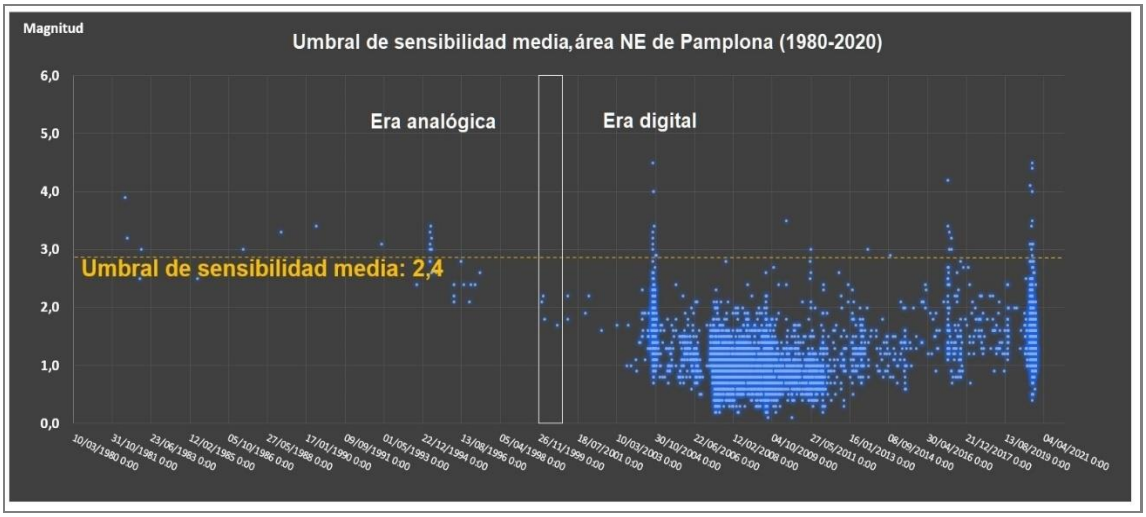


Figura 6.58. Comparación entre los episodios de magnitudes medias sentidas (por encima de la línea amarilla M2,4) en abril de 1995, en 2004-2005, 2017 y el de 2020-2021. La sismicidad de fondo (por debajo de la línea amarilla) a partir de 2002 está presente por una cuestión técnica, comenzaron a instalarse más aparatos de medida y a medirse con mejor precisión cada vez menores magnitudes.

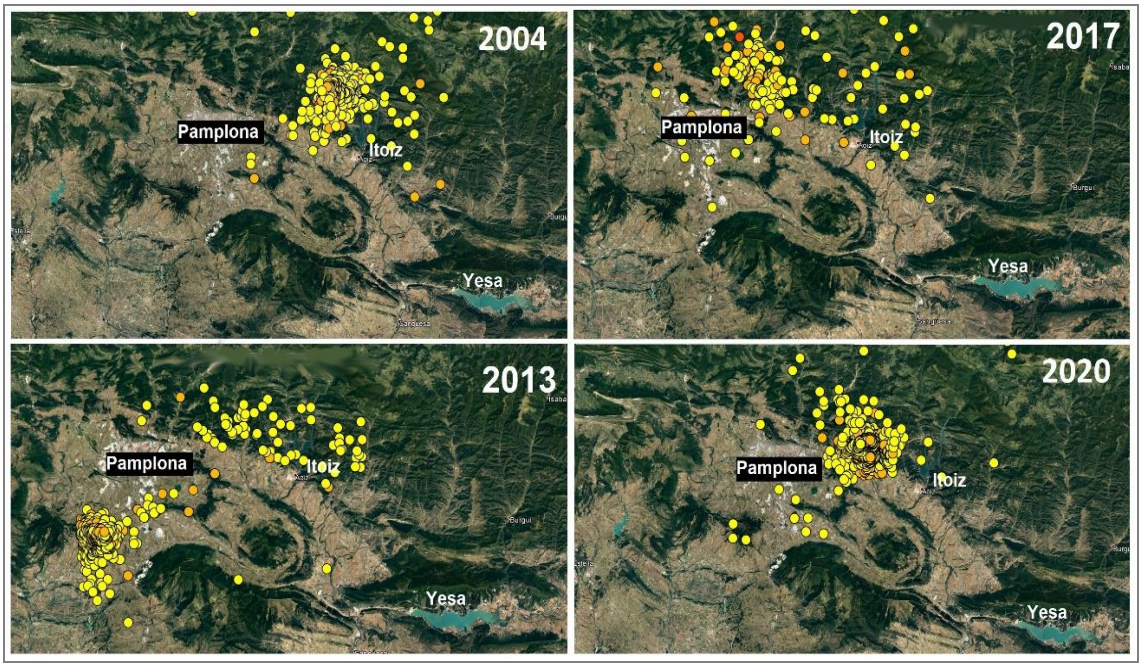


Figura 6.59. Epicentros proyectados de los enjambres de 2004-2005, 2013 (concentrados al sur de la ciudad), 2017-2019 y 2020-2021. Obsérvese que, aunque la serie de 2013 se concentra en su mayoría al sur de Pamplona, en la Sierra de El Perdón, el área que va de Olave a Aoiz no cesó de temblar ese año, incluso con eventos M>3 sentidos en los barrios norte y este del área metropolitana.

Durante el enjambre de 2013, al sur de la ciudad de Pamplona, no cesó la actividad sísmica en esta área del NE, aunque la mayor parte de los epicentros se encuentran en la Sierra de El Perdón (Figura 6.59). Es a partir del 10 de marzo de 2017 que los epicentros iniciales al norte de Pamplona y más al oeste de Itoiz van migrando en 2018 y 2019 hasta concentrarse durante 2020 y 2021 en torno a Lizoain, más cerca de Pamplona y algo más alejados de Itoiz que en 2004. Desde 2004 se han generado en esta área los terremotos de mayor intensidad vividos en Pamplona y sentidos en otras comunidades, incluyendo Aragón, La Rioja, Euskadi, Cataluña y el sur de Francia, exceptuando los terremotos de 1903, 1982 y 1998, con una diferencia importante en la manera de medir magnitud e intensidad, el área sigue generando una sismicidad relevante (ver figura 6.58). Sin embargo, aún no disponemos de estudios a esa altura de relevancia sobre fallas candidatas o tasas de movimiento (ver figura 6.65).

Cómo puede afectar este hecho a las construcciones, edificaciones o infraestructuras erigidas en un Terreno tipo III (NCSE-02) más acorde con un terreno como los que podamos encontrar en las áreas cartografiadas como perfiles Pamplona P12 y P22 e incluso zonas brechificadas como los descritos perfiles C y E2, o como hemos visto en la ladera derecha de Yesa con cierta componente viscosa, arrojaría un valor del parámetro S=1,10. Para un Terreno blando tipo IV del que habría que hacer estudios especiales, obtenemos un valor S=1,16. Aquí S es el coeficiente de amplificación del terreno. Este coeficiente depende de ($\varrho \cdot ab$) donde ϱ vale 1 en una construcción de uso normal como coeficiente adimensional de riesgo: $\varrho=(t/50)^{0.37}$ y depende de la probabilidad de que se exceda la aceleración de cálculo (ac) en el periodo de vida para el que se proyecta la construcción (t) que, para edificios de viviendas, considerados construcciones de importancia normal t=50 años es $\varrho=1$. En caso de que se considere una construcción de importancia especial $\varrho=1,3$. El coeficiente del terreno para un área sismogenética como la situada al norte-este de Pamplona satisface un valor de S para unas condiciones ($0,1g<\varrho \cdot ab<0,4g$). Es decir: $S = C/1,25+3,33[\varrho.ab/g)-0,1](1-C/1,25)$ s/NCSE-02.

El coeficiente C depende de las características geotécnicas del terreno de cimentación obtenidas a partir del estudio geotécnico, hasta una profundidad de 30 m. Si el terreno no es uniforme, se utiliza la expresión: $C=\sum Ci.ei/30$.

Un terreno de arcillas y gravas de los tipos definidos como P12 o P22 o de "cascajo" suelto con C=2 y de unos 6 o 10 m de espesor sobre Margas de Pamplona inicialmente alteradas, nos arrojaría una serie de datos a reconsiderar a la hora de calcular ac a partir de los hechos observados y de la aportación de los trabajos que se han desarrollado en los últimos años en esta área sismogenética al norte y este de la capital, Pamplona.

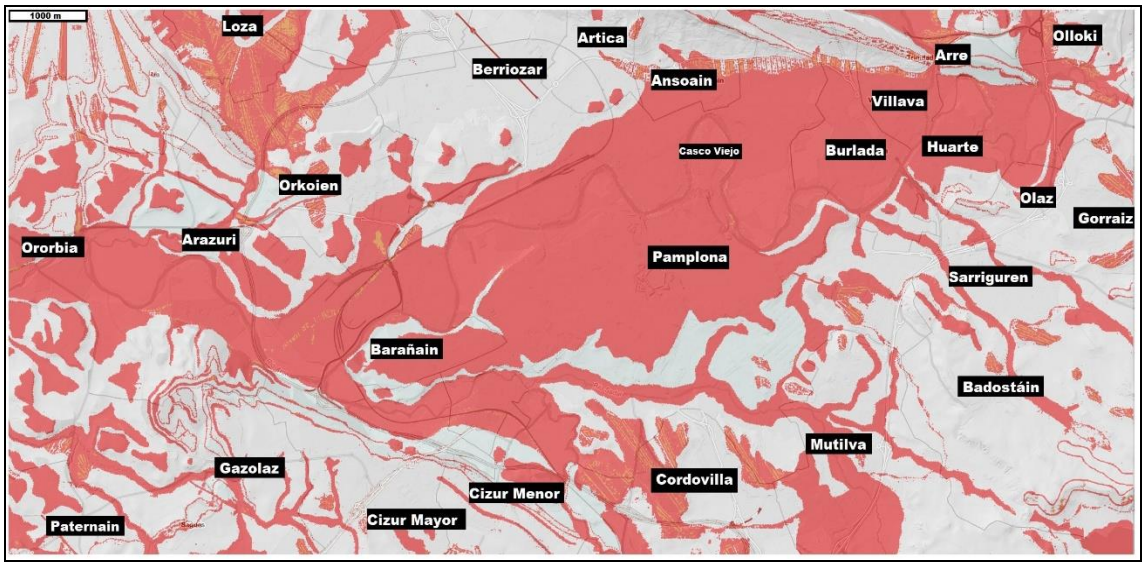


Figura 6.60. En rojo quedarían englobadas aquellas zonas en que, una vez definidas como pertenecientes a los perfiles geotécnicos P12, P22 y E2+C, sería recomendable considerar un estudio exigente de la seguridad a partir de ac en relación a terremotos que generen PGA superior a 0,16g.

Con una ab de 0,16g como la PGA registrada en el evento del 10 de marzo de 2017 en el acelerógrafo de la ciudad, las aceleraciones de cálculo (ac) oscilarían entre 0,19g y 0,20g y los diseños de muchas cimentaciones, además de ciertas estructuras y por supuesto, los elementos no estructurales, deberían ser revisados.

Si esperamos un terremoto extraordinario con ab=0,24g extrapolando los datos del 10 de marzo de 2017 a fallas de mayor longitud capaces de generar ese valor pico con terremotos M>5,5, las aceleraciones de cálculo (ac) oscilarían entre 0,28g y 0,30g si aplicamos una extrapolación lineal.

En el caso de construcciones de importancia especial con ab=0,16g, la aceleración de cálculo (ac) varía de 0,23g a 0,26g y con ab=0,24g, ac= 0,36-0,38g. En la anterior figura 6.60 se pueden visualizar en rojo cuáles serían las áreas potencialmente englobadas bajo los perfiles P12 y P22 y la combinación E2+C en las que sería recomendable comenzar a considerar un estudio algo más ambicioso en lo que a seguridad estructural y no estructural se refiere, en consonancia con lo investigado.

Coincidiendo con la actualización de los mapas de peligrosidad sísmica en 2015, se presentó un trabajo en la Universidad de Oviedo: *Zonación Sismotectónica y Peligrosidad Sísmica en la Región Cantábrica (Norte de España)* de Alba Díaz González, donde estudia la peligrosidad sísmica y los valores de aceleración para el área de Pamplona. Comenta la autora:

> *"En la mitad septentrional de Navarra, la Norma Sismorresistente ha calculado un valor de aceleración de 0,04g, y en la mitad sur, valores inferiores a 0,04g, mientras que, la peligrosidad sísmica obtenida en este trabajo en Navarra es superior a 0,04g en toda la comunidad, aumentando significativamente hacia el NE, y llegando a alcanzar en la frontera con Francia valores de 0,16g. Teniendo en cuenta que al SO de Francia, en su frontera con Navarra y Aragón, hay registrados varios sismos de magnitud superior a 4,5 y uno de magnitud 5,3 en el año 1967, y en comparación con los valores de aceleración obtenidos en este estudio, parece que la peligrosidad sísmica determinada por la NCSE-02 está subestimada. Entre los años 2003 y 2007 se llevó a cabo el proyecto Interreg IIIIa ISARD, con el objetivo de obtener información para la prevención y operación sobre el Riesgo Sísmico en la región Pirenaica, mediante la integración de datos de España, Francia y Andorra. Si en esta ocasión se comparan los resultados obtenidos con los valores de peligrosidad del proyecto ISARD se advierte que los valores de este último son mayores El proyecto ISARD (2007), proporciona valores de peligrosidad sísmica de 0,15g para la frontera entre Navarra y Francia, valores muy aproximados a los resultados de este trabajo, donde en esa misma zona los valores obtenidos son de 0,16g. En la zona de Pamplona, la aceleración calculada en el proyecto ISARD es ligeramente inferior que la obtenida en este estudio, estando la primera comprendida entre 0,075-0,10g y la segunda entre 0,10-0,12g".* Zonación Sismotectónica y Peligrosidad Sísmica en la Región Cantábrica (Norte de España). Díaz González A. 2015.

6.8.6.2. Conclusiones.

El área situada al norte y este de Pamplona, coincidiendo con las estructuras NO-SE, seguramente relacionadas con el cabalgamiento de Roncesvalles, conforman el límite septentrional de la Cuenca de Pamplona.

Los episodios sísmicos vividos con epicentros entre Olave y Lizoain, especialmente en 1995, 2004-2009 con el primer llenado del embalse de Itoiz y en 2017-2020-2022, algo más cerca de la ciudad, provienen de dichas estructuras.

Cuando han temblado otras áreas como en el caso de 1982, 2013 y 2015 en las inmediaciones de la Sierra de El Perdón y en la zona de los diapiros (Etxauri, Ripa, etc.) el área NE de Pamplona también presentaba actividad sísmica, a veces con eventos sentidos por la población M>3.

En lo que va de siglo XXI se han producido al menos cinco terremotos que han superado la intensidad IV-V, cuatro de ellos en el área noreste de la ciudad, dos la madrugada del 1 de octubre de 2020.

El terremoto M4,2 e intensidad V (EMS) VI (USGS-MMI) del 10 de marzo de 2017 a las 07:43h en Olave generó una aceleración pico del suelo (PGA) de 0,16g cuadruplicando las expectativas de la norma NCSE-02 y duplicando la actualización de los mapas de ab esperada de 2015 (Díaz A. 2013).

Desde que existen datos digitales, se comprueba que esta área apenas presenta episodios sin actividad sísmica. Extrapolando los datos al pasado, cuando el umbral de sensibilidad era mucho más alto, vemos que a través de la recopilación de datos analógicos, el hecho de ser la Cuenca de Pamplona una unidad alóctona y vistas las apreciaciones a través de la hemeroteca, todo sugiere que siempre debió ser así.

Tras el primer llenado de Itoiz se vivió un episodio especial de estrés debido a la difusión de una presión de poro a la que, posiblemente, el terreno aún se esté adecuando de forma marginal.

Cuál o cuáles han sido las fallas que originaron los frecuentes episodios símicos con impactos notables en las áreas afectadas y en los barrios norte y este de Pamplona, con intensidades mayores de V, es una investigación que aún está pendiente.

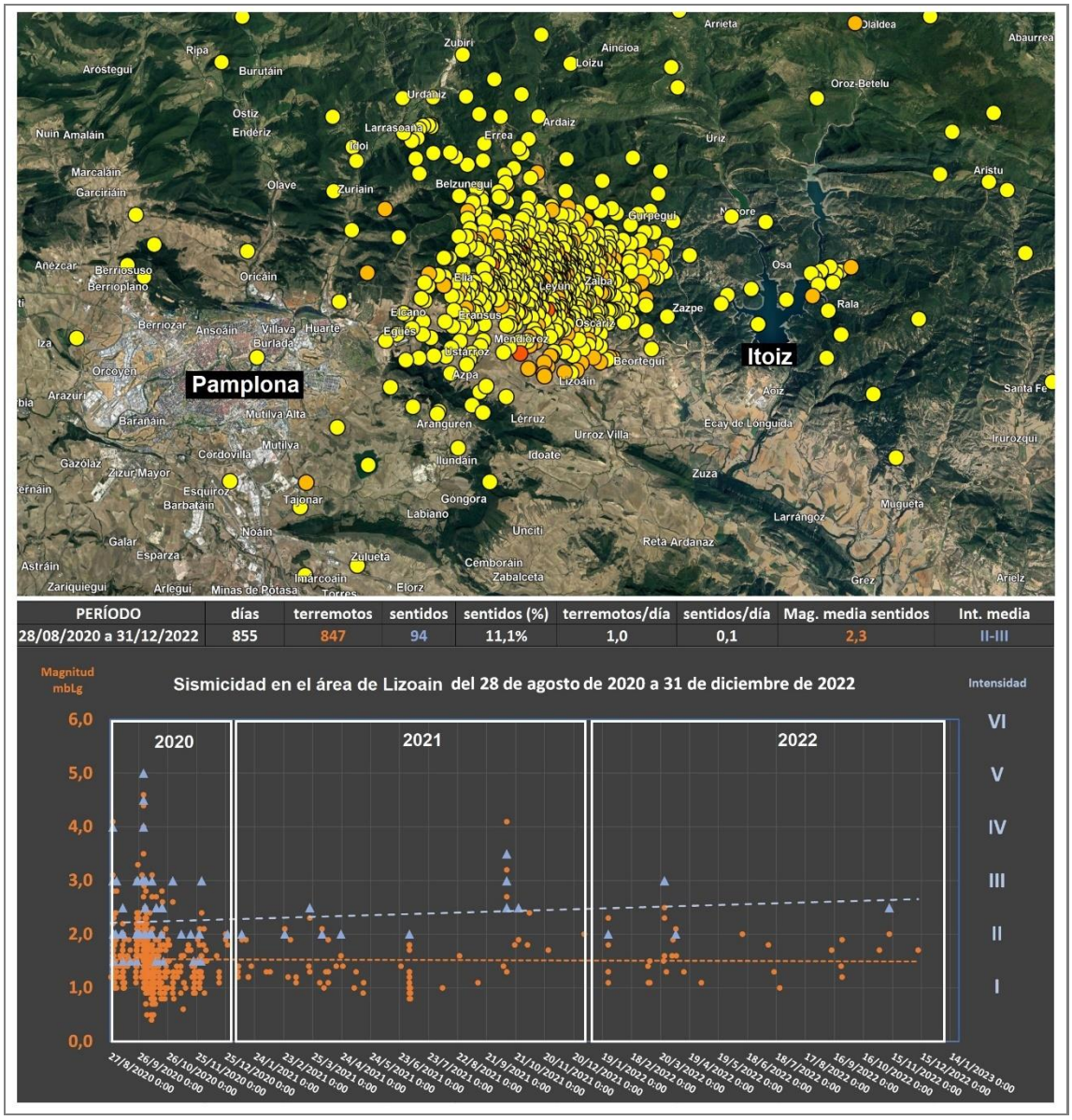
Existen numerosas estructuras activas con gran diversidad de mecanismos que no están recogidas en los mapas. Así, hablar de un régimen de esfuerzos, con un patrón a regional es imposible.

Los mecanismos focales son predominantemente normales con el eje de tensión perpendicular a la alineación de los Pirineos, lo que sugiere que existe en toda la zona un régimen extensivo NNE-SSO. Esta observación es congruente con los datos de desplazamientos observados por satélite. Con el EGMS de Copernicus en el oeste de los Pirineos se detecta un movimiento algo menor de 1 mm/año.

Todos estos datos hablan de que una seguridad sísmica basada exclusivamente en la gestión probabilística derivada de los catálogos sísmicos existentes, en los alrededores de Pamplona ha perdido efectividad.

6.8.7. Los enjambres de 2020-2022.

A esta serie le adjudicamos un inicio a finales de agosto de 2020 sin haber cesado completamente la actividad sísmica que comenzó en 2017 en Olave y haber mantenido como "ruido de fondo" un registro prácticamente continuo de la sismicidad consistente en pequeños terremotos imperceptibles (ver figura 6.58).



PERÍODO	días	terremotos	sentidos	sentidos (%)	terremotos/día	sentidos/día	Mag. media sentidos	Int. media
28/08/2020 a 31/12/2022	855	847	94	11,1%	1,0	0,1	2,3	II-III

Figura 6.61. Distribución espacial (arriba) y temporal (abajo) de la sismicidad (magnitud en naranja e intensidad en azul) desde el 28 de agosto de 2020 al 31 de diciembre de 2022 en el área de Lizoain.

6.8.7.1. Distribución de la sismicidad.

La observación temporal indica que los epicentros fueron migrando al este desde el inicio de la serie de Olave en 2107. El día 30 de agosto de 2020 se produjo el primer terremoto M4,0 sentido con intensidad III-IV por la población de Pamplona y en el área metropolitana más cercana con intensidad hasta IV. Seguidamente hubo réplicas continuas y sentidas en las áreas más cercanas a Lizoain. Por primera vez tenemos en esta área datos de intensidades I a III con terremotos de magnitudes menores de 2.

Desde el M4,0 del 30 de agosto se producen un total de 847 terremotos hasta el día 1 de enero de 2023, de ellos 94 son sentidos por la población (11,1%). La magnitud media de los terremotos sentidos es menor que en 2017: M2,3 y la intensidad media II-III. Se produce una media de un terremoto al día incluyendo los menores de magnitud 1 que se contabilizan a partir de octubre con la llegada de estaciones móviles del IGN a petición del Gobierno de Navarra. Se dio el caso, como en otras ocasiones, de que según disminuía la magnitud, aumentaba levemente la intensidad, hasta que el fenómeno se hizo habitual. Ello es debido a causas psicológicas, por lo que consultamos a la psicóloga especialista en comportamiento ante riesgos naturales, Beatriz Echevarría, y ante los datos, concluimos que (como se puede ver en la gráfica de la figura 6.61) existe un factor subjetivo importante a la hora de valorar la intensidad, no solamente se trataría de una cuestión geotécnica (efecto sitio, topografía, etc.).

La mayor parte de la sismicidad se concentra en los cuatro meses de septiembre a diciembre de 2020 (88%) siendo los meses de septiembre y octubre de 2020 los que aglutinan las tres cuartas partes de toda la serie (74%), el resto quedan distribuidos entre 2021 y 2022. Solamente el día 1 de octubre de 2020 se producen 109 terremotos (13% del total de los dos años y cuatro meses) con los tres impactos M4,6, M4,0 y M4,4 a las 00:02h, 01:37h y a las 02:21h además de la decena de temblores que se sienten en toda Pamplona y muchos más en el área epicentral. Tras inspeccionar la zona de Lizoain y alrededores comprobamos que no todos aparecen en los cuestionarios, podríamos hablar de, al menos, una veintena de ellos sentidos desde Aoiz a Pamplona.

Quiero agradecer al arquitecto especialista en daños a edificios por sismicidad, Patrick Murphy, su generosidad a la hora de venir a inspeccionar el área y permitirnos utilizar sus excelentes y didácticos dibujos, tanto sobre los efectos de los terremotos como los explicativos de campo. Nos acompañó en las inspecciones en Lizoain, Leyún, Redín, Urroz, Ekai en octubre de 2020. También nos conocimos en Lorca. Todas las afecciones que inspeccionamos después del 1 de octubre de 2020 mostraron que los daños fueron leves, destacando caídas de falsos techos, grietas en mampostería o tabiquería de ladrillo y desperfectos por objetos caídos, cuadros, lámparas, estanterías, libros, etc.

Figura 6.62. Algunos de los daños observados más comunes en los barrios norte y en el área epicentral fueron leves: a) caída de falso techo en el barrio de Santa Lucía, b) una grieta en una vivienda de Lizoain, c) una grieta en tabiquería en un sexto piso del barrio norte de Pamplona, San Jorge y d) una grieta en la sillería en Lizoain.

Esta serie supone la mayor concentración de sismicidad conocida en Navarra (hubo varios días en que se contabilizaron más de cincuenta sismos, 109 el día 1 de octubre) triplicando los datos de hasta una treintena de terremotos pequeños y superficiales registrada en la Sierra de El Perdón en 2013. Se dispuso de una red digital y una manera de extracción de datos prácticamente inmediata.

El evento recuerda mucho a lo ocurrido la madrugada del l0 de marzo de 1903 o al episodio de 1982 y menos a lo sucedido en 2004 o en 2013. Sabemos que lo sucedido en 2004 fue debido a circunstancias especiales inducidas por el primer llenado de Itoiz y que en 2013 tuvieron una importancia relevante, especialmente al inicio de la serie, la disposición de las galerías salinas abandonadas y unas lluvias extraordinarias que nunca más han sido superadas.

La actividad sísmica disminuyó notablemente durante 2021 respecto de 2020, registrándose 3 intervalos de más de un mes sin actividad sísmica: del 16/05/2021 al 24/06/2021. Otro del 04/07/2021 al 06/08/2021 y un tercero del 23/11 al 30/12/2021 (figura 6.63).

Seguir estudiando este episodio casi continuo que de cuando en cuando recuerda que sigue ahí, puede darnos pistas sobre la sismicidad natural en el área de convergencia del Cabalgamiento de Roncesvalles en contacto con la Cuenca de Pamplona como unidad alóctona y su impacto en las edificaciones e infraestructuras situadas sobre las Margas de Pamplona, directamente o con el desarrollo de los perfiles geotécnicos ajustados a su evolución geomorfológica, especialmente los perfiles E2, P12 y P22 descritos en la microzonación geotécnica.

Figura 6.63. La mayor densidad de terremotos se produce en 2020, durante el año 2021 disminuyó notablemente la actividad sísmica, registrándose 3 intervalos de más de un mes sin actividad sísmica: del 16/05/2021 al 24/06/2021; otro del 04/07/2021 al 06/08/2021 y un tercero del 23/11 al 30/12/2021. De las profundidades de los 754 terremotos arriba representados sucedidos entre el 28 de agosto de 2020 y el 3 de julio de 2021 solo 5 de ellos aparecen a partir de 15 km de profundidad, siendo la mayoría eventos localizados entre 0 y 1 km (54%), entre 1 y 3 km (8%), entre 3 y 5 (17%), entre 5 y 10 (16%) y a partir de 10 (4%).

6.8.7.2. Reajuste constante.

Uno de los debates más frecuentes, aparte de los relacionados con los aspectos geotécnicos y geomecánicos que dieron lugar a cursos y seminarios para Protección Civil, Colegio de Arquitectos o ayuntamientos afectados, fue la recurrente pregunta de si lo sucedido aquellos días de 2020 y algo menos en 2021 y 2022 era también una herencia de Itoiz. Por ejemplo, durante los años 2020 y 2021 solo hubo tres intervalos de más de un mes de duración sin actividad sísmica en la zona (figura 6.63).

Es muy difícil contestar a esta cuestión, pero desde 2004 parece que el terreno ya habría tenido tiempo de reajustarse. Bien es verdad que ya nadie discute la influencia del primer llenado del embalse en la inducción o adelanto de la sismicidad, pero también es verdad que desde 2004 a 2020 se vivieron cerca de 16 ciclos de embalse y desembalse.

En la siguiente figura puede verse la proyección epicentral sobre mapa satelital de la sismicidad ocurrida en 2004-2007 comparada con la ocurrida en 2020-2022. La crisis que comenzó con el primer llenado de Itoiz en septiembre de 2004 se vuelve más densa pero menos enérgica en 2007 y se localiza en una franja de dirección NO-SE con el embalse de Itoiz más o menos en el centro a unos 20 km de Pamplona. Lo sucedido en 2020-2022 se concentra a medio camino entre Itoiz y Pamplona, aproximadamente en Leyún a unos 10 km de la ciudad. Hay una diferencia entre ambos "centros de gravedad" de unos 10 km.

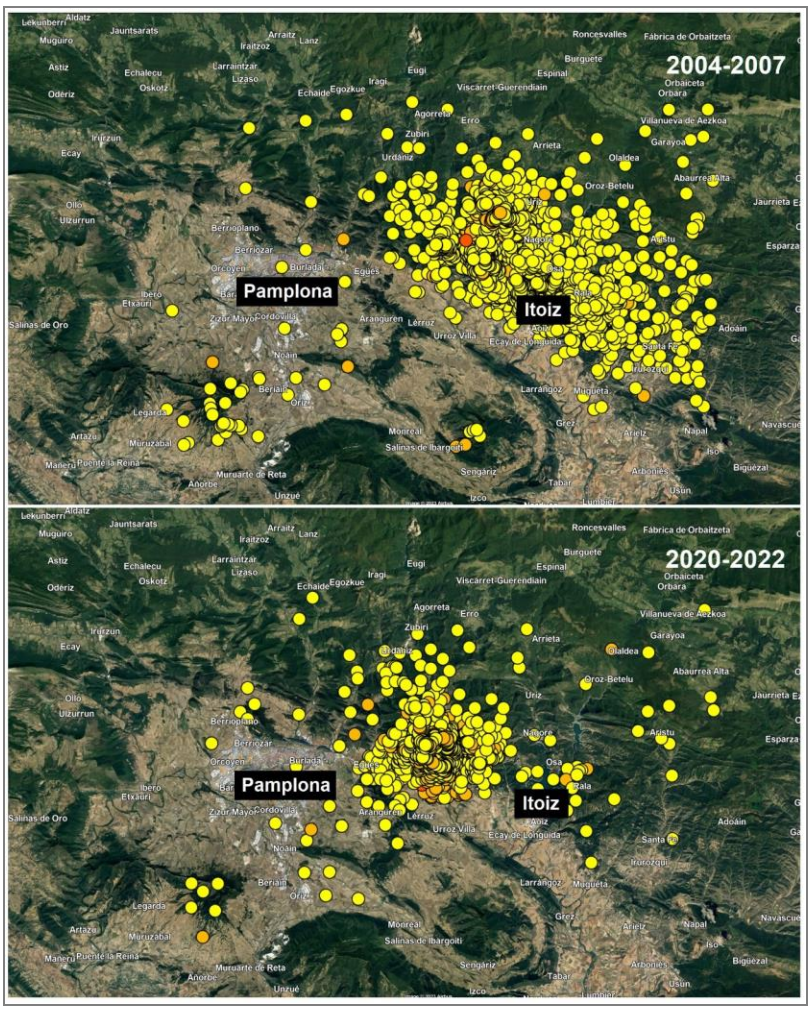


Figura 6.64. Proyección sobre mapa satelital de los epicentros de 2004-2007 (arriba) comparada con la ocurrida en 2020-2022 (abajo). La crisis que comenzó con el primer llenado de Itoiz en septiembre de 2004 se vuelve más densa pero menos enérgica en 2007 abarcando una enorme franja de dirección NO-SE con el embalse más o menos en el centro. Lo sucedido en 2020-2022 se concentra a medio camino entre Itoiz y Pamplona (en Leyún a unos 10 km de ambos lugares) bastante más cerca de la ciudad. La diferencia entre el punto que representaría el centro de ambas series es de unos 10 km.

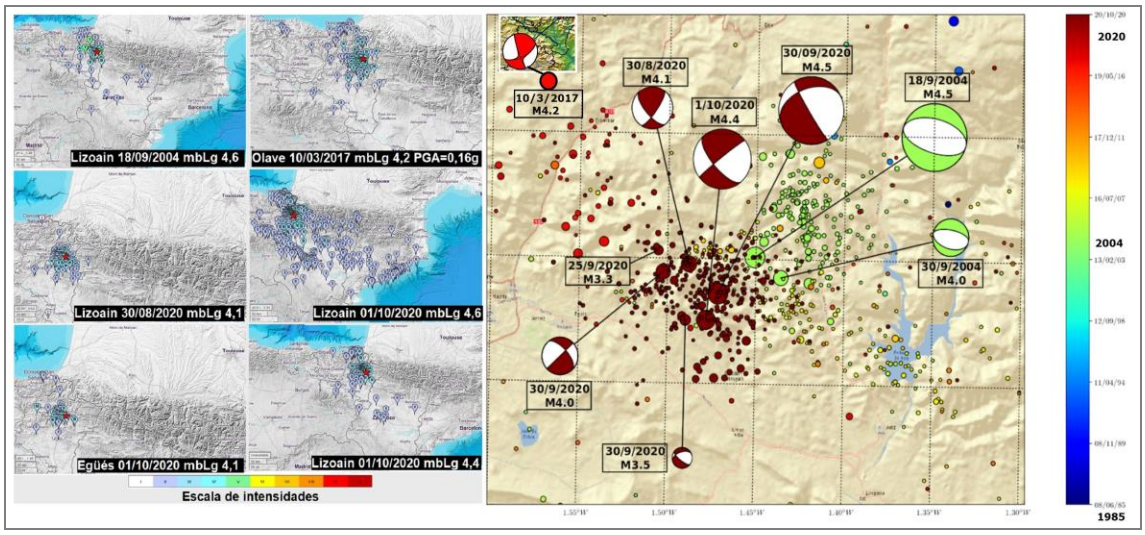


Figura 6.65. A la izquierda, extractos de los testimonios de intensidad de seis terremotos en la zona epicentral que va desde Olave a Lizoáin-Egüés-Esteríbar-Aoiz. El primero es el M4,6 sucedido el 18 de septiembre de 2004 con el primer llenado de Itoiz en Lizoain. El segundo es el de marzo de 2017 en Olave. El tercero, el M4,1 en Lizoain en agosto de 2020, da comienzo a la serie de 2020-2022 y los siguientes son tres de los sucedidos en la madrugada del 1 de octubre de 2020. El evento de Olave del 10 marzo de 2017 (en rojo a la derecha) registró una aceleración del terreno de 0,16g en el acelerógrafo de Pamplona, supone cuatro veces lo esperado según la norma NCSE-02 o casi el doble de la actualización de 2015 (0,09g). Los terremotos M4,6, M4,1 y M4,4 del 1 de octubre también presentan testimonios en Francia que se pueden recoger en el ISARD o en RENASS. De los seis terremotos, cuatro pertenecen al enjambre 2020-2022. Los tres últimos son los más intensos de más de un centenar sucedidos el 1 de octubre de 2020. Obsérvense los testimonios del evento M4,6 que van desde Vizcaya a Tarragona y que se puede ampliar con los datos franceses en Burdeos, Pau o Perpiñán. A la derecha, epicentros desde 1985 (azul) hasta 2020 (granate) con varios mecanismos focales como los dos terremotos de Lizoain y Nagore de 2004 (en verde), Olave 2017 (en rojo) y cinco de la serie de 2020 en Lizoain. Presentan fundamentalmente mecanismos transcurrentes con planos nodales SO-NE y NO-SE y componente oblicua. El M3,5 del 30/09/2020 muestra una solución de falla normal con componente de desgarre. El actual régimen tectónico en el área al norte-este de Pamplona es bastante complejo y no existe un criterio claro para concretar hipótesis plausibles de esfuerzos. Existen numerosas estructuras activas con gran diversidad de mecanismos que ni siquiera aparecen en los mapas. En estas condiciones, hablar de un régimen de esfuerzos, de un modelo sismotectónico homogéneo o de un único patrón a nivel regional es imposible. Sin embargo, los mecanismos focales son predominantemente normales con el eje de tensión perpendicular a la alineación de la cordillera pirenaica. Esto sugiere que actualmente existe en toda la zona un régimen extensivo en dirección NNE-SSO, lo que concuerda bien con los datos de desplazamientos observados por satélite, por ejemplo con EGMS de Copernicus en el oeste de los Pirineos. La tasa actual de deformación es muy baja, menor de 1 mm/año. La zona pirenaica presenta una actividad sísmica constante y constituyen la segunda región sísmicamente más activa de la Península Ibérica. Por ello, en esta región, basar la seguridad sísmica en catálogos es notablemente ineficiente. Fuente de mapas y mecanismos: IGN, 2020.

Es probable que el ruido de fondo continuo tenga que ver con ello, como sucede en la mayoría de estas obras en cualquier lugar del planeta, pero no cabe duda de que la densa red de monitorización nos da una imagen más real, especialmente al considerar el crujido continuo de un área más o menos extensa de la corteza que va cambiando sus condiciones mecánicas. Para la caracterización de algunos aspectos geomecánicos en las áreas sismogénicas se suele recurrir a la relación de Richter de "frecuencia frente a magnitud", dadas por la sismicidad reportada en algún catálogo de referencia como los que se facilitan desde el IGN. Esta relación empírica que muestra un histograma de magnitudes e incluso de intensidades si las cuantificamos, se conoce como Ley de Gutenberg-Richter y se expresa como: $Log_{10}(N) = a - b \cdot M$.

N es el número de eventos con magnitudes mayores o iguales a la magnitud M y a representa la actividad sísmica o el número de sismos con magnitudes mayores que una determinada M durante el tiempo t, que considere el catálogo. El parámetro b es el coeficiente que indica la proporción logarítmica de sismos pequeños con respecto a la cantidad de sismos grandes. Su valor fluctúa generalmente de 0,6 a 1,2 y se considera el valor 1,0 como el "atractor fractal" en terremotos naturales de origen puramente tectónico y no debidos a condiciones climáticas extraordinarias, sismicidad inducida por embalses, fracking, minería a cielo abierto, inyecciones masivas de aguas de la minería de hidrocarburos o de potasas u otras actividades sismogenéticas. Cuanto mayor sea el valor de b, mayor será la cantidad de sismos pequeños respecto de los grandes. Por tanto, a menor valor de b, más trabadas o atascadas estarán los contactos de las fallas. Como hemos comentado, a veces los catálogos incorporan, en casos de cierta actividad sísmica relevante, datos de unidades móviles que suelen ser mucho más sensibles y se reflejan en una repentina aparición de numerosos terremotos pequeños en el catálogo ya avanzada la serie.

Eso sucedió en octubre de 2020 y se puede visualizar en el inicio de la gráfica de la figura 6.63 correspondiente a octubre de 2020. Para un estudio amplio en el tiempo y determinar los parámetros a y b de la Ley de Gutenberg-Richter habrá que esperar unos años, aunque los 20 años que van desde 2004 a 2023 (ambos incluidos) arrojan en el área de Olave-Aoiz un valor de b=0,87 y de a=4,15. Díaz González A. (2015) hizo una estimación histórica de varias áreas del norte peninsular incluidas varias de influencia pirenaica. La autora encuentra valores similares para los terremotos históricos ocurridos hasta 2013, por ejemplo, b=1,41 y a=7,09 en la zona norpirenaica, que es la que mayor actividad histórica presenta. En la zona de los Macizos Vascos (b=1,02 y a =4,93) la sismicidad aparece asociada a estructuras E-O como en el caso de la falla de Leiza, la de Ollín, las láminas cabalgantes de Aralar o el límite oeste de la falla de Hendaya, de orientación NE-SO. En el área de la Falla de Pamplona al oeste de la ciudad (b=0,78 y a=3,47) la actividad sísmica también presenta cierta orientación E-O, pero hemos visto que de manera más dispersa.

Podríamos considerar que se está produciendo una sismicidad natural con mediciones continuas de alta sensibilidad, algo que antes del llenado de Itoiz no existía, también que en un principio el primer llenado disparó la sismicidad y ésta se fue relajando con ciertos altibajos. Habría que resaltar que la zona presenta tendencia a favorecer terremotos mayores sobre los pequeños, lo que supone reconocer que la Cuenca de Pamplona, como unidad alóctona con un bajo gradiente de acumulación de esfuerzos, puede disparar fallas que acumulen cierta cantidad de energía de manera repentina. Y es que, al contrario que en otras áreas sísmicas, los terremotos históricos que se repiten en una estructura determinada aquí son raros. Esto nos ha llevado a considerar que enfocar los nuevos estudios en la distribución epicentral ya conocida, como base para prevenir la peligrosidad sísmica, sería menos efectivo que en otras áreas con mayores tasas de deformación y menos fracturas por unidad de superficie. Por tanto, la distribución epicentral de los catálogos históricos tampoco sería una base muy efectiva de prevención de futuros terremotos destructivos.

