A dark blue vertical bar runs down the left side of the slide. A blue arrow points to the right from this bar, containing the date.

22-11-2017

Geomorfología kárstica en la cabecera del valle del Río Ésera, Benasque

Several thin, curved lines in shades of blue and grey sweep upwards from the bottom left corner of the slide.

Javier Rivases

GRADO EN GEOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Índice

- Resumen
- Abstract
- Introducción
 - Objetivos
 - Plan de trabajo y metodología
 - Situación geográfica
 - El Forau d'Aiguallut y su historia. Estado del arte.
- Marco geológico
 - Estratigrafía
 - Batolitos
 - Serie Paleozoica
 - Cuaternarios
 - Tectónica
 - Hidrografía e hidrología
 - Hidroquímica del sistema kárstico Aiguallut-Güells del Joeu
 - Respuesta del sistema a eventos de precipitación extrema
- Resultados
 - Mapa geomorfológico
 - El modelado kárstico
 - El forau d'Aiguallut y plan d'Aiguallut
 - La edad de formación del Forau d'Aiguallut
 - El sistema kárstico de la escaleta
 - El sistema de Peña blanca
 - Plan d'Están
 - Paderna, la Renclusa y el sistema del Alba.
 - El modelado glaciar, fluvio-glaciar y gravitacional.
 - Dolinas y pendiente
 - Pendiente media de cada dolina cartografiada
 - Relación entre pendiente y aparición de dolinas.
 - Resultados y discusión
- Conclusiones
- Bibliografía
- Anexos
 - Mapa geomorfológico
 - Mapa geomorfológico de Plan d'Aiguallut
 - Mapa geomorfológico de Peña Blanca
 - Mapa geomorfológico de la Escaleta
 - Otras dolinas y formas de disolución cartografiadas.
 - Dolinas y pendiente
 - Pendiente media de cada dolina cartografiada y relación entre desarrollo de dolinas y pendiente.
 - Aigualluts
 - Escaleta
 - Peña Blanca

Resumen

El presente documento aborda desde un punto de vista descriptivo, la geomorfología de la cabecera del río Ésera en Benasque, Huesca. Si bien los rasgos principales del paisaje han sido generados por la acción glaciaria, es el modelado kárstico el que incluye una de las formas más singulares del valle del Ésera, el Forau d'Aigualluts. Se aborda la zona desde tres perspectivas, la descripción detallada del forau d'Aigualluts, pero también la cartografía de más de doscientas formas de origen kárstico en el entorno de trabajo. Además de la descripción de las formas kársticas, se ha tratado de estimar una edad de formación para el forau d'Aigualluts y se ha analizado las posibles relaciones existentes entre la distribución de dolinas y la pendiente del terreno.

Abstract

This work describes the geomorphology of the headwaters of the Ésera valley, in the Spanish Pyrenees, Huesca. Although the main features of the landscape are related to past glacial activity, the Aigualluts sinkhole and ponor constitutes one of the most singular landforms of the valley. This work documents cartographically both the Aigualluts sinkhole and ponor, as well as more than 200 sinkholes. An attempt is made to estimate the age of the Aigualluts sinkhole and the potential relationships between the spatial distribution of sinkholes and the slope of the ground Surface.

Introducción

La base en la que se apoya este proyecto es doble, mi predilección por la cartografía y mi afición por las montañas. Francisco me propuso un trabajo en la cabecera del alto Ésera, puesto que una de sus especializaciones es el karst, habiéndolo trabajado desde diferentes prismas, desde problemas de dolinas en zonas urbanas, o pérdidas por karstificación en presas y embalses. Francisco es otro aficionado a la montaña, y en actividades anteriores conocía la existencia del Forau d'Aiguallut en el pirineo oscense. Además, había observado la presencia de depresiones que podrían tener origen kárstico y que pudieran constituir material suficiente para la realización de un TFG por parte de un alumno.

Objetivos

Tras una primera revisión bibliográfica, y una jornada de campo para evaluar las posibilidades de la zona de estudio, atendiendo a las limitaciones personales y temporales, se definieron los siguientes objetivos.

- Realizar una revisión bibliográfica de la zona, haciendo especial hincapié en los aspectos geomorfológicos e hidrogeológicos
- Realizar una cartografía geomorfológica
 - Especificando que es una cartografía temática y que se ha puesto especial hincapié en las formas de origen kárstico.

- Realizar un análisis estadístico de la distribución de dolinas con respecto a la pendiente del terreno.
- Revisar el conocimiento hidrológico de la zona, cuantificar el área de drenaje de los diferentes sub-sistemas kársticos.
 - Publicación de modelos tridimensionales para facilitar el visionado de los resultados.

Plan de Trabajo y Metodología

El plan de trabajo ha contado de diversas fases. Fundamentalmente una revisión bibliográfica, un trabajo de gabinete para la cartografía, posteriormente una digitalización y diseño de la cartografía, un análisis estadístico de las geoformas y una redacción de la memoria.

- Revisión bibliográfica
 - Uso de la biblioteca del departamento de Ciencias de la Tierra. Mapa Geomorfológico de Benasque
 - Uso de diferentes plataformas de búsqueda de documentos: Researchgate(...)
 - Biblioteca del IGME
 - Cartografía MAGNA 50
 - Búsquedas en Internet.
- Trabajo de gabinete
 - En primer lugar, la puesta en contacto con el Instituto Geográfico de Aragón, para obtener las fotos aéreas sin ortorectificación de cara a su uso en el estereoscopio.
 - Recorte y reescalado mediante Adobe Photoshop
 - Mediante el uso del fototracer y el estereoscopio óptico elaboración de la cartografía geomorfológica preliminar, con el apoyo de un SIG.
 - Realización de cartografía geomorfológica de detalle, y de mapas temáticos (geomorfología kárstica).
- Trabajo de campo
 - Realizar cartografía de detalle de la zona.
 - Resolver dudas surgidas durante el trabajo de gabinete.
- Análisis y estudio estadístico de las geoformas kársticas inventariadas en el estudio
 - Por tamaño
 - Por altura
 - Por pendiente
 - El cómputo global y también subdivididas por zonas.
- Redacción y elaboración de la memoria.

El trabajo de cartografía se ha enfocado en dos vertientes complementarias. Por un lado cartografiar las pequeñas depresiones dentro de la cabecera del Ésera que tengan un origen kárstico y por otro, georreferenciar en el mapa todas aquellas cavidades que los grupos de espeleología ya habían encontrado. Para la primera de las vertientes, se han delimitado 5 zonas de estudio, de las cuales se ha obtenido una tripleta de fotos aéreas para su interpretación cartográfica. Para la segunda de ellas, se ha obtenido la información proveniente de los grupos de espeleología y se han georreferenciado las cavidades. El resultado de los dos procesos es el

mapa geomorfológico temático que anexa este documento. Las zonas en las que se ha trabajado son:

- Sistema kárstico en el valle de la Escaleta
- Forau d'Aiguallut y Plan d'Aiguallut
- Sistema kárstico de Peña Blanca
- Plan D'Están,
- Refugio de la Renclusa y Sistema del Alba.

El estudio estadístico consistirá en evaluar una serie de parámetros espaciales, algunos de los cuales se refieren a un área total de estudio. Para la determinación de esa área total de estudio, se han delimitado unos polígonos relacionados con el afloramiento de calizas devónicas. Los parámetros estadísticos que se van a evaluar son los siguientes:

- Altitud media de cada dolina
- Nº de dolinas en la zona de estudio
- Densidad de dolinización (nº de dolinas / área total)
- Área media de las dolinas (m²)
- Dolina más grande cartografiada (m²)
- Porcentaje de superficie dolinizada (suma del área de todas las dolinas x 100/área total)
- Distancia media entre vecinos (Media de la distancia de cada dolina a la más cercana)

Situación geográfica

La zona de estudio se encuentra en la cabecera del valle de Benasque, drenado por el río Ésera, dentro de la provincia de Huesca, y de la comunidad autónoma de Aragón. Como veremos más adelante, uno de las dificultades era definir la zona de estudio, dada la abundancia y dispersión de las formas kársticas en el Alto Ésera. Finalmente se ha delimitado una zona entre el Hospital de Benasque y el Ibón del Coll de Toro, pero centrada fundamentalmente en el Plan d'Aiguallut y sus alrededores.

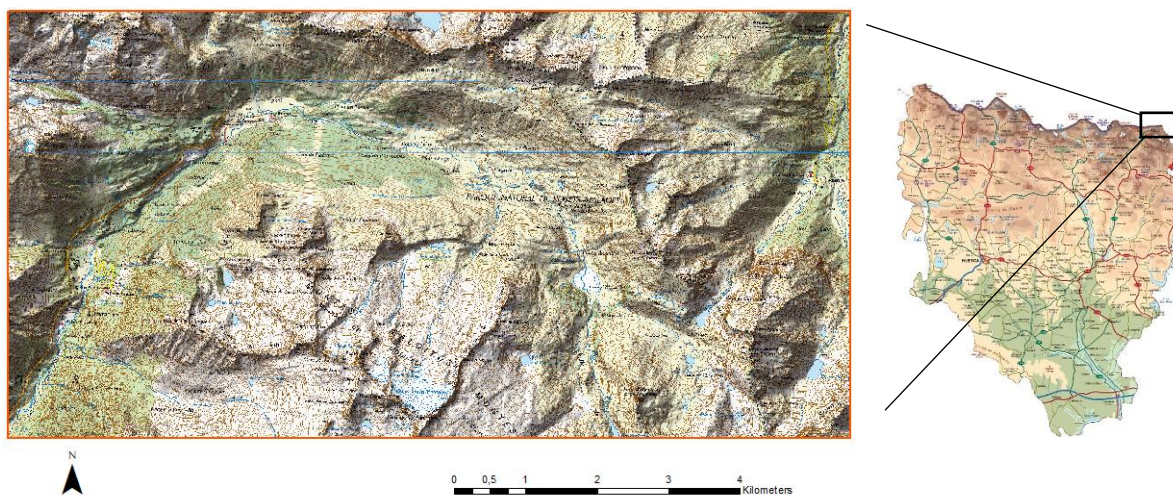


Fig. 1: Zona de estudio. Fuente Instituto Geográfico Nacional. Mosaico de mapas a escala 1:25.000. Elaborado con ArcGIS 10.5

Esta zona es frecuentemente transitada por aficionados a la montaña en todas sus modalidades, desde pirineístas que tienen este valle como punto de partida para la ascensión de los picos de más de 3000 metros que hay en esta zona, hasta senderistas o familias que

pretenden pasear por uno de los valles más escondidos del pirineo aragonés. Es necesario recordar en este punto que el Forau d'Aiguallut es uno de los lugares más visitados del Pirineo, por su espectacularidad y su accesibilidad (Aproximadamente 45' andando). El forau d'Aigualluts esta catalogado como un lugar de interés geológico (LIG) de Aragón.