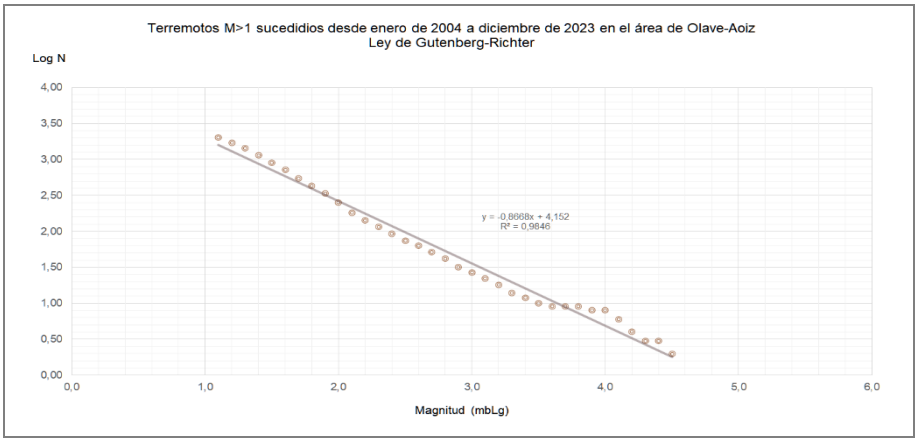


Figura 6.66. Ley de Gutenberg-Richter para los 2393 terremotos M>1 sucedidos entre enero de 2004 y diciembre de 2023 en el área de Olave-Aoiz. Vemos que R^2 se acerca a la unidad y b=0,87 lo que indicaría que estaría en el tránsito entre la zona de los Macizos Vascos b=1,02 donde la sismicidad aparece asociada a estructuras E-O como es el caso de la falla de Leiza, falla de Ollín y las láminas cabalgantes de Aralar, con en el límite oeste a la falla de Hendaya, de orientación NE-SO y el área de la Falla de Pamplona b=0,78 donde la actividad sísmica también presenta una cierta orientación E-O, pero que como hemos visto es más dispersa.

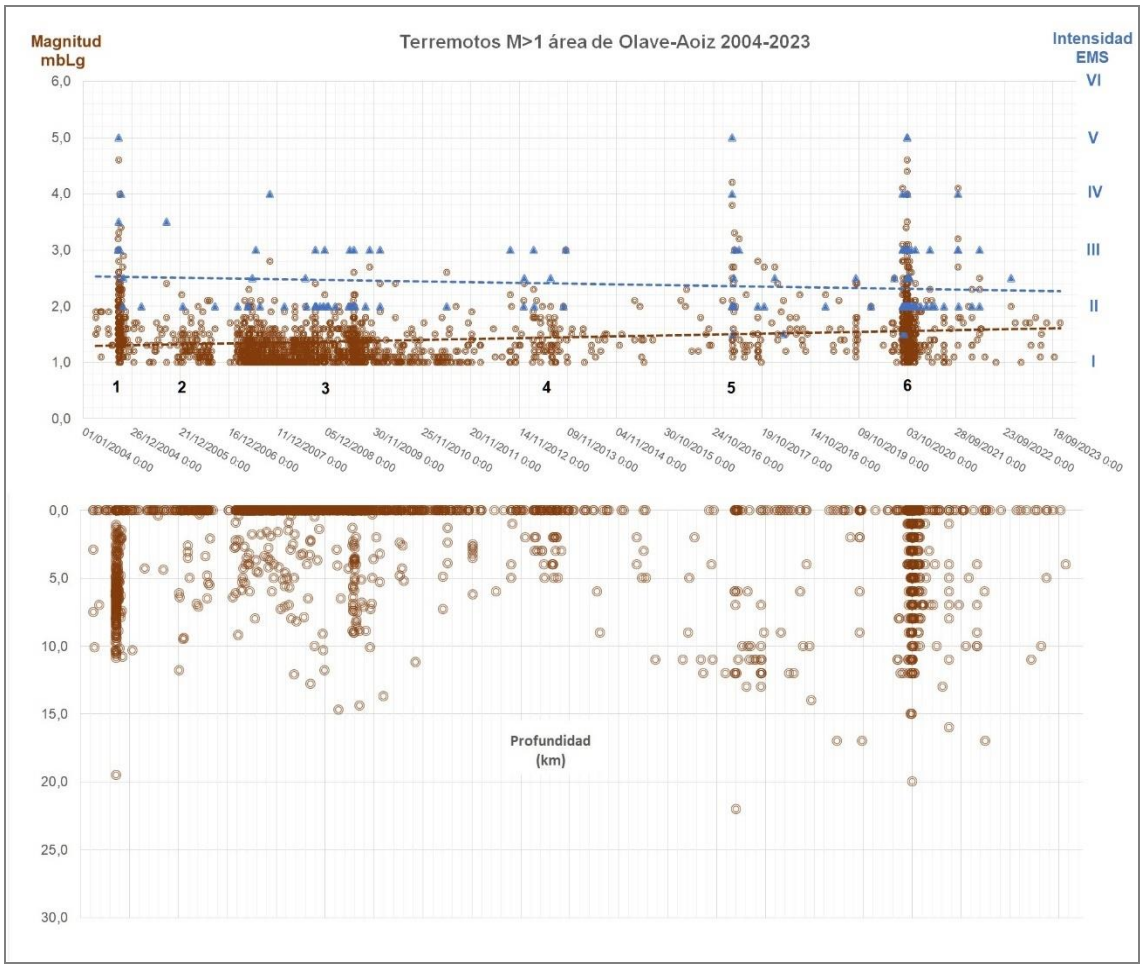


Figura 6.67. Es útil comparar la recurrencia de la magnitud con la intensidad, ya que, a pesar de ser un valor subjetivo y con ciertas fluctuaciones de carácter psicológico, no hay incorporaciones repentinas de personas ultrasensibles cuando ya ha avanzado la serie. Los 162 terremotos sentidos con intensidad suprior a I-II desde enero de 2004 hasta diciembre de 2023 en el área de Olave-Aoiz se producen en circunstancias muy diferentes, en 2004 no había teléfonos móviles, apps de terremotos o redes sociales para intercambiar información, algo que estuvo muy activo en el enjambre de 2020. Comparando los datos con la magnitud, vemos que la primera tiende a disminuir (arriba en azul) mientras que la segunda (filtrando los valores de M<1 ya que unas veces se incorporan estaciones móviles y otras no) sigue al alza. En la parte de abajo podemos ver la distribución de las profundidades. Especialmente en los momentos de máxima densidad sísmica se diferencian claramente seis periodos de alta actividad (enumerados de 1 a 6). El primero coincide con la fase 1 del llenado de Itoiz, el segundo con las fases 2 y 3 y un tercero con las fases 4 y 5 en 2007-2008. La actividad sísmica es más baja ya a mediados de 2012. En 2013 coincidiendo con lo sucedido en El Perdón, al sur de la ciudad, hay una cuarta reactivación y ya hasta 2017 no sucede nada destacable. No obstante, el quinto (2017) y sexto brote (2020) presentan cierta continuidad.

6.8.7.3. Conclusiones.

El episodio sísmico que comienza el 30 de agosto de 2020 se muestra como una continuidad del que comenzó en marzo de 2017. Existe una sismicidad prácticamente continua de baja magnitud no sentida por la población, pero registrada, raras veces supera intervalos de inactividad de un mes.

Se puede considerar una sismicidad natural con leve tendencia a favorecer terremotos mayores sobre pequeños, lo que supone reconocer que la Cuenca de Pamplona, como unidad alóctona con bajo gradiente de acumulación de esfuerzos, puede disparar fallas no recogidas en los catálogos.

Una visión global de los 20 mayores terremotos sucedidos cerca de Pamplona desde 1612 muestra que el patrón regional NO-SE coincide de manera fractal con lo sucedido al norte y este de la ciudad.

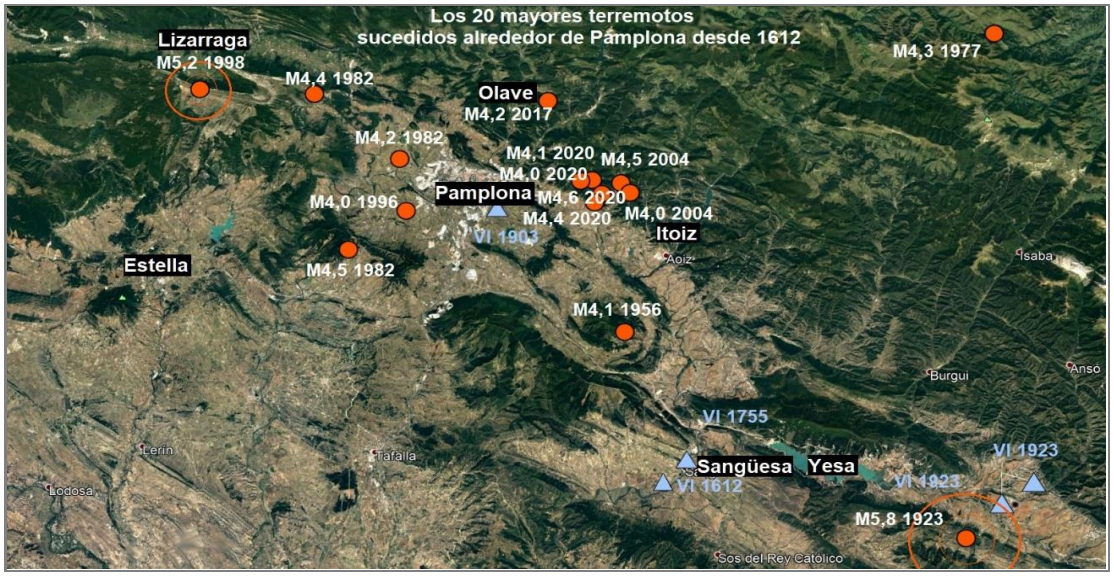


Figura 6.68. Los 20 mayores episodios sísmicos, terremotos históricos, réplicas y enjambres sucedidos alrededor de Pamplona desde 1612, recogidos y analizados en este trabajo, también trazan a nivel regional una cierta orientación NO-SE. Siempre supusieron una sorpresa, tanto desde el punto de vista histórico como en el corto periodo instrumental manejado. Las bajas tasas de deformación, la gran cantidad de áreas fracturadas y el dilatado tiempo entre eventos, muestra que los terremotos históricos repetidos en una misma estructura son raros en comparación a otras zonas de la Península Ibérica. Consideramos así que enfocar los nuevos estudios en la distribución epicentral ya conocida, como base para prevenir la peligrosidad sísmica futura, sería menos efectivo que en otras áreas con mayores tasas de deformación y menos fracturas por unidad de superficie. La distribución epicentral de los catálogos históricos tampoco sería una base muy efectiva de prevención de futuros terremotos destructivos. Es por ello que se hace necesario un mayor trabajo de campo enfocado a determinar y conocer cuáles son los potenciales accidentes tectónicos capaces de generar daños y no solo los cercanos a terremotos históricos destructivos, que es más o menos lo que se he venido haciendo hasta ahora (figura 6.72).

Nunca se había registrado una densidad y frecuencias tan numerosas como en la serie de 2020, es destacable la madrugada del 1 de octubre de 2020 con 109 sismos, de los cuales fueron sentidos por la población media docena, tres de ellos en toda la Comunidad Foral y otras limítrofes y uno en prácticamente todo el cuadrante nordeste de Iberia hasta el Mediodía francés.

El Departamento de Presidencia Justicia e Interior, con competencias en Protección Civil, elaboró el Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico de la Comunidad Foral de Navarra, siendo aprobado por Acuerdo del Gobierno de Navarra, de 28 de marzo de 2011. En el apartado 12.4.2 *"Revisión y actualización"* del referido Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico de la Comunidad Foral de Navarra, se recoge que:

> *"Con la misma periodicidad que los simulacros (en el apartado anterior se establece una periodicidad de cuatro años), y de acuerdo, tanto con la evaluación efectuada de los mismos, como de las nuevas tendencias en la gestión de las emergencias, se efectuarán las revisiones de los procedimientos de notificación y activación, actuación de las figuras operativas y de los Grupos de Acción y, en general, de la operatividad del Plan. Asimismo, y con la misma periodicidad, se actualizará el catálogo de medios y recursos, para lo cual se notificarán a la Dirección de Protección Civil las posibles notificaciones. Por otra parte, esta Dirección, al menos anualmente, comprobará que dicho catálogo se encuentra debidamente actualizado y que funciona correctamente el sistema establecido para la notificación de las modificaciones… Con todo ello se realizará una revisión ordinaria completa del Plan cada cinco años como mínimo*". (SISNA, 2011).

Transcurridos más de los cinco años indicados (en 2016 se cumplieron 5 y en 2021 se cumplieron 10), es obligatorio acometer la revisión del SISNA y...

> *"… se deberán llevar a cabo programas de formación destinados a los órganos y servicios actuantes y a la población en general"... "Se realizarán revisiones extraordinarias cuando ello se estime necesario para adaptar el Plan a la realidad del momento de la Comunidad Foral de Navarra. Estas revisiones deberán ser informadas favorablemente por la Comisión de Protección Civil de Navarra y aprobadas por el Consejo de Gobierno del Gobierno de Navarra. En su caso, deberán ser homologadas por la Comisión Nacional de Protección Civil"...* (página 76 del SISNA).

En los momentos de máxima densidad de sismicidad, en los enjambres sucedidos desde 2004 hasta 2023, se diferencian seis periodos de alta actividad (enumerados de 1 a 6 en la figura 6.67). El primero coincide con la fase 1 del primer llenado de Itoiz, el segundo con las fases 2 y 3 y un tercero con las fases 4 y 5 en 2007-2008. La actividad sísmica ya es más baja a mediados de 2012. En 2013 coincidiendo con lo sucedido en El Perdón y Etxauri, al sur y este de la ciudad, hay una cuarta reactivación (4) y ya hasta 2017 no sucede nada destacable (5). No obstante, el quinto (2017) y sexto (6) brote (2020) presentan cierta continuidad (figura 6.67).

6.8.8 Pamplona y la seguridad sísmica. Una mirada al futuro.

Los 847 terremotos registrados en la serie de Lizoain desde agosto de 2020 a enero de 2023 (94 sentidos) suponen más del 10% de los más significativos desde 1612 si agrupamos geohistoria e instrumentación. Se producen en tan sólo el 0,03% del tiempo histórico estudiado. Vimos que tras los más de 300 sucedidos en 2013 no hubo ninguna actualización del SISNA, tampoco tras los de 2017 y con los de 2020-2022 la ciudadanía de Navarra sigue sin tener noticias del nuevo SISNA, que creemos, necesita mucho trabajo de campo (figura 6.67).

No vamos a incidir más de lo que lo hemos hecho en capítulos anteriores sobre esta manifiesta carencia, pero sí creemos necesario, al menos, dar unas pautas que, aunque ya fueran presentadas en 2016 y 2017 tras los enjambres de 2013 y 2017 a los responsables de Protección Civil del Gobierno de Navarra y se realizaron seminarios al respecto, tanto en Protección Civil como en el Colegio de Arquitectos y en ayuntamientos situados sobre la zona epicentral, aportan una mirada al futuro y son producto de equipos multidisciplinares. Todas las personas que hemos trabajado con el SISNA y en otras circunscripciones golpeadas por terremotos que un día llegaron a ser más enérgicos de lo esperado somos conscientes de esta necesidad. La necesaria realización de la revisión del Proyecto RISNA (evaluación del riesgo sísmico de la Comunidad Foral de Navarra) que sirvió de base para la redacción del SISNA (Plan Especial ante el Riesgo Sísmico en la Comunidad Foral de Navarra) y de al que tarde o temprano se estimará su actualización, está enfocada a:

a- Incorporar el estado del arte generado desde la realización del estudio SISNA (2011) en materia de peligrosidad y riesgo sísmico en Navarra.

b- Cotejar los datos del catálogo sísmico con los que arrojan otras redes no contempladas en el SISNA y que abarcan en su ámbito el territorio Foral.

c- Incorporar los datos revisados para calibrar los modelos y utilizar las nuevas metodologías para la actualización del riesgo sísmico.

d- Incorporar los datos del catastro del Servicio de Riqueza Territorial y Tributos Patrimoniales, al análisis de la vulnerabilidad en las edificaciones para la estimación de daños.

e- Incorporando en el SIG los datos del padrón, los de atenuación y ampliación y la extracción de los datos del IGN de los sismos en tiempo real, para configurar una herramienta informática y app de apoyo en las decisiones.

f- Redactar criterios de intervención post sismo y su transposición a fichas, para el análisis de los edificios afectados y la ayuda a la toma de decisiones sobre su evacuación o derribo.

Aparte de la revisión y actualización del plan especial de riesgo sísmico en Navarra (SISNA), sobre todo en su aspecto histórico tal y como hemos mostrado, varios retos quedan establecidos para la sociedad navarra del siglo XXI que deberán ser los pilares de actuación institucional. Para la revisión del Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico de la Comunidad Foral de Navarra, es necesario comenzar por la modificación de las bases de datos, que incluirá no solo la actualización de las propias bases de datos utilizadas en el estudio anterior, tanto del catálogo de sismos como del parque de viviendas, sino también los nuevos datos históricos y los necesarios trabajos de campo, así como el padrón que mejore el análisis de vulnerabilidad. Con el estado del arte actual en materia de peligrosidad y los datos revisados cuantitativa y cualitativamente se procederá a la actualización del RISNA. Los documentos que sería necesario actualizar son sobre todo los que conforman el capítulo de "*Objetivos generales y alcance del estudio", "evaluación de la peligrosidad sísmica (emplazamientos en roca) caracterización geotécnica".*

Esta actualización se realizaría a partir de la revisión del catálogo sísmico tomando como base los catálogos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y de Le Réseau National de Surveillance Sismique (RéNaSS).

6.8.8.1. Revisiones importantes.

La distribución de las fallas activas, identificadas hasta el momento en la bibliografía sobre el potencial sísmico del área de influencia pirenaica, evidencia que los estudios neotectónicos más detallados se encuentran cerca de los epicentros conocidos más destructivos de la historia.

La baja tasa de deformación actual hace que los periodos de recurrencia sean muy dilatados en el tiempo para que un terremoto se genere desde la misma estructura que lo hubiera generado hace décadas o siglos.

Al contrario que en otras áreas sísmicas, los terremotos consecutivos en una estructura determinada son raros en esta parte de la Península Ibérica, lo que nos lleva a que considerar la distribución epicentral como base para prevenir la peligrosidad sísmica sea menos efectivo que en otras áreas con mayores tasas de deformación y menos fracturas.

Por lo tanto, la distribución epicentral de los catálogos históricos tampoco sería lo más representativo de las áreas que pudieran experimentar terremotos destructivos en el futuro. Es necesario definir y caracterizar los accidentes sismogenéticos que han venido actuando especialmente en 2004, 2013, 2017 y 2020-2022 (figuras 6.65 y 6.72). Tras lo vivido desde 2013 y siguiendo las indicaciones del SISNA, se hacen necesarias varias revisiones. La revisión de la las zonas sismogenéticas y de estructura potencialmente activas sería la más urgente.

Los nuevos análisis de las fallas potencialmente activas de la Comunidad Foral y áreas limítrofes, con atención especial a la Canal de Berdún y el área norte y este de Pamplona, podrían tener un tratamiento como unidades independientes en la revisión del cálculo de peligrosidad. La revisión de la evaluación de la peligrosidad sísmica en roca, para el periodo de retorno del RISNA de 475 años y que tendrá en cuenta las zonas sismogenéticas y las fallas potencialmente activas también resulta necesaria.

Otras: Revisión del estudio geotécnico de respuesta dinámica de los materiales superficiales utilizando los siete perfiles facilitados para el área metropolitana de Pamplona. Revisión de la evaluación de los factores de amplificación. Revisión de la evaluación de la peligrosidad sísmica final integrando los datos de amplificación debida al terreno y los de peligrosidad en Margas de Pamplona sanas y alteradas para un periodo de retorno de 475 años.

Una nueva elaboración del mapa geotectónico de Navarra, a ser posible diferenciando clases de suelos atendiendo a su comportamiento ante el movimiento sísmico y asignando factores de amplificación a las diferentes clases de perfiles como los presentados en este estudio para el área metropolitana de Pamplona, especialmente los perfiles de tipo E2, P12 y P22. También las aceleraciones pico y espectrales que representan los movimientos esperados en cada localidad, en un suelo genérico y en roca. La actualización se realizará a partir de:

a. Revisión de la base de datos del parque inmobiliario de Navarra, incorporando los datos de catastro de 2020 del Servicio Riqueza Territorial y Tributos Patrimoniales.

b. Incorporar los datos del padrón.

c. Incorporación del nuevo estado del arte para la estimación del daño para las diferentes tipologías.

d. Revisión de los datos de transferencia con los datos anteriores.

e. Revisión de la evaluación del riesgo sísmico, incorporando el nuevo análisis de peligrosidad y la nueva evaluación de la vulnerabilidad.

f. Análisis de detalle de la Comarca de Pamplona.

La elaboración de un sistema de información geográfica SIG con la información generada ha mostrado suponer un gran avance, tanto a nivel europeo como estatal o autonómico, por lo que ampliar y actualizar las bases del catálogo puede ser de gran utilidad:

a. Las bases de datos del catálogo sísmico actualizado y homogeneizado a Mw cuando sea posible.

b. Las bases de datos de los parámetros de actividad de las fallas existentes en la Comunidad Foral (o fuera pero dentro de su ámbito de influencia) que se hayan estudiado y se incorporen a la base de datos.

c. Las bases de datos de las aceleraciones pico PGA y espectrales SA (T) para T comprendidos en el rango de 0,1s a 2s, en condiciones de suelo duro o roca.

d. Las bases de datos del tipo de suelo para cada entidad poblacional.

e. Las bases de datos de las aceleraciones pico y espectrales que representan los movimientos esperados en cada entidad poblacional, incorporando el efecto local del suelo e incluso mapas de microzonación como pronósticos para proyectos en suelo y roca.

f. Las bases de datos de distribución de viviendas de vulnerabilidad A, B, C y D.

g. Las bases de datos del padrón.

h. Las bases de datos/matriz de probabilidad del daño para cada tipología de vivienda y periodo de retorno de 475 años.

El soporte cartográfico y de ortofotos, sería el contenido en el Sistema de Información Territorial de Navarra del Geoportal (SITNA) y las escalas de presentación mantendrán sus mismos parámetros. También se podrían incluir los del IGN. La interfaz gráfica de usuarios sería sencilla y facilitaría el manejo de las diferentes herramientas. El GIS permitirá análisis y consultas a información de resultados ya configurados (como mínimo los recogidos en el actual RISNA).

GIS dinámico: Además, el sistema de información geográfica, incorporaría los datos en tiempo real de los sismos que se produzcan que tengan afección en la Comunidad Foral de Navarra, que son presentados en la página web del IGN. Con dicha información y los datos de aceleraciones pico y espectrales que representan los movimientos esperados en cada entidad poblacional incorporando el efecto local del suelo, se analizará la vulnerabilidad (tanto en viviendas como en personas) en la zona afectada y se presentará los resultados gráficamente, para la anticipación y ayuda a la toma de decisiones en SOS Navarra y Protección Civil, incluso con el uso de una app como SGE2 presentada en 2017 en el Gobierno de Navarra.

6.8.8.2. Procedimientos de actuación e intensidad.

Se debería analizar la vulnerabilidad de las construcciones y se redactarán criterios de inspección post sismo de las edificaciones no destruidas, para determinar su estado y tomar decisiones sobre su ocupación, evacuación o derribo.

Dichos criterios se realizarán para cada tipología de edificación de las existentes en Navarra y se elaborarán fichas que recojan los criterios. Se analizarán las mejoras, si se han producido, en técnicas de desescombro y búsqueda en edificios colapsados tras las actuaciones en los últimos sismos. Tras el análisis se elaborará una guía de actuación y una relación de material y nueva tecnología de apoyo en estas situaciones.

Equipo Técnico

Para el desarrollo de estos trabajos será necesario disponer del personal técnico y material adecuado para que se efectúen los trabajos de campo, laboratorio y gabinete descritos en un pliego, el cual deberá disponer de las siguientes especialidades:

a. Una persona o gabinete de personas encargadas del estudio histórico
b. Especialista en sismología
c. Especialista en peligrosidad sísmica
d. Especialista en tectónica
e. Especialista en GIS
f. Una persona arquitecta o ingeniera especialista en estructuras

6.8.8.3. Consideraciones finales.

Como hemos visto, quedaría mucho por hacer en materia de seguridad geotécnica y sísmica en Navarra y más concretamente en el área metropolitana de Pamplona. El rigor del investigador que, como geohistoriador debe incluir en los sistemas de búsqueda de las fuentes (heurística), datos a interpretar, podrá operar con ellos con una sana crítica interpretativa (hermenéutica) sea esta científica y/o dialéctica que es lo que se pretende impulsar. Y aquí radica nada más y nada menos que la base de la normativa sectorial, de ello van a depender las construcciones, restauración, mantenimiento, de edificios, infraestructuras, embalses, centrales energéticas...

Es oportuno apuntar que Euskadi en 2020 o Galicia en 2021 han adoptado la medida de desplegar una red de control propia, en el caso de Euskadi ya está operativa (EuskalSis) y Galicia estaría investigando la manera más adecuada de adaptación a su territorio. En aquella comisión parlamentaria de 2013 en Navarra, se acordaron tres cuestiones: 1) estudiar algo similar para Navarra, además de 2) educar en la cultura sísmica a los estudiantes, qué son los terremotos, qué hacer si un día vamos a vivir a una zona de relevante actividad sísmica, qué relación hay entre los depósitos salinos, las lluvias extraordinarias y la sismicidad, qué terremotos destacables ha habido en la zona pirenaica, cuál sería su mayor grado destructivo, etc., y 3) otra de carácter social enfocada a la inspección técnica de los edificios más vulnerables, principalmente del Casco Viejo de Pamplona y del barrio de la Chantrea (SISNA 2011, página 55) similar al *Decreto 241/2012 del País Vasco* que hemos comentado en casos anteriores.

No se cumplieron aquellas promesas de carácter pedagógico tras un año en que el fenómeno sísmico abría portadas y noticieros, sino que el estudio propuesto dedicado a conocer las implicaciones de las antiguas explotaciones de potasa y las infiltraciones de agua de 2013, que pidieron loa ayuntamientos y se consensuó en el Parlamento, tampoco se abarcó, en julio ya casi no había terremotos. Los habitantes del área de Erreniega-El Perdón quedaron a la espera del brote de nuevos enjambres cuyo origen volvería a ser un enigma científico (fue el caso de un pequeño brote sucedido en octubre de 2015) y en el mejor de los casos atribuible a la Falla de Beriain, aunque las localizaciones epicentrales no coincidiesen para explicar lo ocurrido ni en 2013 ni en 2015.

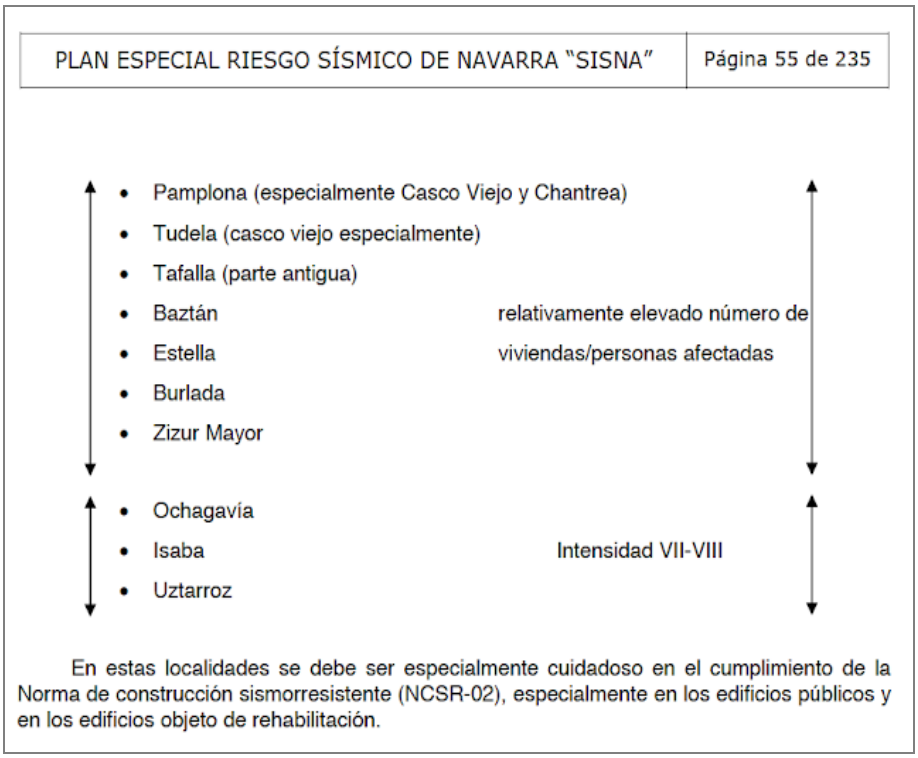
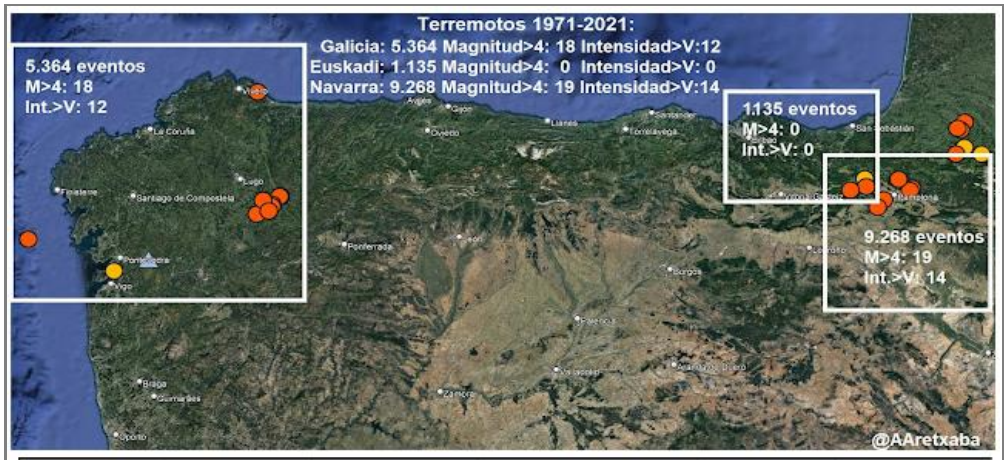


Figura 6.69. SISNA (página 55): Las zonas más vulnerables de Navarra. Algunas de ellas ya son objetivos necesarios de rehabilitación en algunos de sus edificios, es en esas zonas donde se debe ser "especialmente cuidadoso" en el cumplimiento de la normativa sismorresistente, en este caso de la vigente norma de 2002 es la NCSE-02. Tras lo acontecido en Lorca, (el SISNA data de febrero de 2011, dos meses antes de los terremotos de Lorca) sabemos que las normas de construcción sismorresistente no han sido, no son, y nunca serán suficientes, por lo que las medidas de rehabilitación deberán ser acompañadas con disposiciones urbanísticas adecuadas por un lado y una cultura sísmica de la población que sigue ausente hoy en día.

Tampoco se dio ningún paso hacia la propuesta consensuada por todos los grupos de realizar una inspección técnica del parque inmobiliario en las zonas más vulnerables apuntadas en el SISNA de 2011 (página 55) y también en sede parlamentaria, como hizo, por ejemplo, el Gobierno Vasco en 2012 con una ley autonómica para evaluar al completo su parque inmobiliario: *Decreto 241/2012, de 21 de noviembre, por el que se regula la inspección técnica de edificios en la Comunidad Autónoma del País Vasco* bajo varios criterios, entre ellos los estructurales.

Entre 1971 y 2021 en Euskadi ocurrieron 1.135 sismos, ninguno alcanzó la magnitud M4 ni la intensidad V. En Galicia se vivieron 5.394 de los que 18 alcanzaron o superaron esa magnitud y 12 esa intensidad. En Navarra fueron 9.268 de los cuales 19 superaron la magnitud M4 y 14 la intensidad V. Por cada terremoto vasco se producen cinco en Galicia y nueve en Navarra.

Es importante considerar el tamaño de la superficie de cada comunidad, Euskadi es la más pequeña y la más densamente poblada. Galicia abarca cuatro veces más superficie. La tasa de ocurrencia de terremotos en Euskadi es de 0,16/km² en 50 años (entre 1971 y 2021). En Galicia es similar: 0,18. La de Navarra es cinco veces más: 0,89.



Territorio	Superficie (km²)	Terremotos 1971-2021	Terremotos/km² 50 años	Magnitud ≥4	Intensidad ≥V
Galicia	29.574	5.364	0,18	18	12
Euskadi	7.234	1.135	0,16	0	0
Navarra	10.391	9.268	0,89	19	14

Figura 6.70. Comparativa del número de sismos con especial atención a los terremotos M>4 e intensidad >V sucedidos en medio siglo de cobertura instrumental desde 1971 a 2021 en Galicia, Euskadi y Navarra. Siendo Euskadi el territorio que menos sismicidad presenta (sin M>4 y sin Int.>V hasta la fecha) y con la menor densidad de eventos por km² (0,16), similar a la de Galicia (0,18) y unas seis veces menos que Navarra (0,89), ya tiene operativa la red EuskalSis. Galicia la está estudiando y Navarra se lo planteó en 2013 en sede parlamentaria mientras se sucedía el enjambre de la Sierra de El Perdón. Por cada terremoto sucedido en Euskadi se producen cinco en Galicia y ocho en Navarra.

El Plan Territorial de Protección Civil de Navarra (PLATENA), en el marco competencial que el ordenamiento jurídico atribuyó a la Comunidad Foral, previó específicamente la necesidad de elaborar un plan autonómico para hacer frente al riesgo derivado de los terremotos dentro del territorio de Navarra; aunque como segunda zona sísmica de Iberia, existen áreas físicas de la geografía foral cuya importancia y trascendencia están muy por encima de generalidades debido a la demografía, la concentración de sectores productivos, industria, patrimonio, etc.

Sin duda, el área principal es la Cuenca de Pamplona. Nació así el *"Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico en Navarra"* (SISNA) que asegurase la intervención eficaz y coordinada de los recursos y medios disponibles, con el fin de limitar las consecuencias de los posibles terremotos que se puedan producir y afectasen a las personas, los bienes y el medioambiente. El organigrama del plan es magnífico y la estructuración acorde con la realidad sísmica y social, ahora bien, el estudio geohistórico es uno de los aspectos principales que se necesita actualizar. Estos trabajos transcendentales deben ser realizados por equipos conocedores de la historia local, de la peculiar sismicidad navarra y en especial de la cuenca, además de haber dispuesto de al menos un historiador, figura fundamental para sentar las bases de una correcta distribución del territorio y normativa sectorial mirando al siglo XXI. Si no es así, el desenlace es imperecederamente el mismo: confusiones, bajo nivel en los resultados y un coste económico y social que aún estaría por determinar. El terremoto de Legarda de mayo de 1982 por un lado y el de Lizarraga de octubre de 1998 por otro, son ambos motivos históricos suficientes como para proponer una revisión al menos histórica del SISNA y un análisis especial dedicado a un área metropolitana que aglutina al 56% de la población de Navarra (cerca de 367.000 personas).

Además, si esta investigación histórica del terremoto de 1903 es considerada a partir de ahora, ya serían tres los acontecimientos geohistóricos que nos acercan a una visión más realista de la cuestión sísmica navarra, en especial alrededor de Pamplona. Asimismo, la similitud y paralelismos encontrados en los tres eventos, en especial los de 1903 y 1982 con lo sucedido en 2020, nos hacen pensar en que estemos ante la primera oportunidad histórica de poder comprender mejor el carácter singular de la sismicidad alrededor del área metropolitana y del comportamiento de los edificios sobre los perfiles geotécnicos presentados en torno a las Margas de Pamplona y el área metropolitana de la ciudad.

Por otro lado, en esta cuestión tenemos una gran ventaja con respecto a otras zonas de la Península Ibérica, ya que según se suceden los acontecimientos, podemos recabar información de nuestros vecinos del norte, fuentes afortunadamente muy cercanas y de las que otras comunidades más alejadas de Francia no disponen, la que denominan la *"Navarra española"* está contemplada en varios de sus estudios.

Podemos obtener información de carácter internacional en el *"Dossier Départemental des Risques Majeurs Cellule d'Analyse du Risque et de l'Information Préventive de la PRÉFECTURE DES PYRÉNÉES-ATLANTIQUES de la République Française"* (página 46) que data de 2003, un año anterior a los terremotos de Lizoain y Nagore donde ya se advierte del potencial alrededor de la ciudad y se considera el terremoto de Lizarraga Mb5,2 de 1998:

> *"... El departamento de los Pirineos Atlánticos puede ser golpeado por terremotos que no tengan lugar dentro del propio departamento. De hecho, los Altos Pirineos (65) también han experimentado fuertes seísmos. Por ejemplo, la región de Pamplona (Navarra española) es el lugar de una actividad sísmica significativa (magnitud 5 el 27/10/1998). Estos lugares con seísmos cerca de la frontera pueden causar perturbaciones y daños en el propio departamento..."*. Dossier Départemental des Risques Majeurs Cellule d'Analyse du Risque et de l'Information Préventive de la PRÉFECTURE DES PYRÉNÉES-ATLANTIQUES de la République Française (página 46).

Como vemos, los franceses consideran, al menos desde 2003, a la zona de Pamplona *"una zona de actividad sísmica significativa"*, y en especial al terremoto de Lizarraga como potencialmente dañino en su propio territorio. En el SISNA de febrero de 2011 (página 11) se afirma: *"... La baja sismicidad de Navarra explica que el tema del riesgo sísmico no haya recibido tanta atención por parte de la comunidad científica, como otros riesgos naturales..."*.

Vemos que el estudio y consideración de estos fenómenos naturales tiene dos perspectivas: una desde el norte (Francia) que considera desde 2003 a los terremotos de Legarda de 1982, Lizarraga 1998, Lizoain y Nagore 2004, como una referencia importante en un contexto de *"actividad sísmica significativa"* (la región de Pamplona en la Navarra española); y otra desde el sur (España) que califica a Navarra al completo como una zona de "*baja actividad sísmica*" en la que el terremoto de Lizarraga de 1998 no es una referencia a destacar. Un resumen de la diferente consideración incluso pensando exclusivamente en Navarra se puede ver en la siguiente tabla resumen comparativa.

PLAN DE SEGURIDAD	MAGNITUD MÁXIMA	MAYOR TERREMOTO NAVARRO	TERREMOTOS SIGNIFICACTIVOS EN NAVARRA	ACTIVIDAD SÍSMICA NAVARRA
SISNA (España)	Nunca se ha llegado a 5	Lizoáin 2004 4,5mblg	Lizoáin 2004 4,5mblg	"BAJA"
PDPA (Francia)	Varios terremotos M>5 en la zona de Pamplona	Lizoáin 2004 5,3ML	Lizoáin 2004 5,3ML Lizarraga 1998 5,2ML Nagore 2004 5,2ML Legarda 1982 4,6ML	"SIGNIFICACTIVA"
NUESTRA PROPUESTA FUTURA (Siglo XXI)	Mw 6,5 (Mapa Tectónico de España	Sismicidad histórica y población	Sismicidad histórica y población	"SIGNIFICACTIVA"

Figura 6.71. Tabla resumen comparativa de los planes de seguridad sísmica que atañen a Navarra (SISNA) y a la Prefectura del Departamento de los Pirineos Atlánticos (PDPA).

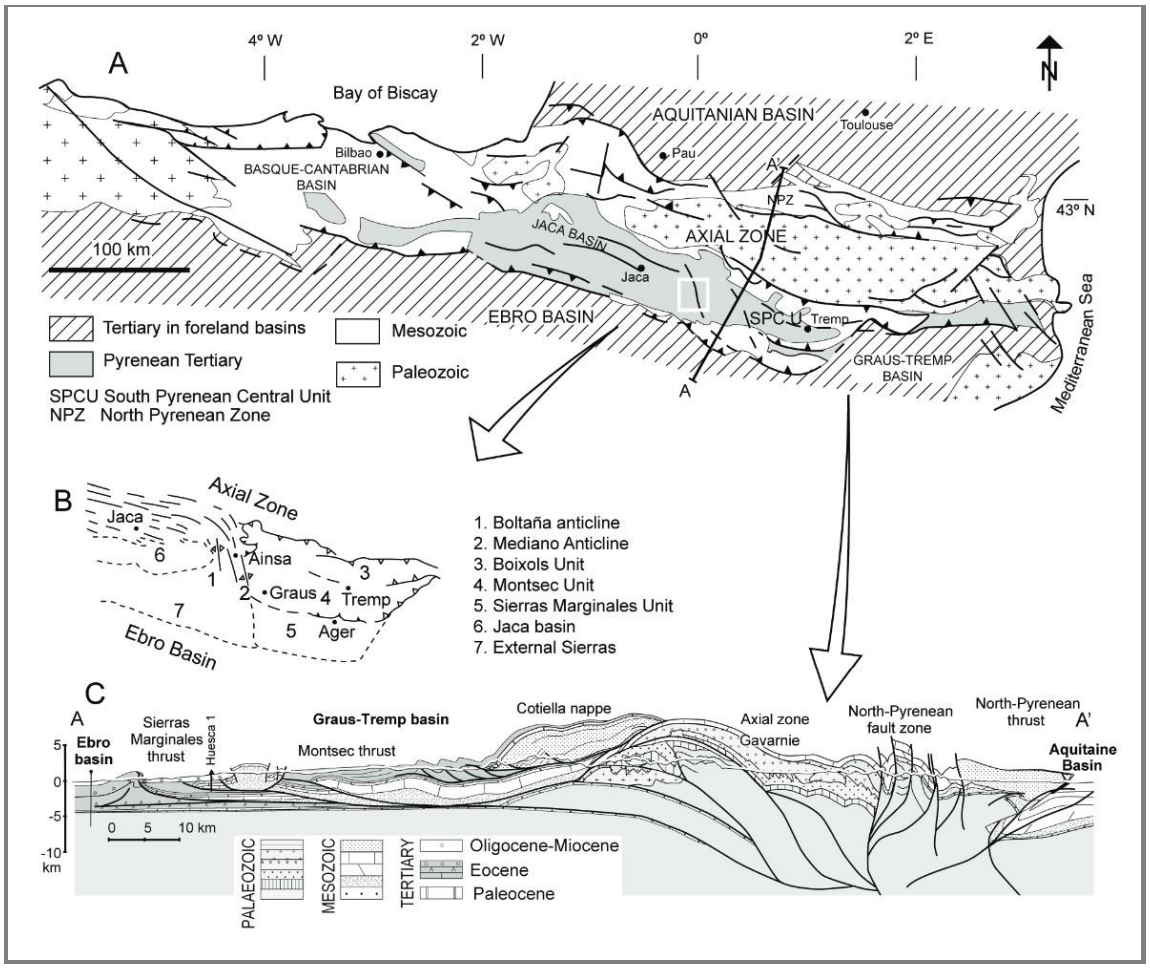


Figura 6.72. A. Estructura geológica del área sur pirenaica al oeste de la Cuenca Jaca-Pamplona. Se puede distinguir la cuenca de Graus-Tremp al este del Anticlinal de Boltaña. Modificado de Oliva et al. (2011). **B.** Unidades estructurales simplificadas en el Sudoeste del Pirineo. **C.** Sección geológica modificada de Martínez-Peña, B. y Casas-Sainz, A. (2003) del límite occidental de la zona central del área sur pirenaica. El número de discontinuidades corticales y fallas con disposición estructural horizontal, en esta zona refleja muy bien la necesidad de estudios dedicados a la seguridad sísmica para una zona tan fracturada. Los nuevos estudios deberán completar esta información en mayor medida que no a la distribución epicentral ya conocida. Como base para prevenir la peligrosidad sísmica sería algo mucho más seguro. En otras áreas de la Península Ibérica o del norte de Pirineos, con mayores tasas de deformación, menos fracturas por unidad de superficie y menos población, la gestión de la seguridad por catálogos puede ser más efectiva, pero al sur de Pirineos y especialmente en el área Jaca-Pamplona, es raro que una misma falla genere dos eventos de remarcable magnitud de manera consecutiva en términos históricos. La distribución epicentral de los catálogos históricos aquí no sería una base muy efectiva de prevención de futuros terremotos destructivos.

PARTE 7

RECOMENDACIONES DE PROYECTO Y CONSTRUCTIVAS

7.1. Introducción.

En este apartado vamos a dar unas pautas definitivas para las recomendaciones constructivas más importantes, simplificando los terrenos para futuros proyectos en tres grandes familias. Se trata de una de las grandes demandas de los proyectistas que trabajan en el área metropolitana de Pamplona en suelo y roca.

El dotarse de algún tipo de clasificación, lo más sencilla posible, que sea capaz de proveer de un conocimiento básico y útil en la zona para todos los proyectos de edificación, restauración, obra pública o infraestructuras, es una aspiración se ha venido buscando a través de los años desde los colegios profesionales, escuelas de arquitectura e ingeniería o desde la Fundación Laboral para la Construcción de Navarra y que en cierto modo impulsa la redacción del presente documento académico. Para ello se organizaron cursos, seminarios y jornadas técnicas, al menos desde el año 1998. En todas ellas se utilizaron clasificaciones basadas en la litología, las propiedades mecánicas y geotécnicas y por supuesto, la normativa vigente en cada momento, por lo que esta manera de agrupación sistemática en terrenos de conducta análoga, sobre los que se proyecta nuestro hábitat, ya ha tenido una acogida positiva contrastada en encuestas realizadas entre los profesionales del sector en diferentes ocasiones entre finales del siglo XX y las dos primeras décadas del XXI.

Como ya hemos comentado, la división comienza con las grandes familias de perfiles exteriores E con sus variantes E1 y E2, donde creció la ciudad en tiempos recientes. Los tradicionales terrenos donde se apoyaron la mayoría de los edificios históricos estudiados como la catedral, el edificio del hoy Parlamento de Navarra o el Archivo General de Navarra son los P1 con las variantes P11 y P12. Los terrenos P2 tienen antecedentes históricos con el desarrollo de Burlada, Villava o las más recientes urbanizaciones de las llanuras de inundación en la Rochapea, San Jorge, Landaben, sus variantes P21 y P22 son similares, aunque concretaremos ciertas diferencias en relación a su potencia. Y finalmente los perfiles C, que incluyen disposiciones estructurales marginales donde se han dado los mayores fenómenos de inestabilidad como en Arre, Gorraiz o Yesa y donde se observaron leves desperfectos tras terremotos relativamente pequeños como en Cemborain.

De esta manera han quedado configuradas tres grandes familias de terrenos: E, P y C con sus variantes geomorfológicas y evolutivas. En el mapa de la siguiente figura 7.01 se presenta la distribución de cada una de las grandes familias con criterios litológicos. En cada una de ellas se podrán tener en cuenta las recomendaciones que vamos a definir referentes a cimentaciones, excavaciones, rellenos, contenciones, recalces, rehabilitaciones, inestabilidades, aceleración sísmica, permeabilidad, etc., y comportamientos conocidos ante solicitaciones de obras de edificación, rehabilitación o de infraestructuras, algunas de ellas han sido descritas en capítulos dedicados.

7.2. Herramientas complementarias.

Para complementar y simplificar lo más posible las recomendaciones constructivas, vamos a apoyarnos en cinco consideraciones o herramientas complementarias que se ven reflejadas en las siguientes cinco imágenes.

1) La división de las siete familias de terrenos en tres grupos de conducta análoga (figura 7.01)
2) La clasificación de I a VI del grado de meteorización de los macizos rocosos según la ISRM (1981) que podemos ver desarrollado en el capítulo sobre características geomecánicas y resumido en la figura 7.02 o extraerlo de la tabla XVII.
3) Los criterios de excavabilidad de Franklin de 1974 en la figura 7.03.
4) Las profundidades de excavación con cimentaciones colindantes. Criterios para calcular el valor de P (m) Acondicionamiento del terreno. Cimentaciones. NTE (1998). Figura 7.04.
5) La relación entre el RMR y el Em (GPa) de la figura 7.05 a partir de los trabajos de Galera JM, Álvarez M, y Beniawski DE, 2005.Figura 7.05.

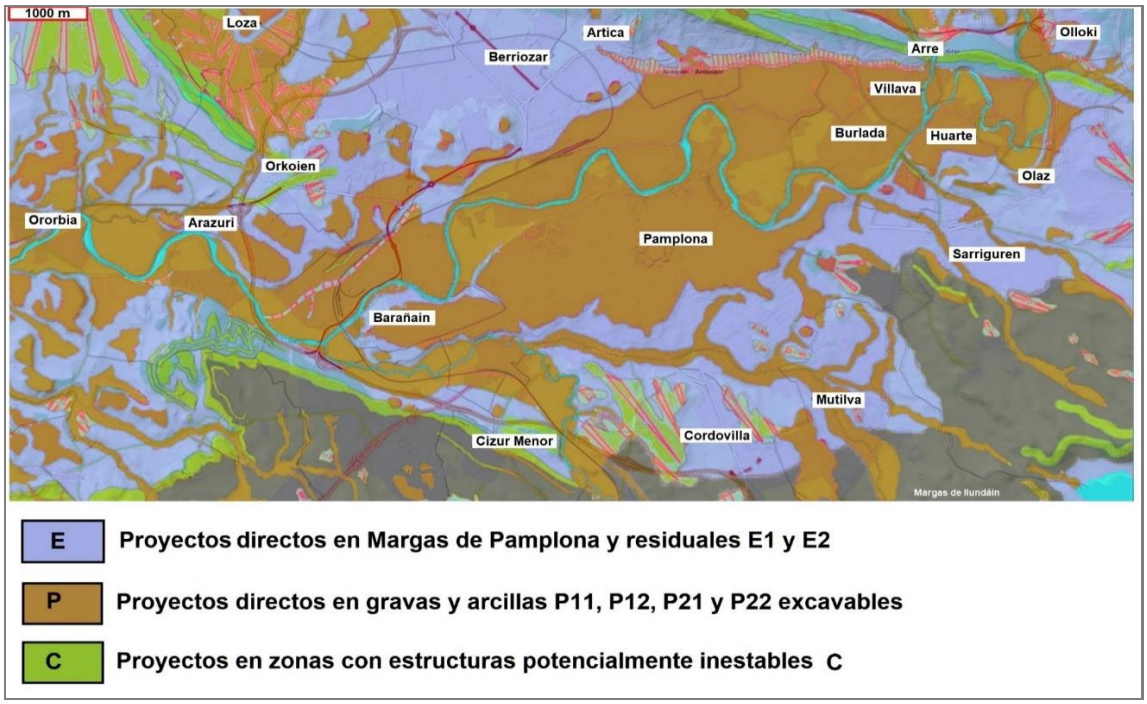


Figura 7.01. Las tres grandes familias de terrenos de características geotécnicas integradas para el área metropolitana de Pamplona.

Formación eocena de Margas de Pamplona

GRADO DE METEORIZACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS (ISRM 1981)

I INALTERADA O SANA: no son visibles señales de meteorización. Roca fresca. Algunas discontinuidades pueden mostrar leves teñidos. *Rc>260 kp/cm²*

II LEVEMENTE ALTERADA: meteorización penetrativa desarrollada en superficies de discontinuidades abiertas, pero solo meteorización leve del material rocoso. Las discontinuidades están coloreadas y la coloración puede extenderse dentro de la roca unos pocos milímetros desde la superficie de la discontinuidad. *105<Rc<260 kp/cm²*

III MODERADAMENTE METEORIZADA: una leve coloración se extiende por la mayor parte de la masa. El material no es disgregable (salvo a trasvés de la fracturación). *50<Rc<105 kp/cm²*

IV MUY METEORIZADA: la alteración se extiende por toda la masa y el material rocoso es parcialmente disgregable. Todo el material excepto el cuarzo está coloreado. La roca puede ser excavada con martillo de geólogo. *10<Rc<50 kp/cm²*

V COMPLETAMENTE METEORIZADA: la roca está totalmente teñida, descompuesta y disgregada; solamente fragmentos de roca mantienen textura y estructura. La apariencia externa es de un suelo. *5<Rc<10 kp/cm²*

Figura 7.02. Grado de meteorización de macizos rocos (ISRM 1981) (ver parte tabla XVII en la parte tres).

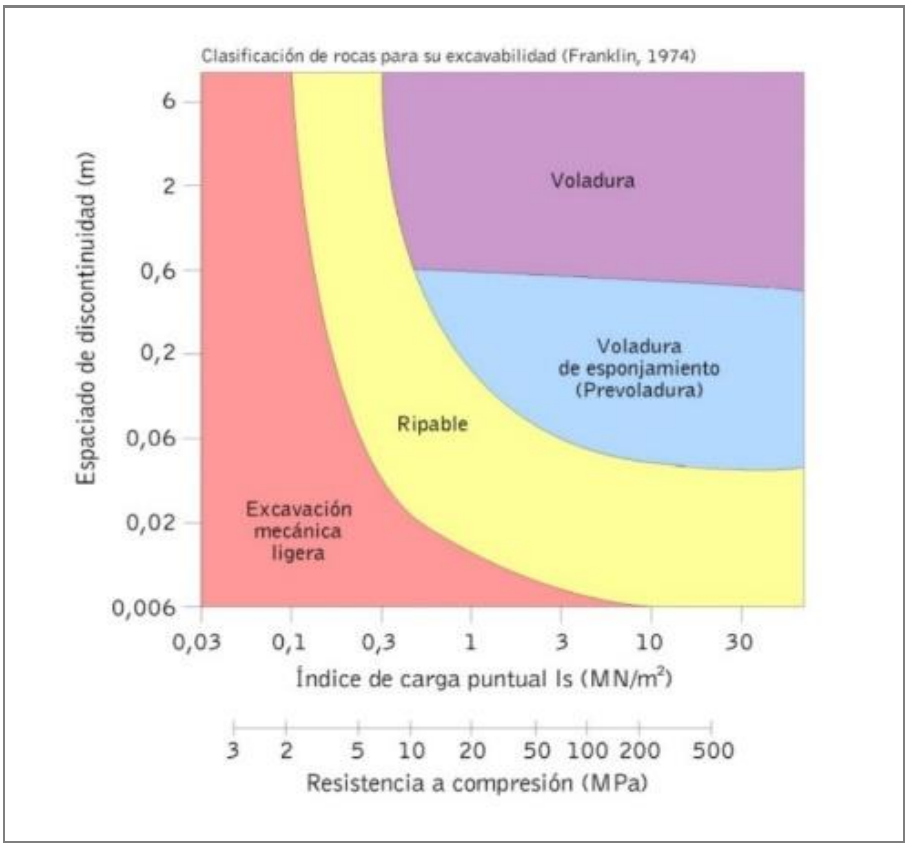


Figura 7.03. Criterios de excavabilidad de Franklin (1974).

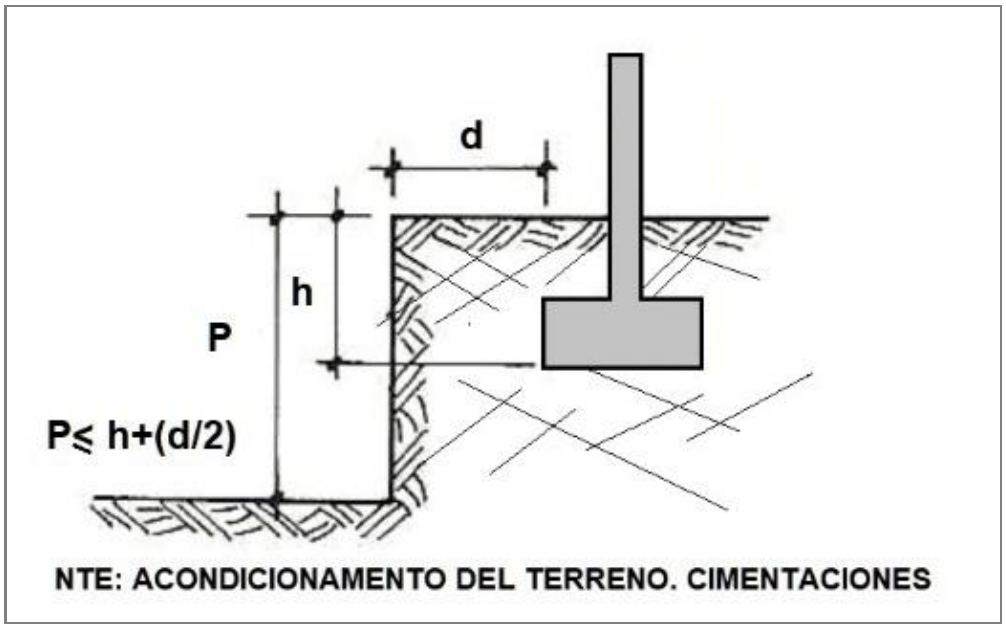


Figura 7.04. Profundidad de excavación y cimentaciones colindantes. Criterios para calcular el valor de P (m) *Acondicionamiento del terreno. Cimentaciones*. NTE (1998).

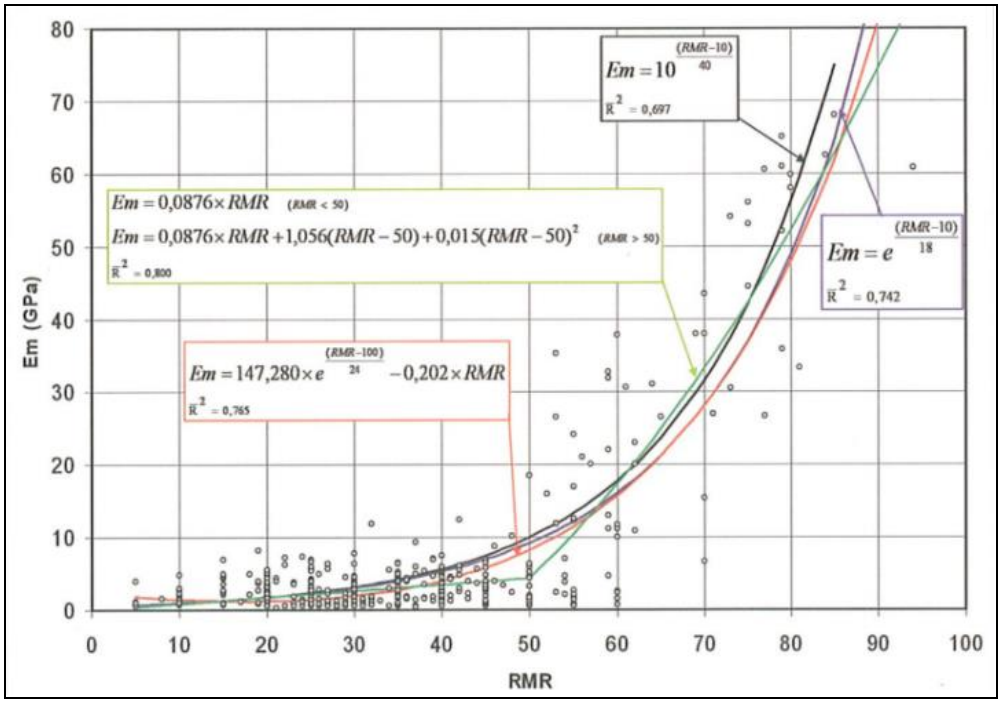


Figura 7.05. Relación entre el RMR y el Em (GPa) Galera JM, Álvarez M, Beniawski DE, 2005.

7.3. Familia geotécnica E (Margas de Pamplona y sus residuales).

Como ya hemos comentado, esta familia está constituida por los perfiles E1 y E2 que se diferenciarán en el estudio geotécnico a partir de los perfiles de alteración con suelos o roca muy alterada según las clasificaciones que se quieran utilizar, por ejemplo, las del grado de meteorización de macizos rocosos según ISRM (1981), los datos de la velocidad de las ondas S, la resistencia a compresión simple, el valor del RMR en casos de obras de excavación o los ensayos de penetración dinámica en golpeo/profundidad que el estudio geotécnico determine. Los terrenos E1 serían aquellos en los que los perfiles alterados no alcanzan los 3 m de profundidad y los E2 los que los superan.

7.3.1. Perfil geotécnico E1. Margas de Pamplona sanas y semisanas.

Figura 7.06. Afloramiento de Margas de Pamplona (E1) en las inmediaciones del estadio de El Sadar (al fondo) en un talud 1H:3V tratadas con un gunitado con mallado anclado y vegetación a pie ante la rapidez del deterioro producido y acumulación de residuales a pie de talud.

7.3.1.1. Cimentaciones.

La recomendación es la cimentación directa por medio de zapatas aisladas hasta el mínimo de profundidad que se requiera, las cargas podrán alcanzar los 5-10 kp/cm². No se esperan asientos significativos y dependerán de la magnitud de las cargas y del tamaño de las cimentaciones. En este tipo de terrenos se puede formar una capa centimétrica de margas alteradas, el estudio geotécnico y el proyectista deberán tenerlo en cuenta a la hora de apoyar soleras, muretes, elementos constructivos de bajas cargas, accesos de hormigón en masa, etc. Los datos, como hemos visto, muestran que se pueden formar perfiles de residuales que cambien de volumen en función de la humedad ambiental. En el caso de apoyos por debajo de la capa activa de unos 3 m de profundidad no hay ningún problema de desarrollo del fenómeno, pero por encima de ella es conveniente proyectar un conjunto de juntas que se amolden a estas variaciones de volumen, normalmente estacionales.

7.3.1.2. Excavaciones.

Se trata de terrenos duros y muy duros, generalmente son ripables y tradicionalmente han sido excavados con excavadoras, raramente con martillos neumáticos y no se han utilizado explosivos cerca de áreas habitadas. Según los criterios de excavabilidad de Franklin (1974) basados en la calidad geomecánica del macizo a partir de parámetros como el RQD o el RMR, la existencia de juntas y de la resistencia a compresión simple, este perfil se califica entre excavable y ripable. En caso de existir edificios colindantes se aplicará lo mostrado en la figura 7.04.

7.3.1.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas.

Las excavaciones temporales podrán realizar inicialmente taludes 1H:5V (80º). Se deberán comprobar las orientaciones de las fracturas y diaclasas para determinar posibles inestabilidades en función de las orientaciones de las discontinuidades en el macizo rocoso. Se debe prestar atención especial a la existencia y movimiento de agua por dichas fracturas. En excavaciones y taludes temporales o definitivos que se encuentren cerca de edificaciones y en el caso de excavar por debajo del plano de apoyo de la cimentación colindante sin poder mantener una distancia de seguridad estructural geotécnica, que se puede determinar, por ejemplo, a partir de la NTE Acondicionamiento del Terreno, Cimentaciones, 1998 (ver figura 7.04), se deberán tomar las medidas adicionales de contención que indique la dirección de obra y evitar fenómenos de descompresión en los horizontes sobre los que se apoya la cimentación colindante. Los taludes definitivos se recomiendan 3H:2V (30º-35º).

7.3.1.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015).

Construcción de importancia normal.

Factor ϱ =1,0 condición: ab. ϱ =0,09g < 0,1g entonces S=C/1,25

Coeficiente del terreno (C=1,3 los 3 primeros metros C=1 hasta 30 m) S_{global}=0,82

ac= 0,09 x 1,0 x 0,82 = 0,074g

Construcción de importancia especial.

Factor ϱ =1,3 condición: ab. ϱ =0,12g >0,1g entonces S = C/1,25+3,33[ϱ.ab/g)-0,1](1-C/1,25)

Coeficiente del terreno (C=1,3 los 3 primeros metros C=1 hasta 30 m) S_{global}=0,81

ac= 0,09 x 1,3 x 0,81 = 0,095g

7.3.1.5. Contenciones.

Para la utilización de contenciones con muros, escolleras, bulones, anclajes, pantallas de micropilotes, etc. Se utilizarán los datos extraídos del RMR. Datos orientativos: peso específico aparente: 2,40 t/m³. Ángulo de rozamiento: 20-25º, cohesión: 10-15 t/m² y módulo de deformación E=10 GPa.

7.3.1.6. Utilización de los materiales para préstamos.

Los materiales provenientes del triturado de las margas excavadas, incluso hasta grados III de alteración (ISRM, 1981) se consideran *tolerables*, según la OC-326/00. Si presentan plasticidad se les tratará como *marginales*. Las margas sanas en el exterior son materiales fácilmente degradados por la humedad, por el sol, el aire y los ciclos hielo-deshielo. Se consideran como *rocas marginales* y para su utilización se pueden mezclar con gravas de los perfiles P1 y P2, añadir aglomerantes como cemento, cal u otras soluciones dependiendo de cuál vaya a ser su uso. Siempre se suele acometer un sencillo estudio dedicado a cada promoción que permita definir su puesta en obra (por ejemplo, PG-3, 2001).

7.3.2. Perfil geotécnico E2. Margas de Pamplona alteradas.

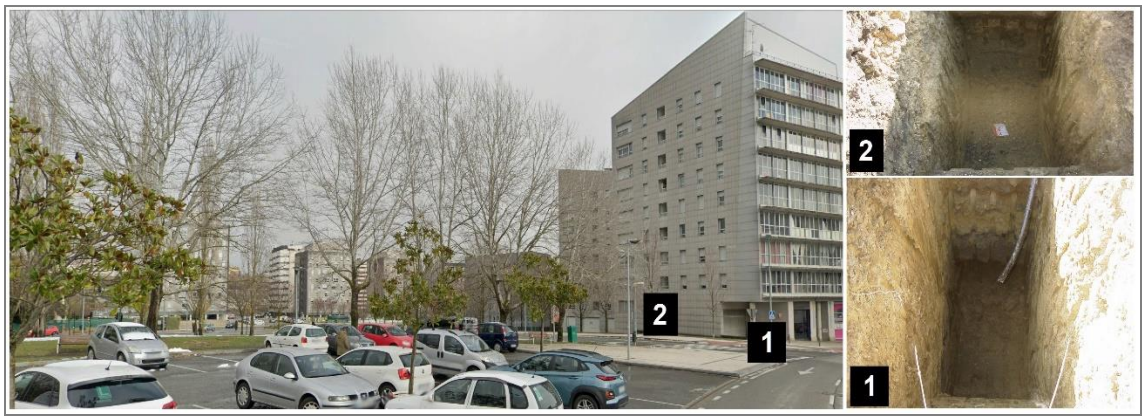


Figura 7.07. Un edificio en Mendillorri cimentado a más de 3 m de profundidad en roca semialterada degradada de las Margas de Pamplona (E2) con un perfil de alteración que alcanza localmente unos 10 m. Se pueden ver las características del terreno en sendas calicatas realizadas a esas profundidades.

7.3.2.1. Cimentaciones.

La recomendación es la cimentación por medio de pozos o zapatas aisladas que alcancen un perfil de roca de al menos grado de alteración II-III (hasta el mínimo de profundidad que se requiera, las cargas podrán alcanzar los 3-7 kp/cm². No se esperan asientos significativos y dependerán de la magnitud de las cargas y del tamaño de las cimentaciones. Si no se alcanzan profundidades suficientes para apoyar en el macizo rocoso y se opta por hacerlo en los niveles de grado IV-V, las cargas no superarán los 2 kp/cm² y se realizará un estudio de los asientos derivados. En este caso es recomendable el arriostrado de las cimentaciones con el objeto de puentear las heterogeneidades que pudieran existir. En casos de cargas altas y profundidades normalmente superiores a 6 -7 m se han utilizado pilotes y micropilotes, dependiendo de las afecciones a edificios o infraestructuras cercanas, se han utilizado pilotes excavados con o sin camisa recuperable y en espacios abiertos también por hinca.

7.3.2.2. Excavaciones.

Se trata de terrenos medios a duros, fácilmente excavables. Según los criterios de excavabilidad de Franklin (1974) basados en la calidad geomecánica del macizo a partir de parámetros como el RQD o el RMR, la existencia de juntas y de la resistencia a compresión simple, este perfil es excavable. En caso de existir edificios colindantes se aplicará lo mostrado en la figura 7.04.

7.3.2.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas.

Las excavaciones temporales podrán realizar inicialmente taludes 1H:2V (60-65º). Se deberán comprobar las orientaciones de las fracturas, y cuerpos blandos para determinar posibles inestabilidades en función de las orientaciones de las discontinuidades en el terreno. Se debe prestar atención especial a la existencia y movimiento de agua.

En excavaciones y taludes temporales o definitivos que se encuentren cerca de edificaciones y en el caso de excavar por debajo del plano de apoyo de la cimentación colindante sin poder mantener una distancia de seguridad estructural geotécnica, que se puede determinar, por ejemplo, a partir de la NTE Acondicionamiento del Terreno, Cimentaciones, 1998 (ver figura 7.04), se deberán tomar las medidas adicionales de contención que indique la dirección de obra y evitar fenómenos de descompresión en los horizontes sobre los que se apoya la cimentación colindante. Los taludes definitivos se recomiendan 3H:2V (30º-35º).

7.3.2.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015).

Construcción de importancia normal.

Factor ϱ =1,0 condición: ab. ϱ =0,09g < 0,1g entonces S=C/1,25

Coeficiente del terreno (C=2,0 los 5 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,14

ac= 0,09 x 1,0 x 1,14 = 0,102g

Construcción de importancia especial.

Factor ϱ =1,3 condición: ab. ϱ =0,12g >0,1g entonces: S = C/1,25+3,33[ϱ.ab/g)-0,1](1-C/1,25)

Coeficiente del terreno (C=2,0 los 5 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,14

ac= 0,09 x 1,3 x 1,14 = 0,134g

7.3.2.5. Utilización de los materiales para préstamos.

Los materiales provenientes de margas alteradas grados IV-VI de alteración (ISRM, 1981) se consideran *no tolerables* y *marginales*.

7.3.2.6. Consideraciones referentes al cambio de volumen.

Los terrenos que presentan perfiles E2 consisten en importantes depósitos de margas alteradas o suelos residuales, el estudio geotécnico y el proyectista deberán tenerlo en cuenta a la hora de apoyar no solo soleras, muretes o elementos constructivos de bajas cargas.

Han generado patologías estructurales en terrenos con índices de expansividad ligeramente mayores de 0,05MPa en condiciones muy concretas de carga, profundidad y puesta en servicio. Los residuales que cambien de volumen en función de la humedad ambiental son la norma. En el caso de apoyos por debajo de la capa activa de unos 3 m de profundidad no se generaría el problema, pero por encima de ella estas variaciones suelen ser estacionales con soluciones constructivas sencillas como ampliar el número de juntas o preservar el perímetro de las edificaciones de los ciclos de humedad-sequedad con aceras amplias o tratamientos de cal, geotextiles, etc.

7.4. Familia geotécnica P (Perfiles geotécnicos tipo Pamplona 1 y 2. Gravas cuaternarias).

Esta segunda familia de materiales es la más utilizada en la historia de la construcción de Pamplona y localidades adyacentes. Es, además, en la que mayor número de perfiles presentamos, la hemos dividido en cuatro: los perfiles geotécnicos P11 y P12 de las terrazas medias y altas y los perfiles geotécnicos P21 y P22 de las terrazas bajas y llanuras de inundación.

7.4.1. Perfil geotécnico P11. Gravas de terrazas someras, medias y altas.

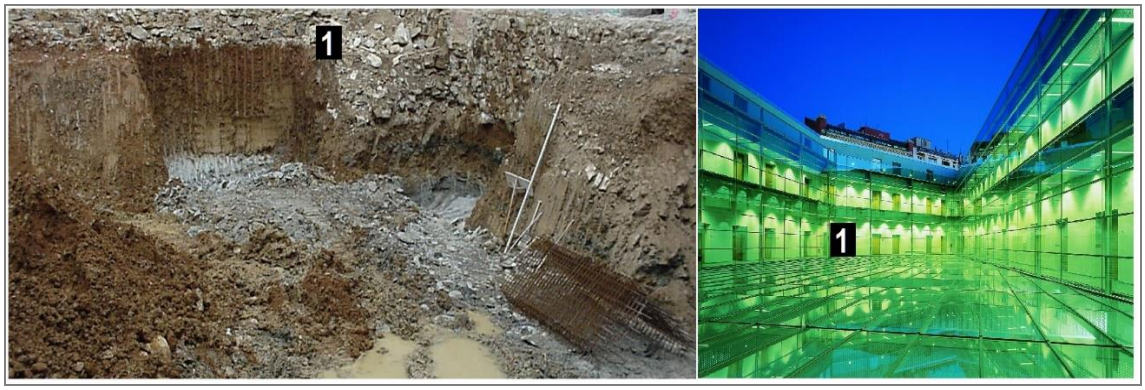


Figura 7.08. Las Gravas P11 sustentaron el hoy Parlamento de Navarra durante todo el siglo XX (1900-2000). Bajo ellas, las Margas de Pamplona, a unos 2-4 m de profundidad, reciben hoy las cargas del edificio desde 2001. Foto de la derecha de José Manuel Cutillas.

7.4.1.1. Cimentaciones.

La cimentación en estas gravas ha sido durante siglos la opción predominante por lo explicado sobre los materiales utilizados y el transcurso histórico, con la irrupción en el siglo XX del hormigón armado de la mano de los combustibles fósiles, el automóvil y la moda de los sótanos y aparcamientos, estos terrenos dejan de ser en el centro de la ciudad los preferidos para cimentar. La figura 7.08 muestra que la construcción de sótanos en la antigua Audiencia (hoy Parlamento) llevó las cargas directamente a las Margas de Pamplona. Las cimentaciones suelen ser continuas, corridas, muros de cimentación con cargas variables entre 2 y 4 kp/cm².

No se generaron asientos significativos a no ser que se realizasen actuaciones agresivas como fue el caso de la antigua Audiencia, en cualquier caso, todo dependerá de la magnitud de las cargas y del tamaño de las cimentaciones.

7.4.1.2. Excavaciones.

Se trata de terrenos medios, fácilmente excavables. En caso de existir edificios colindantes se aplicará lo mostrado en la figura 7.04.

7.4.1.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas.

Las excavaciones temporales podrán realizar inicialmente taludes 1H:2V (60-65º). Se deberán comprobar lentejones de limos y arcillas, y cuerpos blandos para determinar posibles inestabilidades en función de las orientaciones de las discontinuidades en el terreno. Se debe prestar atención especial a la existencia y movimiento de agua, esta formación generalmente almacena agua en el contacto con la roca.

En excavaciones y taludes temporales o definitivos que se encuentren cerca de edificaciones y en el caso de excavar por debajo del plano de apoyo de la cimentación colindante sin poder mantener una distancia de seguridad estructural geotécnica, que se puede determinar a partir de la NTE Acondicionamiento del Terreno, Cimentaciones, 1998 (figura 7.04), se deberán tomar las medidas adicionales de contención que indique la dirección de obra y evitar fenómenos de descompresión en los horizontes sobre los que se apoya la cimentación colindante. Los taludes definitivos se recomiendan 3H:2V (30º-35º).

7.4.1.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015).

Construcción de importancia normal.

Factor ρ =1,0 condición: ab. ρ =0,09g < 0,1g entonces S=C/1,25

Coeficiente del terreno (C=1,3 los 3 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,04

ac= 0,09 x 1,0 x 1,04 = 0,094g

Construcción de importancia especial.

Factor ρ =1,3 condición: ab. ρ =0,12g >0,1g entonces: $S = C/1{,}25+3{,}33[\rho.ab/g)-0{,}1](1-C/1{,}25)$

Coeficiente del terreno (C=1,3 los 3 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,04

ac= 0,09 x 1,3 x 1,04 = 0,122g

7.4.1.5. Utilización de los materiales para préstamos.

Los materiales provenientes de las gravas se consideran *tolerables*, según la OC-326/00. Si presentan plasticidad se les tratará como marginales. Las gravas de los perfiles P11 se pueden seleccionar por tamizado e incluso se les puede añadir aglomerantes como cemento, cal u otras soluciones y mezclarlas con materiales de E1 dependiendo de cuál vaya a ser su uso. Siempre se suele acometer un sencillo estudio dedicado a cada promoción que permita definir su puesta en obra (por ejemplo, PG-3, 2001).

7.4.2. Perfil geotécnico P12. Gravas cuaternarias de terrazas potentes, medias y altas.

Figura 7.09. Plaza de Euskal Herria en Ansoain al norte de Pamplona en la misma formación cuaternaria P12 relacionada con los depósitos del río Arga, pero más potentes (más de 6 m) y en la margen derecha. Almacenan agua prácticamente todo el año. Han venido siendo un terreno de cimentación relativamente reciente con la salida de Pamplona de las murallas a finales del siglo XIX y hasta prácticamente la mitad del siglo XX al irrumpir el hormigón, la energía fósil y a partir de los años 70-80 la construcción de sótanos.

7.4.2.1. Cimentaciones.

Las cimentaciones históricas en los terrenos P12 han sido en estas gravas. Durante siglos las opciones predominantes suelen ser cimentaciones continuas, corridas, muros de cimentación con cargas variables entre 2 y 4 kp/cm². No se generan asientos significativos. Los estudios geotécnicos suelen incluir un apartado que da información sobre la escasa deformabilidad de estos terrenos ante cargas relativamente altas.

7.4.2.2. Excavaciones.

Se trata de terrenos medios, fácilmente excavables. En caso de existir edificios colindantes se aplicará lo mostrado en la figura 7.04.

7.4.2.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas.

Las excavaciones temporales podrán realizar inicialmente taludes 1H:2V (60-65º) en seco. Se deberán comprobar lentejones de limos y arcillas, y cuerpos blandos para determinar posibles inestabilidades en función de las orientaciones de las discontinuidades en el terreno. Se debe prestar atención especial a la existencia y movimiento de agua, esta formación generalmente almacena agua en el contacto con la roca.

En excavaciones y taludes temporales o definitivos que se encuentren cerca de edificaciones se debe mantener una distancia de seguridad estructural geotécnica, que se puede determinar a partir de la figura 7.04. Si no, se deberán tomar las medidas adicionales de contención que indique la dirección de obra y evitar fenómenos de descompresión en los horizontes sobre los que se apoya la cimentación colindante. Los taludes definitivos se recomiendan 3H:2V (30º-35º) en seco.

7.4.2.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015).

Construcción de importancia normal.

Factor ϱ =1,0 condición: ab. ϱ =0,09g < 0,1g S=C/1,25

Coeficiente del terreno (C=1,3 los 6 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,04

ac= 0,09 x 1,0 x 1,04 = 0,094g

Construcción de importancia especial.

Factor ϱ =1,3 condición: ab. ϱ =0,12g >0,1g S = C/1,25+3,33[ϱ.ab/g)-0,1](1-C/1,25)

Coeficiente del terreno (C=1,3 los 6 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,04

ac= 0,09 x 1,3 x 1,04 = 0,122g

7.4.2.5. Utilización de los materiales para préstamos

Los materiales provenientes de las gravas se consideran *tolerables*, según la OC-326/00. Si presentan plasticidad se les tratará como marginales. Las gravas de los perfiles P12 se pueden seleccionar por tamizado e incluso se les puede añadir aglomerantes como cemento, cal u otras soluciones y mezclarlas con materiales de E1 dependiendo de cuál vaya a ser su uso. Siempre se suele acometer un sencillo estudio dedicado a cada promoción que permita definir su puesta en obra (por ejemplo, PG-3, 2001).

7.4.3. Recomendaciones especiales sobre los Perfiles geotécnicos P2 de terrazas bajas.

Los perfiles geotécnicos P2 son los terrenos que mayores problemas geológicos y geotécnicos han generado en la amplia área estudiada, pero no pertenecerían a la categoría de la geotecnia puramente mecánica, sino más bien ambiental. Son debidos a que buena parte de los terrenos que hemos catalogado dentro de la familia P2 en realidad son llanuras de inundación. Terrenos y clima juegan un papel esencial en la interacción con la obra pública o la edificación. Tras los cambios debidos al abandono de la pequeña agroindustria, que hasta hace bien poco convivía con en el medio urbano de los centros de las villas que miran al río Arga y sus afluentes, y especialmente de la capital Pamplona, comenzaron a urbanizarse estas áreas en las que la clásica consideración de los periodos de retorno se ha visto drásticamente perturbada en los últimos años.