Además, la existencia de aguas termales en la zona (Baños de Benasque) son otro punto de atracción turística, que en invierno conserva el turismo de alta montaña pero que además suma la población aficionada al esquí de fondo, puesto que el valle del Ésera se ha delimitado como estación de esquí de fondo, con rutas marcadas y mantenidas durante buena parte del invierno.

Geográficamente la zona de estudio se localiza en la parte más nororiental de Aragón y el valle presenta grandes desniveles entre los 3404 m del Aneto hasta los 1750 m en los que se emplaza el Hospital de Benasque, límite oeste de nuestra zona de estudio. No hay núcleos de población en la zona de estudio, siendo las únicas infraestructuras el Hospital de Benasque, el refugio de la Renclusa y la cabaña de la Besurta.

La vegetación es típica de alta montaña, mientras que el clima queda lejos de las humedades oceánicas o mediterráneas, presentando rasgos típicamente de montaña. Se trata de un clima frío de montaña, con oscilaciones térmicas acusadas, tanto diurnas como estacionales. Las lluvias se distribuyen bajo un régimen mediterráneo-continental: máximo de primavera seguido del verano, por causa de las numerosas tormentas y del otoño; mínimo invernal clarísimo. Otro factor climático es su prolongada e intensa innivación.

La precipitación anual media oscila entre 1800 y 1900mm, la temperatura media anual en el 4,5°C y presenta precipitaciones en forma de nieve entre 70 y 100 días al año. Además, hay más de 120 días de helada al año.

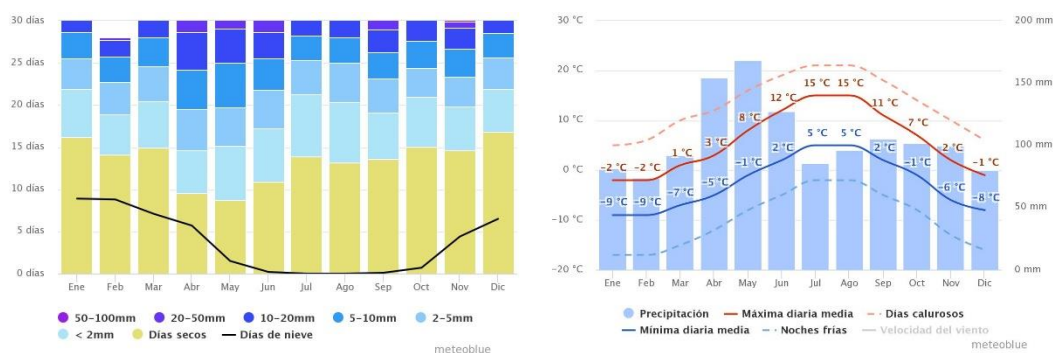


Fig. 2: Algunos datos climáticos del Puerto de Benasque. Fuente www.meteoblue.com

Historia del Forau d'Aiguallut o Trou del Toro.

A día de hoy los documentos más modernos y más fiables sobre la geomorfología del valle de Benasque son la serie cartográfica MAGNA 50 del IGME y su informe adjunto elaborado por Cambray y Plá y Esgleas i Giménez (1991) y el mapa geomorfológico en escala 1:50.000 editado por Geoforma (García-Ruiz et al, 1992). Por otro lado, se han encontrado numerosas

actas de espeleología de grupos que están trabajando la zona que han sido de relevancia a la hora de realizar este trabajo.

El Forau d'Aiguallut es extraordinario por dos cuestiones fundamentales. En primer lugar, es el sumidero donde por primera vez se demostró mediante trazadores la relación entre un sumidero y una surgencia (Güells del Joeu). Además, es un claro ejemplo de que puede no existir coincidencia entre los límites de las cuencas topográficas y los del sistema kárstico; el agua drena subterráneamente atravesando la divisoria topográfica de las cuencas de los ríos Ebro (vertiente mediterránea) y el Garona (vertiente Atlántica).

Historia científica del Forau D'Aiguallut

De nuevo existe numeroso material para hablar sobre todas las publicaciones y documentos que tratan sobre el Forau d'Aiguallut, pero nos centraremos sólo en las más notables desde el punto de vista geológico. De acuerdo con la publicación realizada por el Instituto de Estudios Espeleológicos de Sabadell en 1979:

- En 1792 Ramon de Carbonnieres, celebre geólogo Alsaciano señala que las aguas desaparecidas en el Trou del Toro reaparecían 4 kilómetros más allá, en el valle de la Artiga de Lin, en los Güell de Joeu.
- Adolphe Joanne reseña en 1850 un intento de seguimiento anónimo del sistema mediante el uso de serrín.
- Entre 1896 y 1900, Emille Belloc tiñe por primera vez el agua del Forau, utilizando fucsina, pero calculando mal la cantidad necesaria de colorante. Arrojando así un resultado negativo y negando la hipótesis de conexión entre el Forau y Güell del Joeu.
- Lucas Mallada, célebre geólogo aragonés, describe el Forau y lo relaciona directamente con las surgencias del Plan D'Están situadas aguas abajo del Forau.
- En 1931 Norbet Casteret, espeleólogo francés, publica "Le probleme du trou du toro, determination des sources du rio Ésera". Conociendo las intenciones españolas de desviar el curso del río Aiguallut para su aprovechamiento energético, rebate las conclusiones de Belloc. Ante la inminencia de las obras hidroeléctricas, Casteret consigue 60 kilos de fluoresceína, y el 19 de Julio de 1931, al atardecer (la fluoresceína se degrada con la luz), lanza los 60 kilos en un tiempo de 45 minutos desde lo alto de la cascada para que sea "idealmente batido". El día 20 en el valle de Arán la coloración llega no solo hasta la surgencia de Güells de Joeu (4 km) sino hasta la misma frontera francesa, situada aguas abajo a una distancia de 13 km, quedando así demostrada la conexión entre las cabeceras del Garona y el Ésera

Marco Geológico

La geología de la zona es compleja, y no es objeto de este trabajo entrar en detalle en su estructura y estratigrafía, por lo que se da por válido lo publicado en la serie MAGNA 50 del IGME. Se pasa a realizar una síntesis de lo expuesto en dicho documento que afecta a la zona estudiada. Así pues, y de acuerdo con su publicación (*J. García Sansegundo et al, 1993*) podemos subdividir la zona en tres conjuntos litológicos. En primer lugar, los batolitos graníticos que dan lugar a los macizos montañosos de la zona, en segundo lugar a toda la serie paleozoica presente en diversos puntos de la zona de estudio y por último, a los depósitos superficiales cuaternarios

de diverso origen, (glaciar, fluvial o gravitacional) que rellenan y tapizan localmente el fondo y las laderas de la artesa glaciar.

ESTRATIGRAFÍA

Batolitos graníticos. El macizo granítico de la Maladeta

Respecto a los materiales que afloran en la zona de estudio, se observan únicamente dos unidades de rocas graníticas, por un lado, la unidad denominada (12) en el mapa geológico, que correspondería a granitos s.s y que los autores llaman “granito de cumbres”, y por otro los granitoides (14 en el mapa) en contacto con la unidad anterior.

La granodiorita envuelve la parte central del batolito, tiene grano medio, con biotita y anfíbol, y se caracteriza por una disminución en el porcentaje de minerales ferromagnesianos (anfíbol y biotita), una importancia creciente de la fase granítica y la aparición de enclaves microgranudos.

La parte central del batolito, que corresponde con las cotas más altas, se caracteriza por ser un granito de grano medio, porfiroide con biotita, moscovita, cordierita y megacristales de feldespato alcalino maclado frecuentemente según Carlsbad. Está afectado por una red de juntas tapizadas por cristales de turmalina negra. Además, esta unidad presenta pocos enclaves comparada con la anterior, pero de una naturaleza más variada.

La transición entre la granodiorita y el granito es progresiva, observable desde unos pocos metros a unas pocas decenas de metros.

La serie paleozoica.

En la hoja de Canéhan-Vieille aparece ampliamente representada buena parte de la serie paleozoica. De hecho se detalla con bastante precisión cada unidad, su litología, su edad, su estado de deformación y los complejos estructurales que forman. De nuevo, y dado que el objeto de estudio es la cabecera del Ésera nos centraremos únicamente en las unidades que ahí afloran. Siendo fundamentalmente las unidades 19 y 22 del mapa geológico, que se describen a continuación, siguiendo las descripciones recogidas en la memoria del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 por J.García Sansegundo et al. (1993).

- Calizas grises y blancas de edad devónico-carbonífero.