Esta pervivencia del sector primario en las urbes modernas fue sustituida por la urbanización, la construcción de centros comerciales, instalaciones deportivas, edificios administrativos, etc. (Aretxabala A. 2019). Una buena parte de la llanura de inundación del río Arga y de otros afluentes está urbanizada desde hace apenas dos décadas. En este corto lapso de historia reciente ya ha sufrido al menos tres episodios de inundación catastrófica, la última en diciembre de 2021. Por lo tanto, lo primero que debemos tener en cuenta a la hora de interactuar con los perfiles P21 y P22 es que el agua estará presente en mayor o menor medida y que, aunque no seamos muy conscientes de ello, estamos interactuando directamente con el río a través de la dinámica de uno de los órganos fluviales menos considerados en el sector de la construcción: la llanura de inundación.

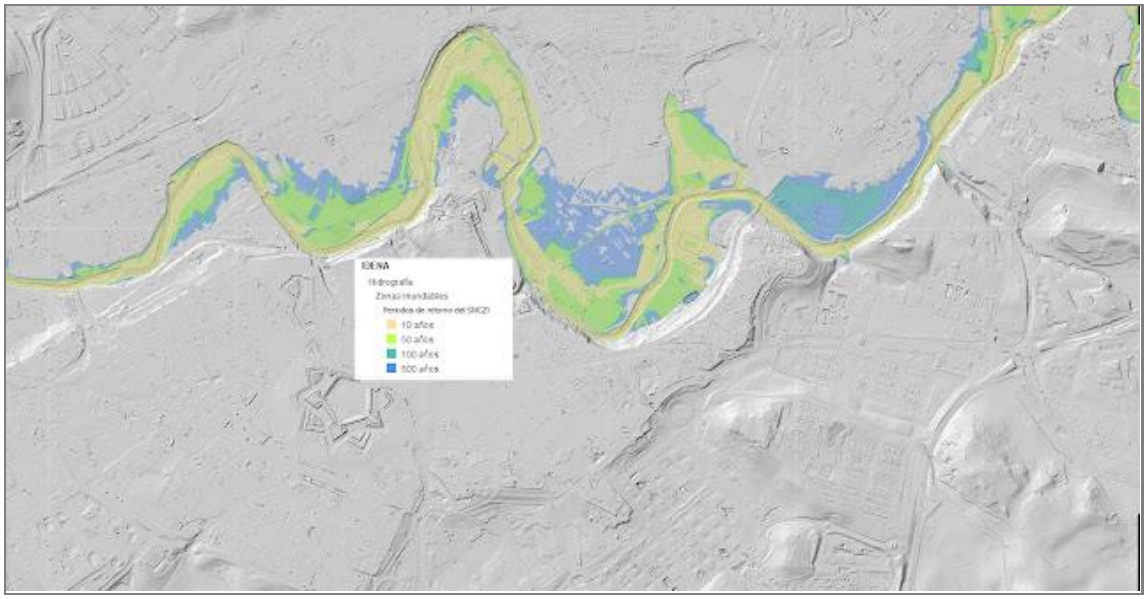


Figura 7.10. Períodos de retorno de inundación en la llanura aluvial del río Arga para 10 años (naranja), 50 años (verde claro), 100 años (verde oscuro) y 500 años (azul) según el SNCZI del Ministerio para la Transición Ecológica, en el área metropolitana de Pamplona. Mapa IDENA.

7.4.4. Perfil geotécnico P21. Terrazas bajas y márgenes de las llanuras de inundación.

Figura 7.11. Perfil P21 estudiado a unos 380 m al norte del río Arga. Se trata de materiales de gravas, arcillas, limos y arenas que no suelen sobrepasar los 5-6 m de profundidad. Descansan sobre perfiles normalmente alterados de Margas de Pamplona. A unos 3-4 m de profundidad las surgencias de agua son habituales en toda la traza de la llanura de inundación. Todo depende del régimen de precipitaciones. La zona señalada donde se hicieron las excavaciones 1 y 2 fue inundada en diciembre de 2021 y viene a ser el límite de la curva de período de retorno de 500 años (T 500). Al fondo, mirando hacia el sur, se eleva la vieja Iruña. Destacan la Catedral de Pamplona y el Archivo de Navarra, antiguo Palacio Real y más tarde Capitanía.

7.4.4.1. Cimentaciones.

Las cimentaciones históricas en los terrenos P21 han sido en estas gravas, raras veces en niveles arenosos o limosos que hasta hace poco eran tierras de cultivo. Durante siglos las opciones predominantes suelen ser cimentaciones continuas, corridas, muros de cimentación, losas, con cargas variables entre 1 y 3 kp/cm². No se generan asientos significativos. Los estudios geotécnicos suelen incluir un apartado que da información sobre la deformabilidad de estos materiales, en especial contando con la presencia de agua. En casos de cargas altas y profundidades normalmente superiores a 6 -7 m se han utilizado micropilotes y pilotes ejecutados "in situ" con camisa.

7.4.4.2. Excavaciones

Se trata de terrenos medios, fácilmente excavables. En caso de existir edificios colindantes se aplicará lo mostrado en la figura 7.04.

7.4.4.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas.

Las excavaciones temporales duran muy poco tiempo por la presencia de agua, suelen ser necesarias medidas de refuerzo y contención. Se debe prestar atención especial a la existencia y movimiento de agua, especialmente en el contacto con la roca. En excavaciones y taludes temporales o definitivos que se encuentren cerca de edificaciones se debe mantener una distancia de seguridad estructural geotécnica, que se puede determinar a partir de la figura 7.04.

7.4.4.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015).

Construcción de importancia normal.

Factor ϱ =1,0 condición: ab. ϱ =0,09g < 0,1g S=C/1,25

Coeficiente del terreno (C=1,3 los 6 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,04

ac= 0,09 x 1,0 x 1,04 = 0,094g

Construcción de importancia especial.

Factor ϱ =1,3 condición: ab. ϱ =0,12g >0,1g S = C/1,25+3,33[ϱ.ab/g)-0,1](1-C/1,25)

Coeficiente del terreno (C=1,3 los 6 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,04

ac= 0,09 x 1,3 x 1,04 = 0,122g

7.4.4.5. Utilización de los materiales para préstamos.

Los materiales provenientes de las gravas se consideran *tolerables*, según la OC-326/00. Si presentan plasticidad se les tratará como marginales. Las gravas de los perfiles P21 se pueden seleccionar por tamizado e incluso se les puede añadir aglomerantes como cemento, cal u otras soluciones y mezclarlas con materiales de E1 dependiendo de cuál vaya a ser su uso. Siempre se suele acometer un sencillo estudio dedicado a cada promoción que permita definir su puesta en obra (por ejemplo, PG-3, 2001).

7.4.5. Perfil geotécnico P22. Gravas cuaternarias y terrazas bajas. Llanuras de inundación.

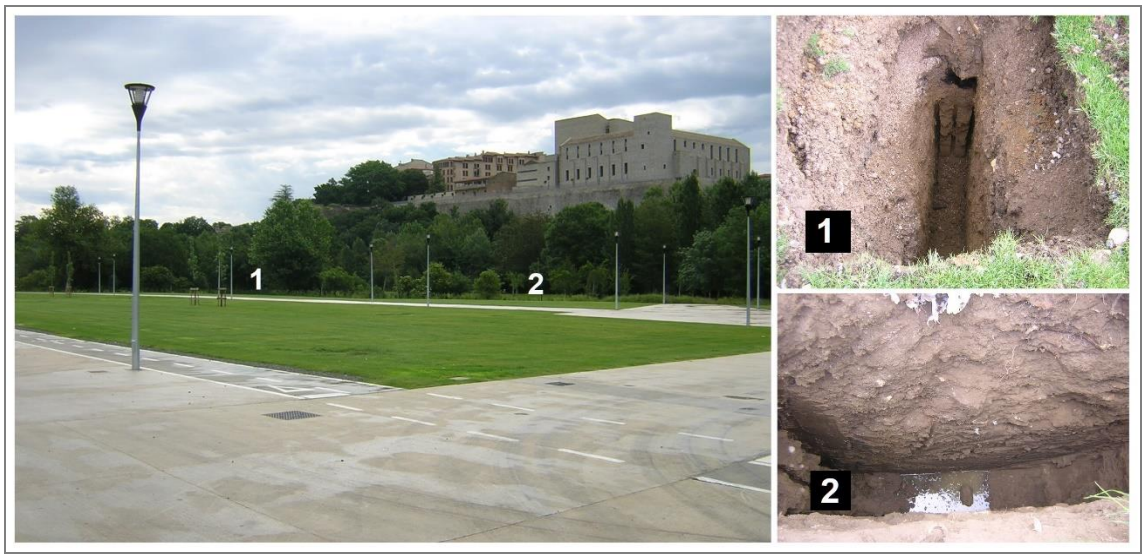


Figura 7.12. Perfil geotécnico P22 con más de 6 m de profundidad de materiales de llanura de inundación y antiguas huertas en el actual parque Runa. Eran terrenos de cultivo a la entrada del siglo XXI que fueron urbanizados, y en este caso, convertidos en el parque donde se ubican las instalaciones de feria durante las fiestas de San Fermín (norias, montañas rusas, etc.). Arriba la vieja Iruña se asoma a la llanura de inundación del río Arga. Destaca el edificio del Archivo de Navarra, antiguo Palacio Real y edificio de Capitanía.

7.4.5.1. Cimentaciones.

Las cimentaciones históricas en los terrenos P22 han sido en gravas y raras veces en los niveles arenosos, limosos y arcillosos. Durante siglos las opciones predominantes suelen ser cimentaciones continuas, corridas, muros de cimentación, losas de cargas bajas dado que existen terrenos extremadamente blandos y saturados intercalados, especialmente en las partes más bajas. Pueden generarse asientos importantes. Los estudios geotécnicos suelen incluir un apartado que da información sobre la alta deformabilidad de estos materiales, en especial por la presencia de agua constante en las partes más bajas y variable en una traza de hasta 500 m perpendicular al río. En los últimos tiempos han sido habitualmente puenteadas y se han utilizado cimentaciones semiprofundas, pozos de cimentación, cimentaciones profundas, etc., para acceder a las Margas de Pamplona.

7.4.5.2. Excavaciones.

Se trata de terrenos medios, fácilmente excavables. En caso de existir edificios colindantes se aplicará lo mostrado en la figura 7.04, aunque en este tipo de terrenos, dada la persistencia de niveles de agua y la inestabilidad de cuerpos blandos como lentejones de arenas y limos saturados, suelen hacerse estudios dedicados.

7.4.5.3. Estabilidad de las excavaciones.

Las excavaciones temporales son siempre inestables (las definitivas no existen), suelen ser necesarias medidas de refuerzo y contención. Se debe prestar atención especial a la existencia y movimiento de agua, especialmente en el contacto con la roca.

7.4.5.4. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015).

Construcción de importancia normal.

Factor ϱ =1,0 condición: ab. ϱ =0,09g < 0,1g S=C/1,25

Coeficiente del terreno (C=2 los 6 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,15

ac= 0,09 x 1,0 x 1,15 = 0,104g

Construcción de importancia especial.

Factor ϱ =1,3 condición: ab. ϱ =0,12g >0,1g S = C/1,25+3,33[ϱ.ab/g)-0,1](1-C/1,25)

Coeficiente del terreno (C=2 los 6 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,16

ac= 0,09 x 1,3 x 1,16 = 0,136g

7.4.5.5. Utilización de los materiales para préstamos.

Los materiales provenientes de las gravas se consideran *tolerables*, según la OC-326/00. Si presentan plasticidad se les tratará como marginales. Las gravas de los perfiles P22 se pueden seleccionar por tamizado e incluso se les puede añadir aglomerantes como cemento, cal u otras soluciones y mezclarlas con materiales de E1 dependiendo de cuál vaya a ser su uso. Siempre se suele acometer un sencillo estudio dedicado a cada promoción que permita definir su puesta en obra (por ejemplo, PG-3, 2001).

7.4.6. Consideraciones geológicas e históricas adicionales sobre urbanización en perfiles P2.

Los ríos, especialmente los arroyos pequeños, son sistemas que regulan ecosistemas y clima con reacciones biogeoquímicas invisibles al ojo humano, pero con una enorme capacidad de transformación de la materia orgánica. Son claves en el ciclo de carbono y en la salud de los habitantes que viven cerca, incluidos los humanos. Las poblaciones de especies de agua dulce han disminuido en un 83% en promedio desde 1970 (WWF-Anheuser-Busch InBev, 2019). Durante el itinerario aguas abajo, los ríos transforman los materiales geológicos y biológicos que transportan, así como las mezclas de ambos en forma de coloides. Se acumulan en los seres vivos, en los sedimentos, se transforman en gases como el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4).

Uno de los principales materiales que provienen de los ecosistemas terrestres y llegan a los ríos es la materia orgánica, hojas, ramas, restos animales, ricos en carbono, son el alimento indispensable para organismos fluviales, como bacterias, algas, líquenes u hongos. Las visiones emergentes distinguen los caudales climáticos, cuyos cambios están relacionados solo con cambios del clima, de los caudales naturales, donde además del clima se integran los usos del suelo por parte de las comunidades humanas. En las últimas siete décadas se aprecia la tendencia generalizada al descenso de caudales en todas las estaciones anuales, bastante más significativa en la cuenca del Ebro en otoño e invierno. Si consideramos los últimos 20 años se nota aún más, además los mayores caudales en momentos de riada están aumentando por cuestiones que incluyen cambios en los patrones climáticos y urbanismo (figura 7.13) que han modificado la dinámica biológica comentada.

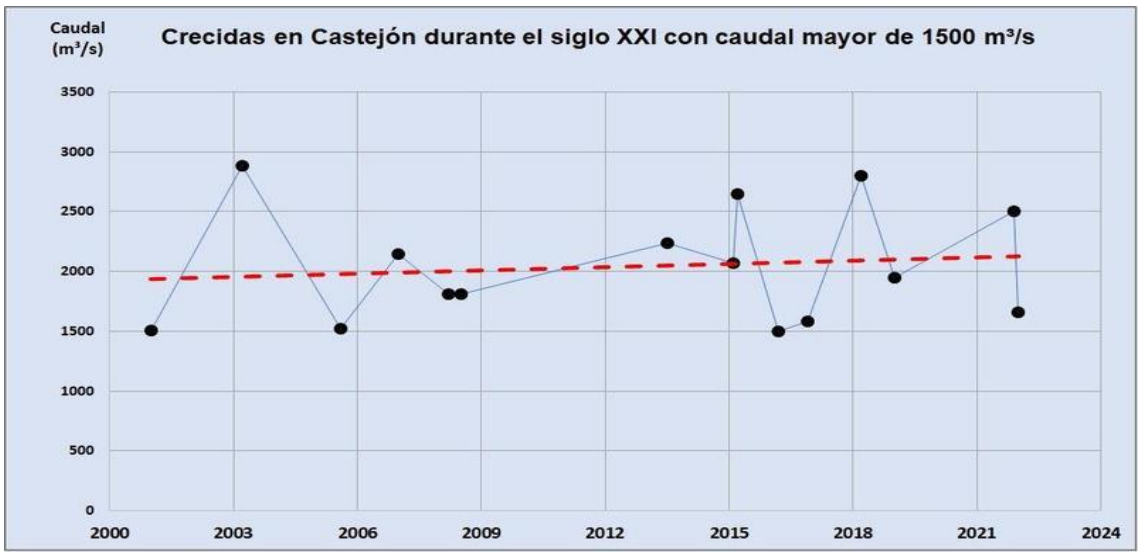


Figura 7.13. A pesar de haber disminuido las precipitaciones, los eventos de avenida que han superado el caudal de 1500 m³/s crecen en frecuencia y en cantidad. Se puede estimar un incremento en torno a 100 toneladas de agua por segundo cada década. Crecidas en Castejón 2000-2022 (Aretxabala, A. 2022).

Para evitar los daños de estas crecidas que, como muestran los datos son cada vez más habituales e intensas (figura 7.13), distintas agrupaciones sindicales e incluso representantes públicos apelan a *"la limpieza del río, sus márgenes y sus fondos"*, refiriéndose no a la retirada de neumáticos, chatarra, nitratos, etc., sino al dragado de fondos y vegetación de ribera que, según creen "*reduciría los daños*". Esta afirmación no tiene fundamento empírico ninguno y ha sido comprobada desde el ámbito científico como una mera superstición. Se trataría de una *"medida placebo"* (Ollero, A. 2013).

> *"La "limpieza" es una actuación destructiva del cauce que no sirve para reducir los riesgos de inundación y que puede originar graves consecuencias tanto en el medio natural como en los usos humanos del espacio fluvial. Es necesaria una labor continua de concienciación y educación para conseguir que las sociedades ribereñas renuncien a este tipo de acciones y promuevan mecanismos alternativos de gestión y convivencia con el riesgo"*. Por qué NO hay que limpiar los ríos. (Ollero, A. 2013).

La Directiva Marco del Agua (UE-DMA, 2000) pone el acento a que los Estados den más espacio a los ríos, teniendo en consideración el mantenimiento y el *restablecimiento* de las llanuras aluviales, así como medidas para prevenir y reducir los daños a la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica a largo y no a corto plazo. Estos planes de gestión del riesgo de inundación deben ser revisados periódicamente y en caso de necesidad actualizarse, teniendo especialmente en cuenta las repercusiones del cambio climático en su incidencia.

En la Directiva Marco del Agua se rechazan también las actuaciones locales que derivan el problema aguas abajo con motas, muros o entubando los ríos en la falsa creencia de poder acometer acciones *"contra"* las inundaciones en un determinado tramo. Esta práctica es habitual en España, en Navarra y en el área metropolitana de Pamplona, pero siempre es en perjuicio de las comunidades aguas abajo a las que habitualmente se les encañona el caudal de las grandes avenidas.

El denominado principio de *solidaridad* de la DMA adquiere así un papel protagonista en la gestión del riesgo de inundación cuando la pretensión es "*llevar el problema a otra parte"*. Estas prácticas provocan inundaciones más graves una vez sobrepasados o superados los obstáculos. La crecida inundará lo primero que encuentre, sean huertas, granjas, polideportivos, zonas residenciales o bosques de ribera. En consideración a esas comunidades, los Estados miembros fueron exhortados desde la DMA a buscar una distribución justa de responsabilidades, decidiendo conjuntamente medidas para el beneficio común y no parcial en lo referente a la gestión del riesgo de inundación a lo largo de todo el curso del río. Las consecuencias de no haber comprendido el principio de solidaridad siguen siendo nefastas. Sin embargo, obviar el denominado *principio de solidaridad* por la DMA, tampoco soluciona el problema local de las crecidas.

Uno de los efectos más desconocido en el sector de la construcción es el de las inundaciones freáticas. El ejemplo de lo sucedido en varias localidades de la cuenca y barrios de la ciudad en el año 2013 fue muy significativo. Como ya comentamos, el río Arga se mantuvo muy alto por meses por una mezcla de causas naturales y artificiales. Con las riadas del 8 al 10 de junio de 2013, por ejemplo, en el barrio de San Jorge, se inundaron los pasadizos subterráneos y accesos, así como la plaza baja de la rotonda de la Avenida de Navarra a más de 300 m del curso fluvial. No fue repentino (figura 7.14), el agua se había estado almacenando durante meses de lluvias extraordinarias, las defensas y motas evitaron la entrada de agua a la parte urbanizada, pero ésta se filtró finalmente por el contacto entre los perfiles P2 y E1.

Al recrecer las defensas (cada vez más altas), se comprime el flujo y se inyecta agua con más presión en las capas subterráneas (figuras 7.14 y 7.15) permeables como P21 y P22. Así la crecida se expande mucho antes hacia los laterales, por debajo del suelo que en superficie (la grava cuaternaria de la llanura es el terreno más permeable de los siete que hemos catalogado). De este fenómeno geológico y geotécnico se ha pasado a la equivocada interpretación de que *"cada vez con menos caudal se llega más alto porque el río está sucio"*.

Alfredo Ollero lo expresa de esta manera: *"Esto no se debe a la supuesta elevación del cauce, sino al hecho constatado de que se inundan terrenos muy alejados del cauce por la presión del agua desde el nivel freático"* (A. Ollero, 2013). Recordemos que la permeabilidad en estos terrenos es la más alta y que la permeabilidad es un parámetro que se mide en longitud/tiempo como cm/s, es decir, se trata de una velocidad. Nos enfrentamos así a uno de los diversos problemas derivados de la regulación: cuanto más lenta sea la crecida (dado que es regulada con los embalses para evitar picos, dilatando ésta en el tiempo) el proceso durará más, tal y como vimos del 9 al 19 de diciembre de 2021 desde Eugui (río Arga) hasta Tudela y desde Ullibarri-Gamboa (río Zadorra) hasta Tudela.

En los grandes ríos como el Ebro ya se juega tanto con la gestión y optimización del desembalse en cada subcuenca, que las crecidas no son en absoluto fenómenos naturales y están muy alejadas del equilibrio geomorfológico, especialmente subterráneo (y por lo tanto invisible) que el propio río diseñó. Las velocidades de transferencia (permeabilidad subterránea) prácticamente no han cambiado, lo han hecho las condiciones con el mantenimiento de largos periodos de transferencia.

Para evitar que coincidan las puntas de cada uno de los afluentes se termina generando una crecida con el menor pico posible, pero como vemos en la figura 7.13 es algo cada vez más frecuente y de mayor magnitud si lo medimos en toneladas de agua por segundo que atraviesan una determinada sección de río. El resultado es que se producen también más inundaciones freáticas, especialmente dañinas en áreas urbanizadas con la consiguiente creencia de que cada vez, con menores picos, las inundaciones son más dañinas porque el río no está limpio.

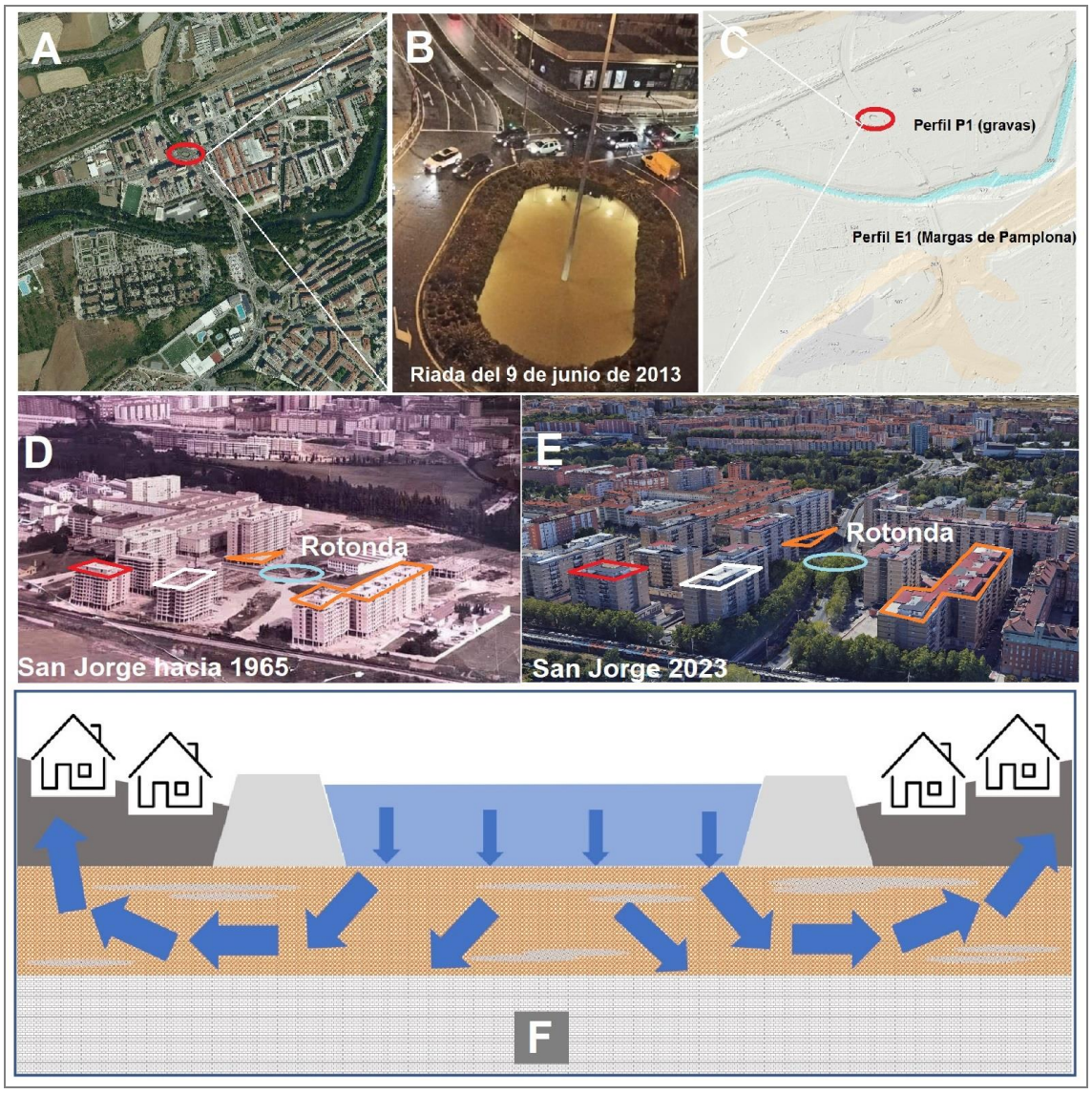


Figura 7.14. A. Situación de la rotonda de la Avenida de Navarra con pasos subterráneos y accesos bajo ella en la parte oeste del barrio de San Jorge de Pamplona sobre mapa del satélite Sentinel-2. **B**. Riada del 9 de junio de 2013 que se infiltró por las gravas de P2 hasta inundar toda la parte baja de la plaza, lugar de paso de peatones y reunión de vecinos. **C**. Situación geotécnica de la rotonda sobre las gravas de P2 a unos 300 m del curso del río Arga y las Margas de Pamplona aforando al sur, en la margen izquierda, subiendo al barrio de San Juan. **D**. Obras de urbanización y construcción de San Jorge (oeste) sobre P2 hacia 1965, cuando la Avenida de Navarra donde se construirá la futura rotonda y plaza baja (en azul) ni siquiera estaba trazada. **E**. Una toma similar con Google Earth casi seis décadas después, en 2023, con la situación de la rotonda actual. **F**. Incremento de inundaciones freáticas bajo enclaves humanos (urbanos, agrícolas, ganaderos, deportivos...) al aumentar la presión de agua en un cauce comprimido o encañonado de manera artificial y manteniendo durante días, especialmente con las laminaciones y regulaciones que duran semanas. Los niveles de columna de agua exceden en altura y longitud lo que el río diseñó en su autoconstrucción equilibrada.

7.4.7. Consideraciones generales sobre la construcción en las llanuras de inundación.

Las laminaciones son una manera efectiva con la que se evitan ciertos daños en poblaciones, pero como consecuencia, el proceso se dilata en el tiempo con varios días o semanas de paso de altos caudales, algo que, desafortunadamente está siendo perjudicial para ámbitos urbanos que se suelen saltar el principio de solidaridad de la DMA. Se crean defensas que, hasta cierto nivel de avenida, preservan zonas localizadas de los daños de la riada. Sin embargo, las áreas agrícolas que encontraban un aporte aliado de fertilidad en cada riada, no las percibían como un peligro hasta hace relativamente poco tiempo, por ello no se construyeron defensas o motas hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XX, la fecha clave de su inicio en el Ebro es 1961. Al estar indefensas ante los sucesivos periodos de saturación prolongada por las inundaciones freáticas, y en mucha más extensión, en los lugares que aún conservan la actividad agrícola, más altas defensas traen mayores daños con las inundaciones extraordinarias más frecuentes, por eso los agricultores se ven más perjudicados. Estas crecidas, ahora más mantenidas que antaño, recargan los acuíferos de los depósitos aluviales (la parte del río que no vemos debajo de edificios y huertos) con mayor presión y tiempo (ver figuras 7.13 y 7.14).

Se generan inundaciones freáticas cada vez más frecuentes y con mayor expansión. Fue a partir de la devastadora crecida de 1961 cuando proliferaron las motas o diques para proteger zonas de cultivo. Lo que parece oportuno y necesario es revisar los retornos en el tiempo en que los ríos vuelven a inundar su llanura aluvial, pues ya está claro que hay una fuerte distorsión entre la teoría y los impactos reales, las pérdidas humanas y las económicas. El problema de las inundaciones, en este marco de incremento de las frecuencias y magnitud de los daños, con la gestión del agua en la era del declive energético y el cambio climático, ha abierto un importante debate internacional. La investigación científica y la puesta en práctica de sus recomendaciones salva vidas, ahorra recursos públicos y es pedagogía social, para nuestros dirigentes y para las personas del ámbito científico y técnico, especialmente del sector de la construcción. El problema de los retornos actuales de las inundaciones se ha venido tratando de forma probabilística, pero con poca o ninguna revisión sobre los planes urbanísticos tras cada evento calificado de *"histórico"* una y otra vez. Por ejemplo, en el caso de la cuenca del Ebro en la Comunidad Foral, está estimado que las inundaciones se producirían, en algunas zonas de las afectadas, en un periodo de entre 50 y 100 años y rara vez se planifica con la de 500 (figura 7.15) según IDENA (Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra), cuando en lo que va de siglo XXI ya se han registrado ocho, de las que destacan tres especialmente (2003, 2013 y 2021). La siguiente figura 7.15 muestra la curva para un periodo de retorno de 500 años (T 500) para Burlada del SNCZI-IPE del Ministerio para la Transición Ecológica. La fotografía de abajo, cedida por uno de los afectados, muestra claramente que el día 10 de diciembre de 2021 se superó ampliamente. Lo mismo observamos en San Jorge o La Rochapea.

Figura 7.15. Burlada, 10 de diciembre de 2021.

Otro ejemplo significativo en el meandro de la Rochapea es que el río Arga presenta un *caudal natural* calificado en 2018 por el Ayuntamiento de Pamplona con un cero en el informe encargado para la redacción y ejecución de un plan integral de convivencia con el río Arga; se trataba de un área agrícola que daba de comer a la vieja Iruña y se urbanizó con la llegada del siglo XXI (figuras 7.16 y 7.17).

Las motas, diques y elevaciones con rellenos, como en el Parque Runa, además de las soluciones urbanísticas como las muy avanzadas en las viviendas de VPO de la Plaza de Pompeyo, no solucionan el problema para los casos extraordinarios, en la casi totalidad de los casos estudiados los empeoran, funcionando relativamente bien para períodos de retorno entre 10 y 50 años (Cabrejas, E. 2018). Una de las recomendaciones, quizás la más sorprendente de aquel informe de 2018, era la falta de *"definición del territorio fluvial"* poniendo de manifiesto que, "*uno de los grandes beneficios de devolver al río una parte de su espacio, redunda en una disminución de los efectos dañinos de las avenidas"* (página 53, *'Resiliencia y gestión del riesgo del espacio fluvial de Pamplona'*, Eva Cabrejas 2018), un punto de partida incondicional sobre el que comenzar a trabajar. A partir de aquí el problema no solo no se soluciona, sino que es agravado por esas malas soluciones, tal y como en 2018 concluyó el citado informe del Consistorio en el que, además se recogió un catálogo histórico de esas *"defensas"* (realmente se vio que eran obstáculos). Si nos fijamos en las fotografías de dos grandes inundaciones del siglo XXI en la figura 7.16: la de junio de 2013 con el paso máximo de 623 toneladas de agua por segundo en Pamplona y la de diciembre de 2021, con 608, encontramos tramos que corresponderían a eventos extremos de entre más de 50 y 500 años.

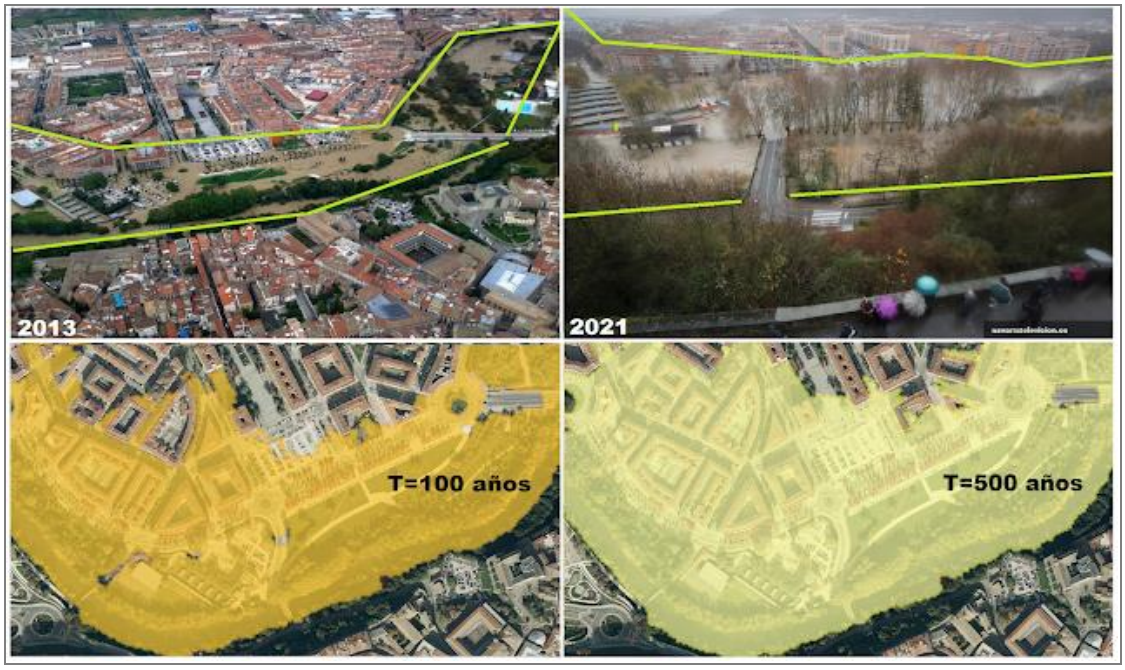


Figura 7.16. Arriba: dos fotografías desde el casco viejo de Iruña de las inundaciones de junio de 2013 (Gobierno de Navarra) y de diciembre de 2021 (Navarra Televisión) en el Parque Runa y la Rochapea. Abajo: mapas de periodos de retorno T 100 y T 500 años para la zona, IDENA (Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra).

Figura 7.17. Parque Runa y alrededores. Evolución urbanística desde las huertas de 1998 hasta julio de 2023.

Especialmente desde 2003, tenemos crecidas mayores que demuestran que defensas y motas no son una solución y sí muchas veces un problema. En Navarra hemos visto también que, tal y como se adelantó desde la ciencia ambiental, climática y geológica, los impactos de los eventos extremos debidos a los dos factores fundamentales indicados en la Directiva Marco del Agua (UE-DMA): calentamiento global y conquista de las llanuras aluviales, siguen en aumento. El incremento de caudales, frecuencias y, por lo tanto, de daños, son mayores.

Nada se puede acometer *"contra"*[15] un fenómeno natural de estas características que se repite cada vez más frecuentemente y de manera más violenta. Un cierto grado de contención tecnológica sigue ausente del debate y aún no ha permeado ciertas mentalidades forjadas durante la gran aceleración.

Meterse en callejones sin salida que habrá que desandar como sociedad, con nuevas pérdidas de vidas humanas y de las ingentes cantidades de energía adicional que ello conlleva, es un peligro evitable que obliga a tomar soluciones más efectivas y radicales. En el trasfondo persiste un enorme descontento con la gestión de las inundaciones, especialmente tras el enorme gasto y la frustración que supone para sus habitantes verse obligados a abandonar aquellas zonas que un día fueron forzadas a ser urbanizadas y habitadas de manera irracional.

La ciudadanía percibe cómo cada vez se derivan más recursos, millones de euros e incluso se paga perdiendo vidas, para ganar unos metros o unos centímetros al río, algo que no parece lo más razonable, pero podemos intentar comprender su dinámica, repasar nuestra relación secular con la dinámica del agua y retroceder. La retirada estratégica no es una derrota, es una herramienta más para dotar a las comunidades de mayores cotas de seguridad y bienestar. Podemos situar muy cerca en el tiempo la decisión del ser humano de invadir de manera irracional las riberas de los ríos y las llanuras de inundación. La razón de hacerlo radica en la confianza de que la modificación, conquista, desviación e incluso la destrucción de éstas, iba a tener resultados tan duraderos como los deseados. No en todas las sociedades aparece este impulso de manera simultánea, en algunas nunca fue así, simplemente por un conocimiento más profundo del medio o por la imposibilidad energética de ejecutarlo, y en otras, las más avanzadas en las que sí se hizo, ha comenzado a revertirse el proceso. La retirada estratégica que se ha puesto en marcha en EE.UU., Italia, Alemania, Reino Unido o en España con el proyecto Ebro Resilience, que surgen del reconocimiento de que en algún momento no se hicieron las cosas de manera adecuada. Si esta perspectiva apareció de manera repentina o si lo hizo progresivamente varía de unas comunidades a otras y aparece en diferentes contextos históricos y económicos.

---

15 El Ayuntamiento de Pamplona decidió tras las *"históricas"* riadas de diciembre de 2021 anunciar que "*Pamplona encargará a una empresa de ingeniería un análisis sobre áreas de mejora a acometer contra las crecidas del Arga*". Se ha decidido instar a la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) a que revise y mejore el sistema de previsión de crecidas del río. El alcalde ha solicitado una reunión con la presidenta de esa entidad. Asimismo, se ha hecho una puesta en común de errores detectados en la última inundación, como el hecho de que haya colectores que, cuando crece el Arga, se encuentran bajo la cota del río por lo que, en vez de cumplir su función de reducir el agua en circulación en algunos casos hasta llegaron a tener el efecto inverso, o la limitada utilidad que tuvieron las llanuras de inundación del parque de Aranzadi, cuya capacidad se vio rebasada en la crecida, ha indicado el Ayuntamiento. (20 M EP 17/12/2021).

La conquista generalizada de las llanuras de inundación fue debida a que alguna disposición especial impulsó a esas comunidades a hacerlo, pues ese paso se da desde una mentalidad que, en cuestión de conquistar o modificar las llanuras de inundación, prácticamente estaba ausente en la historia previa: aparecen las dinámicas de acaparación, ocupación y dominio.

Los tres aspectos que forman parte de nuestra modernidad son trazables en la evolución de expresiones como *"Patrimonio Natural"* que da cuenta de una mentalidad notablemente moderna, aunque también de apropiación de aquello que apenas conocemos, pero menos aún podemos controlar. Las riberas, como terrenos fértiles, fueron secularmente áreas productivas de una equilibrada relación cultural con el agua, no utilitarista, menos aún economicista, ni objetos de especulación inmobiliaria, pero en ocasiones acabaron siendo mercancías.

El respeto a la descomunal fuerza vital y modificadora del agua se basaba en el reconocimiento y admiración hacia el vigor de un elemento natural que esculpió la superficie habitada, los paisajes, y que, aunque muchas generaciones no lo presenciasen, se sabía de su energía y vehemencia a través de la cultura popular, del legado del folclore o por testimonios directos de familiares o vecinos. La era científica tan solo vino a confirmarlo.

Arrebatar áreas de expansión como llanuras de inundación, primera línea de costa o los mismos cauces, desviándolos y modificándolos, antaño se hacía desde el convencimiento de su temporalidad, casi nunca se produjo una invasión constructiva con pretensiones de apropiación, sino una relación circular de avance y retroceso con un gesto y una expresión rítmica y armónica al son de los movimientos de los propios cursos fluviales o la mar, algo que el ser humano sabía interpretar y admirar. Ese movimiento rítmico entre el ser humano y los cauces se ha vuelto tan invisible como traumático. Fueron los combustibles fósiles los que propiciaron esa pérdida de visión. Hasta bien entrada la era industrial no se acometieron las complejas infraestructuras que acompañan a las nuevas expectativas de dominio. Hoy, en esa danza rítmica secular nos disponemos para el próximo compás: un paso hacia atrás.