Nos encontramos frente a la unidad clave de este estudio. Las calizas son la unidad estratigráfica en la que se han generado todos los sistemas kársticos de la zona incluyendo el Forau d'Aiguallut. Estas calizas están marmorizadas por metamorfismo de contacto y están situadas por debajo de las facies “Culm” del carbonífero, por lo que se han atribuido al devónico superior-carbonífero inferior. Esta formación calcárea aflora fundamentalmente en los alrededores del Plan d'Están y la zona sur de la hoja de Vieille y se trata de calizas en ocasiones tableadas y otras veces masivas. El tono blanquecino es característico y se reconoce perfectamente en foto aérea. En la zona de estudio, esta unidad se encuentra muy recrystalizado, debido a que está intensamente afectado por el metamorfismo de contacto inducido por el batolito granodiorítico de la Maladeta. El

espesor de estas calizas es difícil de estimar, debido a que se encuentran muy plegadas y fracturadas.

En lo referente a la edad, estas calizas, fueron datadas en las proximidades de la Renclusa por Rios (1977) mediante *Clymenia levigata*, obteniendo una edad de Famaniense medio-superior. Sin embargo, la parte superior de este nivel calcáreo tiene que llegar hasta el Carbonífero pues contiene conodontos de edad Tournaisiense y Viséense.

- Grauvacas, pizarras negras, conglomerados y calizas. Facies "Culm" (22). Carbonífero inferior

Por encima de las calizas de la unidad anterior se sitúan materiales del Carbonífero en facies "Culm". El "Culm" corresponde a una serie siliciclástica constituida por alternancias decimétricas de areniscas feldespáticas y lutitas negras, entre las que, ocasionalmente se intercalan niveles de conglomerados. El espesor es difícil de calcular debido a que se encuentra muy plegada; en cualquier caso, este debe de ser superior a los 700 m. Frecuentemente los conglomerados están constituidos por brechas envueltas en una matriz microconglomerática. A pesar del carácter silíceo de esta serie, se suelen encontrar capas de calizas bastante continuas con un espesor inferior a los 2 o 3 m. Por su distribución caótica y por el contexto sedimentario sugieren un depósito tipo "debris flow", ligado a zonas proximales de abanicos submarinos o a zonas de pie de talud.

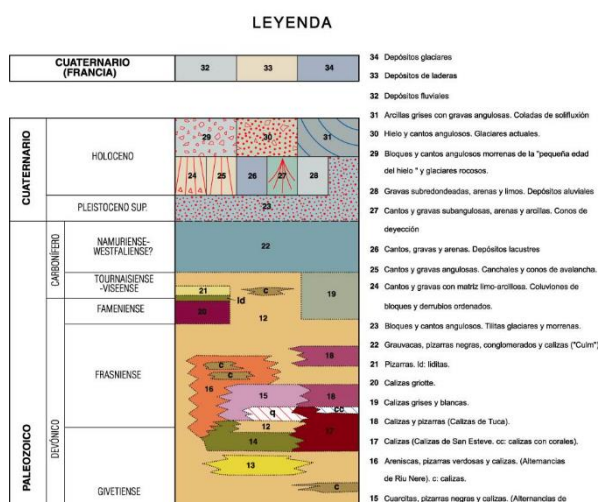


Fig. 3. Serie estratigráfica de la zona de estudio. Extraído de J. García Sansegundo et al. (1993) Mapa Geológico de España 1:50.00, hoja nº 148 (Canejan – Viehla)

Depósitos cuaternarios

Depósitos morrénicos: Depósitos que se concretan en acumulaciones caóticas de bloques heterométricos, con estrías y restos de la acción glacial, englobados en una matriz arenosa con cierta fracción de finos y con ciertas estructuras de flujo. Son cantos angulosos de granito, esquistos, pizarra, cuarcita y caliza, y con escasa matriz limo-arenosa. Tienen su origen en la acumulación de los materiales arrastrados por la acción de los hielos de los antiguos glaciares. Pueden distinguirse depósitos morrénicos, en el centro del valle glacial, al este del Hospital de Benasque y en el cierre antes del Forau d'Aigualluts, también queda un pequeño depósito en el valle de la Escaleta según Martínez de Pisón (1990).

Depósitos aluviales. Depósitos de granulometrías gruesas a finas propios de regímenes torrenciales de alta energía, localizados a lo largo de los principales cursos fluviales y en las

cubetas generadas por sobreexcavación glacial, colmatados por los sedimentos glaciolacustres en los procesos de retroceso de los aparatos glaciales cuaternarios.

Depósitos de pie de ladera. Acumulación de bloques y canchales localizados, principalmente en los pies de escarpes y crestones. Estos son de carácter polimíctico y heterométrico, con bloques que pueden llegar a los 4 m y espesores de entre 1 y 10 metros. También es posible encontrar algunos depósitos de coluviones en el límite oeste de la zona de estudio (Remuñe y Literola)

TECTÓNICA

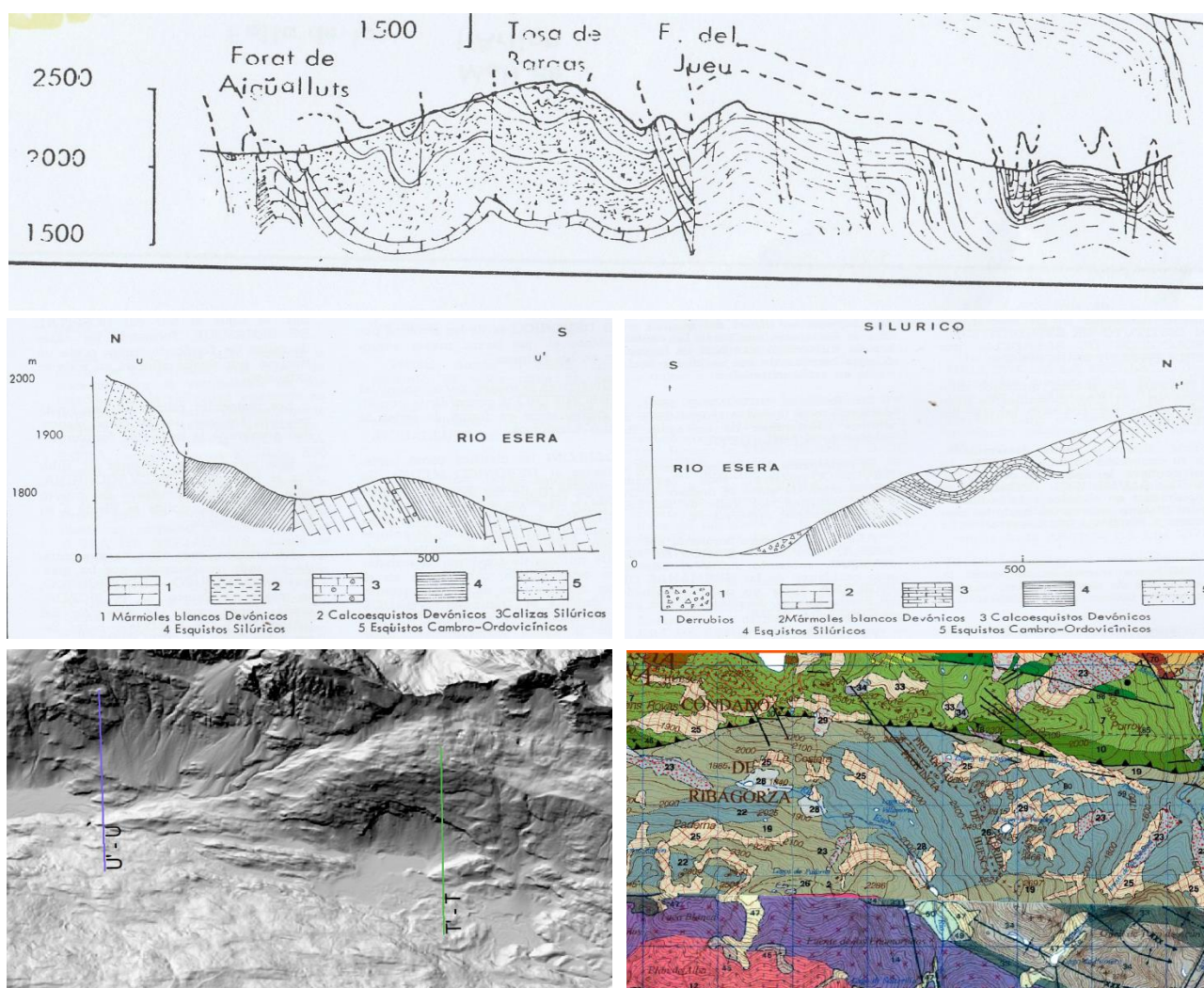


Fig. 4: Cortes geológicos de la zona de estudio. Arriba, corte geológico entre el Forat d'Aiguallut y Güells de Joeu. Medio, cortes geológicos de la ladera norte de la cabecera del Ésera. Abajo, situación de los cortes. Fuente: Instituto de estudios espeleológicos (1979). Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico de la Maladeta-Valle de Arán. Abajo derecha: Extracto del Mapa geológico de España escala 1:50.000. Hojas de Canejan-Vielha (148) y Benasque (180). IGME donde se observan los afloramientos de la unidad calcárea del devónico superior, Unidad 19.

La zona de estudio se enmarca totalmente dentro de lo que se conoce como “zona axial pirenaica” y que corresponde con la zona de máxima deformación en el levantamiento del orógeno pirenaico.

En ellas se pueden observar estructuras pre-hercínicas, hercínicas, tardihercínicas y alpinas, pero que desde luego no son el objeto de este trabajo. Haciendo un ejercicio de síntesis,

en la serie paleozoica se pueden encontrar numerosas estructuras de plegamiento, dando lugar a dos sinclinorios separados por un anticlinal central, el cual ve atravesado su flanco norte por un cabalgamiento de origen alpino (Cabalgamiento de Gavarnie) que puede seguirse lateralmente en toda la zona axial, afectando a la serie paleozoica. Dentro de nuestra zona, el Cabalgamiento de Gavarnie tiene una dirección aproximada E-O y se encuentra en una posición subvertical, como ponen de manifiesto los cortes geológicos de la *figura 4* siendo esta estructura la de mayor importancia, también es necesario reseñar la Falla del Joeu y la Falla de la Maladeta como las principales estructuras tectónicas en esta zona, así como todo el plegamiento de la serie paleozoica previo a la deformación alpina.

En el área de estudio, tres son las fallas que determinan el comportamiento hidrogeológico del sector.

- Falla de la Maladeta, que bordeando el granito, establece los principios del drenaje subterráneo.
- Falla de la Renclusa, enclavada en el material devónico, da lugar a la gran dolina de colapso en el refugio de la Renclusa, además de otros pequeños sumideros, a lo largo de la ladera sur del valle del Ésera
- Falla sur del Joeu, que separa el ordovícico del devónico y es la causante del afloramiento hídrico de Güells de Joeu. Límite norte de la zona de estudio.

Estas fallas y cabalgamientos no son sencillos de distinguir en el campo, por lo que se ha asumido la cartografía del IGME, y el trabajo se ha centrado en cartografiar en detalle la formación calcárea devónica objeto de este trabajo.

HIDROGRAFÍA E HIDROQUÍMICA

La hidrografía del sector estudiado viene determinada por dos factores fundamentales, como son la pluviometría y el glaciario. La hidrografía de esta zona está condicionada por los aportes de agua que en la zona quedan almacenados durante 5 meses al año en buena parte de su área en forma de nieve. Lo que condiciona la evolución del sistema de una manera decisiva.

Las aguas que alimentan el Trou del Toro, provienen de dos colectores fundamentales, el Barranco de Barrancs y la Valleta de la Escaleta. Ambas sub-cuencas nacen en las crestas de las montañas formadas por circos de origen glaciar y a su paso van recorriendo pequeños desniveles y escalones, de distinta litología y en muchos casos, con bastante recorrido subterráneo, siendo el último de estos tránsitos subterráneos el que pasa por el karst de la escaleta, del cual desemboca al Plan d'Aigualluts, donde las aguas se unen a las del Barranco de Barrancs. La fusión del manto nivoso genera una diferencia notable en el caudal medido en este curso de agua, pudiendo este duplicarse entre una medida por la mañana y a mitad de la tarde (748 l/s, frente a 1130 l/s; tomado Instituto de estudios espeleológicos de Sabadell, 1979)

Mientras tanto el Barranco de Barrancs recoge las aguas del colector general de los glaciares de Salenques, Tempestades y Aneto, constituyendo el aporte hídrico más importante del "Trou del Toro". Las aguas de dichos barrancos van fluyendo ladera abajo por un caos de bloques graníticos, pasando por el lago de Barrancs y fluyendo por el congreso hasta llegar al Plan D'Aigualluts, donde éste se subdivide en múltiples brazos debido al poco gradiente (1,7%) presente en el Plan D'Aiguallut, donde apenas 10 m de desnivel separan la cabecera del plan, de la cascada que drena el Forau.

HIDROQUÍMICA DEL SISTEMA KÁRSTICO AIGUALLUT- GÜELLS DEL JOEU

Existe un estudio interesante sobre la comparativa de los sistemas acuíferos de montaña Güells de Joeu y Alguaire, pese a que no es nuestro interés elaborar una comparativa, sí que lo es las conclusiones sobre el sistema kárstico Aiguallut-Güells de Joeu. De acuerdo con este estudio de A. Freixes et al. (1991), la investigación ha consistido en un análisis de las respuestas hidrodinámicas, hidrogeotérmicas, hidrogeoquímica e hidrobiológica en las

Las propiedades características de esta cuenca, es que el 90% de su cuenca se sitúa por encima de los 2000 metros de altitud y tienen grandes implicaciones en el funcionamiento del sistema, tanto desde el punto de vista hidráulico como de la evolución química de las aguas. Este sistema, supone un ejemplo excepcional de captura kárstica, sin duda el más importante de la cordillera pirenaica. El punto más elevado es el Aneto con sus 3404 m y el punto más bajo los Güells de Joeu a 1400 m. El volumen aportado por el sistema a lo largo del ciclo hidrológico puede ser superior a los 90 Hm³ y el volumen de la zona saturada, de unos 10 Hm³.

En el estudio se presentan los datos geoquímicos de las aguas de Güells de Joeu durante todo un año. A través de esos datos se pueden obtener algunas conclusiones. Los iones sulfatos y bicarbonato evolucionan de manera análoga, siguiendo un modelo de marcado carácter estacional. Dicha evolución es opuesta a la del caudal, es decir, los máximos de caudal coinciden con las mínimas concentraciones de bicarbonato y sulfato y viceversa. Dichos máximos de caudal están ligados a los periodos de fusión. En relación a las características geoquímicas del agua de este manantial, estas aguas presentan una mineralización muy baja y suponen un aporte masivo de agua al sistema. El fuerte descenso de la concentración de HCO₃⁻ pone de manifiesto la rápida circulación de estas aguas por el sistema, que recorren 4 kilómetros de distancia y 600 metros de desnivel, desde el Forau d'Aigualluts hasta los Güells del Joeu. Los valores máximos se obtienen en invierno, cuando la influencia de aguas de mayor tiempo de tránsito es mayor (zonas de infiltración y saturada). La concentración máxima de HCO₃⁻ es de 60 mg/l lo que podría ser reflejo de una marca característica de las aguas de la zona saturada del sistema.

Las conclusiones del estudio sugieren un sistema con una gran estacionalidad en el quimismo de sus aguas y que presenta una gran karstificación en profundidad.

RESPUESTA DEL SISTEMA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTREMA

El 18 de junio de 2013 se produjo en la cabecera del Ésera un evento de precipitación extrema según Serrano Notivoli et al. (2014) que explica cómo se comporta el sistema en situaciones extraordinarias. En el caso de la crecida de 2013 se llegaron a registrar más de 600 mm de lluvia en la estación de la Renclusa, con datos también extraordinarios en todo el valle del Ésera y del Cinca. No sólo ese fue el causante de este evento excepcional, sino que también lo fue la gran fusión de nieve que se produjo gracias a estas lluvias.

Las consecuencias en el todo el valle del Ésera aún pueden reconocerse en el cauce del mismo, pues ensancharon los márgenes del río, tiraron puentes e inundaron cascos urbanos como el de Benasque o Graus con importantes pérdidas materiales.

El comportamiento del sistema kárstico de la cabecera del Ésera fue incapaz de drenar todo el caudal que se estaba generando entre la escorrentía y la fusión y desbordó. De esta manera, los sumideros pasaron de drenar agua a expulsarla, comportamiento conocido como “trop plein”. Especialmente importante es el caso de una pequeña cavidad que se encuentra camino de “la Besurta” en su margen izquierda. Esta pequeña cavidad está formada en la morrena glaciar del fondo del valle, y su formación se debe al “reventón” del sistema en el evento del 2013, su tamaño se aproxima a los 5 m de diámetro.

Resultados

Mapa Geomorfológico

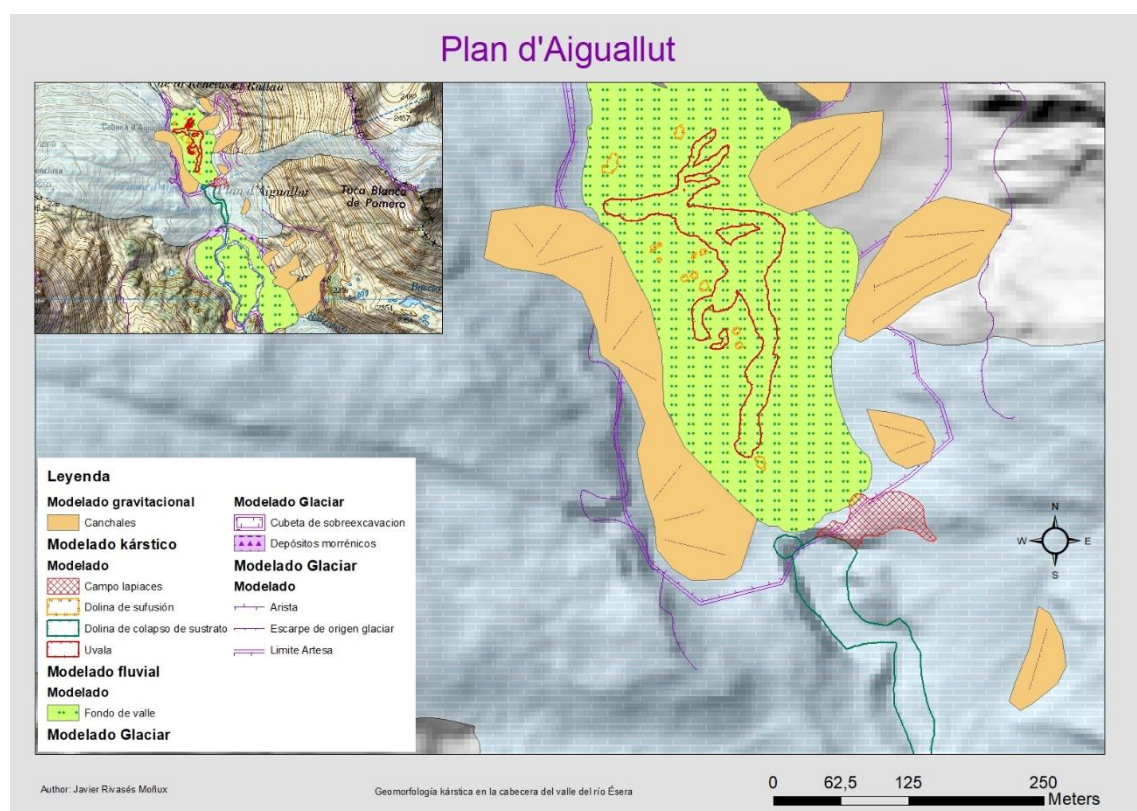


Fig. 5. Mapa Geomorfológico de Plan d'Aiguallut. Elaboración propia

El modelado kárstico

El modelado kárstico en la zona de estudio es muy relevante en esta zona, y podríamos decir que tras el de origen glaciar, es el siguiente en extensión e importancia de la zona. Lógicamente su aparición está ligada a la presencia de las calizas devónicas en el entorno. Pero allá donde éstas afloran, está presente.