La revolución industrial introdujo un excedente energético que cambió la relación circular de algunas sociedades con la energía del medio y con el propio territorio. El son de los movimientos estacionales del agua dejó de acompañar el desarrollo humano y pasó a manos de la ciudad industrial y tecnológica basada en la quema de combustibles fósiles, tal cual la conoce nuestra generación. Aquella relación (o economía) circular que acompañó a los seres humanos que nos precedieron el 98% de nuestra historia (escrita), estaba basada en la energía del aire y en la solar que alimentaba a las plantas, éstas a los músculos de los animales, a los nuestros, a la madera, el carbón vegetal, la cera, el aceite de ballena o la construcción de saltos hidroeléctricos...

Las energías renovables fueron el motor principal de un pausado desarrollo y además siempre volvía al medio para una y otra vez recargarse y renovarse en forma de energía potencial, biota o fertilizante. Sin embargo, ese ciclo vivió una anomalía histórica con la ruptura del círculo. Al entrar ingentes cantidades de energía no renovable en la producción, en la economía y en la distribución territorial, por primera vez en nuestra historia aparecen el desecho y una exposición adicional debida a la modificación y apropiación de la dinámica del territorio. Una anomalía histórica de carácter geológico, no del mero despliegue de talento humano y tecnología para controlar un medio al que se intentó domesticar.

Con los recursos no renovables (ya en declive) se forjó la sociedad termoindustrial basada en una dinámica artificial que sigue siendo invisible y nos empuja a cometer una y otra vez los mismos errores, como luchar "contra" las inundaciones. Se calcula que más de 12.000 hectáreas quedaron anegadas durante días en Navarra en diciembre de 2021, dos personas fallecieron ese mes arrastradas por la avenida, posteriormente nos dispusimos una vez más a abarcar el problema como si de una lucha o una guerra contra el río se tratase.

Afectados y expertos analizan ahora las posibles soluciones para evitar futuros daños ocasionados por el desbordamiento de los ríos que no repitan los errores del pasado. La fría perspectiva que requieren estos fenómenos para evitar más daños no se puede abarcar con obras *"contra"* las inundaciones, que ya hemos visto cómo incluso en la era de la energía barata, abundante y versátil no sirvió para dominar, desviar, y mucho menos evitar el paso de miles de toneladas de agua por segundo en una sección de ribera y llanura de inundación (DMA).

7.5. Perfiles geotécnicos C. Relieves estructurales.

Figura 7.18. Perfil geotécnico C al norte de Pamplona en el paraje de Burria. En la PA-30 en dirección a Arre (al oeste, de frente en la foto) que comunica las localidades y las áreas industriales del norte de Pamplona. Podemos ver dos tipos diferentes de desplomes: 1) al sur el primero de carácter rotacional, más que estructural, se da con la meteorización y degradación de la roca. Los tratamientos con gunitado, hormigones proyectados, con fibras, con mallas e incluso bulonados y anclajes tienen una efectividad temporal limitada a evitar la caída de material sobre la calzada, pero al tratarse de rocas evolutivas con el tiempo los elementos de anclaje pierden su funcionalidad. 2) En el segundo caso, al norte, el deslizamiento es planar a favor de la marcada estratificación y por la degradación de los niveles de margas. Los tratamientos de anclaje y bulonado, así como los enfocados a preservar el material de los ataques atmosféricos y contención, tienen igualmente una efectividad temporal. La roca se cuartea y muchas veces se pueden observar las cabezas de bulones y anclajes sobresaliendo. Siempre que se pueda, los mejores resultados vienen con taludes lo más tendidos y revegetados posible, así como muretes de piedra tipo escollera al pie, gaviones, etc.

7.5.1. Disposiciones estructurales desfavorables e inestabilidades.

En la quinta parte en que se tratan los casos de Cemboráin, Arre y Yesa, se refleja de manera analítica la problemática inherente a estos terrenos C. En todos los casos, independientemente de la escala, subyace un factor común: la disposición estructural favorable no detectada o subestimada y parámetros geotécnicos variables con el clima, la sismicidad o la mano del ser humano.

7.5.1.1. Cimentaciones.

Las cimentaciones históricas en los terrenos estructurales C han consistido en cimentaciones continuas y atadas debido a las fuertes anisotropías presentes, zapatas corridas, muros de cimentación, losas de cargas medias, fueron ejecutadas históricamente para puentear las heterogeneidades inherentes a estos terrenos de transición de marcada orientación estructural. Existen niveles débiles de margas y lutitas alternando con calcarenitas y areniscas duras. En ocasiones hay presencia de agua y niveles saturados intercalados, especialmente visibles en excavaciones. Los estudios geotécnicos suelen incluir un apartado que da información sobre la fuerte anisotropía de estos materiales y su influencia en la transmisión de las cargas de cimentación.

7.5.1.2. Excavaciones.

Se trata de terrenos que requieren excavación mecánica ligera. En caso de existir edificios colindantes se aplicará lo mostrado en la figura 7.04 del que formará parte el factor de influencia estructural litológica.

7.5.1.3. Estabilidad de las excavaciones y obras subterráneas.

Las excavaciones son casi siempre inestables a no ser que la inclinación sea contra talud. En el resto de los casos son habituales inestabilidades pequeñas como la vista en Cemboráin (500 m³), el deslizamiento de Arre (75.000 m³) o el de Yesa (11.900.000 m³). Es necesario un estudio adecuado y frecuentemente medidas de refuerzo y contención. Se debe prestar atención especial a la existencia y movimiento de agua.

7.5.1.4. Contenciones.

Para la utilización de contenciones con muros, escolleras, bulones, anclajes, pantallas de micropilotes, etc., se utilizarán los datos extraídos del RMR. Datos orientativos: p. e. aparente: 2,40 t/m³. Ángulo de rozamiento: 15-20º, cohesión: 0-10 t/m² y módulo de deformación E<5 GPa.

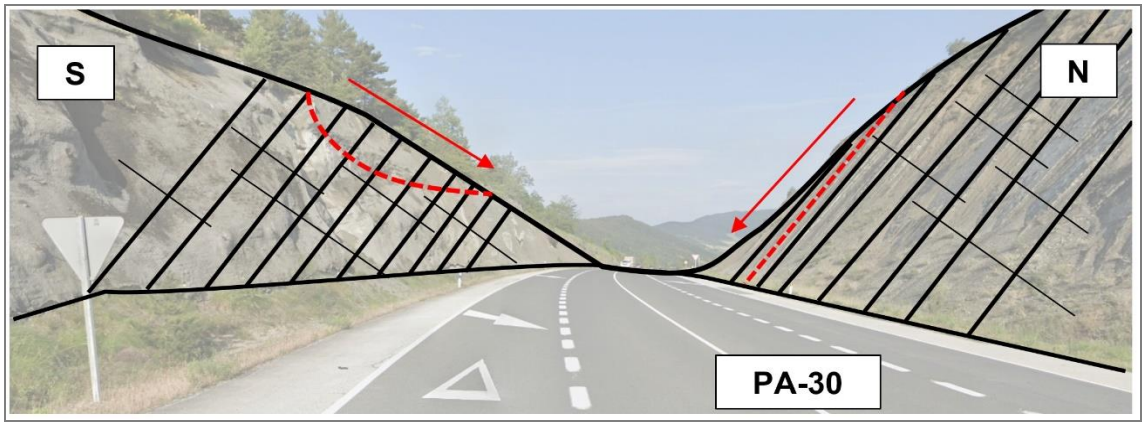


Figura 7.19. En la PA-30 en dirección a Arre (al oeste, de frente en la foto) podemos ver dos tipos diferentes de desplomes, al sur el primero (S) de carácter rotacional coincide con una orientación más favorable desde el punto de vista estructural y se produce por la meteorización y degradación de la roca, sin embargo, en este tipo de macizos rocosos son habituales las cuñas por diferentes familias de diaclasas o deslizamientos prácticamente rotacionales que involucran una buena masa de suelo o roca muy meteorizada. En el segundo caso (N) el deslizamiento es planar a favor de la marcada estratificación coincidente con la excavación y por la degradación de los niveles de margas. Este paraje se sitúa a 1 km del deslizamiento histórico y recurrente de Arre continuando hacia el oeste, que es hacia donde mira la foto.

7.5.1.5. Sismicidad (ab=0,09) NCSE-02 (actualización de mapas de 2015).

Construcción de importancia normal.

Factor ϱ =1,0 condición: ab. ϱ =0,09g < 0,1g S=C/1,25

Coeficiente del terreno (C=1,6 los 6 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,09

ac= 0,09 x 1,0 x 1,09 = 0,098g

Construcción de importancia especial.

Factor ϱ =1,3 condición: ab. ϱ =0,12g >0,1g S = C/1,25+3,33[ϱ.ab/g)-0,1](1-C/1,25)

Coeficiente del terreno (C=2 los 6 primeros metros C=1,3 hasta 30 m) S_{global}=1,09

ac= 0,09 x 1,3 x 1,09 = 0,128g

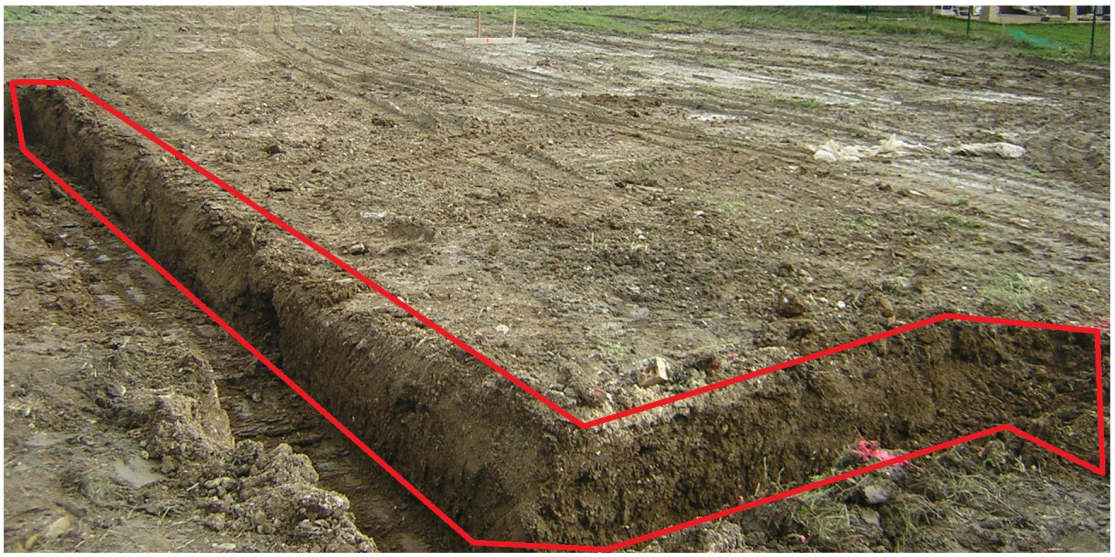
7.5.1.6. Utilización de los materiales para préstamos.

Los materiales provenientes del triturado de las margas y areniscas excavadas en los perfiles C, incluso hasta grados III de alteración (ISRM, 1981), se consideran *tolerables*, según la OC-326/00. Si presentan plasticidad se les tratará como *marginales*. Los niveles de margas intercalados entre areniscas y calcarenitas son materiales fácilmente degradados por la humedad, por el sol, el aire y los ciclos hielo-deshielo. Para su utilización se pueden mezclar con gravas de los perfiles P1 y P2, añadir aglomerantes como cemento, cal u otras soluciones dependiendo del uso. Se suele acometer un sencillo estudio dedicado a cada promoción que permita definir su puesta en obra (por ejemplo, PG-3, 2001).

PARTE 8

EL SIGLO XXI Y LA SOSTENIBILIDAD GEOTÉCNICA

HORMIGÓN Y ACTUACIONES EN EL TERRENO



8.1. El siglo XXI y la sostenibilidad en el sector de la construcción. Hormigón y geotecnia.

Durante el siglo XX el crecimiento de Pamplona vivió la mayor aceleración histórica conocida, tanto en población como en edificación, economía o infraestructuras. La población del área metropolitana de Pamplona era de unos 33.000 habitantes a comienzos del siglo XX y de unos 305.000 al comienzo del XXI. La gran aceleración propiciada por la abundancia y versatilidad de la energía no renovable, en especial hidrocarburos y más concretamente petróleo y derivados, en especial diésel, produjo un cambio muy profundo en la manera de cultivar, producir alimentos, desarrollar todos los sectores económicos, desde el primario hasta los servicios y la tecnología y por supuesto la construcción y la edificación. Aparece por primera vez el producto tecnológico más extendido por el planeta, el moderno hormigón armado (HA) y se extiende a partir de los años 30-40 del siglo XX hasta nuestros días de una manera que la mirada en tiempo geológico podría considerar invasiva por lo que vamos a ver. En la vieja Iruña apenas se tuvo contacto con las Margas de Pamplona desde su fundación por un evidente problema de acceso a energía concentrada, abundante y versátil. No fue hasta el siglo XX que el área que ocupa la ciudad, gracias a estos nuevos productos y a la irrupción de su mano del hormigón armado, no se accedía a ellas, quedando la mayoría de las construcciones apoyadas sobre terrazas de arcillas y gravas definidas como P1 y más recientemente P2 en áreas inundables. Para comprender la trascendencia de lo que supuso este incremento de energía y la posibilidad de hacer excavaciones y obras subterráneas para otro de los fenómenos que irrumpió con la modernidad: el vehículo autónomo, podemos poner un ejemplo muy grosero, pero que da una idea del cambio revolucionario que se introdujo a partir de la segunda mitad del siglo XX: la comparación hombre-excavadora.[16]

---

[16] Una retroexcavadora pequeña convencional puede ejecutar en una hora aproximadamente una excavación de 2 x 2 x 5 m (20 m^3) para acceder a las Marga de Pamplona y hormigonar una zapata de un edificio moderno de HA. Si un hombre sano trabaja 100 Wh y asumimos que la retroexcavadora tiene un rendimiento constante (P) de 50 kW durante una hora (t), la energía (E) utilizada por la excavadora es $E=P \cdot t$. Para igualar el trabajo de la excavadora con el trabajo de un hombre sano a unos 100 w, dividimos la energía de la excavadora (E) por la potencia de ese hombre. Podemos estimar cuántos hombres serían necesarios para igualar el trabajo de la retroexcavadora. En este ejemplo se necesitarían 500 hombres trabajando a 100 w cada uno para igualar a la retroexcavadora pequeña durante una hora. Es importante destacar que esta comparación es bastante simplificada y no tiene en cuenta la eficiencia y otros factores. Visto de otra manera: si un hombre sano anterior al siglo XX tuviese que excavar solo un espacio de 20 m^3 en un terreno P1 o P2 para acceder a las Margas de Pamplona, necesitaría 21 días de 24 h. Suponiendo que trabajase 8 h diarias habría concluido la excavación en dos meses. Con ese gasto energético para acceder a 5 m de profundidad, la excavadora podría ejecutar en esos dos meses (trabajando 8 h/día) unas 500 zapatas. Si ponemos en vertical el asunto (una manera bastante gruesa, pero vamos allá) en lo que al hombre le cuesta dos meses profundizar esos 5 m, la excavadora podría excavar 2,5 km. Y esta fue, a brochazo bien grueso, la magia que trajeron los combustibles fósiles al sector de la construcción. Pamplona, obviamente participó de estos avances. Eso sí, la apuesta tendría efectos secundarios y hasta tiempos muy recientes muy pocos se plantearon qué pasaría si ese factor versátil y abundante de energía no renovable dejase de apuntalar semejante magia y si, además, tuviese efectos indeseados.

En un mundo donde la concentración de CO_2, la humedad y las temperaturas atmosféricas están en constante aumento, es imperativo comprender cómo estos factores afectan al hormigón armado y su interacción con los terrenos descritos. El hormigón, con su resistencia y maleabilidad, ha sido el pilar de nuestra historia reciente y fue concebido como un material con obsolescencia programada para su uso de unas décadas y posterior sustitución, siempre en ciclos rápidos de construcción y destrucción. Quizás sea Le Corbusier el mejor exponente de esta nueva mirada que impregnó arquitectura y obra civil durante la gran aceleración del siglo XX, su paradigmática sentencia *"del pasado tiraría todo, salvo lo que aun sirve"* es el mejor resumen de una nueva forma de construcción que la energía barata y abundante pudo propiciar. Sin embargo, aunque Le Corbusier no lo llegase a conocer, el hormigón armado enfrenta desafíos significativos en el siglo XXI debido a que su uso y mantenimiento se basó en la abundancia y versatilidad de recursos baratos y accesibles que cada año lo son menos. Al tratarse de recursos no renovables, no siempre la garantía de una obsolescencia asegurada consistiría en una sencilla sustitución, pero menos aún bajo unas condiciones atmosféricas que no se percibieron como cambiantes y adversas con el uso masivo de energía no renovable. El hormigón es, de lejos, el material de construcción más utilizado, con una producción mundial de unos 10 km^3 cada año (Gartner EM y Macphee D. 2011). Las aplicaciones más comunes del hormigón son en forma de bloques hidráulicos, elementos estructurales prefabricados o estructuras moldeadas in situ. Desde hace décadas, las cimentaciones, recalces, sostenimientos y cualquier interacción con los terrenos descritos se ejecutan siempre con alguna de esas variedades.

8.1.1. Emisiones de CO_2.

Las emisiones de CO_2 del sector de la construcción representan algo más del 18% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (Edenhofer O. et al., *Contribución del Grupo de Trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del IPCC. Mitigación del Cambio Climático*. 2014). El uso principal en el sector es el cemento para fabricar hormigón. Las emisiones de todos los insumos para extraer áridos, triturarlos, seleccionarlos, transportarlos a la central, calcinarlos, mezclarlos, llevarlos a obra, mantenerlos, demolerlos, etc., normalmente se desprecian en relación con los achacados exclusivamente al cemento. El hormigón era uno de los materiales artificiales con mayor eficiencia energética y de carbono en términos de volumen, hasta que la energía se volvió cara. No obstante, dada la asociación bien establecida entre las emisiones antropogénicas globales de CO_2 y los cambios ambientales, los Estados vieron la necesidad de reducciones en las emisiones industriales de CO_2 y a la industria del cemento se la incluyó en las agendas de descarbonización ofreciendo varias opciones en orden de facilidad: 1) Utilizar combustibles alternativos y/o materias primas alternativas para reducir las emisiones. 2) Reemplazar parte del clinker todo lo posible con conglomerantes bajos en carbono. 3) Desarrollar aglomerantes con bajas emisiones de carbono que no estén basados en el clinker y 4) Captar o secuestrar el CO_2 emitido en las propias plantas.

En 2021, las emisiones mundiales derivadas sólo de la fabricación de cemento destinada a edificación, carreteras e infraestructuras alcanzaron los 2.900 millones de toneladas de CO_2, lo que representaba casi el 8% de las emisiones globales de carbono (Andrew R. 2022). Dos décadas antes (2002), las emisiones eran menos de la mitad, con unos 1.400 millones de toneladas de dióxido de carbono. Impulsadas especialmente por el desarrollo de China, las emisiones globales en la fabricación de cemento se han duplicado en el mundo desde 2002 y triplicado desde 1992, creciendo hasta la actual tasa del 2,6% anual. Pero el mundo no está fabricando y utilizando más cemento y hormigón, sino menos.

La caída en España tras el pico de 2006 y el colapso del sector en 2008 se acercó al 80% y en Navarra al 52%; desde entonces nunca se superó el paradigmático año de menor actividad constructiva de la historia: 1985. Sin embargo, las industrias siguen reduciendo y haciendo más limpios sus procesos, el consumo de cemento disminuye al mismo tiempo que aumentan sus emisiones de CO_2. La intensidad de carbono del cemento (emisión de CO_2 por tonelada) ha aumentado un 9,3% entre 2015 y 2020, principalmente debido al crecimiento de China, según la Agencia Internacional de Energía (AIE). El gran impacto climático, combinado con que no se espera la caída global de una demanda de hormigón (que baja menos que sus emisiones), hacen que sea de gran importancia desarrollar soluciones más sostenibles para el sector de la construcción.

Es bien conocido que los hormigones a base de cemento Portland absorben CO_2 atmosférico durante toda su vida. La velocidad de carbonatación depende de la porosidad del hormigón, la sección transversal, el tipo de áridos y las condiciones de exposición, en especial la humedad, la temperatura y la concentración atmosférica de CO_2.

Desafortunadamente, el deterioro avanza debido a las tasas de carbonatación crecientes, lo que se considera indeseable por razones de durabilidad. El pH del hormigón suele ser de alrededor de 12, generando una capa de óxido impermeable en la superficie del acero que actúa como una barrera contra la corrosión, lo que le confiere una vida útil de entre 50 y 100 años. Sólo el CO_2 (fósil) liberado por la roca calcárea durante la calcinación, sumado al de los combustibles fósiles utilizados para calentar el proceso, representa algo más del 5% de las emisiones globales.

8.1.2. Estrategias de mitigación.

La combinación de un aumento de la dificultad de acceso a fuentes de energía no renovable y de alta densidad energética, paralela a la concentración de CO_2, a los niveles de humedad variables y a temperaturas más elevadas, plantea preguntas cruciales sobre la vida útil y la integridad estructural del hormigón armado que cada vez requiere más recursos para su mantenimiento (energía).

Estas condiciones adversas interactúan con el hormigón a nivel molecular (carbonatación, pérdida de pH, oxidación de armaduras, presencia de cloruros, humedad) y macroscópico (impactos mecánicos, sismicidad, asientos del terreno, ciclos de calor excesivo) desencadenando procesos que pueden tener consecuencias profundas en la seguridad y longevidad de las estructuras directamente en contacto con la dinámica, también cambiante, del terreno sobre el que se apoyan.

Existen posibles estrategias de mitigación y adaptación que podrían ser fundamentales para preservar la integridad de nuestras construcciones en un entorno cada vez más desafiante. Comprender el impacto —en las estructuras de hormigón armado— del aumento de humedad, temperatura y concentraciones de CO_2 al mismo tiempo que se impone el encarecimiento de la energía, en un mundo que demanda soluciones innovadoras y sostenibles para garantizar el mantenimiento y la durabilidad de nuestras infraestructuras, se ha convertido en el gran reto global.

Por eso mismo es pertinente preguntarse si el vehículo autónomo, especialmente el de combustión (pertinente también para híbridos, eléctricos o de pila de hidrógeno), con el declive de los recursos no renovables (hidrocarburos y minerales estratégicos para la transición verde) va a seguir dominando la movilidad y la ciudad del siglo XXI. El siglo pasado vio al automóvil conquistar las ciudades, planificar para él e incluso horadar el medio urbano para facilitar su conquista del medio humano. Se promovieron los subterráneos y el crecimiento en vertical se desarrolló hacia abajo. Con el colapso del sector en 2008 esta tendencia se fue apagando y un amplio rango de nuevos urbanistas pusieron en tela de juicio su continuidad. En el trasfondo está la cuestión de si la ciudad del siglo XXI va a seguir siendo proyectada para él como el indiscutible icono heredero de la economía fósil, pero recordemos también que desde 2008 el consumo eléctrico en Europa y en España se ha reducido de manera notable, por lo que electrificar la economía y por tanto, el transporte autónomo, aunque parece necesario, supone una parte importante del reto global.

Varios estudios coinciden en que el calentamiento global debido al cambio climático traerá nuevos desafíos para el sector de la construcción en todos los ámbitos y procesos, especialmente en la elección de las cimentaciones por causas económicas y de cambio de uso del subsuelo. Pero los riesgos de daños vienen inducidos por el incremento global de humedad, eventos extremos, temperatura y CO_2 y se vería reflejado sobre todo en un aumento medio global del 16% de la carbonatación de las estructuras en el año 2100 (Benítez P. et al., 2020) con un aumento de la velocidad de corrosión de alrededor del 15% si la temperatura aumentase 2ºC (Stewart et al., 2011, 2012). Varias investigaciones realizadas sobre las infraestructuras de China, teniendo en cuenta esos mismos parámetros climáticos proporcionados por el IPCC, concluyen que la carbonatación podría aumentar en un 45% en las estructuras de hormigón armado antes de 2100 (Peng y Stewart, 2016).

Otros estudios han mostrado cómo globalmente este mismo calentamiento podría adelantar en un 31% la velocidad de avance del deterioro, lo que significa disminuir la vida útil media de las estructuras hasta 15 años ante niveles moderados de agresividad (Bastidas-Arteaga et al., 2013).

8.2. El sector de la construcción ante el incremento de la presión ambiental por unidad de actividad económica.

La extracción de áridos y la fabricación de cemento no aumentan significativamente a nivel global, presentando una caída cercana al 80% en España desde el pico de 2006, en Navarra un 52%. Al mismo tiempo, las emisiones aumentan debido a la notable pérdida de eficiencia. Entre sus causas hay que incluir la externalización de buena parte de los procesos industriales, prefabricados, piezas especiales, cemento, aditivos, etc., hacia China. En el siglo XXI comenzamos a vivir una paradoja: nuestro modelo económico, basado en la obsolescencia tecnológica de la transformación de recursos no renovables, para crecer necesita destruir las bases materiales y biológicas que hacen posible no sólo su crecimiento, sino su continuidad. El hormigón armado —como el más abundante de todos los productos tecnológicos de la historia con los nuevos planteamientos constructivos y comerciales—, sería el mayor exponente de esta contradicción.

Especialmente a partir del colapso de los mercados de 2008 y la crisis inmobiliaria, se fue cada vez más consciente de la existencia de ciertos límites al crecimiento de la producción industrial en la que el sector de la construcción fue el más perjudicado. La manera técnica de que dispusieron los gobiernos para expresarlo fue la recesión, basada en un medidor: el PIB. Si este indicador se estanca y no crece, nos dirigimos a una reducción de la actividad industrial en los sectores económicos estratégicos con un incremento de precariedad y pobreza. Pero la cuestión real es geológica, algo muy difícil de entrever desde lo que reflejaría ese medidor y otros similares. Así que vemos proliferar entre los economistas estudios que utilizan el cemento, la minería de áridos o el consumo de hormigón como indicadores de la producción industrial.

Los líderes mundiales adoptaron en 2015 un conjunto de objetivos globales para erradicar la precariedad y la pobreza, proteger los ecosistemas que aún siguen funcionando y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de *desarrollo sostenible*, la Agenda 2030. Pero, aunque ya hemos recorrido más de la mitad del trayecto (Agenda 2015-2030), no hemos conseguido erradicar ni la destrucción de los ecosistemas ni la desposesión de las comunidades que los habitan. La nueva manera de uso de los recursos geológicos consistía, entre otras cosas, en arrinconar la denominada nueva minería especulativa que, una vez erradicada, sería sustituida por una suerte de modelos de *extracción sostenibles* que, transversalmente, aparecen en la mayoría de los 17 objetivos para el desarrollo sostenible (17 ODS).

Los impactos a ecosistemas y comunidades se reducirían de manera notable. Esta propuesta de relacionarnos con las bases geológicas de la economía aparece desde el primero de ellos u ODS 1: la minería y el fin de la pobreza, el segundo ODS 2: la minería y la erradicación del hambre, y así sucesivamente, la minería y la salud, el bienestar, igualdad, trabajo digno, cambio climático, paz, fortalecimiento de las instituciones…

El resultado, por el contrario, y como vemos a través de la actividad industrial más básica: la extracción y producción de cemento y áridos, ha sido una creciente intensificación de la presión ambiental por unidad de actividad económica con el incremento de las emisiones mientras disminuye la producción industrial. Además de los datos aportados por la AIE (órgano consultivo de la OCDE, de la que España es miembro), se suman a esta observación los trabajos del Post Carbon Institute y autores como William Rees, o desde hace años, el International Resource Panel (IRP) del Programa Medioambiental de las Naciones Unidas.

Quedan en entredicho las afirmaciones genéricas de itinerarios de transición ecológica que reposan sobre la idea de lograr un crecimiento verde con el apoyo de programas al estilo Green Deal que, derivado de los 17 ODS, se han puesto en marcha en Europa, especialmente tras la pandemia de 2020. Además, se consolida tal contradicción con un hecho bien contrastado del que la minería es la gran protagonista: que la eficiencia del mercado que facilita la tecnología digital (gran consumidora de energía y minerales) ha simplificado el esquilmado de comunidades locales y sus territorios.

Éstos fueron progresivamente vaciados y abandonados hasta, por ejemplo, una tasa de urbanización en España que pasó a principios del siglo XX del 70% rural y 30% urbano, al 18% rural y 82% urbano en 2020. La comarca de Pamplona pasó de albergar al 10% de la población de Navarra en 1900 al 56% en 2020. Ello trajo un incremento nunca antes conocido en los movimientos de tierras, la construcción de edificios e infraestructuras basadas en el hormigón con las nuevas soluciones habitacionales, como vimos por ejemplo en el caso de Sarriguren y el descomunal desarrollo de 2005 a 2020. En este transcurso tan acelerado nacieron los 17 ODS de la Agenda 2030 aquel septiembre de 2015, entonces áreas extensas del planeta ya habían tenido que ser abandonadas. Este último modelo que domina nuestra relación con el medio que nos sustenta es incapaz de evitar el abandono de los territorios rurales si el beneficio económico depende de que los impactos ambientales sean cargados a sus habitantes, incluidos los humanos.

En la revisión de 2004 de *The Limits to Growth* (Meadows, D. et al. 1972) apareció el escenario BAU2 (Business As Usual 2) y como vemos en la figura 8.01, la consideración de los datos que el conocimiento de la geología industrial suministraba a finales de los años 90 del siglo XX sobre algunos recursos geológicos clave, en particular los combustibles fósiles, resultaron algo más abundantes de lo que se suponía en el escenario BAU de 1972.

Este hecho, no obstante, nos volvió más derrochadores, al mismo tiempo que se triplicaron las emisiones del sector del cemento de 1992 a 2022, la descomunal concentración de beneficios que se puso en marcha nos hizo (a la mayoría) más deudores. Cualquier contrastada abundancia de recursos parece siempre *"una buena noticia"*, sobre todo a las empresas del sector de la construcción, de los hidrocarburos o a las mineras, y con ellas a las escuelas de minas y geología, pues en el caso de las primeras, dilataba los años de sus negocios sin muchos traspiés en el horizonte, como los de 1973, 1979 o 1990 y las segundas, que aún no han desarrollado minerías basadas en otra cosa que no sea el diésel, veían la posibilidad de seguir con sus expectativas de crecimiento.

Los autores (Meadows et al., 1972) siempre enfatizan el hecho de que la proyección de tendencias de un total de 12 escenarios que cubren el período de 1900 a 2100 no son predicciones, sino una manera de ilustrar complejas interrelaciones dentro de un sistema dinámico basado en el crecimiento exponencial. El primer escenario, probablemente el más conocido, se denomina *"Business As Usual"* (BAU) o *"negocios como siempre"* y es el más utilizado en los sectores industriales a la hora de hacer pronósticos, pues es el que mejor se ajusta a los datos empíricos. BAU muestra una dinámica de crecimiento exponencial del sistema socioeconómico que conduce a un modo de sobrepaso y caída brusca de la producción industrial desencadenada por el agotamiento de los recursos no renovables en esta misma década.

Desde muy pronto, los Estados apostaron por investigar tecnologías que garantizasen el acceso a más recursos. Y en cierto modo se consiguió. En la revisión de 2004 se presentó un nuevo escenario con prácticamente el doble de recursos o BAU2 (figura 8.01). En 2004, estos autores del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) postularon entonces que no sería la escasez de recursos, sino la contaminación, y muy especialmente el impacto de los gases de efecto invernadero, los que causarían la detención del crecimiento industrial e incluso la contracción de sectores como la agroindustria, la construcción o la automoción.

Este escenario BAU2 tiene los mismos supuestos que el Business As Usual (BAU) de 1972 (el más conocido y utilizado), excepto que se asumió el acceso al doble de recursos no renovables gracias a la eficiencia de nuevas tecnologías, de la automatización y del papel de las TIC. Según los autores del MIT, más recursos naturales no evitaban el freno al crecimiento, e incluso tampoco el colapso de sectores económicos e industriales estratégicos. La causa cambiaba del agotamiento de los recursos a una grave crisis de contaminación que frenaba la actividad económica. Cada año añadido se tendrían que triturar más y más montañas o cordilleras para obtener la misma cantidad de recurso mineral que unas décadas antes para culminar cualquier transición verde (Valero A. 2020, Michaux S.P. 2023) o quemar un diésel más y más difícil de refinar y caro para extraer la misma cantidad de áridos para hormigón (Aretxabala A. 2020).

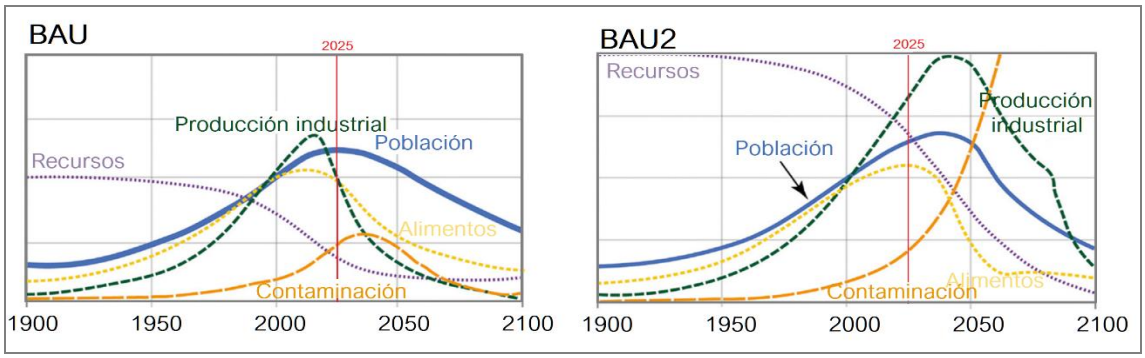


Figura 8.01. Escenarios BAU (1972) y BAU2 (2004) de *The Limits To Growth*. **(**Meadows, DH, Meadows, DL y Randers, J., 2004). Con el doble de recursos geológicos (BAU2 a la derecha) que en el escenario BAU (izquierda) ambas en morado, el freno al crecimiento no viene de la mano del agotamiento de recursos como problema principal que acompaña a la degradación del medio, sino de la mano de la contaminación que acompaña al declive de recursos (en naranja). Es clave, como ya vivimos, considerar el impacto de los gases de efecto invernadero. El problema global del declive innegociable de recursos geológicos, que son los que realmente apuntalaban nuestra última organización social, no se soluciona con más recursos (ver diferencia en el inicio de la línea morada de recursos), especialmente poniendo la mirada en los minerales, los productos energéticos y los indeseables efectos secundarios derivados de su extracción desmedida. Este pronóstico y su posterior desarrollo en diferentes ámbitos económicos globales fue uno de los impulsores para la creación de los 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (los 17 ODS o Agenda 2030) el 25 de septiembre de 2015.

Toda apreciación o expectativa de acceso a más y más recursos suele suponer una buena noticia para cualquier sector considerado estratégico. No obstante, ya en la cumbre de Río de junio de 1992, no fueron pocos los grupos de científicos que advirtieron de los efectos secundarios o iatrogénicos que esto acarrearía. Nuestras opulentas sociedades industrializadas hicieron caso omiso de las advertencias sobre los efectos que hoy ya forman parte de nuestra vida cotidiana, y no hablamos sólo de sequías, olas de calor, violentas tormentas o inundaciones frecuentes, el calentamiento de la superficie marina, o la desertificación de nuestro entorno, también hablamos abiertamente de cómo nuestros cuerpos han pasado a formar parte de las nuevas corrientes artificiales, vehiculando a través de ellos los nuevos desechos que el planeta ya no digiere, especialmente nitratos, partículas NOx y microplásticos.

Si consideramos el escenario BAU (el más conocido y utilizado) de 1972 y especialmente el escenario BAU2 de 2004, vemos que la constelación de pronósticos e itinerarios apuntados no se alejaron mucho de lo que ya estamos viviendo. Sin embargo, al contrario de lo observado en la figura 8.01 (BAU) y visto que no somos capaces de parar la presión ambiental (BAU2), observamos cómo aumenta el abandono de lugares que fueron fértiles y continúa el vaciado del mundo rural.

En noviembre de 2023 se presenta otro recalibrado de aquel informe (y best seller) para la ONU, con especial mirada al escenario BAU, teniendo en cuenta los datos empíricos de los 50 años ya recorridos (1972-2022) e introduciendo el recalibrado en nuevos soportes informáticos (*Recalibration of limits to growth An update of the World3 model.* Arjuna Nebel, Alexander Kling, Ruben Willamowski, Tim Schell, 2023). Una mirada por separado a cada sector revela mayores diferencias que las encontradas en 2004.

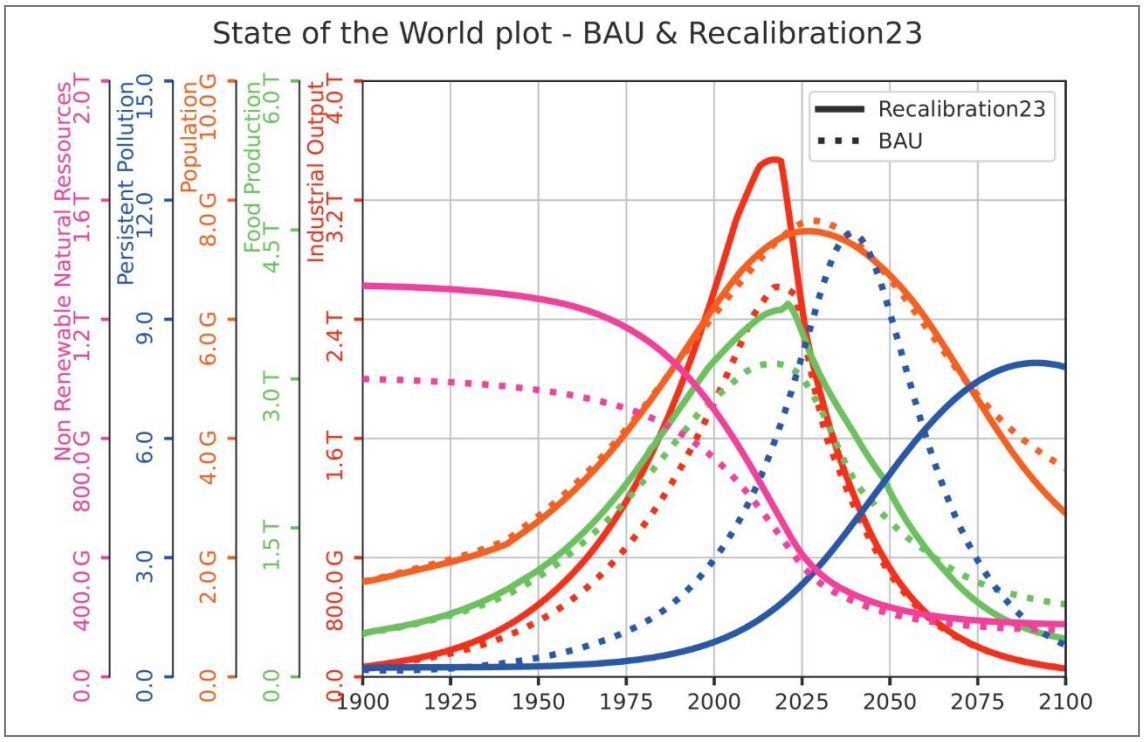


Figura 8.02. Es la figura 3 del *Recalibration of limits to growth. An update of the World3 model.* (Arjuna Nebel, Alexander Kling, Ruben Willamowski, Tim Schell, 2023). Las variables de población y alimentos per cápita se ajustan bastante más al BAU de 1972 que al BAU2 de 2004. La producción industrial y la contaminación difieren de forma significativa: la primera se acerca más al BAU de 1972 y la segunda al BAU2 de 2004.

La diferencia en cuanto a los recursos no renovables es que el nuevo recalibrado de 2023, con respecto a los pronósticos de 1972, muestra cómo éstos se ajustaron mejor a los datos empíricos reales de los últimos 50 años. El escenario BAU2 asumía el doble de recursos contando con tecnologías de reciclaje y no se frenaba la producción industrial por falta de recursos, sino por el impacto de la contaminación. Sin embargo, los dos escenarios difieren sólo ligeramente en el resultado general. De los 12 escenarios originales de 1972, el escenario BAU coincide mejor con el actual escenario recalibrado de 2023. Se refleja claramente el modo de sobrepaso y la caída de la producción industrial en esta misma década debido a la escasez de recursos.