El problema de la escala. Se han cartografiado más de 250 geoformas de origen kárstico en el área de estudio. El principal método de trabajo ha sido la ortofoto y los sistemas de información geográfica(SIG) para su reconocimiento. Seguramente en la zona de estudio habrá otras muchas formas kársticas de menor escala, como dolinas de orden métrico e inferior que son imposibles de detectar mediante el método de estudio. La única manera de realizar ese trabajo a ese nivel de detalle sería cartografiando in situ todas las geoformas del área de estudio. El nivel de tiempo necesario para ese trabajo hubiese sido imposible para una sola persona.

Para la descripción del modelado se dividirá el mismo entre formas exokársticas y endokársticas.

- Formas exokarsticas
 - Microformas de disolución

Solution runnels: Son los llamados “lapiaz en regueros”. En la zona de estudio no son demasiado abundantes, pero hay algunos casos. En ellos, su anchura es entre 5 y 10 centímetros en término general. Se han observado en afloramientos con una pendiente importante, superior a los 30º.

Grikes (Luftkarren): Es el lapiaz estructural típico de los paisajes kársticos. En la zona de estudio es muy habitual. Se ha caracterizado de una manera general, generando polígonos llamados “campos de lapiaces”. Ocupan una amplia extensión de los



Fig. 6: Lapiaz en regueros en el sendero camino al Forau d'Aiguallut (izquierda). Hellprints en el valle de la Escaleta (derecha).

afloramientos calcáreos, normalmente en zonas de pendiente baja a media. Sus dimensiones son variables, con paredes más rectas y verticales. La anchura de los surcos varía entre los 5 y los 40 cm. En ocasiones, en el fondo del surco se han depositado arcillas y material arrastrado por las lluvias, lo que ha permitido el desarrollo de vegetación.

- Macroestructuras de disolución

Las morfologías que generalmente aparecen con mayor profusión en los paisajes kársticos son las depresiones cerradas (dolinas y poljes). Como veremos en los resultados de cada zona, es la morfología principal del área de estudio.

Podemos diferenciar varios tipos de dolinas según la clasificación utilizada por F. Gutiérrez et al. (2008)

- Dolinas de disolución superficial. Aparecen salpicando todas las superficies de erosión/corrosión sobre calizas, llegando a alcanzar diámetros de más de 20 m (Plan d'Aigualluts), pero también multitud de ellas de tamaño métrico. Sus morfologías varían entre circulares y elípticas, con morfologías en cubeta y bordes suavizados.
- Dolinas generadas por colapso: Fundamentalmente se observan dos, pero probablemente las más importantes en cuanto a relevancia. El Forau d'Aiguallut y el Forau de la Renclusa, algo alejado pero también de importantes dimensiones es el Forau d'Estanyet, en la vertiente Norte del Coll del Toro. Se clasifican en función del material suprayacente a la roca disuelta, en función de si es una cobertera o un sustrato.
- Dolinas de sufusión de cobertera. Se producen cuando el material de la cobertera va descendiendo a las cavidades generadas por la disolución.
- Uvalas. Se emplea este término para agrupaciones de dolinas, que dan lugar a estructuras no circulares, el principal caso se da en el Plan d'Aiguallut. Se ha generado una morfología en forma de “curso fluvial” imposible de generar con la cantidad de caudal que discurre por el valle (todo absorbido por el Forau).

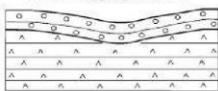
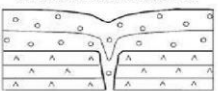
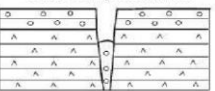

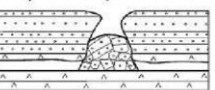
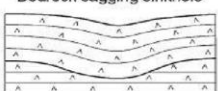
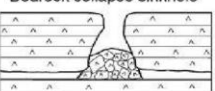
MAIN SINKHOLE TYPES			
MATERIAL	PROCESS		
	Sagging	Suffosion	Collapse
Cover	Cover sagging sinkhole 	Cover suffosion sinkhole 	Cover collapse sinkhole 
Caprock	Caprock sagging sinkhole 		Caprock collapse sinkhole 
Bedrock	Bedrock sagging sinkhole 		Bedrock collapse sinkhole 

Figura 7: Clasificación de las dolinas atendiendo al tipo de material afectado y al tipo de subsidencia. Extraída de Gutiérrez et al, 2008,

Cavidades y pequeños sumideros. En buena parte de la zona cartografiada, existen pequeños sumideros de escala métrica, difícilmente cartografiables a la escala de trabajo. Se han resaltado en el mapa los más relevantes por su importancia en el sistema hídrico de la zona, como pueden ser los sumideros del Ésera desde el Plan d'Están hasta el Hospital de Benasque, o los que controlan la “desaparición” del cauce en el Barranco de la Escaleta.

Forau d'Aiguallut y plan d'Aiguallut

Realmente fue esta zona la que motivó este trabajo, y es donde realmente se ha hecho buena parte del trabajo de campo. Como se adjunta en el mapa geomorfológico adjunto, se puede observar la gran dolina de colapso del sustrato que forma el Forau d'Aiguallut como principal foco de interés de esta sub-zona de estudio. En el mapa, se pone de manifiesto de una manera sintética el afloramiento de calizas devónicas en la que se enmarca toda la karstificación. Si se observa los efectos de la karstificación sobre el relleno fluviolacustre, se puede comprobar como la parte más occidental es la más karstificada, siendo la parte oriental la que conserva mejor esa topografía plana características de estas cubetas de sobreexcavación rellenadas.

La geometría de las dolinas es variable, desde redondeadas a elipsoidales y dando lugar a conjuntos que han conectado, dando lugar a pequeñas uvalas, alguna de las cuales alcanza varios centenares de metros. La disolución de los materiales calcáreos por debajo de la cubeta da lugar a subsidencia en los materiales glaciolacustres, quedando unas dolinas de sufusión en la mayoría de los casos de la zona del Forau. Los únicos casos de dolinas de colapso serían el propio Forau y la dolina colindante en dirección NE.

Resultados estadísticos zona Forau d'Aigualluts.

ZONA	PLAN D'AIGUALLUT
SUPERFICIE (m²)	129332
ALTITUD MEDIA (m)	2007
Nº DOLINAS	17
DENSIDAD DOLINIZACIÓN (dolina/km²)	131,4
AREA DOLINA MEDIA (m²)	28,1
AREA MAX DOLINA (m²)	72,0
AREA TOTAL DOLINIZADA (m²)	2582,0
PORCENTAJE SOBRE TOTAL (%)	2,00
PENDIENTE MEDIA DENTRO DOLINAS (º)	41,1
DISTANCIA MEDIA ENTRE VECINOS (m)	5,14

*Tabla 1. Estadísticas geométricas de las dolinas cartografiadas en el Forau d'Aigualluts.
Elaboración propia*

El Forau d'Aiguallut es una dolina de colapso de amplísimas dimensiones, en la bibliografía se calcula unas dimensiones de 80 m de diámetro por 30 m de profundidad, mientras que el área calculada mediante el uso de sistemas de información geográfica da 7800 m² aproximadamente contando desde el inicio de la cascada. Multiplicando este valor por una profundidad media de 20 m. (en la bibliografía se habla de una profundidad máxima de 30 m en la pared N, y esta va descendiendo hacia el sur progresivamente) (Instituto de estudios Espeleológicos, Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico de la Maladeta, 1979). Realizando dichos cálculos. Obtendríamos un volumen de 156.000 metros cúbicos de roca disuelta.

La edad de formación del Forau d'Aiguallut

Es perfectamente sabido que la karstificación de una roca es función de la solubilidad de dicha roca en el agua. De ahí que sea mucho más rápido y sencillo que se disuelvan sales

como la halita o la glauberita que lo hagan las cuarcitas. El sistema carbonatado está en un término medio. La edad mínima para la formación de un sistema de drenaje es calculada en un orden de magnitud de 20.000 años, aunque han sido datadas las partes más antiguas de algunos sistemas en cifras entre 150.000 años y 2 millones de años. Hoy se acepta que la mayoría de redes subterráneas en calizas son de edades plio-pleistocenas según Galán (1991). Las redes holocenas (post-glaciares, de menos de 10.000 años) sólo conciernen pequeñas cavidades epidérmicas y sistemas de cuevas en yesos.

También es necesario tener en cuenta que determinar la “edad” de un sistema kárstico no es para nada sencillo, teniendo en cuenta que la mayoría son polifásicos y que las formas han sido excavadas en diferentes momentos, aunque actualmente se están datando cavidades a partir de sedimentos o superficies correlativas.

Galán expone que “Aunque el establecimiento de un drenaje subterráneo es un proceso rápido (del orden de 20.000 años), la mayoría de los karsts son polifásicos y su edad de conjunto generalmente asciende a algunos centenares de miles de años.”

En cuanto a la tasa de disolución en sistemas carbonatados, según Galán, para sistemas en alta montaña templada se encuentra entre 100-130 m³/Km².año. Asimismo, asegura que la disolución exokárstica representa a lo sumo el 15% de la disolución total; siendo el 85% en el endokarst.

Para un volumen de roca disuelto de 156420 m³, que ocupa una extensión de 0,0078 km² y teniendo en cuenta la tasa de disolución de la calcita para ambientes secos de alta montaña, se obtienen unos datos mínimos de 200.000 años. Si además tenemos en cuenta que el exokarst suele ser una parte pequeña de todo el sistema kárstico (15% frente a 85% endokarst, según el mismo autor) se obtienen edades de inicio de formación muy superiores, que pueden llegar hasta el 1,33 M.a.

Pese a que estos cálculos no son del todo exactos, y presentan muchas incertidumbres, lo que sí queda claro es que para esas tasas de disolución de calcita y ese volumen de roca disuelta, son necesarios más de 100.000 años para poder formarse este sistema kárstico de tal magnitud y desarrollo.

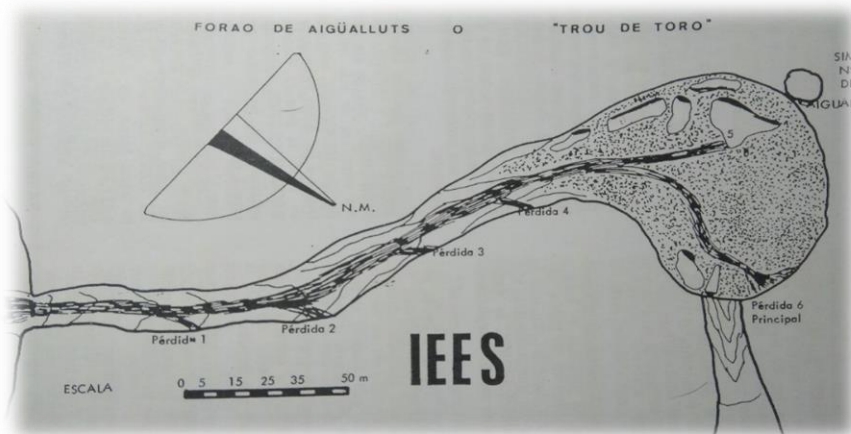


Fig. 8. Cartografía de detalle del Forau d'Aigualluts. Tomado de Instituto de Estudios Espeleológicos de Sabadell. "El Trou de Toro y su Historia". Zona de Benasque. Área A. Páginas 65-80

Estos datos contrastan con la teoría de Martínez de Pisón, expresada en su publicación de la revista Eria en 1989 (Morfología Glaciar del valle de Benasque), según la cual, dado que en

la cubeta inferior (topográficamente) del plan d'Aiguallut hay cantos rodados, claramente de procedencia fluvioglaciaria, y que deben proceder del plan d'Aiguallut de aguas arriba del

Forau, supone que el desarrollo de la dolina de colapso se originaría una vez los glaciares se habían retirado completamente. Además, explica en dicho artículo, que precisamente en esa zona, se da una fase glaciaria tardía correspondiente a una edad Finipleistocena. Si la formación del Forau d'Aiguallut tuvo que darse posteriormente a la retirada de dicha fase glaciaria, su edad sería Holoceno inferior. Según los datos teóricos obtenidos y pese a su carácter cualitativo más que cuantitativo, parece indicarse que el sistema kárstico pudo empezar en fases pleistocenas o finipleistocenas, elaborándose una dolina de mucha menor entidad mientras el sistema glaciario permanecía activo en sus últimas fases. Con la retirada de la lengua de hielo, y en un estadio inicial, en épocas de avenidas sería posible el depósito de cantos rodados más allá del propio Forau, dando lugar a los depósitos fluvioglaciares que hoy se encuentran. Asimismo, el paso del sistema glaciario por uno fluvio-torrencial, aumentó la infiltración y dio paso al colapso del techo de la cavidad, que sumado a los desprendimientos por los que está afectada, configuran la forma final del Forau.

El sistema kárstico de la Escaleta

El valle de la Escaleta es una pequeña depresión con dirección WNW-ESE formada fundamentalmente en calizas del Devónico superior, con la granodiorita en su cara sur y el Culm en la norte. En dichos afloramientos calcáreos se ha producido una intensa disolución. Están reseñadas por grupos de espeleología varias cavidades y se han cartografiado en el sistema numerosas dolinas de escala métrica y decamétrica. De la misma manera, el afloramiento muestra lapiazes estructurales, más o menos redondeados. Es posible encontrar un depósito morrénico de pequeñas dimensiones, asociado a las últimas fases del sistema glaciario (Martínez de Pisón, 1989) y pequeños derrubios. También merece ser reseñada, aunque no se incluye en la cartografía el Forau d'Estanyet, una dolina de colapso de importantes dimensiones que se encuentra en la vertiente Norte del Coll de Toro, cuando una franja calcárea cruza transversalmente el collado.

Las estadísticas de las dolinas cartografiadas en la zona son las siguientes:

ZONA	ESCALETA
SUPERFICIE TOTAL (M²)	207889
ALTITUD MEDIA (m)	2176
Nº DOLINAS	73
DENSIDAD DOLINIZACIÓN (dolina/km²)	351,15
AREA DOLINA MEDIA (m²)	22,3
AREA MAX. DOLINA (m²)	108,0
AREA TOTAL DOLINIZADA (m²)	35,0
PORCENTAJE SOBRE TOTAL (%)	47,9
PENDIENTE MEDIA DENTRO DOLINAS (º)	20

Tabla 2. Estadísticas geométricas de las dolinas cartografiadas en el Valle de la Escaleta. Elaboración propia

DISTANCIA MEDIA ENTRE VECINOS (m)	10,35
--	--------------

El sistema kárstico de Peña Blanca

En cuanto al sistema kárstico de Peña Blanca, se han encontrado de nuevo numerosas dolinas de diverso tamaño, desde 152 m² hasta 15m², siendo fundamentalmente dolinas de disolución o dolinas de colapso de cobertera. En general la geometría es circular u elipsoidal, tendiendo estas últimas direcciones paralelas o subparalelas a la dirección de máxima pendiente. En la zona, al igual que en el caso de la Escaleta se observan diferentes zonas de lapiaz estructural.

Las estadísticas de las dolinas cartografiadas en la zona de Peña Blanca son las siguientes:

ZONA	TUCA BLANCA
SUPERFICIE TOTAL(m²)	227519
ALTITUD MEDIA (m)	2291
Nº DOLINAS	135
DENSIDAD DOLINIZACIÓN (dolina/km2)	593,36
AREA DOLINA MEDIA (m2)	21,8
AREA MAX. DOLINA (m)	152,0
AREA TOTAL DOLINIZADA (m2)	2791,0
PORCENTAJE SOBRE TOTAL (%)	1,23
PENDIENTE MEDIA DENTRO DOLINAS (º)	34,9
DISTANCIA MEDIA ENTRE VECINOS (m)	8,72

Tabla 3. Estadísticas geométricas de las dolinas cartografiadas en la ladera de Peña Blanca. Elaboración propia

El Plan d'Están

Para el Plan d'Están, se han reconocido muchas menos dolinas, por lo que el análisis estadístico es menos significativo.

ZONA	PLAN D'ESTAN
SUPERFICIE TOTAL (M²)	253152
ALTITUD MEDIA (m)	1847
Nº DOLINAS	9
DENSIDAD DOLINIZACIÓN (dolina/km2)	35,55
AREA DOLINA MEDIA (m²)	29,9
AREA MAX. DOLINA (m²)	36,0
AREA TOTAL DOLINIZADA (m²)	269,0
PORCENTAJE SOBRE TOTAL (%)	0,11
PENDIENTE MEDIA DENTRO DOLINAS (º)	18,5

DISTANCIA MEDIA ENTRE VECINOS (m)	46,9
--	-------------

*Tabla 4. Estadísticas geométricas de las dolinas cartografiadas en el Plan d'Están.
Elaboración propia*

Se da en esta zona un afloramiento del Culm que corta diagonalmente el fondo del valle glaciar, generando unos relieves de aproximadamente 30 m de altura que chocan con el cauce del Ésera en su cabecera. El resultado de esta disposición se manifiesta por unos sumideros en el contacto entre las calizas devónicas y el Culm (*ver anexos*). Estas dolinas, como reflejan las estadísticas, son muchas menos, pero de un tamaño medio mayor al de los casos anteriores, y efectivamente, la distancia mínima entre vecinos es mucho mayor que en los casos anteriores.

El agua aparece en unas surgencias de nuevo 150 m más al W en el contacto entre estas dos unidades. El curso ha generado unas morfologías meandriformes en el Plan d'Abaixo y se pueden apreciar en foto aérea varios meandros abandonados que están cartografiados. El agua desaparece en varios sumideros en la parte más meridional de la cubeta fluvioglaciar, donde todavía afloran materiales calcáreos devónicos y sigue su curso por debajo de los depósitos morrénicos hasta llegar a la surgencia del Hospital de Benasque. Una cavidad, que se ha explorado y que cuenta con 40 m de desarrollo en una travesía horizontal a través de una diaclasa que se ha ampliado por disolución. El caudal en dicha surgencia es continuo.

Paderna, la Renclusa y el sistema del Alba.

Una forma kárstica importante es el Forau de la Renclusa, una dolina de amplias proporciones (220m²) de colapso, que drena toda la canal superior que baja de los portillones del macizo de la Maladeta.

Otras geoformas importantes de las que no se ha hablado son las pertenecientes a la zona del Alba. Se ha cartografiado una dolina en el contacto entre la granodiorita y la caliza devónica y también las coordenadas de la entrada superior del sistema kárstico del Alba, los datos se han obtenido gracias a la Federación Aragonesa de Espeleología, consultando su página web.