Sin embargo, los picos de ciertas variables alcanzan mayores cotas puntuales y se desplazan parcialmente hacia el futuro (la contaminación, por ejemplo, sigue creciendo hasta finales de siglo). En el recalibrado de 2023 se introducen ya los efectos, por ejemplo, de las primeras dificultades serias para producir alimentos a causa de impactos ambientales en el espacio rural, tales como sequías prolongadas, temperaturas récord o inundaciones. En el trasfondo está la degradación y muerte de suelos o la desertificación, (línea verde de la figura 8.02).

8.3. Reducción, reutilización y reciclado.

Desde hace años las economías se ven obligadas (prácticamente por la fuerza) a reducir y optimizar el consumo de recursos, reutilizando y reciclando. Esta *nueva normalidad* conllevaba, por tanto, la paradoja del intento de reducción cuando las cifras de reservas y recursos aumentaban sobre el papel (u hoja Excel) pero no llegaron como lo hacían antes a garantizar el crecimiento económico como condición necesaria (pero no suficiente) para dotar de cierta estabilidad y continuidad a sectores económicos estratégicos, especialmente el de la construcción, que ha puesto en marcha programas de reciclaje de hormigón, cerámica, piedra o mortero, que son los que generan más desechos, pero también madera, metal, vidrio, plástico, yeso, tal y como vimos, por ejemplo, en la reciente rehabilitación de Salesas para sede de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona MCP.

Los áridos naturales representan el 98,7% del total utilizado, y ahí van incluidos los rechazos de la minería extractiva (5,5%). Los áridos reciclados representan el 0,9% y los áridos artificiales el 0,4% (ANEFA, 2023).

Nos obligamos a identificar con cierto apremio las materias primas consideradas estratégicas, establecer estándares de sostenibilidad y aplicarlos a todas las fases del ciclo constructivo, desde la extracción de áridos hasta la puesta en obra (Gartner E, Hirao H, 2015). La reutilización y el reciclado (actualmente un 14% en general y menos del 6% en el uso de hormigones reciclados) aparecen como primera opción, aumentando la disponibilidad de algunos materiales.

Paralelamente, la UE y los gobiernos desarrollan itinerarios de cambio de modelo de consumo con nuevas economías de cercanía, basadas en la reutilización, la reparación o el reciclaje.

Desde 2020 estamos intentando trazar un trayecto productivo para lograr la neutralidad climática en 2050 y con el Plan Nacional Integrado Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) configurar el nuevo marco estratégico y normativo para la transición ecológica basada en el despliegue de tecnologías renovables con el fin de descarbonizar, electrificar y digitalizar la economía. Al mismo tiempo, vemos aumentar el número de suelos desertizados, el de acuíferos contaminados o los ecosistemas en defunción.

Se argumenta que *"los crecientes retos económicos, sociales y medioambientales que se plantean en Europa ponen en entredicho el modelo económico basado en el patrón «extraer, producir, poseer y desechar»"* tal es el caso del Dictamen SC/048 de la UE[17] presentado en Gobiernos autonómicos y locales a empresas y ciudadanía durante 2018 y 2019. La presentación en Navarra el 21 de noviembre de 2019, a la que estaban invitados todos los agentes sociales, rezaba así:

> *"La Comunidad Foral de Navarra ha iniciado el camino para ser un referente europeo en la aplicación de nuevos modelos económicos sostenibles, para explicar este tema y otros, el Observatorio de la Realidad Social del Departamento de Derechos Sociales ha organizado la jornada: Nuevos Modelos Económicos Sostenibles. Cómo transitar en Navarra hacia unas nuevas relaciones económicas*". Gobierno de Navarra. Agenda 2030 (2019).

Como respuesta a la presión europea, un año después, en noviembre de 2020, el Consejo de ministros del Estado español aprobó la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050 (ELP 2050) como parte de los compromisos de España con el Acuerdo de París (2015) y como Estado miembro de la UE. Pero las inercias y dificultades parecen incrementarse. El año 2023 superó por primera vez en la historia de la humanidad los 2ºC con respecto a la media 1850-1900 previa al despliegue de la revolución industrial. Aunque es algo puntual, los datos de ERA5 de Copernicus ECMWF mostraban que el 17 de noviembre de 2023 fue el primer día en que la temperatura global superó los 2°C por encima de los niveles preindustriales, superando en 2,07°C el promedio de 1850-1900 (CCS, Climate Copernicus EU). Todas las esperanzas se centraron en revertir la situación desde acuerdos internacionales en la COP28 que resultó en una plataforma comercial para el negocio de combustibles fósiles. Es cierto que vivimos ciertas recuperaciones en diente de sierra, con subidas y bajadas en la actividad económica, pero las actuales crisis globales, relacionadas con los impactos ambientales, la pandemia, las guerras o la falta de suministros, obliga a nuestros dirigentes y organizaciones sindicales a repensar una profunda transformación en cada uno de los sectores de la economía. Sin embargo, tenemos que destacar que tanto el conocimiento de los problemas sistémicos como las herramientas para capear este momento ya estaban en manos de las administraciones y habían sido y son motivo de movimientos ciudadanos que fueron y son ampliamente ignorados. En el trasfondo: la solución no era tecnológica ni empresarial, sino fundamentalmente de organización social y de una nueva manera de relación con los recursos.

---

[17] Dictamen del Comité Económico y Social Europeo sobre «La transición hacia un futuro más sostenible en Europa: una estrategia para 2050»: *"Al igual que el resto del mundo, Europa se enfrenta a tres cuestiones fundamentales: 1) el agotamiento de los recursos naturales del planeta, donde se incluyen el cambio climático y la pérdida de biodiversidad; 2) las desigualdades sociales, incluidos el desempleo juvenil y las personas olvidadas en regiones con industrias en declive, y 3) la pérdida de confianza por parte de la ciudadanía en el gobierno, la clase política y la UE y sus estructuras de gobernanza, así como otras instituciones".*

8.4. Retos para una economía verde.

A medida que el espacio extractivo se hace más grande, más lucrativo y más subvencionado, no solo se contaminan y abandonan más territorios, aparece una nueva manera de optimizar las aspiraciones del pensamiento más economicista. Éste, basado fundamentalmente en un despliegue digital, es cada vez más capaz de simplificar el esquilmado a esos territorios, haciéndolo más rápido y de manera más eficiente.

A nadie se le escapa que este despliegue digital se lo debemos a China y conforma un ecosistema que se dirige a un consumo desorbitado de toda la energía eléctrica mundial con la automatización y digitalización de una buena parte de la economía. *"Las TIC podrían utilizar hasta el 51% de la electricidad mundial en 2030 con el 23% de las emisiones de CO_2".* On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. Anders S.G. Andrae. China Huawei Technologies (2020).

Además, este país controla la mayoría de la geología que sustenta el ecosistema digital y hasta el 95% de las cadenas de suministro de los paneles fotovoltaicos, Chile aporta la tercera parte del cobre mundial y el Congo más de la mitad del cobalto. Allí los impactos medioambientales son espectaculares. Pero hay resistencias.

Los científicos chinos se han vuelto reticentes a seguir explotando a precio de ganga las valiosas tierras raras o los minerales necesarios para nuestra transición verde y ahora nos advierten de que sólo *"la prospección geológica intensiva de los depósitos de minerales clave causa un daño extremo al medio ambiente"* (Huang X., Zhang G. 2016).

El camino hacia una economía verde europea se ve también muy destructiva desde la República Democrática del Congo, donde hombres, mujeres y niños extraen las tres cuartas partes del cobalto de nuestros dispositivos digitales y de nuestras infraestructuras de transformación y captación de energías *"limpias"* con la ayuda de fondos chinos y capital occidental que han convertido al país en uno de las más pobres del mundo (74% de su población por debajo del umbral de la pobreza. ONU, 2019). A los geólogos y ambientólogos chinos les preocupa que en sus territorios se hayan instalado de manera generalizada explotaciones con graves impactos en sus ecosistemas y comunidades debidos a la creciente demanda de las industrias verdes de alta tecnología.

Así que visto que lo verde no funciona como nos habíamos imaginado, la tentación fue volver a lo que se llama la economía de mercado y el crecimiento económico infinito, algo que ya no parece posible y menos aún deseable. Vemos cómo el criterio principal de las denominadas iniciativas de recuperación y resiliencia es el de asignar más recursos económicos para que los mismos mecanismos, decisiones políticas e inercias económicas, solucionen la crisis que crearon.

De esta manera, la crisis global, que comienza con la energía y sigue con los recursos geológicos básicos necesarios para nuestra transición verde, tendría una única solución: la financiera-empresarial. Dentro de este conjunto de soluciones financieras y empresariales destacaría uno de los desenlaces más paradójicos: rebajar las exigencias medioambientales como excusa para promover la "economía verde", tanto en la implantación de proyectos tecnológicos como urbanizaciones, polígonos eólicos o fotovoltaicos o en la minería que apuntala su despliegue y el de las infraestructuras de transporte, energéticas y digitales que la acompañan.

El objetivo vuelve a ser favorecer la inversión y subvencionar el cambio de modelo extractivo. Construir y especular con los territorios (BAU), instalar más infraestructuras que quizás no puedan utilizarse y seguir dirigiendo fondos a planes muy sectoriales, protagonizados por redes administrativas que toman a la ciudadanía como objeto de esas políticas de transición y no como los sujetos activos de ellas, creando nuevas zonas de sacrificio en áreas que se siguen vaciando: BAU2. El movimiento de hormigón armado se ha erigido en uno de los mejores indicativos para tomar la temperatura a nuestras economías y más directamente en el sector de la construcción.

8.5. El impacto del hormigón en Navarra.

El aumento más representativo del uso de hormigón en España se dio a partir de 1997 hasta 2006. Se produce una caída tras la crisis de 2008 y el sector no ha llegado nunca a los niveles de consumo previos al colapso financiero y de la actividad industrial de aquel año (figura 8.03).

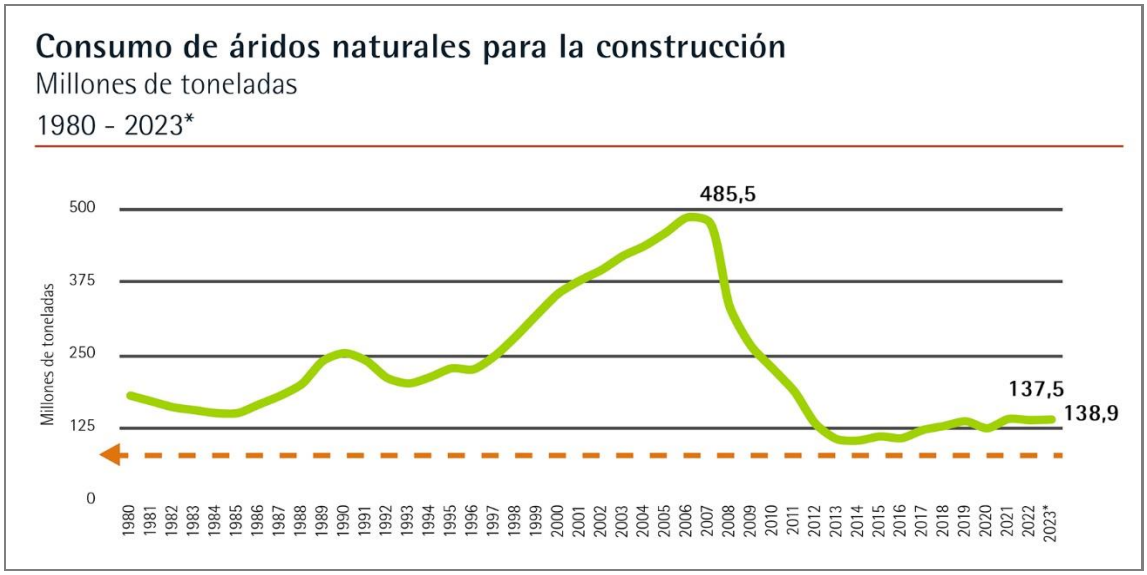


Figura 8.03. Consumo de áridos naturales en España en millones de toneladas a lo largo de la historia de los últimos 42 años (ANEFA). Los áridos naturales representan el 98,7% del total incluyendo rechazos de la minería extractiva (5,5%). Los áridos reciclados representan el 0,9% y los áridos artificiales el 0,4%. El sector de los áridos en 2022 y perspectivas preliminares 2023. ANEFA.

La construcción ha vivido un cierto impulso en los últimos años en Navarra entre 2012 y 2022, pero la mayor parte del consumo en el sector hoy está confiado a la construcción de infraestructuras y en especial las del Tren de Alta Velocidad o Tren de Altas Prestaciones (TAV-TAP). Desde el máximo previo a la crisis (2006) cuando la producción de 486 Mt alcanzó el cenit, el consumo de áridos para la construcción ha caído un 72% con respecto a aquel año. Hablamos de los valores más bajos de la historia, incluso por debajo de 1985, el año que hasta ahora se consideraba el de menor actividad del sector.

La segunda materia prima más consumida después del agua son los áridos para el hormigón, (éstos pueden llegar a representar el 80% de la composición del propio hormigón armado) y su impulso desaforado como el vivido a principios del siglo XXI tiene como mejor exponente lo realizado en la aparición —desde prácticamente la nada— de la ecociudad de Sarriguren, como hemos visto en el apartado dedicado al sorprendente desarrollo de un territorio que pasó del año 2005, según los datos del INE, en las inmediaciones de la colina inicial de 5 habitantes (3 mujeres y 2 hombres) en las inmediaciones del poblado de Hierro abandonado durante dos milenios a 16.000 en 2020: 3.200 veces más.

La posibilidad de volver a reactivar otra burbuja inmobiliaria, como la que explotó hace algo más de tres lustros, cuando Sarriguren ya estaba prácticamente terminada, dependería de algo que parece harto improbable dadas las condiciones de producción industrial y económicas derivadas de aquel impacto en el sector.

Ahora bien, observando con perspectiva el consumo del hormigón en la España de principios del siglo XXI, los datos distan mucho de los previos a 2008, año del estallido de la burbuja inmobiliaria. En el año anterior, el consumo de cemento había superado los 56 millones de toneladas en todo el Estado, gracias principalmente al vertiginoso volumen de construcción de viviendas y la gran inversión en infraestructuras públicas. La caída se acerca al 80% en España, siendo Navarra, con diferencia, la C.A. en la que menos cayó el consumo de áridos para construcción (52%). Navarra con 7 ton/hab/año es ya la única C.A. con consumos superiores a la media europea. Según los datos de la Estadística Minera de España (2018), el número de explotaciones de áridos supone el 65,0% del total de las explotaciones mineras del país. En Navarra es el 81,8%.

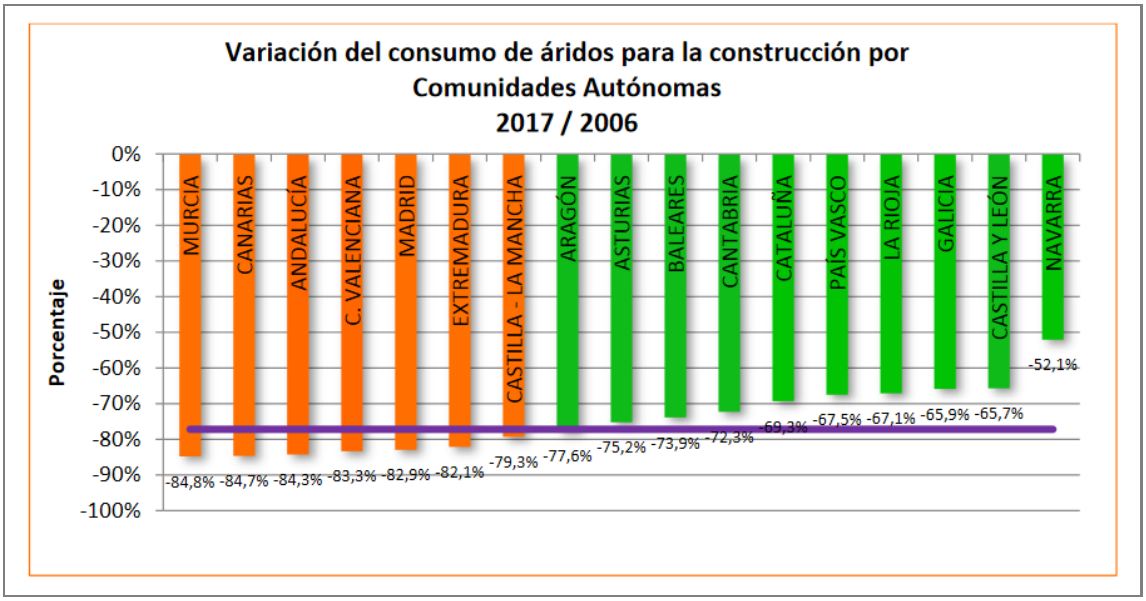


Figura 8.04. Caída del consumo de áridos naturales en España por CC.AA. en porcentaje de la relación 2017/2006. ANEFA

Sarriguren fue el mejor exponente navarro de aquellas descomunales apuestas y culminó con éxito, pero en otras circunscripciones no hubo una planificación detallada, incluida como en casos bien conocidos y documentados, el conocimiento geotécnico que por primera vez formó parte de los pronósticos del proyecto. Otros se quedaron por el camino y hoy podemos ver parajes abandonados a medio urbanizar o kilómetros de esqueletos de edificios y grandes obras degradándose por la imposibilidad de culminarlas o por falta de mantenimiento.

No obstante, una buena parte del sector más desarrollista, aún deposita grandes expectativas en la vuelta de esos tiempos; se pueden ver reflejadas en algunos artículos de opinión de ciertas revistas sectoriales. El impacto de la crisis —argumentan algunos directivos de la obra pública y del sector cementero navarro—, fue *"despiadado"* y encuentran razones de carácter administrativo, político, muchas veces contradictorios, antes que deducir un proceso lógico o incluso natural, ni siquiera de carácter termodinámico, tal y como se vino anunciando en círculos científicos desde, al menos, 1972. Y es cierto que, por un lado, la paralización de la construcción de viviendas y por otro, los grandes recortes en la construcción de obra civil, supusieron un golpe brutal para las 37 fábricas de cemento o sus derivados instaladas en España. Se produjo un colapso parcial de un sector que ya mostraba signos de insostenibilidad en una economía basada en la creación de burbujas, su estallido y la creación de otras nuevas. Pero realmente sí fue previsto, como hoy también se está advirtiendo, por ejemplo, con esta tesis, de lo que probablemente "ya no es posible", lo cual no es poco.

Es muy significativo el impacto si consideramos que, de 20.000 trabajadores empleados en el sector en 2006, se pasa a la cuarta parte (unos 5.000) en 2014, lo que supone una caída del 75% (72% la producción de áridos). No ha habido ninguna recuperación desde entonces (figura 8.03). España pasó de ser el primer productor de hormigón preparado de la UE en 2006 al sexto lugar, por detrás de Alemania, Francia, Italia, Reino Unido y Polonia. En la actualidad, el consumo anual per cápita de España está en el 50% de la media europea. El ritmo de consumo de los elementos geológicos que componen el hormigón, áridos y cementos, es ya una estadística muy ilustrativa usada para auscultar el ritmo de crecimiento de una economía como la conocida hasta ahora, de carácter netamente mercantilista y basada en la quema de combustibles fósiles. Se la denomina economía dinámica cuando invierte en infraestructuras y demanda nuevas edificaciones. Un ritmo de consumo como el vivido antes de 2008 acaba convirtiéndose en burbuja y un crecimiento nulo o negativo simboliza una economía estancada o en recesión.

A Sarriguren, por ejemplo, desde el punto de vista geológico, hay que considerarlo como lo que es: una anomalía histórica posiblemente irrepetible en las próximas décadas. Por eso su importancia es de primer orden. Sarriguren nos regaló información geotécnica de la Edad de Hierro, de la Edad Media, incluso del impacto del terremoto de 1903, la primera experiencia de zonificación geotécnica y, además, supuso la mayor movilización de recursos de la historia de la construcción y edificación en Navarra, se materializó justo al límite de la época en que se pudo realizar y por ello queda incluida como un caso incondicionalmente singular de esta "interacción inevitable a lo largo de los siglos" con las Margas de Pamplona. Recordemos que en 15 años multiplicó su población por 3.200 por primera vez sobre terrenos E1 y E2, lo cual supone, de lejos, la mayor expansión humana conocida en la historia sobre el sustrato eoceno de Margas de Pamplona.

8.6. El hormigón y la construcción después de 2020.

El *Plan Integrado de Gestión de Residuos de Navarra 2025* (PIGRN2025), del Gobierno de Navarra, busca potenciar el empleo de los áridos reciclados sin que ello suponga un problema adicional para el mercado del árido natural que se suministra al sector de la construcción. Recordemos que hablamos del 81,8% de toda la actividad extractiva de la Comunidad Foral. Desde que este material tecnológico (el moderno hormigón armado) irrumpió en Pamplona, en Navarra y en el planeta al completo, en apenas un siglo, su desarrollo y expansión ha sido exponencial (figura 8.05) y ya ningún arreglo de cimentación, recalce, sostenimiento del terreno, han dejado de utilizarlo de tal forma que los áridos conforman una nueva corriente, impulsada con diésel, de materiales que van desde las canteras a las ciudades y desde éstas a las escombreras. Se trata de que vuelvan a las estructuras e infraestructuras urbanas, a ser posible, sin pasar por las escombreras.

Para hacerse una idea del impacto en relación a las anteriores eras descritas (las estratégicas, las de las pandemias, las religiosas o la entrada en la modernidad) los años de la gran aceleración que propiciaron los combustibles fósiles culminan en 2006 con más de un incremento del 400% en el consumo de áridos. Desde entonces el sector se fue retrayendo en España y en Navarra (hasta niveles por debajo de 1985). Entonces llegó 2020, uno de los ecuadores históricos en la vida del planeta desde que existe la humanidad.

En efecto, el año 2010 supuso un importante ecuador en la historia de la humanidad, cuando más de la mitad de la población comenzamos a vivir en ciudades, lo que implicó una nueva experiencia para la vida en el planeta: las unidades estructurales de la urbanosfera, las ciudades, se vieron necesitadas de la creación de las nuevas corrientes regulares de materiales artificiales impulsadas con diésel, como las de los ríos o las atmosféricas, para garantizar cada vez con más dificultades la llegada y transporte de mayores cantidades de áridos, arenas, cemento y la posterior evacuación de miles de toneladas de desechos desde ellas. Como consecuencia, apenas diez años después se pasó otro ecuador en la evolución de la vida y la historia humana: las masas de objetos artificiales superaron el peso total de la biomasa proveniente de la interacción entre la geología, el sol y la vida del propio planeta, bacterias, árboles, seres humanos, animales salvajes o para consumo humano (figura 8.05). La estimación es en ambos casos 1,1 teratoneladas (Tt, es decir: $1{,}1\times10^{12}$ t). El análisis fue presentado en Nature en diciembre de 2020 por un grupo de investigadores del Instituto de Ciencia Weizmann (Israel) Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J. et al. *"Global human-made mass exceeds all living biomass"*. Nature 588**,** 442–444 (2020). Para hacer los cálculos, los autores dividieron los objetos hechos por el ser humano en seis categorías principales: hormigón armado, sus áridos, ladrillos, asfalto, metales y otros materiales que incluyen plásticos, madera tratada para la construcción, papel y vidrio. Un producto que apenas tiene un siglo de recorrido es el mayor responsable de esta nueva relación de masas.

El hormigón armado es el producto tecnológico más importante en el desarrollo y modificación del medio natural que, sin precedentes, se da en la historia del planeta y del ser humano. Supone por tanto, que el pasado siglo XX, además de verlo nacer como una tecnología de éxito icónico, propició las condiciones para su implantación a escala global. Actualmente la *urbanosfera* —red neuronal que dibuja el planeta desde el año 2010, cuando más de la mitad de la población mundial comenzamos a vivir en ciudades— no se comprendería sin su presencia. Su total expansión y conquista global han decorado nuestro hábitat como lo ha hecho el propio ser humano. Esta conquista de cada rincón del planeta no hubiese sido posible sin un factor crucial que simultáneamente catapulta su desarrollo y expansión: los combustibles fósiles. Aproximadamente un 20% de toda esa masa está en el subsuelo sosteniendo nuestras ciudades.

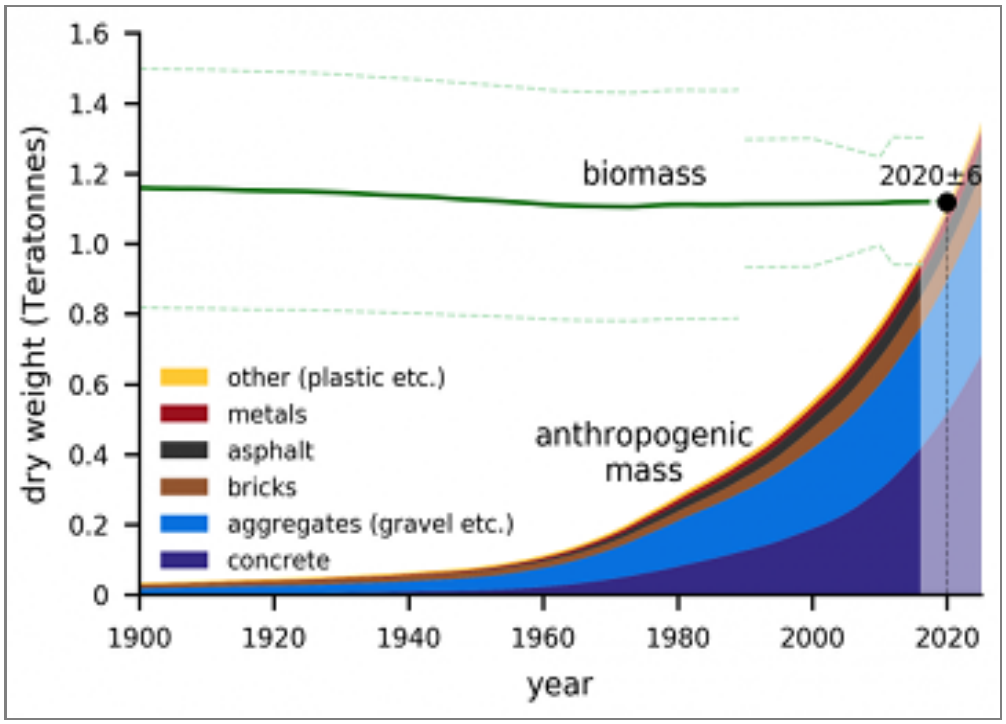


Figura 8.05. En el año 2020 los objetos artificiales superaron en peso a la biomasa del planeta. Fuente: wis-wander.weizmann.ac.il *"Global human-made mass exceeds all living biomass"*. Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J. et al. Nature 588**,** 442–444 (2020).

8.6.1. Incremento en el costo del mantenimiento de infraestructuras y parque inmobiliario.

Por todo lo expuesto, una buena parte de la investigación en el sector se ha enfocado a la búsqueda de formas más ecológicas de fabricar cemento y hormigón, además de nuevos materiales y maneras constructivas (ver Lugo Biodinámico, por ejemplo, del Proyecto Life de la UE, 2016-2020). Pero reducir drásticamente las emisiones es tan difícil como el cambio masivo que requieren el uso de infraestructuras y el propio comercio mundial, así que la Agencia Internacional de Energía (AIE) no prevé que la industria de la construcción llegue a cero emisiones de carbono para 2050.

Aunque conocemos aglomerados u hormigones de origen natural, también algunos manufacturados de altísima calidad con más de dos milenios de antigüedad, el producto conocido como cemento Portland y una mezcla de áridos y agua para generar la mágica roca artificial es muy reciente; tendríamos que remontarnos al desarrollo de diversas patentes durante el siglo XIX, pero especialmente su puesta en obra desde principios del siglo XX, cuando surge el desbocado crecimiento de la industria del cemento.

El despliegue masivo se hace posible gracias a varios factores: 1) Los experimentos de los químicos franceses Louis Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran producir cemento de calidad homogénea. 2) El hecho de que se introducen los hornos de gas, gasoil o carbón y 3) Finalmente, el transporte en fresco con vehículos —de tracción animal primero y enseguida motorizados— antes de las primeras fases de su fraguado.

Así que afirmar que el hormigón armado apenas tiene un siglo de recorrido en esta historia (escrita) de unos 5.000 años, es afirmar que lleva con nosotros un 2% de nuestra historia. El 98% restante desde que tenemos documentos escritos (antes hablamos de prehistoria) hemos usado mezclas de aglomerados, directamente la resistencia de las rocas, madera, barro, ladrillos, fibras vegetales, etc., para procurarnos viviendas e infraestructuras. Incluso gravas del perfil P1 como muros de carga.

Entre 1903 y 1907 se consolida el proceso de fabricación, transporte y puesta en obra del hormigón en masa que poco ha cambiado hasta nuestros días; se trata de una emulación artificial de los procesos de erosión, transporte y sedimentación que la Naturaleza despliega durante siglos con enormes cantidades de energía solar y telúrica. En pocos días u horas, gracias a la manipulación de fuentes de energía no renovable, el ser humano se vio capaz de crear un material pétreo artificial y utilizarlo en su propio beneficio, copiando esos procesos naturales por observación, el desarrollo del conocimiento científico, en especial las ciencias de la Tierra y sobre todo por la disponibilidad de fuentes de energía accesibles, baratas, versátiles y abundantes. Esta es la clave de la conquista planetaria del hormigón armado: es simultáneo al crecimiento sostenido del desarrollo termoindustrial fosilista, tanto en organizaciones sociales capitalistas como socialistas.

Para su fabricación y comercialización a gran escala son imprescindibles nuestras actuales fuentes de energía favoritas: gas, carbón y petróleo, que aún hoy en día suponen más del 85% del consumo global de energía primaria en el mundo. Gracias a las ingentes cantidades de hidrocarburos extraídos especialmente tras la segunda mitad del siglo XX, transformados por combustión de la energía solar fósil, primero enterrada, luego cocida durante millones de años y finalmente devuelta a coste cero como gas, carbón y *oro negro* fabricados en el único planeta (que se sepa) del sistema solar con Tectónica de Placas, el desarrollo y conquista planetaria del hormigón armado no hubiese dibujado el actual paisaje y los modos constructivos de una *urbanosfera* tan pesada como la biota. Podemos afirmar también lo siguiente: lo que la Tectónica de Placas fabricó a partir de la captura de energía solar en decenas de millones de años, actualmente, cada año que pasa, lo estamos quemando a un ritmo de entre uno y dos millones de años de trabajo geológico (dependiendo del tipo de petróleo, gas y carbón que consideremos). Desde que comenzó la primera Revolución Agrícola hace cerca de 12.000 años, los seres humanos hemos reducido la biomasa global casi a la mitad, de unas 2 Tt a alrededor de las 1,1 Tt de hoy.

Una cantidad cada vez mayor de territorio se está utilizando para cultivar, pero la masa total se ve reducida por la deforestación y otros cambios en el uso que han reducido drásticamente lo verde (el 90% de la materia viva). Tras ellos, los mayores impactos provienen de la caza, la sobrepesca y las macrogranjas; todas ellas fueron actividades que con el tiempo también se convirtieron en prolongaciones del trabajo fósil. Toda tecnología funciona porque tras ella hay una energía que la sustenta, el mismo hormigón es una tecnología absolutamente fósil-dependiente que imita de manera bastante pobre los procesos geológicos de erosión, transporte y sedimentación, gracias a la simultaneidad histórica del desarrollo de ambas tecnologías: el hormigón armado y el uso de hornos de gas, carbón y transporte mecanizado de combustión interna.

La durabilidad del hormigón está determinada en gran medida por su deterioro con el tiempo, que se ve afectado por los cambios del medio ambiente. Con el mantenimiento de nuestra extensa obra de hormigón armado pasa exactamente lo mismo: vivimos en un mundo cada vez más necesitado de reparación y conservación de infraestructuras envejecidas, pero con las fuentes de energía barata, abundante y versátil en decadencia, así que el problema de derivar cada vez más recursos para seguir en el mismo lugar se amplifica. Vivimos en el síndrome de la Reina Roja de *Alicia a través del espejo*: cada vez tenemos que correr más deprisa para seguir en el mismo lugar.

Los objetos artificiales que ya compiten en masa con la biosfera, masa que se ha igualado en apenas 120 años, no obstante, mantienen una insalvable distancia con respecto a la materia viva: garantizar su propia continuidad. La vida es capaz de regenerarse a sí misma, las cosas artificiales no, y para su mantenimiento y durabilidad es necesario el consumo de ingentes cantidades de energía. Por lo tanto, cada vez va siendo más caro y difícil luchar contra los elementos en un mundo en declive energético y además en el que han cambiado las circunstancias: el aumento de la dificultad de acceso a fuentes de energía no renovable y de alta densidad energética es simultánea al auge imparable de varios de los mayores enemigos del hormigón armado: la concentración de CO_2, los niveles de humedad, las temperaturas más elevadas y ciertos perjuicios derivados de decisiones del pasado a la ahora de urbanizar: inestabilidades del terreno, sismicidad no reconocida o subestimada o áreas conquistadas en llanuras de inundación.

8.6.2. Los bio-hormigones.

Pese a las altas prestaciones y resistencias conseguidas, el hormigón tiene debilidades y necesita de un mantenimiento cada vez más costoso. En esa vulnerabilidad es donde aparece la necesidad de evolucionar y revolucionar un sector que creció con él y conseguir un hormigón que no requiera tanto mantenimiento. Existen mezclas que solventan de manera parcial el problema. Incorporan al hormigón clásico elementos biológicos como cepas de ciertas bacterias del tipo *Bacillus Pseudofirmus*, capaces de adaptarse a ambientes altamente alcalinos y de lactato de calcio.

En 2016 la Universidad de Delft (Países Bajos) presentó una solución de un producto de hormigón autorreparable aprovechando las propiedades regenerativas de la propia naturaleza. Universidades y centros de investigación por todo el mundo ya investigan esta biotecnología. Al mezclar este tipo de bacterias con cápsulas de lactato de calcio en la mezcla de hormigón inicial, obtenemos un tipo de hormigón con capacidad de reconstruirse a sí mismo a medida que la humedad penetra por el sistema poroso, las grietas, los huecos o zonas previamente dañadas, propiciando a la mezcla una suerte de automantenimiento. La humedad, al introducirse en una cimentación o una estructura, desintegra la cubierta biodegradable de lactato de calcio. Éste estimula a las bacterias que lo consumen fabricando caliza orgánica en el proceso.

A medida que avanza la transformación bacteriana, la caliza se expande y rellena las grietas creadas por impactos, terremotos o la propia incidencia del agua. Así reconstruye la estructura desde adentro hacia afuera, sellando los lugares más vulnerables donde comienzan las debilidades. Se trataría de una variedad de hormigón adecuada para obras muy expuestas a agentes agresivos o en zonas de difícil acceso para las labores de reparación y mantenimiento. Esta biotecnología puede garantizar futuras reparaciones costosas y complejas. Se han puesto en marcha ambiciosas investigaciones analíticas sobre el efecto del cambio climático y las propiedades de los materiales, la durabilidad de las estructuras de hormigón (fisuradas y no fisuradas) bajo diferentes escenarios climáticos como los del Panel Intergubernamental del Clima (IPCC) a partir de sus informes, con modelos de proyección climática calibrados y validados utilizando los resultados experimentales en lugares muy diferentes del planeta. Por ejemplo, *The effect of climate change on durability of existing concrete structures: a comparison between the United Kingdom and Iraq*, Abbas Al-Ameeri 2019. Los resultados indican que la profundidad de carbonatación aumenta al aumentar el ancho de las fisuras en el acabado, la concentración de dióxido de carbono, la humedad relativa y el aumento relativo de la temperatura. En el trabajo mencionado, el análisis de difracción de rayos X en polvo (DRX) y las pruebas de pH confirmaron estos impactos en lugares tan dispares como Reino Unido o Iraq. Al desarrollar modelos de deterioro integrados (perfil de concentración de cloruro y profundidad de carbonatación) —que son función tanto de las propiedades del material como de factores ambientales por el cambio en la cantidad de CO_2, temperatura y humedad relativa—, se evidencia que el ingreso de cloruro en áreas costeras y la profundidad de carbonatación en todas están altamente influenciados por las condiciones climáticas cambiantes en el entorno debido al cambio climático. Además, los resultados revelan una aceleración en la tasa de deterioro de las estructuras que acaba reduciendo la vida útil efectiva de éstas. El desarrollo de bio-hormigones puede ayudar en un futuro a controlar e incluso revertir esta tendencia. Todo dependerá de la investigación que se vaya desarrollando ante una propuesta tan reciente, tanto para hormigones de nueva creación, como para investigar procedimientos sobre los que ya están en servicio.

El uso de bacterias calcificadoras en el hormigón es una tecnología emergente y aún se encuentra en etapas de investigación y desarrollo. Aunque hay investigaciones prometedoras con experiencias muy locales, la aplicación práctica a gran escala en proyectos de construcción aún evoluciona y se enfrenta, sobre todo, a la inercia cortoplacista del sector (Jappe. A. 2021). Algunos desafíos y consideraciones incluyen la viabilidad económica a corto plazo, la estabilidad a largo plazo de las bacterias en condiciones reales de construcción y la adaptabilidad de esta tecnología a diferentes tipos de suelos y ambientes. La pequeña escala ya muestra resultados prometedores de resistencia y autorreparación, al igual que en muros de contención o elementos prefabricados. Las investigaciones sobre hormigón con bacterias calcificadoras abarca ya a todo el mundo. A pesar de las expectativas que ofrece esta tecnología, su implementación a gran escala aún puede requerir tiempo y desarrollo.

8.6.3. El futuro de las cimentaciones en las Marga de Pamplona y terrenos asociados.

Prácticamente la totalidad de la transmisión de cargas constructivas a cimentaciones, ampliaciones, recalces, refuerzos para edificación o apoyo de infraestructuras en las últimas décadas se ha hecho a través del hormigón armado. Actualmente además de la tendencia emergente a reutilizar los escombros de obras que van quedando obsoletas (también para obras lineales, carreteras, rellenos o accesos) o la utilización de nuevos materiales.

El sector, además, trata de redescubrir las formas tradicionales integrando ciertas innovaciones técnicas. Cuando se fueron abandonando las soluciones locales, como las que hemos repasado en los casos estudiados en Pamplona y alrededores, no fue porque fueran inadecuadas, sino porque no suponían suficientes ganancias y no servían para el beneficio cortoplacista, especialmente en su necesidad de obsolescencia programada y ciclos rápidos de construcción y destrucción. El hormigón armado facilitó esa dinámica que acabó siendo denominada *desarrollo económico*, pero que, como hemos visto, se basó en la disponibilidad de recursos limitados, no renovables y traía efectos secundarios a medio plazo, algunos irreversibles.

Hemos visto también cómo durante siglos se desplegó un enorme ingenio e inventiva para encontrar soluciones habitacionales adecuadas a los contextos de clima, tectónica activa, conflictos bélicos, pandemias, utilizando diseños, lugares y materiales locales que se empleaban con el saber hacer de urbanistas, artesanos, maestros constructores y recientemente científicos y arquitectos. Los resultados fueron casi siempre satisfactorios y se fueron ampliando las familias de terrenos sobre los que cimentar edificaciones o apoyar infraestructuras. Hasta tiempos muy recientes el aprendizaje de nuestra interacción geotécnica fue a base de ensayos y errores, hemos recorrido algunos lugares con historias verdaderamente fascinantes entre las construcciones escogidas.

En la historia que hemos repasado, con las construcciones basadas en la tradición local no había necesidad de hormigón, diésel o aire acondicionado en el 98% del tiempo recorrido (muchas veces ni geólogos, ingenieros o arquitectos). Es inevitable, en las circunstancias descritas, que proliferen como lo están haciendo, miradas emergentes que quieran recuperar lo mejor de aquello. Una de las causas por las que las cimentaciones de hormigón, y no las previas al siglo XX, alcanzaron en el núcleo de la ciudad de Pamplona la formación eocena de Margas de Pamplona fue, como comentamos, la irrupción del automóvil y con él la necesidad de dotar a las nuevas construcciones de sótanos para aparcamientos. Se alcanzaron profundidades de decenas de metros de excavación y cimentación en casos muy concretos, como grandes almacenes o palacios de congresos y exposiciones, edificios administrativos, Parlamento o lugares emblemáticos reurbanizados para facilitar el aparcamiento.