Por último, en la bibliografía (Instituto de Estudios Espeleológicos. 1979) se han identificado unas dolinas en la ladera del pico Paderna, ladera en la que afloran las calizas devónicas de nuevo. La cartografía por ortofoto aérea es complicada por la abundante vegetación y la zona es de difícil acceso y alejada de las principales zonas de estudio de este trabajo, por todo ello, no ha sido posible su cartografía.

El modelado glaciar, fluvioglaciar y gravitacional

Glaciar

Se identifican fundamentalmente en la zona de estudio cubetas de sobreexcavación, umbrales y cordones morrénicos según Cambray i Pla y Esgleas i Giménez (1991)

Cubetas de sobre-excavación: Se encuentran actualmente en su mayoría ocupados por lagos o zonas de drenaje deficiente, a través de sumideros. Ocupan los fondos de los circos glaciales

siendo más abundantes en las zonas de litología granítica. Estas cubetas están ligadas a la génesis de los circos glaciares y configuran un perfil longitudinal cóncavo limitado por lindes rocosas que cierran la boca de los circos. Se pueden dividir en dos grupos, las del fondo del valle, entre las que destacan las cubetas de Eriste y Benasque y las de las cotas altas (1700-2100) a las que pertenecen los Llanos del Hospital, Plan d'Están y Plan d'Aiguallut.

Lindes rocosos: Se hallan limitando las cubetas de sobreexcavación y cerrando la boca de muchos circos glaciares favoreciendo precisamente la generación de las cubetas.

Cordones morrénicos: Se identifican sobre el terreno por las formas características a modo de lomas suaves alargadas instaladas sobre algunas laderas y fondos de valles, están íntimamente ligadas a los depósitos morrénicos, de hecho, se trata de depósitos morrénicos laterales u originados en la confluencia de dos lenguas glaciales.

Fluvioglacial

Las cubetas de sobre-excavación se encuentran colmatadas de sedimentos glaciolacustres y fluviotorrenciales. Este relleno de las cubetas de sobre-excavación tiene una profundidad variable, y en el caso de la de Benasque, alcanza los 290m según los datos aportados por Bordonau et al (1989). En la zona de estudio, dicho espesor será probablemente mucho menor tanto en la cubeta de Plan d'Están, Plan d'Aiguallut y Llanos del Hospital. El relleno de dichas cubetas consta del till glaciar, arcillas glaciolacustres y depósitos fluviodeltáicos sobre los que se asientan los conos de deyección y los depósitos aluviales actuales.

Gravitacional

Dentro de este epígrafe se han identificado todas aquellas formas que afectan a formaciones superficiales y coluviones en laderas y escarpes. Los procesos más habituales son los desprendimientos, los vuelcos y las avalanchas. Su desarrollo está en función de la pendiente de la ladera y de la cantidad de material desprendido, se observa en general una mayor presencia de canchales y procesos gravitacionales en la ladera norte de la cabecera del Ésera, por su orientación sur (mayor radiación solar) y el aumento de ciclos hielo-deshielo, lo que provocaría la rotura y su posterior caída.

Dolinas y pendiente.

Uno de los objetivos de este trabajo era el de estudiar la posible relación entre la formación de dolinas y la pendiente del terreno. Para ello se ha trabajado, una vez cartografiadas todas las dolinas, mediante herramientas informáticas y estadísticas. Para este estudio se han utilizado las tres zonas con más densidad de *dolinización* siendo estas El Plan d'Aiguallut, el valle de la Escaleta y la ladera de Peña Blanca (*ver anexos*).

Pendiente media de cada dolina cartografiada

Se han elaborado, mediante software GIS (Geographic Information Systems), análisis de pendientes de la zona de afloramiento, para estudiar la correlación entre la formación de dolinas y la pendiente del terreno. Por un lado, se ha obtenido la pendiente media de cada forma, obteniendo de cada polígono cartografiado un conjunto de valores de longitud, latitud y altitud, pudiendo a través de ArcGIS obtener la pendiente en cada uno de esos puntos. Posteriormente

se calculado la media de los valores en ese polígono y se ha representado con una escala de color sobre el centroide de dicha forma.

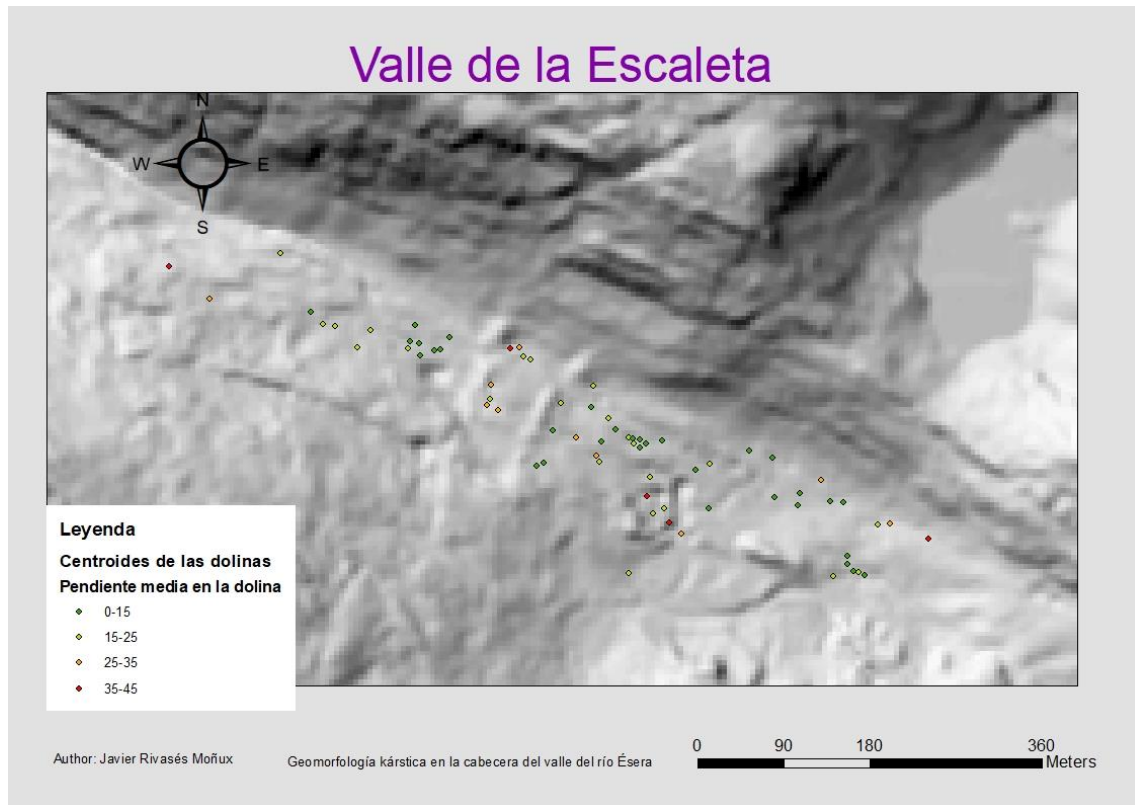


Figura 9. Estudio de la pendiente media dentro de cada dolina en el área de la Escaleta, elaboración propia.

Para la obtención de la pendiente media dentro de cada dolina, se ha utilizado ArcGIS 10.5. Mediante el uso de herramientas de geoprocso, se ha “recortado” el modelo digital de elevaciones de la zona correspondiente, ajustado al interior de las formas cartografiadas. Este modelo digital contiene datos espaciales en formato (x, y, z) y permite realizar análisis espaciales en dos y tres dimensiones, tales como la distancia, la distancia 3d o el cálculo de la pendiente. Una vez obtenido el valor medio de la pendiente dentro de cada polígono, se ha calculado, utilizando herramientas internas del propio programa, el centroide de cada polígono, y se ha mostrado el valor medio de la pendiente en el mismo mediante una escala de colores. En este estudio se ha utilizado un modelo digital de elevaciones basado en datos LIDAR, con un paso de malla de 5m², según los datos facilitados por el Centro Nacional de Información Geográfica.

Relación entre pendiente y presencia de dolinas.

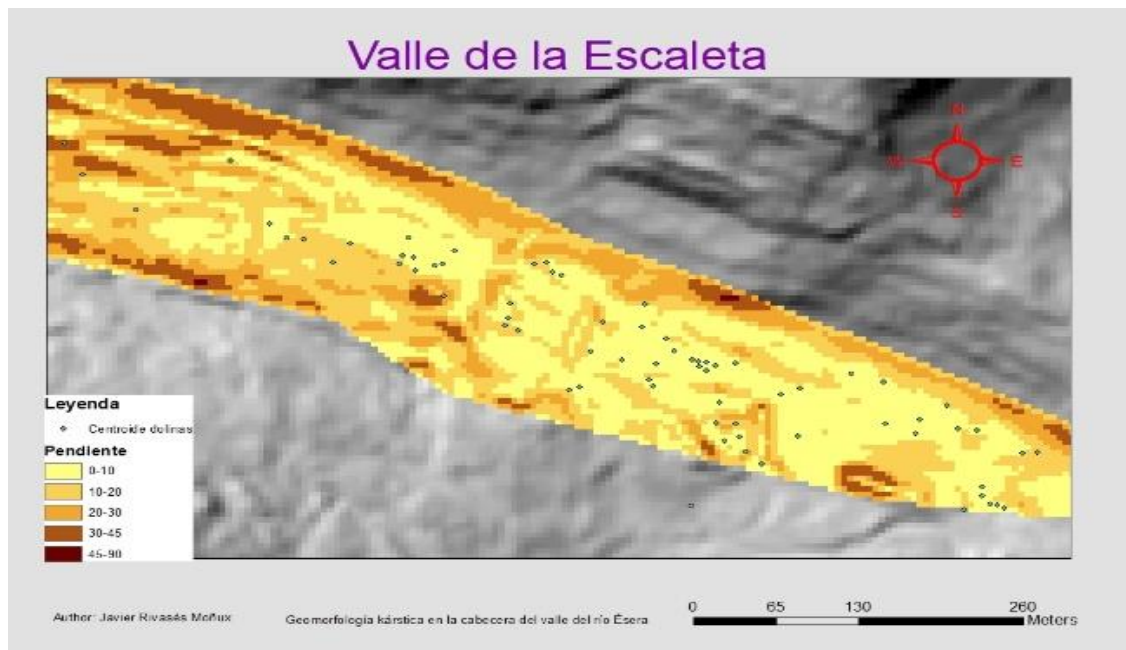


Fig. 11. Estudio de la relación entre desarrollo de dolinas y pendiente del terreno en el Valle de la Escaleta. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se ha llevado a cabo un estudio para conocer la relación entre la presencia de dolinas y la pendiente del terreno. Para ello, se han ubicado los centroides de los polígonos dentro de un análisis de pendientes, esta vez limitado a la zona de estudio (Valle de la Escaleta, Forau d'Aigualluts y Peña Blanca). Como se observa en la fig. 11, la mayor parte de las dolinas se encuentran en zonas con baja pendiente (colores amarillos y ocre en la leyenda).