Las nuevas tendencias de movilidad urbana están consistiendo en expulsar un objeto como el automóvil de los centros urbanos, favoreciendo el transporte público, los carriles bici y de pequeño vehículo eléctrico, la sustitución de soleras de hormigón y pavimentadas por áreas reverdecidas o la demanda popular y científica de preservar la vegetación en ciudades que ya son islas de calor. El objetivo es controlar los picos de temperatura y contaminación y reducir el consumo energético en hábitats más saludables con menor presión en los sistemas de salud. En este contexto conviven en nuestras ciudades las tendencias en declive (hasta un 52% en la relación 2017/2006 en el uso de áridos en Navarra) que apuestan por más hormigón y más aparcamientos, con aquellas que proponen una optimización del espacio urbano que aporta hasta un 20% de ahorro en una edificación convencional (Ebid A. 2016) si se evita, por ejemplo, la construcción de más sótanos y aparcamientos, aunque también con nuevas propuestas de arquitecturas sostenibles basadas en piedra, materiales cerámicos, fibras orgánicas y madera (ver, por ejemplo, Lugo Biodinámico, Proyecto Life de la UE, 2016-2020) que resuelven el problema de la insostenibilidad, los impactos medioambientales o a la salud de una población que envejece.

Sea como fuere, tenemos claro, por lo mostrado en la evolución de la disponibilidad de recursos y los nuevos itinerarios de desarrollo sostenible, que tanto desde la UE como desde los propios ayuntamientos se imponen las directrices urbanísticas exploradas en los documentos que se van desarrollando a partir del CTE, de los 17ODS o del Dictamen SC/048. Las políticas de adaptación están siendo las que definitivamente están transformando los nuevos contextos energéticos, industriales, climáticos o de planteamiento habitacional. En todas ellas el automóvil sufre una innegociable recesión, por lo que cada vez serán más las construcciones que prescindan de aparcamientos subterráneos o las propuestas urbanísticas de rehabilitación que los incluyan.

Esto supone que en más de un 50% de la superficie de Pamplona se produce un rescate del tipo de cimentaciones atadas, corridas e incluso de mampostería sin hormigón armado como las que se vinieron adoptando hasta el inicio del desarrollo urbano de la segunda mitad del siglo XX.

Los nuevos proyectistas vuelven a valorar aspectos de eficiencia económica, energética y estructural en perfiles geotécnicos del tipo P1, P2 y E2, lo cual, como vimos en la historia de las cimentaciones y apoyos de infraestructuras en el área metropolitana de Pamplona, ha venido siendo una práctica habitual interrumpida durante el 2% del tiempo histórico en que irrumpió la ciudad fósil que nos abandona.

Desde las sucesivas ampliaciones y reparaciones de la catedral, hasta la vertiginosa transformación de Sarriguren y en casos muy concretos, y siempre por las circunstancias que hemos desvelado desde los casos estudiados, las patologías y ruinas analizadas fueron debidas a imprevisiones por la carencia de un adecuado conocimiento geológico y geotécnico del comportamiento de las Margas de Pamplona (E1), de sus residuales (E2), de los terrenos que las acompañan en superficie (P1 y P2) o de sus singulares límites estratigráficos y estructurales (C). También el conocimiento de las circunstancias históricas que hicieron posible lo que unas décadas antes no lo era. Las consecuencias de esa falta de visión científica e histórica fueron en la mayoría de los casos leves patologías fáciles de resolver, otras no tanto y algunas veces alcanzaron la ruina de urbanizaciones al completo, incluso en algunos casos se siguen intentando resolver los problemas después de haber pasado décadas desde su creación.

La resolución de los problemas de deterioro de estructuras que fueron implantadas en lugares que no eran adecuados, como viviendas o infraestructuras con sótanos en llanuras de inundación (P21 y P22), terrenos con cambios de volumen a considerar (E2) o laderas inestables (C), se están llevando a cabo acompañadas de estudios de mitigación, refuerzo y tímidamente se escucha la expresión de *retirada estratégica* como de la que hemos hablado y propusimos tras las inundaciones de Tafalla (Aretxabala, A. 2019).

Sin duda se dará el caso. Pero para ello el sector deberá ver que el nuevo urbanismo sostenible y algunas de las soluciones más radicales como la retirada estratégica son solamente otras herramientas de adaptación y mitigación, a la altura de cualquier tecnología. Conllevan estrategias de armonización entre el ser humano, las comunidades y su entorno y siempre deberán ir enfocadas a conseguir mayores cotas de bienestar. Al mismo tiempo que el siglo XXI vino con grandes retos globales, las ciencias y en especial las ciencias de la tierra, pueden y deben dotar a la sociedad de grandes soluciones.

8.7. Apuntes sobre geotermia y soluciones mixtas.

En Navarra no existen señales de actividad volcánica reciente que pueda llevar asociada un flujo térmico regional para soluciones geotérmicas de alta entalpía. Los vestigios de rocas ígneas más cercanos se sitúan en el macizo granítico de Peñas de Aya (en el límite de Navarra y Guipúzcoa), en los diques doleríticos y basaltos emplazados durante el Pérmico superior en el Macizo de Cinco Villas (extremo septentrional navarro) y especialmente en las rocas ofíticas asociadas a los diapiros, localmente conocidas como ofitas y de amplia utilización histórica (ferrocarril, asfalto, hormigones, pesados, industria agroalimentaria, etc.).

Destacan los diapiros de Ollo y Anoz, a unos 10 km hacia el noroeste de San Jorge. Bajo la clásica denominación de ofitas, se engloba una serie de familias de rocas de composición basáltico-andesítica. Aparecen en superficie como masas irregulares de pequeñas dimensiones, de tonos verdosos oscuros y aspecto homogéneo. En ellas predomina la textura ofítica, con plagioclasa y clinopiroxeno como minerales fundamentales, junto a los que pueden aparecer apatito, magnetita, feldespato potásico, anfíbol, epidota, ilmenita y esfena como accesorios, siendo la clorita el mineral secundario más frecuente, en buena parte como producto de alteración de olivino.

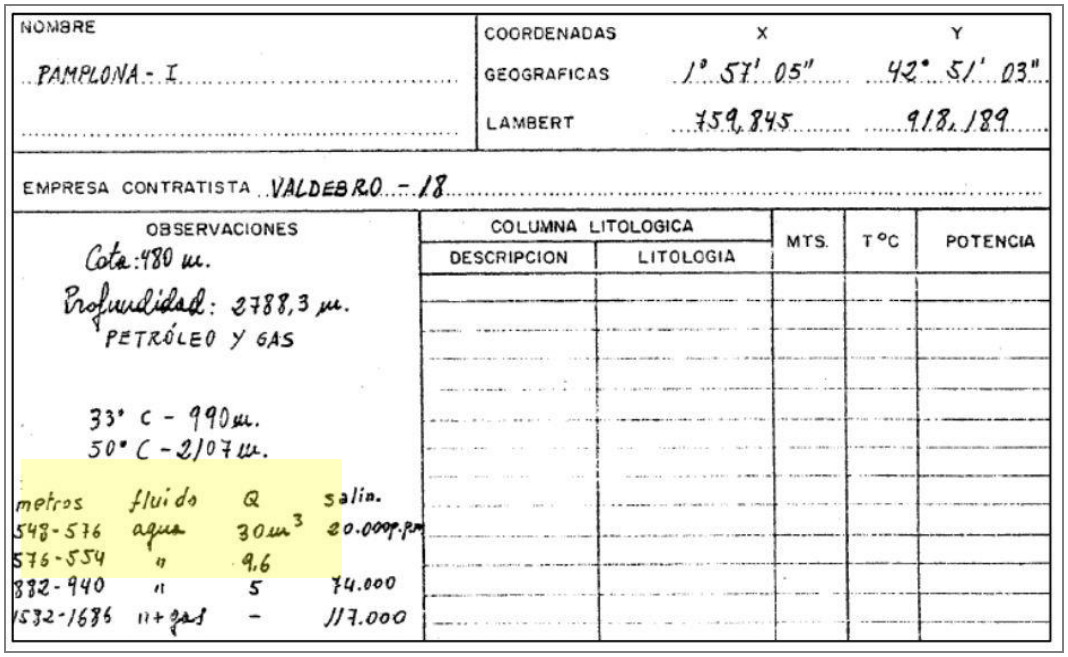
La manifestación hidrotermal más próxima al área metropolitana es el sistema hidrotermal Ibero-Etxauri-Belascoain, situado a unos 6 km al oeste, en el límite occidental de la Cuenca de Pamplona. Este sistema se incluye en la *Unidad Hidrogeológica de Urbasa-Andía*, que limita con la Cuenca de Pamplona. La surgencia de manantiales termales se debe a la presencia de una estructura diapírica cuya intrusión genera un conjunto de fallas radiales entre las que destaca la falla de Etxauri que entra en el área metropolitana y fue el accidente tectónico al que se hizo responsable del evento sísmico ML4,2 del 23 de marzo de 2013. La descarga de las aguas subterráneas de los acuíferos calizos del Paleoceno y Eoceno tiene lugar a lo largo del contacto entre dos fallas, la falla de Etxauri de dirección E-O y la falla de Belascoain-Etxauri-Ibero, no visible en superficie y de orientación NE-SO. Los manantiales afloran sobre las margas eocenas más impermeables en el contacto mecánico con el acuífero confinado carbonatado.

La memoria del mapa geológico 1:25.000 del Gobierno de Navarra (hoja 141-I), destaca el acuífero confinado Ibero-Etxauri está compartimentado en bloques de permeabilidad baja delimitados por zonas muy tectonizadas a partir de las cuales se establece un flujo preferente de agua, con direcciones NO-SE y N-S. Las aguas del manantial de Belascoain fluyen a una temperatura de 26ºC. Diputación Foral de Navarra (1982) clasifica las aguas del manantial de Ibero como fuertemente mineralizadas, son duras o extremadamente duras y de carácter clorurado sódico-cálcico. Las aguas de Etxauri se clasifican de forma idéntica.

Los sondeos profundos realizados a mediados del siglo XX para la búsqueda de hidrocarburos se pueden resumir en la siguiente tabla XXII:

Nombre del sondeo	Coordenadas (ETRS89)	Localidad	Fecha	Profundidad (m)
PAMPLONA-1	41º 50' 60" N, 01º 44' 10" W	Zuasti	13/08/1958	2.788
PAMPLONA SUR-1	42º 43' 40" N, 01º 34' 52" W	Zabalegui	14/09/1961	2.457
PAMPLONA 2	42º 49' 35" N, 01º 42' 03" W	Orkoien	22/02/1959	2.100
PAMPLONA 3	42º 50' 52" N, 01º 44' 41" W	Zuasti	07/10/1959	3.554
PAMPLONA 4	42º 51' 11" N, 01º 43' 38" W	Larragueta	22/06/1960	(sin dato)

Fichas de cuatro de estos sondeos pueden consultarse en la investigación IGME (1982, código 00660), en su Anexo II. En ellas se indica la denominación del sondeo, los materiales atravesados y la cota a la que se definen, así como algunos valores de temperatura medidos a la cota indicada. En el documento *ESTUDIO EN PROFUNDIDAD SOBRE LAS POSIBILIDADES DE APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO EN NAVARRA E IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS CON MAYOR POTENCIAL* (Gobierno de Navarra, 2018). Estas fichas se asocian con el documento ITGE (1982, código 00225), Anejos 1 y 2, al que no se ha tenido acceso.



NOMBRE: PAMPLONA - I

COORDENADAS — X — Y

GEOGRAFICAS: 1° 57' 05" — 42° 51' 03"

LAMBERT: 759.845 — 918.189

EMPRESA CONTRATISTA: VALDEBRO - 18

OBSERVACIONES

Cota: 480 m.

Profundidad: 2788,3 m.

PETRÓLEO Y GAS

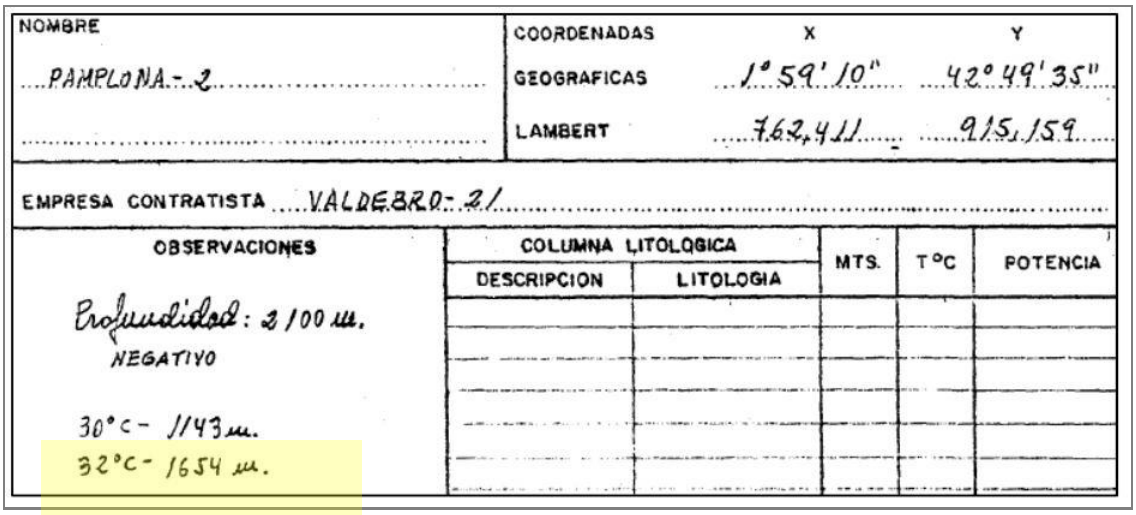
33° C - 990 m.

50° C - 2107 m.

metros	fluido	Q	salin.
548-576	agua	30 m³	20.000 p.m
576-554	"	9,6	
882-940	"	5	74.000
1532-1686	" + gas	-	117.000

COLUMNA LITOLOGICA: DESCRIPCION | LITOLOGIA | MTS. | T°C | POTENCIA

Figura 8.06. Ficha sondeo profundo PAMPLONA-1: 50ºC a 2.107 m.

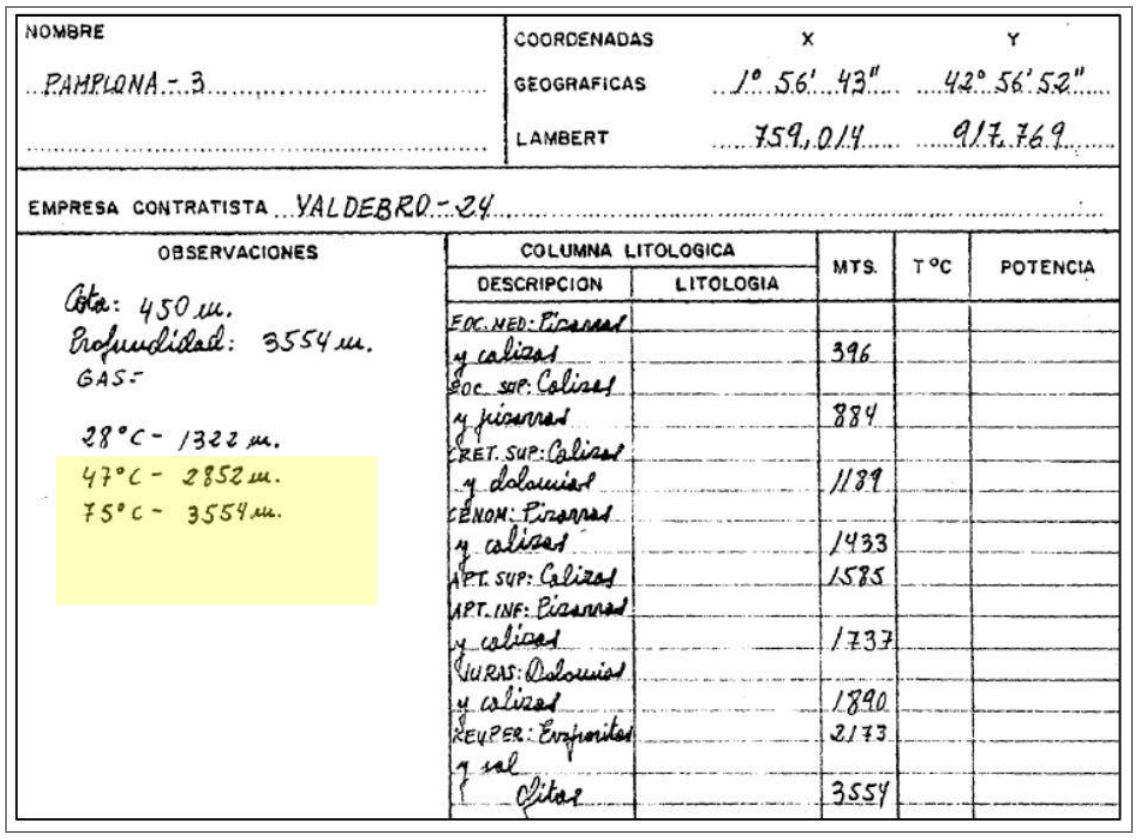


NOMBRE	COORDENADAS	X	Y
PAMPLONA-2	GEOGRAFICAS	1° 59' 10"	42° 49' 35"
	LAMBERT	762,411	915,159

EMPRESA CONTRATISTA: VALDEBRO-21

OBSERVACIONES	COLUMNA LITOLOGICA		MTS.	T°C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			
Profundidad: 2100 m. NEGATIVO 30°C - 1143 m. 32°C - 1654 m.					

Figura 8.07. Ficha sondeo profundo PAMPLONA-2: 32ºc a 1.654 m.

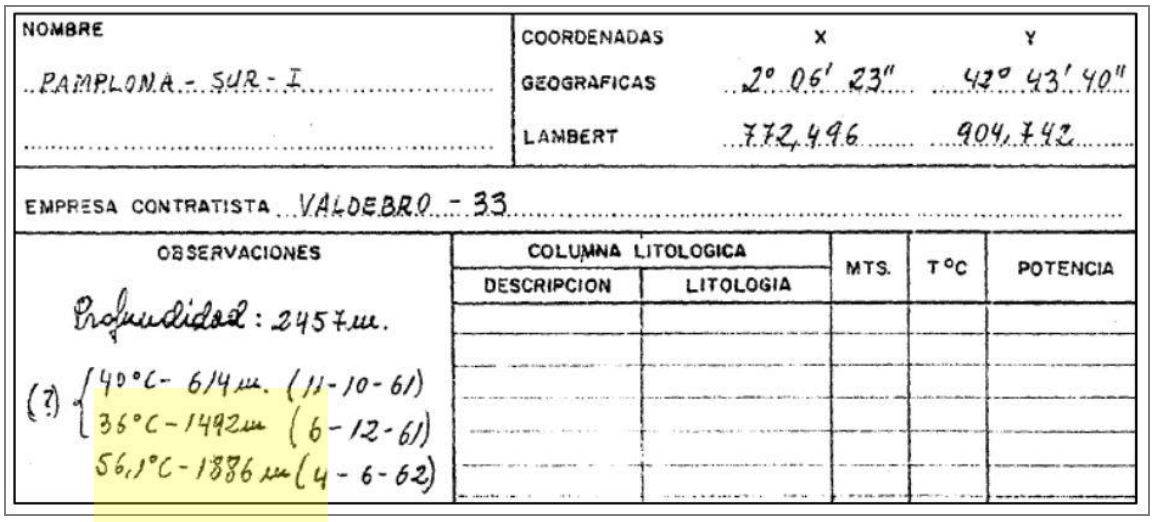


NOMBRE	COORDENADAS	X	Y
PAMPLONA-3	GEOGRAFICAS	1° 56' 43"	42° 56' 52"
	LAMBERT	759,014	917,769

EMPRESA CONTRATISTA: VALDEBRO-24

OBSERVACIONES	COLUMNA LITOLOGICA		MTS.	T°C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			
Cota: 450 m. Profundidad: 3554 m. GAS- 28°C - 1322 m. 47°C - 2852 m. 75°C - 3554 m.	EOC. MED: Pizarras y calizas		396		
	EOC. SUP: Calizas y pizarras		884		
	CRET. SUP: Calizas y dolomias		1189		
	CENOM: Pizarras y calizas		1433		
	APT. SUP: Calizas		1585		
	APT. INF: Pizarras y calizas		1737		
	JURAS: Dolomias y calizas		1890		
	KEUPER: Evaporitas y sal		2173		
	Ofitas		3554		

Figura 8.08. Ficha sondeo profundo PAMPLONA-3: 75ºc a 3.554 m en ofitas.



NOMBRE	COORDENADAS	X	Y
PAMPLONA - SUR - I	GEOGRAFICAS	2° 06' 23"	42° 43' 40"
	LAMBERT	772.496	904.742

EMPRESA CONTRATISTA VALDEBRO - 33

OBSERVACIONES	COLUMNA LITOLOGICA		MTS.	T°C	POTENCIA
	DESCRIPCION	LITOLOGIA			
Profundidad: 2457 m.					
(?) 40°C - 614 m. (11-10-61)					
36°C - 1492 m (6-12-61)					
56,1°C - 1886 m (4-6-62)					

Figura 8.09. Ficha sondeo profundo PAMPLONA-SUR 1: 56,1ºC a 1.886 m.

Como síntesis de la información recopilada de estos sondeos puede establecerse que en el entorno de Pamplona, bajo el sustrato margoso (de baja o nula permeabilidad), a partir de profundidades del orden de 500 m, empiezan a aparecer formaciones de calizas Terciarias y Cretácicas (con potencias decamétricas a hectométricas), intercaladas entre otras formaciones margosas, hasta alcanzar materiales Triásicos en facies Keuper (de elevada salinidad) a profundidades superiores a los 2.000 m. De las mediciones de temperatura realizadas en los sondeos profundos, se establece un gradiente geotérmico sin anomalías, situándose este en torno a los 3ºC/100 m. La mejor síntesis del conocimiento actual sobre la geotermia en Navarra se recoge en el documento mencionado en el punto anterior "*ESTUDIO EN PROFUNDIDAD SOBRE LAS POSIBILIDADES DE APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO EN NAVARRA E IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS CON MAYOR POTENCIAL* (Gobierno de Navarra, 2018)".

Es un documento extenso que además de recopilar la información existente sobre geotermia profunda navarra, recoge experiencias de aplicaciones geotérmica con un listado de instalaciones geotérmicas en Navarra. También incluye los aspectos más relevantes de los estudios geotérmicos precedentes: *Proyecto Hidrogeológico de Navarra. Informe Técnico nº 19. Estudio geotérmico preliminar*, encargado por la Diputación Foral de Navarra en el año 1977 y realizado por la empresa Compañía General de Sondeos, S.A.; y el *Estudio Geotérmico preliminar de Navarra*, elaborado por José F. Albert Bertrán en 1979. Incluye consideraciones de aplicación en Navarra sobre el Atlas Geotérmico de Aragón (Gobierno de Aragón, 2001), ya que ambas regiones comparten aspectos comunes de la geología regional. Entre otras aportaciones, el documento define las principales formaciones geológicas que pueden considerarse como "formaciones de potencial interés geotérmico" que incluyen rocas carbonatadas cretácicas y terciarias asociables a las formaciones carbonatadas de estos periodos existentes en la serie sedimentaria profunda bajo Pamplona.

Se indican a continuación los aspectos geotérmicos más destacables recopilados de los estudios y documentación analizados:

El entorno de Pamplona, como la mayor parte de Navarra, se enmarca dentro de los territorios clasificados como recursos geotérmicos de muy baja temperatura. Al sur de la comunidad se ha definido una zona con recursos geotérmicos de baja temperatura, asociada con el termalismo de Fitero (figura 8.10).

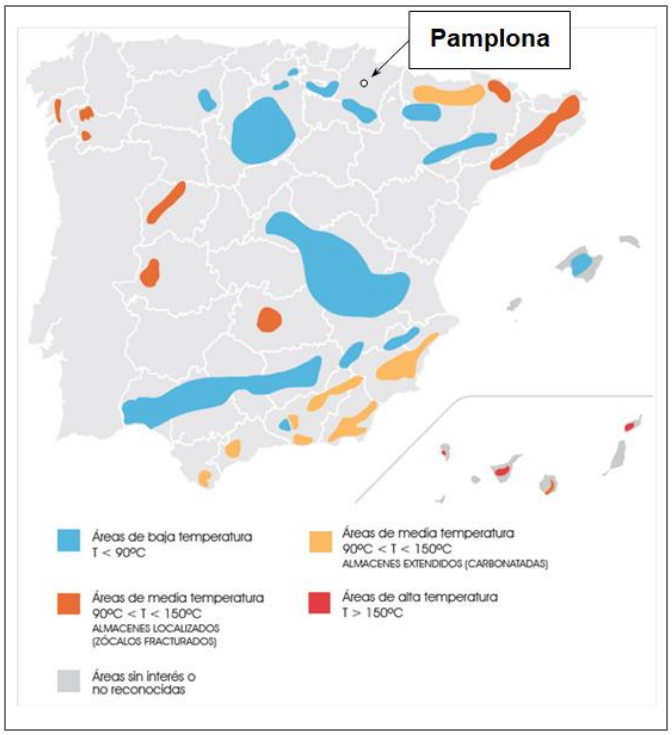


Figura 8.10. Mapa de áreas geotérmicas de España (IGME: Inventario General de Manifestaciones Geotérmicas en Territorio Nacional. Tomo II).

Todas las aguas termales de Navarra tienen una composición química de marcado carácter clorurado-sódico, estando esta mineralización relacionada con la formación evaporítica en facies Keuper (Triásico superior). El modelo hidráulico asociado a todo el termalismo navarro se basa en infiltración del agua en macizos rocosos, con un tiempo de residencia del orden de 20 a 25 años, calentamiento por circulación profunda favorecido por la estructura geológica, y rápido ascenso a la superficie como fluido hidrotermal con cierto porcentaje de mezcla con aguas superficiales más frías. Se ha considerado que el calentamiento del agua termal asociada a las zonas de diapiros como es el caso de Ibero-Etxauri-Belascoain se debe a la mayor conductividad térmica de los materiales evaporíticos atravesados sin que intervenga ningún proceso geotérmico anómalo.

Según el *Estudio Geotérmico Preliminar de Navarra* (Albert, 1979), los gradientes geotérmicos medidos en sondeos petrolíferos profundos en Navarra (en total 18), oscilan entre 2,5ºC/100 metros y 4,4ºC/100 metros. Los valores máximos se distribuyen en dos zonas coincidentes con los sectores donde se han definido las anomalías térmicas (al sur y oeste de Navarra). Aunque la población de datos utilizado es muy baja (18 en total) este documento incluye un mapa orientativo de gradientes geotérmicos en Navarra (figura 8.11).

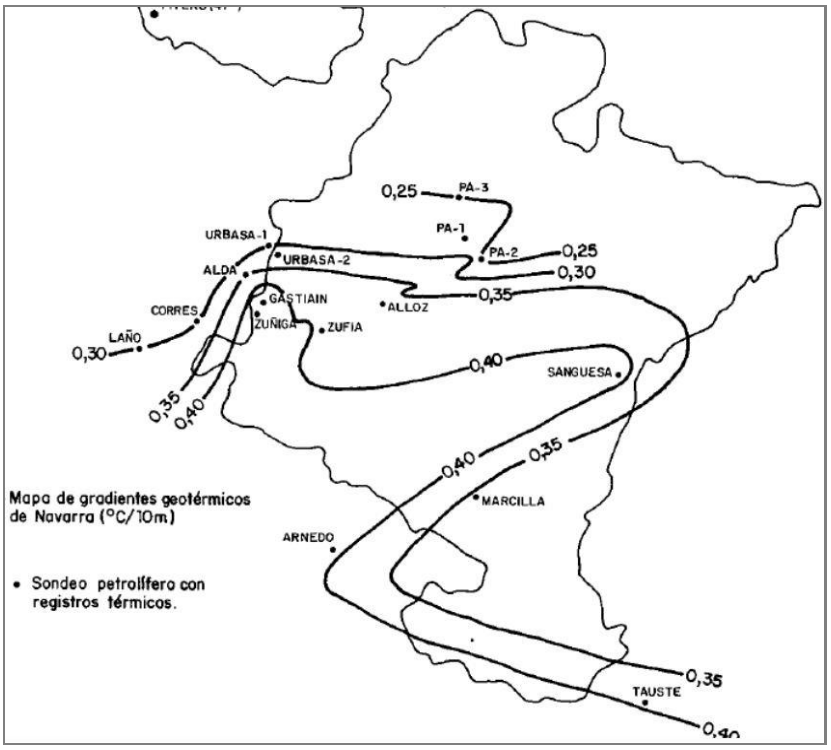


Figura 8.11. Mapa orientativo de gradientes geotérmico en Navarra según Albert (1979). Fuente: *ESTUDIO EN PROFUNDIDAD SOBRE LAS POSIBILIDADES DE APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO EN NAVARRA E IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS CON MAYOR POTENCIAL*. Gobierno de Navarra (2018).

Las nuevas técnicas y tecnologías que van desarrollándose permiten otorgar mayor valor a zonas catalogadas como recursos geotérmicos de baja y muy baja temperatura, como es el caso de las manifestaciones geotérmicas en Navarra. Algunas valoraciones sobre este aspecto se recogen en Antonio Colmenar-Santos et al, (2016) *The geothermal potential in Spain*. Otros autores como Arrizabalaga et al, 2015 *y Tecnología y Recursos de la Tierra, (2011*) asignan recursos geotérmicos potenciales de media temperatura en formaciones geológicas permeables, aunque se encuentran ubicadas a profundidades superiores a 3.500 metros tras pasar materiales químicamente agresivos.

Como conclusión final, de los datos e información disponible actualmente y en lo referente a la implantación de instalaciones de aprovechamiento de energía geotérmica, se establece que a día de hoy en Navarra únicamente se pueden explotar recursos de baja o muy baja temperatura. En el caso del entorno de Pamplona esto se traduce en bombas de calor geotérmicas para calefacción, climatización y generación de agua caliente sanitaria en cualquiera de los perfiles definidos anteriormente. Podríamos hablar de soluciones mixtas. Un tipo de tecnología que aún no se ha explotado a gran escala consiste en el almacenamiento de energía térmica en rocas a partir de fuentes de energía renovable. Las plantas que entran en esa categoría tienen capacidades energéticas y eléctricas muy altas, lo que les permite contribuir significativamente a procesos industriales desde una combinación de electricidad y almacenamiento prácticamente sin emisiones. Debido a la creciente necesidad de almacenar el exceso de electricidad procedente de fuentes renovables, las soluciones escalables y que sean altamente eficientes tienen un gran potencial desde el momento en que se comiencen a instalar ante el innegociable declive de las fuentes no renovables o las que, consideradas renovables, requieren de materiales geológicos escasos (Valero, A., 2021).

El almacenamiento y uso de energía térmica parte de la premisa de que se puede almacenar energía en forma de calor gracias a un sistema de electricidad a calor y viceversa, como una bomba de calor, durante períodos de tiempo que pueden ser de días, semanas o meses. Cuando se vuelve a necesitar electricidad, es el calor el que se puede convertir en electricidad o entregarse según la demanda o según la necesidad. Son habituales tres tipos de tecnologías: pozos de agua, baterías de Carnot y el almacenamiento de energía en rocas basálticas como las ofitas de Navarra.

El concepto de almacenamiento de calor en un pozo de agua es bastante simple: consiste en un agujero profundo en el suelo cubierto con material aislante y lleno de agua caliente. El agua permanecerá caliente durante meses, dependiendo del tamaño y diseño del almacenamiento, con la posibilidad de convertirse en una batería de calor estacional, almacenando calor durante el verano y descargándolo en invierno.

Las baterías Carnot constan de un sistema más complejo. La carga convierte la electricidad en calor mediante una bomba de calor o una serie de resistencias, almacenando el exceso en un almacén térmico. Durante la descarga el proceso se invierte a través de un ciclo termodinámico y se entrega nuevamente electricidad. Las baterías de Carnot tienen ventajas, no tienen limitaciones geográficas, se pueden utilizar una gran variedad de materiales de almacenamiento, como agua caliente, sales fundidas, rocas, materiales termoquímicos y pueden implementarse desde tecnologías ya maduras. Las eficiencias de electricidad a electricidad oscilan entre el 40-70%, con una densidad energética de 50 kWh/m^3.

Se trataría de menos rendimiento que el de una batería de ion-Litio, pero con mayores posibilidades de escalamiento. Ya se han instalado algunas plantas de importantes empresas y centros de investigación, desde Siemens Gamesa a la Universidad de Newcastle.

La tecnología mixta entre la geotermia y el almacenaje del exceso de energía proveniente de fuentes renovables consiste en calentar las rocas basálticas como las ofitas que se formaron a altas temperaturas en Navarra. Desde la actividad volcánica andesítica-basáltica, las encontramos cerca de Pamplona, como hemos comentado, y ya se usan en diversos procesos industriales como la construcción, ferrocarril o históricamente en la agroindustria. El calentamiento se realiza con aire caliente que puede alcanzar temperaturas de 600-700ºC en los momentos de máxima producción, luego se descarga el aire caliente produciendo electricidad con turbinas convencionales.

Con una bomba de calor se traslada la energía desde un depósito frío hasta los depósitos que reciben el calor, almacenándolo. Cuando se necesita la energía eléctrica o sus precios son altos, las rocas basálticas de los tanques calientes se enfrían, y al revés en los tanques fríos, produciendo nuevamente electricidad.

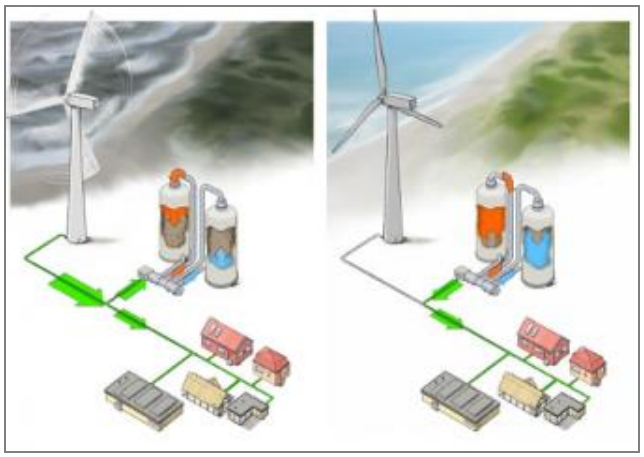


Figura 8.12. Croquis de un dispositivo GridScale mostrando el almacenaje desde energía eólica a térmica en los momentos de máxima producción (izquierda) y devolviéndola desde las rocas basálticas en los momentos que no hay viento (derecha). Fuente: GridScale, Danemark, 2022.

Las principales ventajas de estas tecnologías consisten en la posibilidad de integrarse fácilmente con sistemas preexistentes, junto con su escalabilidad intrínseca, un impacto ambiental muy bajo y un material de almacenamiento local y económico. El período de almacenamiento varía desde unos pocos días hasta varias semanas, dependiendo del tamaño del proyecto, aislamiento y de las pérdidas térmicas, permitiendo también aplicaciones estacionales.

La duración del almacenamiento se adapta al número de tanques de almacenamiento. La potencia nominal se ajusta con el número de unidades en paralelo. La gama GridScale (figura 8.12) cubre tanto la duración de horas necesarias para el suavizado diario de la energía solar fotovoltaica como la duración de varios días necesaria para el suavizado de la energía eólica en los intervalos causados por períodos de poco viento. En la ciudad proliferan las inversiones en edificios que cuentan con instalaciones geotérmicas desde hace décadas y que se han impulsado en los últimos años siguiendo las directrices del *PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA 2021-2030* (PNIEC) y en el caso de la geotermia somera, dado su potencial de ahorro y descarbonización en la edificación, se está buscando el desarrollo técnico que permita la reducción de costes de ejecución, la mejora de métodos de evaluación del terreno para nueva construcción, el incremento de la productividad de los sondeos y la integración en rehabilitación de los edificios patrimoniales como vimos en Salesas. Además, las tecnologías de almacenaje, como las presentadas, apuntan todas ellas a soluciones mixtas para calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria.

Este enfoque permite una descentralización con pérdida de dependencia de las fuentes de energía de la red. También permite aumentar los niveles de uso de energía renovable. GridScale (figura 8.12) es, por ejemplo, un sistema de almacenamiento de energía térmica por bombeo que utiliza roca triturada como medio de almacenamiento abundante y de bajo costo. Los principales componentes del sistema son: una unidad turboexpansora con compresor de prepresión, controles, etc., una unidad de filtrado con filtros de aire y colectores y dos filas de depósitos de almacenamiento estandarizados de diseños variables dependiendo de las necesidades o expectativas.

Los proyectos mixtos de geotermia somera en Margas de Pamplona y sus terrenos asociados, combinados con tecnologías de almacenamiento de energía a modo de baterías, basadas en las moderadamente abundantes ofitas de Navarra requieren diseños adecuados a las necesidades de edificios o comunidades energéticas. Las curvas de aprendizaje han comenzado y trazan ya interesantes líneas de investigación para un futuro sostenible en que la tradición, nuevamente, se da cita con la más moderna tecnología también sobre las Margas de Pamplona.

9. RESUMEN FINAL

1. De la primera parte destacamos la capacidad de las Margas de Pamplona para evolucionar a diferentes materiales en su interacción con el clima, especialmente sus cambios de comportamiento geotécnico en función de los intercambios de humedad ambiental. Sumado a ello está la peculiaridad climática de la Cuenca de Pamplona, donde se asienta la formación con sus terrenos asociados y el 56% de la población de Navarra, a caballo entre las influencias más secas del clima continental al sur con el húmedo y oceánico por el norte. Ello ha determinado una manera singular de interacciones geotécnicas poco consideradas.

2. De la segunda parte rescatamos el hecho de que no fueron habituales las interacciones del ser humano con las Margas de Pamplona dentro de la ciudad antigua. A pesar de que la tecnología en las margas fue conocida desde, al menos, la Edad de Hierro, fuera del núcleo desde el que se desarrolló Pamplona, la peculiaridad geotécnica de sus terrenos dispuso que la mayor parte del tiempo histórico la construcción se desarrollase sobre terrenos de las familias P1 y P2 (Pamplona 1 y 2). Solo en momentos de cambios radicales en la historia, como la irrupción de pestes y pandemias a partir de la Edad Media, modificaron esa predisposición al ir a buscar otras zonas donde desarrollar nuevas tendencias constructivas de carácter terapéutico y religioso. El ser humano se reencontró con nuevos terrenos como los perfiles exteriores (E1 y E2) y también con los niveles geotécnicos estructurales C. En el siglo XX se da el cambio más radical con la irrupción de los combustibles fósiles, el hormigón armado, la maquinaria de motor de combustión y el vehículo autónomo. La ciudad sigue creciendo en altura, pero al darse la mayor expansión horizontal de la historia, se desarrolla la construcción directamente hacia los terrenos exteriores de Margas de Pamplona (E). Paralelamente, dentro de la vieja ciudad, el desarrollo vertical (hacia abajo) favorecido por las nuevas y potentes tecnologías y maquinarias de obra pública, pone en contacto al sector con los perfiles E como no había sucedido en la historia. Ello ha llevado a cierta incomprensión que ha resultado en algunas patologías que se analizan desde el punto de vista geotécnico-forense en diferentes contextos constructivos, culturales e históricos.

3. De la tercera parte destacamos que las Margas de Pamplona no presentan cambios de comportamiento geomecánico y geotécnico en relación a su distribución espacial (geográfica y cota) y son muy sensibles a los cambios ambientales, especialmente la humedad. Es la profundidad del macizo rocoso el parámetro que mejor representa ese comportamiento geotécnico. La resistencia mecánica o el peso específico, así como los índices de expansividad y calidad del macizo rocoso como el RQD o el RMR, son dependientes de la humedad y de la profundidad.

Los casos potenciales más proclives para desarrollar patologías, a partir de los cambios ambientales climáticos o antrópicos, no son en rocas sanas o suelos residuales, sino especímenes intermedios. Se suministra una clasificación dedicada basada en la resistencia mecánica. Es el parámetro más adecuado para disponer de una ordenación propia que satisfaga expectativas de distribución y previsión.

4. En la cuarta parte se facilita una clasificación de tres familias geotécnicas con siete perfiles tipo de entidad propia. Se suministra una microzonificación geotécnica para proyectos constructivos acordes con la normativa vigente y adecuados a ella, en especial se considera el Código Técnico de Edificación (CTE, 2006).

5. En la parte cinco se analizan las inestabilidades en obra pública, urbanización, edificación y construcción en general, atendiendo a los criterios geotécnicos mostrados en las partes anteriores. Se analizan con detenimiento cuáles son los mecanismos comunes que generan patologías a pequeñas, medianas y grandes escalas, el papel del clima, las actuaciones humanas o la sismicidad, y siempre supeditadas a la interacción con una predisposición estructural de los materiales geológicos que facilita las inestabilidades. Normalmente suelen estar involucrados terrenos periféricos del perfil geotécnico C de la formación, combinados directamente con Margas de Pamplona, sus residuales e incluso de las familias P.

6. En la sexta parte, dedicada a la seguridad sísmica, se hace un repaso histórico de los acontecimientos relacionados con el fenómeno sísmico alrededor de la ciudad y cómo ha cambiado la percepción del mismo a lo largo de la historia, especialmente tras los acontecimientos vividos con la entrada del siglo XXI. Algunos impactos relevantes del pasado han llegado muy velados o no han llegado por causas culturales y religiosas. Se proponen itinerarios para garantizar la seguridad adecuada a los diferentes terrenos involucrados desde una nueva visión geotécnica. Ésta revela la necesidad de avanzar en una seguridad que no se actualizó al mismo ritmo que el conocimiento y los hechos. Creemos que el fenómeno está subestimado por el tipo de enfoque recibido. Se debería evitar el basar los nuevos estudios exclusivamente en distribuciones epicentrales ya conocidas y considerar la necesidad de estudios de campo de las innumerables fallas desconocidas que están generando terremotos cerca de la ciudad, en especial en las fuentes sismogénicas norte-este. La efectividad del trabajo centrado en gabinete, sobre todo con el recuento y valoración de los catálogos, es claramente menor en los alrededores de Pamplona que en otras áreas con mayores tasas de deformación y menos fracturas, pero conocidas, lo que sugiere que la distribución epicentral de los catálogos históricos dejó de ser una base efectiva con la entrada de la segunda década del siglo XXI para la prevención de futuros terremotos destructivos en la zona.

7. De la séptima parte destacamos la posibilidad de disponer de la microzonación presentada en la parte cuatro y las recomendaciones constructivas adecuadas sobre el territorio para cada espécimen geotécnico, E1, E2, P11, P12, P21, P22 y C, en especial las referentes a cimentaciones, excavaciones, estabilidad, obras subterráneas, sismicidad, aprovechamiento de los materiales para obra pública o urbanización con advertencias y consejos especiales para cada uno. Se estudian las problemáticas comunes a cada perfil tipo y se dan pautas generales para las obras en terrenos que presentan cambios de volumen ambientales (E2) o en llanuras de inundación (P21 y P22), así como medidas especiales para evitar inestabilidades en todos los perfiles definidos, especialmente en presencia de niveles C.

8. La octava parte es un esbozo de los retos y expectativas que afrontan los sectores de la construcción, la edificación o la industria desde la perspectiva constructiva y, concretamente, geotécnica, energética y de sostenibilidad. Todo ello en un contexto ambiental y económico-social altamente cambiante con desafíos importantes para esta misma década. Se da un repaso a las propuestas, normativas y dictámenes internacionales, estatales, autonómicos o municipales para ayudar a trazar un futuro más próspero, suministrando una serie de propuestas, tecnologías y posibles actuaciones que, desde las ciencias de la tierra, se pueden hacer avanzar para garantizar un desarrollo más sostenible en los sectores involucrados.

Antonio Aretxabala Díez

10. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES

1. Abbas Al-Ameeri (2019) The effect of climate change on durability of existing concrete structures: a comparison between the United Kingdom and Iraq.
2. Abohashish A., Ebid, M.A. (2015) Estimating the Economic Quantities of Different Concrete Slab Types. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. ISSN. 2319-8753.
3. AIE 2020. World Energy Investment 2020.
4. Albert-Beltrán, J. F. (1979). Estudio geotérmico preliminar de Navarra. Gobierno de Navarra.
5. Alegría-Suescun, D. (2004) Agua y ciudad. Aprovechamientos hidráulicos urbanos en Navarra (siglos XII-XIV). 436 pp. ISBN: 9788423527076. Gobierno de Navarra.
6. Alfaro, J. A.; Casas, A.M. y Simón, J.L. (1987) Ensayo de zonación sismotectónica en la Cordillera Ibérica, Depresión del Ebro y borde sur pirenaico. Estudios geol., 43, 445-457.
7. Alonso Pereira J.R. (2013) Los orígenes del hormigón armado en la arquitectura española. Revista Labor & Engenho
8. Anders S.G. Andrae S. (2020) On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. Huawei Technologies.
9. ANEFA (2022) Informe de situación económica sectorial.
10. ANEFA (2023) El Sector de los Áridos en 2022 y perspectivas 2023.
11. Ardaiz Loyola, I. y Martínez Vicente (1980) Estudio Prospectiva Navarra 2000
12. Arenillas, I., Arz, J.A. (1994) Síntesis bioestratigráfica y eventos paleoceanográficos del Cretácico (Maastrichtiense) al Mioceno (Langhiense) basada en foraminíferos
13. Aretxabala, A. (2002) Algunas aclaraciones sobre estudios geotécnicos en suelos colapsables en Navarra. RE: revista de edificación, ISSN 0213-8948, Nº 31-32, 2002. INGEOPRES, Nº. 142, ISSN 1136-4785 2005, págs. 48-53 1998. INGEOTER. Vol. 8. Cap. 6. ISBN: 9798493129292.
14. Aretxabala, A. (2012) El terremoto de Pamplona del 10 de marzo de 1903 (M 4,7 - VI).
15. Aretxabala, A. (2012) La tormentosa relación de menosprecio cultural, científico, técnico y geotécnico entre España y su patrimonio histórico. Tierra y Tecnología (ICOG).
16. Aretxabala, A. (2013) Informe preliminar: la serie sísmica en la sierra de El Perdón (sur de Pamplona).
17. Aretxabala, A. (2014) Fracking. El encuentro en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Santander.
18. Aretxabala, A. (2014) Lorca Resiliente. Secretaría General Técnica del Ministerio del Interior, Dirección General de Protección Civil y Emergencias. Atención Social y Económica. P.47

19. Aretxabala, A. (2015) La rentabilidad del fracking contada a principiantes.
20. Aretxabala, A. (2016) Grandes infraestructuras, bombas de relojería y sociedad colaborativa. Revista 151515. ISSN 2530-4690
21. Aretxabala, A. (2017) Informe preliminar: la crisis sísmica de marzo y abril de 2017 al norte de Pamplona.
22. Aretxabala, A. (2018) Arnao observando el declive. Revista 151515. ISSN 2530-4690
23. Aretxabala, A. (2018) El hormigón armado, icono del capitalismo fosilista. Revista 151515. ISSN 2530-4690
24. Aretxabala, A. (2019) Navarra: nuevos modelos económicos sostenibles y transición global hacia un nuevo modelo energético.
25. Aretxabala, A. (2020) ¿Energías limpias? ¿Crecimiento en V? Nuestras trampas al solitario descubiertas.
26. Aretxabala, A. (2020) El crecimiento sin fin toca a su fin.
27. Aretxabala, A. (2020) La minería en Navarra ante el nuevo contexto histórico de transición energética y global. Fundación Sustrai Erakuntza.
28. Aretxabala, A. (2020) La peligrosidad sísmica en Navarra. Una cuestión no exclusivamente geológica.
29. Aretxabala, A. (2020) Planeta Hormigón. Revista 151515. ISSN 2530-4690
30. Aretxabala, A. (2021) Volatilidad del petróleo: la enorme piedra en el camino hacia la Transición Energética. Revista 151515. ISSN 2530-4690
31. Aretxabala, A. (2023) A minería na nosa primeira transición enerxética. Tempos novos Nº. 313 2023, 12-18.
32. Aretxabala, A., Aoiz, M., Ausejo, B., Cabrejas, J., Corcín, J.J., Escudero, L.M., Esparza J.M., Ibarra, J., Irigaray, J.J., Jaso, C., Rekondo, J., Beñat-Cañada, S., Urkia, I. Zabalza, J. (2019) Hasta aquí llegó la penúltima riada. Las enseñanzas del Zidacos. 250 pp. ISBN 978-84-94636-54-7. Ed. Altaffaylla.
33. Aretxabala, A., Sanz, C. (2011) Why was it so damaging? The Lorca earthquake, 2011 May 11th. International Journal of Environmental Protection (IJEP).
34. Aretxabala, A., Sanz, C. (2012) Reconsidering Urban Planning in Spain after the Lorca Earthquake (11th May 2011). 15WCEE
35. Aretxabala, A., Turiel, A., Pascual, U. (2023) La energía como bien público, clave para el desarrollo sostenible. CTXT. Agenda 2030.
36. Arjuna, N., Kling, A., Willamowski, R., Schell, T. (2023) Recalibration of limits to growth: An update of the World3 model. Journal of Industrial Ecology.

37. Armendáriz Martija, J. (2008): De aldeas a ciudades: el poblamiento durante el primer milenio a. C. en Navarra. Fondo de Publicaciones del Gobierno de Navarra. Institución Príncipe de Viana. Pamplona. 377 pp. 128
38. Asamblea General de las Naciones Unidas (2015) Objetivos de Desarrollo Sostenible. 2015.
39. Astibia H., Payros, A., Elorza, J., Ortiz, S. (2016) Fossil associations from the middle and upper Eocene strata of the Pamplona Basin and surrounding areas (Navarre, western Pyrenees)
40. Azanza López, J. J. (2010). De ensanche militar a "city" de Pamplona: arquitectura y urbanismo para una nueva imagen de la ciudad (27-74). Fundación Príncipe de Viana, Gobierno de Navarra.
41. Babault, J., Teixell, A. (2007) El relieve de los Pirineos. Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, ISSN 1132-9157, Vol. 15, Nº. 2, 2007, págs. 135-150
42. Barcena Hinojal, I., Almazán, Azurza Zubizarreta, O., Villamor Lomas, E., Pérez de Arenaza, I. (2022) Energy democracy in the face of civilizational collapse: energy communities of the North and South
43. Barnolas, A., Pujalte, V. (2004) La Cordillera Pirenaica: Definición, límites y división. Geología de España (pp.233-241) IGME.
44. Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech, pp. 189-239.
45. Basalt Core (2022) Almacenamiento de energía renovable con piedras de basalto. GridScale.
46. Benítez, P., Rodrigues, F., Talukdar, S., Gavilán, S. (2020) Degradation of Concrete Structures from the Climate Change Perspective. XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020).
47. Berthe M. (1948) Famines et épidémies dans les campagnes navarraises à la fin du Moyen Âge. Paris, Sfied, 1984, 2 vol.
48. Bieniawski, Z.T. (1989) Engineering rock mass classifications. New York: Wiley.
49. Bornaetxea, T., Antigüedad, I., Ormaetxea, O. (2018) Mapas de susceptibilidad de deslizamientos a partir del modelo de regresión logística en la cuenca del río Oria (Gipuzkoa). Estrategias de tratamiento de variables. Cuaternario y Geomorfología ISSN: 0214-1744.
50. Brinquis, C. Rekondo, J. Aretxabala, A. (2022) Las inundaciones son fenómenos naturales inevitables. Ecología, El Salto.
51. Burland, J. B., Burbridge M. C. (1985) Settlement of foundations on sand and gravel.

52. Caballero Lobera. A. (2016) Tesis Doctoral Víctor Eusa-Arquitecto: Pamplona 1894-1990 Departamento De Arquitectura E.T.S. Arquitectura de San Sebastián (EHU-UPV).
53. Cabrejas, E. (2018) Resiliencia y gestión del riesgo del espacio fluvial de Pamplona. Ayuntamiento de Pamplona.
54. Caja de Ahorros de Navarra AA.VV. (1994) La catedral de Pamplona. Tomos I y II
55. Calderón y Arana, S. (1903) Efectos del terremoto de Pamplona del 10 de marzo de 1903. Boletín de 1903 de la Real Sociedad Española de Historia Natural, página 168.
56. Capellán, I.; Mediavilla, M., de Castro, C., Carpintero, O., Miguel, L.J. (2015). More Growth? An unfeasible option to overcome critical energy constraints and climate change.
57. Carballo, A. (2010) Utilidad de la huella ecológica y del carbono en el ámbito de la responsabilidad social corporativa (RSC) y el ecoetiquetado de bienes y servicios DELOS: Desarrollo Local Sostenible Nº8
58. Carpintero, O. Frechoso, F. (2022) Energía, sostenibilidad y transición: nuevos desafíos y problemas pendientes. Arbor-CSIC.
59. Carreño, E., Valero, J. F. (2011) Sismicidad de la Península Ibérica en el periodo instrumental 1985-2011.
60. Casas A, Aretxabala, A. (2020) Estudio de estabilidad y evaluación de la seguridad ladera derecha embalse Yesa. Fundación Nueva Cultura del Agua.
61. Casas, A. M. (2000) Informe analítico sobre los problemas que presenta el Proyecto de presa y embalse de Biscarrués (Huesca y Zaragoza). 9 p.
62. Castiella-Rodríguez, A. (1993) De la Protohistoria navarra: La Edad del Hierro. Cuadernos de Arqueología de la Universidad de Navarra. 1993, nº1, pp.121-175.
63. Chacón, J. (2012) Movimientos de ladera clasificación, descripción y evolución espacial y temporal. Universidad de Granada
64. CHE (2013) Preguntas y respuestas más habituales del embalse de Yesa. Confederación Hidrográfica del Ebro.
65. CHE (2019) Informe del comportamiento de la ladera Derecha de Yesa. Confederación Hidrográfica del Ebro, octubre 2019.
66. CHE (2020) Informe del comportamiento de la ladera derecha de Yesa. Confederación Hidrográfica del Ebro, enero 2020.
67. CICCP (2021) Dictamen final sobre la seguridad de las obras del recrecimiento de la presa de Yesa, con atención especial a la ladera derecha. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
68. Comisión Permanente del Consejo de Estado (2011) Proyecto 12/08, Modificado nº 3 de recrecimiento del Embalse de Yesa sobre el río Aragón, Addenda con medidas correctoras

del impacto ambiental y plan de restitución territorial de su entorno, tt. mm. de Yesa y otros (Navarra y Zaragoza)

69. Comité Económico y Social Europeo CESE (2017) Dictamen SC/048 sobre nuevos modelos económicos sostenibles.
70. Conde, J.A. (1840). Historia de la dominación de los árabes en España, sacada de varios manuscritos y memorias arábigas. París, 336 pp.
71. Consejo de la UE (2000). Directiva Marco del Agua DMA.
72. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)-Universidad Nacional San Juan, Argentina (2019). La minería y el desarrollo insostenible. El estudio de caso en San Juan, Argentina.
73. Copitzy Gómez Fuentes A. (2010) Entre embalses y trasvases. Territorio y resistencia social en la montaña de Aragón. Repositorio del Gobierno de México.
74. Costain, J. K., Bollinger, G. (2010) Review: Research Results in Hydroseismicity from 1987 to 2009 Geology, Environmental Science. Bulletin of the Seismological Society of America
75. Court V., Fizaine F. (2017) Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions. 2017.
76. De Castro, C.; Capellán-Pérez, I. Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies. Energies 2020, 13, 3036. 2020.
77. Deere, D.U. (1989). Rock quality designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corps Engrs. Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
78. Diario de Navarra. Seguimiento de varias noticias. 2013-2020.
79. Díaz González, A. (2015) Zonación Sismotectónica y Peligrosidad Sísmica en la Región Cantábrica (Norte de España)
80. Diputación Foral de Navarra. (1977). Proyecto hidrogeológico de Navarra. Informe técnico nº 19. Estudio geotérmico preliminar.
81. Doblas, M., Aretxabala, A. (2013) Los enjambres sísmicos de Jaén en 2012-2013. Una hipótesis de trabajo considerando la hidrosismicidad y algunas actividades humanas. Senado de España-Ministerio de Fomento.
82. Durá-Gómez, I., Talwani, P. (2010) Reservoir-induced seismicity associated with the Itoiz Reservoir, Spain: a case study. Geophysical Journal International, Volume 181 (1) 343–356.
83. Duró Cazorla, A., Mateo Pérez, M.R. (2015) La ermita de San Roque de Pamplona y su necrópolis. Gobierno de Navarra.
84. E. E. Alonso, J. A. Pineda, R. Cardoso (2015) Degradation of marls; two case studies from the Iberian Peninsula (UPC).

85. Ecologistas en Acción (2019) Informe: Escenarios de trabajo en la transición ecosocial 2020-2030. 2019.
86. Ecologistas en Acción (2019) Informe: Minería Especulativa en España. 2019.
87. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y. (2014) Climate change 2014: mitigation of climate change. Biblioteca Digital de la ONU.
88. Egia Astibia Víctor Manuel (2015). Cementos Portland de Olazagutía. Sociedad de Estudios Iturralde Elkartea.
89. Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J. (2020) Global human-made mass exceeds all living biomass". Nature 588, 442–444.
90. Euroestudios S.A. (1992) Proyecto de estabilización de la ladera del Monte Ezcaba y la variante este de Pamplona. Gobierno de Navarra.
91. Euroestudios, Gobierno de Navarra (1992). Proyecto de estabilización de la ladera de Monte Ezcaba variante este Pamplona (Arre).
92. European Comission (2019) The European Green Deal. 2020.
93. Floristán, A.P. (1987) La Historia de Navarra en la Edad Moderna (1512-1750). Príncipe de Viana. Gobierno de Navarra.
94. Font, E., Martínez-Solares, J.M., Masana, E., Santanach, P. La serie sísmica de Tivissa, 1845 (cadenas costeras catalanas): los deslizamientos del barranco del Manou. Revista de la Sociedad Geológica de España, nº 23(1-2).
95. Franklin, J. A., Broch, E., Walton, G. (1971) Logging the mechanical character of rock. Transactions of the Institution Mining and Metallurgy, Sec. A.: Mining industry 80, p. A1-9.
96. Freire-Gonzalez, Jaume (2017): "Evidence of direct and indirect rebound effect in households in EU-27 countries", Energy Policy 102 (2017) 270–276. 2017.
97. Galbis Rodríguez, J. (1940). Catálogo sísmico de la zona comprendida entre los meridianos 5º E. y 20º W. de Greenwich y los paralelos 45º y 25 º N. Tomo 2, Talleres del Instituto Geográfico y Catastral, Madrid.
98. García Mayordomo, J. (2015). Creación de un modelo de zonas sismogénicas para el cálculo del mapa de peligrosidad sísmica de España. Integración de conocimiento y opinión a través de tres modelos sucesivos (IGME).
99. García-Barberena, M., Unzu, M. (2013) Un barrio artesanal periurbano en la ciudad romana de Pompelo. Cuadernos de Arqueología. Universidad de Navarra, 21, 2013, págs. 219 – 255
100. García-Mayordomo, J., Insua-Arévalo, J.M. (2011) Seismic hazard assessment for the Itoiz dam site (Western Pyrenees, Spain).
101. García-Mayordomo, J.; Insua-Arévalo, J.M.; Martínez-Díaz, J.J.; Jiménez-Díaz, A.; Martín-Banda, R., Martín-Alfageme, S., Álvarez-Gómez, J.A., Rodríguez-Peces, M.; Pérez-López,

R.; Rodríguez-Pascua, M.A.; Masana, E.; Perea, H.; Martín-González, F.; Giner-Robles, J.; Nemser, E.S.; Cabral, J. & QAFI compilers. (2012). The Quaternary Active Faults Database of Iberia (QAFI v.2.0). Journal of Iberian Geology 38 pp. 285-302.

102. Gargiani R., Rosellini, A. (2011) Le Corbusier: Béton Brut and Ineffable Space, 1940-1965. Surface Materials and Psychophysiology of Vision. EPFL Press.
103. Geoconsult (2019). Estudio de estabilidad y evaluación de la seguridad de la ladera derecha del embalse de Yesa. Geoconsult Ingenieros Consultores S.A.U.
104. Gil-Peña, I., Barnolas Cortina A. (2001) Ejemplos de relleno sedimentario multiepisódico en una cuenca de antepaís fragmentada. La Cuenca Surpirenaica. Boletín Geológico y Minero 112.
105. Gisbert Aguilar, J., Mateos Royo, I., Somovilla de Miguel, I.A. (2011) Morteros de restauración (primera parte).
106. Gisbert Aguilar, Josep. Galarreta Corcuera, Saúl (2016). Experimental Modelling of the Pathology that affects the Burgos Cathedral Trasaltar: expansion/breakness by changes in humidity of air in presence of magnesium salts.
107. Gobierno de España (1981) Atlas de Navarra: geográfico, económico, histórico. 79 páginas. ISBN: 84-85205-24-3.
108. Gobierno de España (2002) Norma de Construcción Sismorresistente Española NCSE-02.
109. Gobierno de España (2006) Código Técnico de la Edificación (CTE) Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.
110. Gobierno de España (2012) Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España. (ISBN 948-84-416-2685-0).
111. Gobierno de España (2012) Estudio de la cimentación y caracterización geotécnica del edificio del Banco de España, Paseo Sarasate nº 1, Pamplona.
112. Gobierno de España (2021) PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA 2021-2030 (PNIEC).
113. Gobierno de Navarra (1993) Cartografía Geológica de Navarra E. 1:25.000 HOJA 141-II
114. Gobierno de Navarra (1993) Cartografía Geológica de Navarra E. 1:25.000 HOJA 174-II
115. Gobierno de Navarra (2002) Mapa Geotécnico Para Ordenación Territorial y Urbana de Pamplona.
116. Gobierno de Navarra (2003) Zonificación Navarra 2000
117. Gobierno de Navarra (2007) El recorrido de los minerales en la Comunidad Foral de Navarra. 2007.
118. Gobierno de Navarra (2011) Plan especial de Protección Civil ante el riesgo sísmico en la Comunidad Foral de Navarra (SISNA).

119. Gobierno de Navarra (2014) Memoria de 2013 de la Sección de Geología y Geotecnia de la Dirección General de Obras Públicas del Departamento de Fomento del Gobierno de Navarra
120. Gobierno de Navarra (2016) Plan Integrado de Gestión de Residuos de Navarra 2025 (PIGRN2025.
121. Gobierno de Navarra (2018) Estudio en profundidad sobre las posibilidades de aprovechamiento geotérmico en Navarra e identificación de las zonas con mayor potencial.
122. Gobierno de Navarra (2019) Inventario de Emisiones de GEI de Navarra
123. Gobierno de Navarra (2020) Green Deal Europe 2020.
124. Gobierno de Navarra (2021) Balance Energético de Navarra.
125. Gobierno de Navarra Vocabulario navarro de José María Iribarren (1984).
126. Gobierno de Navarra. Declaración institucional del Gobierno de Navarra ante la emergencia climática. (2019).
127. Gobierno de Navarra. Mapa Geológico 1:25.000 IDENA
128. Gobierno Vasco (2012) DECRETO 241/2012, de 21 de noviembre, por el que se regula la inspección técnica de edificios en la Comunidad Autónoma del País Vasco.
129. Gómez Ramos, S. (2023) Energías Renovables y Eficiencia Energética. ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE ENERGÍAS RENOVABLES (APPA Renovables).
130. González-Presencio, M. (2009) La nueva sede del Parlamento de Navarra: la transformación de la antigua Audiencia de Pamplona.
131. Guevara-Pérez, T. (2009) Arquitectura moderna en zonas sísmicas. GG. Ed.
132. Guevara-Pérez, T. (2012) Configuraciones urbanas en zonas sísmicas. Sidetur. Ed.
133. Guidoboni, E. Valensise, E. (2012) Il peso economico e sociale dei disastri sismici in Italia negli ultimi 150 anni. Bononia University Press. 552 pp.
134. Gutiérrez, F. (2013) Análisis geomorfológico de la ladera derecha de la Presa de Yesa (Río Aragón, Pirineos). Universidad de Zaragoza.
135. Huang X., Zhang G. (2016) Protecting the environment and public health from rare earth mining. Earth's Future. AGU.
136. IGME (1988) Mapa Geotécnico para Ordenación Territorial y Urbana de Pamplona, escala 1:20.000 y 1:5.000.
137. IGME (2007) Minería navarra. D.G. Industria y Comercio: Servicio de Seguridad Industrial.
138. IGME (2009) Mapa Geológico de Pirineos 1:400.000.
139. IGME (2018) Informe MAGNESITA. Panorama Minero.
140. Ingeniería del Suelo (2013) Recrecimiento de la presa de Yesa, sobre la seguridad del embalse. Ingeniería del Suelo, S.A.

141. Ingeotyc (2020) Análisis del estudio de estabilidad y evaluación de la seguridad de la ladera derecha del embalse de Yesa y discusión de sus conclusiones. Documento resumen Ingeotyc, junio 2020.
142. James D. Ward et al. (2016) Is Decoupling GDP Growth from Environmental Impact Possible?
143. Jappé, A. (2021) Hormigón: arma de construcción masiva. 192 pags. ISBN: 9788417386702 Virus. Ed.
144. Jason Hickel & Giorgos Kallis (2020) Is Green Growth Possible?, New Political Economy, 25:4, 469-486, DOI: 10.1080/13563467.2019.1598964.
145. Jiménez Nespereira, F., Biurrun Aramayo, L. y Marcén Zunzarren J. A. (1989) Estudio sobre la estructura administrativa y funcional de Navarra: Análisis y propuesta
146. Joaquín del Valle de Lersundi Mendizábal (1996) La Hoja de Pamplona evolución de su conocimiento geológico. Fundación Príncipe de Viana.
147. Jokin del Valle Lersundi (2019). La aparición del espacio físico: Pamplona desde el punto de vista de la geología, la paleontología y la geografía. Historia de Pamplona, recorrido histórico por el pasado de la ciudad. Ayuntamiento de Pamplona.
148. Kennedy C., Tammineni G., Ahmed M. Ebid, A.M. Mahdi, M., Razzaghian , A.A. (2022) Evaluating the Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete Using Novel Artificial Neural Network. Civil Engineering Journal. Vol. 8. Nº8.
149. Kümmel, R. (2011) The Second Law of Economics. Energy, Entropy and the Origins of Wealth. 2011.
150. L.C. Alatorre, S. Beguería (2009) Identification of eroded areas using remote sensing in a badlands landscape on marls in the central Spanish Pyrenees. CATENA 76.
151. Labeaga, J.C. (1999) El Ayuntamiento de Sangüesa (Navarra) y algunos cultos religiosos. Zainak. Cuadernos de antropología
152. Labeaga, J.C. (2002) San Sebastián, patrón de Sangüesa. Culto, arte y tradición. Cuadernos de etnología y etnografía de Navarra Nº77 (307-347).
153. Lacan, P.,Ortuño, M. (2012) Active Tectonics of the Pyrenees: A review. Journal of Iberian Geology 38 (1) 2012: 9-30
154. Lacarra, J. M. (1950) El desarrollo urbano en las ciudades de Navarra y Aragón en la Edad Media", Pirineos. Revista del Instituto de Estudios Pirenaicos, núm. 15-16, Zaragoza, 1950, pp. 5-10
155. Larrard T., Bastidas-Arteaga, E., Duprat, F., Schoefs, F. (2014) Effects of Climate Variations and Global Warming on the Durability of RC Structures Subjected to Carbonation. Civil Engineering and Environmental Systems, 31 (2), pp.153-164.

156.Larrasoaña, J.C., Pueyo, E.L. y Parés, J.M. (2004). An integrated AMS, structural, paleo- and rock-magnetic study of the Eocene marine marls from the Jaca-Pamplona basin (Pyrenees, N Spain). Geological Society, London, Special Publication, 238, 127-143.

157.Levi-Provençal, E. y García Gómez, E. (1954) Textos inéditos del Muqtabis de Ibn Hayyan sobre los orígenes del reino de Pamplona, Al-Ándalus. Vol. 19, núm. 2 (1954) 297.

158.Linazasoro, J. I. (1978) Permanencias y arquitectura urbana. Las ciudades vascas de la época romana a la Ilustración. Barcelona, Gili.

159.Lizhengli P.,Stewart, M. (2016) Climate change and corrosion damage risks for reinforced concrete infrastructure in China. Structure and Infrastructure Engineering.

160.López-Fernández, C. (2008). Actividad sísmica, zonación sismotectónica y riesgo sísmico en el NO de la Península Ibérica. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 267 pp.

161.López-Fernández, C.; Pulgar, J.A.; Gallart, J.; González, J.M.; Díaz, J.; M. Ruiz. (2004). Actividad sísmica en el noroeste de la Península Ibérica observada por la red sísmica local del Proyecto GASPI (1999-2002). Trabajos de Geología, 24: 91-106.

162.M. Martínez-Peña, M., Casas-Sainz, A. (2003) Cretaceous–Tertiary tectonic inversion of the Cotiella Basin (southern Pyrenees, Spain). International Journal of Earth Sciences.

163.MacRobert, Ch. Sean, B., Nchabeleng, M., (2019) Dynamic Cone Penetrometer (DCP) Relative Density Correlations for Sands.

164.Martí Bono, C., Plana, F. (1996) Concreciones carbonatadas en margas del Eoceno. Consecuencias geomorfológicas.

165.Martinena Ruiz, J. J. (1996) Reseña de la evolución urbana de Pamplona. Desde el siglo XI hasta el derribo de las murallas en 1915. Institución Príncipe de Viana. Gobierno de Navarra.

166.Martínez de Aguirre, J. (2015) El Maestro Esteban en Pamplona: ¿arquitecto y urbanista? Ad Limina / Volumen 6 / N.º 6 / 2015 / Santiago de Compostela / ISSN 2171-620X

167.Martínez Solares, J.M. (2001). Los efectos en España del terremoto de Lisboa. Monografía 19, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 756 pp.

168.Mateo Pérez, R., Duró Cazorla, A. (2015) La ermita de San Roque de Pamplona y su necrópolis

169.McGuire, B., Maslin, M. (2013) Climate Forcing of Geological Hazards. ISBN: 978-0-470-65865-9 Wiley-Blackwell 326 PP.

170.Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J. (1992) Beyond The Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future. Chelsea Green, Post Mills, VT

171.Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W., (1972) The Limits to Growth. Universe, New York.

172.Meadows, D.L., Randers, J. (2004) The Limits to Growth: The 30-year Update.

173.Meyerhof, G. G. (1956) Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Volume 82, Issue 1.

174.Mezquíriz Irujo, M. A y Tabar Sarrías, I. (1995) Palacio Real de Pamplona. 1995

175.Mezquíriz Irujo, M.A., Unzu Urmeneta, M. (2021). Arqueología en la catedral de Pamplona. El origen del culto cristiano. Arzobispado de Pamplona y Tudela

176.Mezquiriz, M. A., Tabar, M. I. (1997) Intervención arqueológica en el Palacio Real de Navarra. Dpto de Cultura, Gobierno de Navarra.

177.Michaux, S.P. (2023) Challenges and Bottlenecks for the Green Transition. Geological Survey of Finland

178.Millan, H.; Pocovi, A. y Casas, A. (1995) El frente de cabalgamiento surpirenaico en el extremo occidental de las Sierras Exteriores. Revista de la Sociedad Geológica de España, 8, (1-2), 73-90.

179.Minerva (2020). Estadísticas de producción minera. Gobierno de España. 2020.

180.Ministerio de Ciencia y Tecnología, IGME, Gessal (2010) Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento de CO_2

181.Ministerio de Fomento. Gobierno de España (2012). Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012.

182.Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Gobierno de España (2002). Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales PG-3

183.Monteano Sorbet P.J. (1999) Los navarros ante el hambre, la peste, la guerra y la fiscalidad Siglos XV y XVII. UPNA.

184.Monteano Sorbet P.J. (2002) La ira de Dios.

185.Monterrubio Velasco, M. (2011) Sismicidad del sur de California (1981-2007): aspectos estadísticos y análisis de tendencias temporales. Departamento de Física e Ingeniería Nuclear (UPC)

186.Morales T., Ibarra, V. (2023) Valoración del Dictamen Final sobre la Seguridad de las Obras del recrecimiento de la presa de Yesa, con especial atención a la ladera derecha. Ayuntamiento de Sangüesa.

187.Nafarroako Hitza (2018) Hazi eta hazi, lehertu arte. 2018.

188.New York Times. 19-08-2012.

189.Nistal Cordero, A.F. Retana Maqueda, M.J. y Ruiz Abrio, T. (2012) El hormigón: historia, antecedentes en obras y factores indicativos de su resistencia. Tecnología y Desarrollo.

190.Oliva, B.; Millan, H. Pocovi, A. y Casas, A. (1996).- Estructura de la Cuenca de Jaca en el sector occidental de las Sierras Exteriores Aragonesas. Geogaceta, 20, (4), 800-802.

191.Ollero, A. (2020) El falso mito de la limpieza de cauces: por qué NO hay que "limpiar" los ríos. Academia.

192.ONU (2015) Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

193.Onyelowe K.C., Naghizadeh A., Aneke F.I., Kontoni D.P.N., Onyia M.E., Welman-Purchase, Ebid A.M. , E. I. Adah E.I., Liberty, U. (2023) Characterization of net-zero pozzolanic potential of thermally-derived Metakaolin samples for sustainable carbon neutrality construction. Scientific Reports.

194.Parrique T., Barth J., Briens F., C. Kerschner, Kraus-Polk A., Kuokkanen A., Spangenberg J.H. (2019) Informe: Decoupling debunked – Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability.

195.Pereira de Barros da Silva, Maria Amélia, Fernández, Héctor Manuel, Baptista, João Júnior, Pereira Teixeira-Pires, Gabriela Jeremias (2018) Cálculo de las propiedades geotécnicas a partir de las velocidades transversales obtenidas en la sísmica de refracción. Estudio de caso en la ciudad de Luanda (Angola)

196.Picarelli, L. (2019) Consideraciones sobre el deslizamiento de Yesa.

197.Préfecture des Pyrénées-Atlantiques de la République Française (2003) Dossier Départemental des Risques Majeurs Cellule d'Analyse du Risque et de l'Information Préventive.

198.Prospección e Ingeniería (1992) Estudio Sísmico de Navarra. Gobierno de Navarra.

199.Prospección y Geotecnia (2013) Evaluación de las condiciones de estabilidad de la ladera derecha en la cerrada del embalse de Yesa. Prospección y Geotecnia.

200.Puigdefábregas, C. (1996) La sedimentación molásica en la cuenca de Jaca. Estudios Pirenaicos. CSIC.

201.Pujalte, V., Baceta J.I., Payros, A. (1996) Late Cretaceous –Middle Eocene Sequence Stratigraphy and Biostratigraphy of the SW and W Pyrenees (Pamplona and Basque Basins): a Field Seminar of the Groupe de Etude du Paleogene and IGCP Project 286. EHU/UPV

202.Quiralte-López, F. (2017) Recrecimiento del embalse de Yesa. Contribución al conocimiento geológico-geotécnico de la cerrada y la estabilidad del estribo derecho.

203.Ramos Aguirre, M. (1998) Excavaciones en el castillo de Tiebas (Navarra), primer informe provisional.

204.Ramos Martínez, J. (2004) Fondos del Archivo Diocesano de Pamplona para el estudio de la Historia de la Medicina.

205.Rey Pastor, A. (1927). Traits sismiques de la Peninsule Ibérique. Instituto Geográfico y Catastral, Madrid, 87 pp.

206.Rey-Pastor, A. (1931) El período sísmico de la Canal de Berdún (Pirineos) 1923-25 Instituto Geográfico y Catastral – Servicio sismológico. Estación Sismológica de Toledo.

207. Río Aragón Yesa+No (2023) El problema de las inestabilidades de Yesa en las dos últimas décadas.
208. Rivas-Medina, A. Gaspar-Escribano, J. Benito, B. García, M.J. (2010) Evaluación Del Riesgo Sísmico con técnicas de Información Geográfica. Aplicación en Navarra.
209. Rodríguez de La Torre, F. (1992) La geografía y la historia de los sismos. Cuadernos Críticos de Geografía Humana. Universidad de Barcelona. ISSN: 0210-0754.
210. Roeloffs, E. (1988) Hydrologic precursors to earthquakes: A review. Geology, Environmental Science, pure and applied geophysics.
211. Ruiz, M., Gaspà O., J. Gallart, J. Díaz, J.A. Pulgar, J. García-Sansegundo, C. López-Fernández, J.M. González-Cortina (2006) Aftershocks series monitoring of the September 18, 2004 M = 4.6 earthquake at the western Pyrenees: A case of reservoir-triggered seismicity?
212. Sánchez-Navarro Neumann, M.M. (1921). Lista de los terremotos más notables sentidos en la Península Ibérica desde los tiempos más remotos, hasta 1917, inclusive, con ensayo de agrupación en regiones y períodos sísmicos. Estación sismológica y Observatorio Astronómico y Meteorológico de Cartuja (Granada). Imprenta Granadina Ros, Granada, 11-65.
213. Sangüesa Ayto. (2020) Propuesta de acuerdo sobre Yesa. Ayuntamiento de Sangüesa, 30 de julio de 2020.
214. Santoyo, M.A., García-Jerez, A., Luzón, F. (2010) A subsurface stress analysis and its possible relation with seismicity near the Itoiz Reservoir, Navarra, Northern Spain. Tectonophysics, 482 (1-4), pp. 205-215.
215. Seco, A., F. Ramírez, L. Miqueleiz, B. García, E. Prieto (2011) The use of non-conventional additives in Marls stabilization. Applied Clay Science 51.
216. Secretaría General de Infraestructuras. Ministerio de Transportes y Movilidad Urbana (2012) Estudio informativo de la red ferroviaria en la Comarca de Pamplona. Fase B. E. 1:2.000.
217. SETRA-LCPC (1976) Laboratoire Central des Ponts et Chausees (LCPC)
218. Siders, A. R., Miyuki, H., Mach, K. J. (2019) The case for strategic and managed climate retreat. Why, where, when, and how should communities relocate?
219. Sourek, M. (2021) Architecture tech: A challenge for investors. ACADEMIA Letters 892
220. Sustrai Erakuntza (2019). Informe: Las afecciones al medio ambiente de MAGNA aumentarían también con su nuevo proyecto en Zubiri.
221. Tabuenca González, F. (2017). Tesis doctoral. La arquitectura de Víctor Eusa. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid.

222.Tribunal de Cuentas (2017) Informe de fiscalización de la contratación celebrada en 2014 por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y sus organismos dependientes, y su ejecución hasta 2017. nº1.279.

223.TYPSA (2013) Estudio de estabilidad de la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa Confederación Hidrográfica del Ebro y Typsa.

224.UNCTAD (2020) The COVID-19 Crisis: Accentuating the Need to Bridge Digital Divides.

225.UNCTAD/GDS/DSI/CPB/2020/5 12 May (2020) Commodity Price Bulletin - March 2020.

226.Unión Europea. Proyecto LIFE (2020) Lugo + Biodinámico. Concello de Lugo. Universidad de Santiago. Universidad Politécnica de Madrid.

227.Universidad de Navarra (2015). Informe sobre la evolución histórica de las laderas de la presa de Yesa, retos futuros y estabilidad global. Laboratorio de Arquitectura, Universidad de Navarra.

228.UPC (2013) Modelo geológico e identificación del mecanismo de inestabilidad que afecta a la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa. Departamento de Ingeniería del Terreno, Universitat Politècnica de Catalunya.

229.Uranga Santesteban, J. J., (1984) Puente la Reina, del puente al fuero (1085-1122). Scripta Theologica, XVI, pp. 473-484.

230.Usa Gov. (2005) Federal Guidelines for Dam Safety. Earthquake Analyses and Design of Dams. U.S. Federal Emergency Management Agency (FEMA).

231.Valero, A., Valero, A., Calvo, G. (2021) Thanatia. Límites materiales de la transición energética. Prensas de la Universidad de Zaragoza, PUZ. 330 páginas.

232.Ventas, L. (2020) Coronavirus. Ya va siendo hora de que la humanidad sea adulta y empiece a decidir qué cosas no puede hacer.