Resultados y discusión

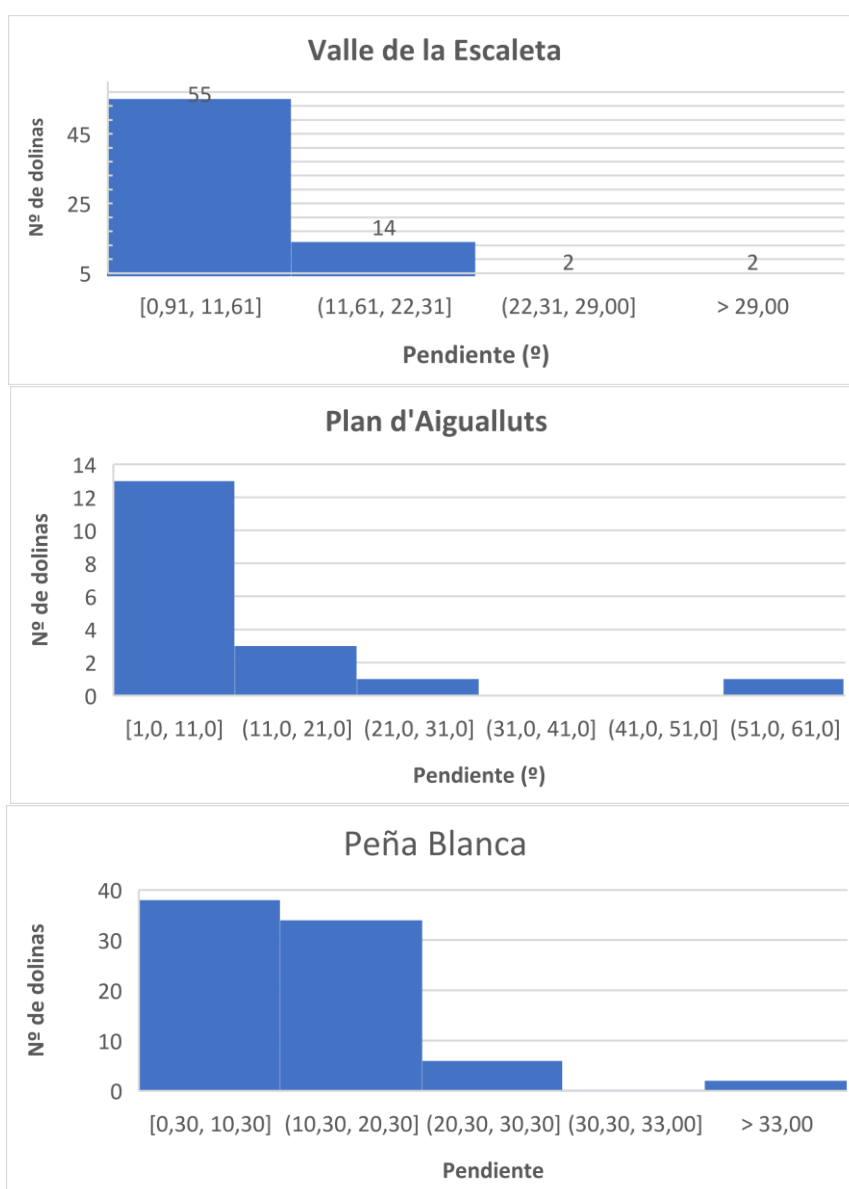


Fig. 12. Histogramas de las zonas de estudio. En ellos se observa la relación entre el desarrollo de dolinas y la pendiente. A mayor pendiente, menor número de dolinas. Fuente: elaboración propia

En el presente trabajo se han cartografiado más de 260 dolinas a lo largo de varios afloramientos, y se ha llevado a cabo un estudio doble sobre la relación de las dolinas y la pendiente. Por un lado, se ha obtenido la pendiente media dentro de cada polígono, obteniéndose así el grado de desarrollo de dicha forma, donde dolinas más profundas presentarán pendientes medias mayores.

En general, salvo las grandes formas del área de estudio (Forau d'Aigualluts y Forau de la Renclusa), el resto de las dolinas cartografiadas no presentan grandes desarrollos, dando lugar a pendientes medias bajas en la mayoría de los casos (tonos verdes y amarillos en la leyenda del mapa)

La otra versión del estudio, sobre la relación entre la pendiente y la presencia de dolinas arroja unos resultados muy claros, la presencia de dolinas está ligada a un determinado rango de pendientes, que según los datos que muestra la figura 11, se encuentra entre 0 y 30°. En los histogramas se puede observar como la gran mayoría de las dolinas cartografiadas se encuentran en zonas con pendientes menores de 12°, aunque en el caso de Peña Blanca se encuentra un numeroso grupo en el rango 10-20°.

Conclusiones

Although past glacial activity modeling is the main agent defining high Ésera river landscape, karstic processes are the one defining its hydrology. 'Forau d'Aiguallut' is the outstanding expression of a wide and complex karstic system, related to the outcropping of strongly folded and fractured Devonian limestone. It is not only the most visible expression of this karstic system, it is also a hydrologic quirk since it reflects the deviation between the topographic boundaries of both the catchment area and the karstic system.

'Forau d'Aiguallut' is a collapse sinkhole of 80 meters of diameter and 30 meters deep, which most likely started evolving under the ice body in the Pleistocene. When the ice went back, the system precipitated to the sudden roof collapse. Then some landslide events contributed to increase its dimensions. It works as a giant sinkhole capable of draining water out a 1530 has high mountain zone. Flow variations are important and linked to climatology, increasing the bottom doline level up 5 meters. Chemical composition is seasonal and suggests a very deep and evolved karst. In the fluvio-glacial basin downstream the Forau d'Aiguallut' a significant limestone field develops, that eventually will connect to the Forau.

It is not the only karstic formation of relevance in the area. Several other systems are currently being surveyed, presenting a wide range of dissolution formulae in the area. Its distribution is restricted to calcareous outcrops and its development linked to geographical – mainly orientation- and topographic factors, as terrain description and gradient. More than 200 sinkholes had been mapped in the survey area, proving the significance of karst in the Ésera valley.

Bibliografía

- Bordonau, J., Pous, J., P. Queralt y J.M. Vilaplana. (1989). Geometría y depósitos de las cubetas glaciolacustres del pirineo. Revista de Estudios geológicos. Vol.: 45, pps 71-79
- Cambray i Plá, D; Esgleas i Giménez, J. (1991). Informe de Cartografía Geomorfológica. Cartografía temática del IGME. Hoja de Benasque (180). Memoria, bibliografía, documentos gráficos y leyenda.
- Freixes Perich, A, Monterde García, M y Ramoneda Molins, J. (1991). Respuestas Hidrogeoquímicas y funcionamiento de los sistemas acuíferos de Güells de Joeu y Alguaire (Valle de Arán): Resultados Preliminares.
- Federación Aragonesa de Espeleología, fichas de cavidades, Sistema del alba. Fecha de consulta 10/08/2017: Disponible en:<<http://www.federacionaragonesaespeleologia.com/cavidades/indextravesias.html>>
- Galán, C. (1991). Disolución y génesis del karst en rocas carbonáticas y rocas silíceas: un estudio comparado. Revista MUNIBE, nº 43. Pags 43-72.
- García-Sansegundo, J. Ramírez Merino, J, Rodríguez Santisteban, R y Leyva, F.(1993. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 148 (Canejan- Vielha) y memoria. IGME, Madrid, 64 pps.
- Gutiérrez, F., Guerrero, J., Lucha, P. (2008). A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. Environmental Geology, 53, 993-1006.
- Instituto de Estudios Espeleológicos de Sabadell. (1979). Actas Espeleológicas. Zona de Benasque. Área A. Sub-Área Espeleológica A-11. Zona de Peña Blanca.
- Instituto de Estudios Espeleológicos de Sabadell. (1979). Contribución al conocimiento del Sistema hidrogeológico de la Maladeta-Valle de Arán. Actas Espeleológicas. Volumen 1. Págs. 11-63. Zona de Benasque.
- Instituto de Estudios Espeleológicos de Sabadell (1979). "El Trou de Toro y su historia". Actas Espeleológicas. Zona de Benasque. Área A. Volumen 1. Págs. 65-80.
- Martínez de Pisón, E. (1989) Morfología Glaciar del Valle de Benasque (Pirineo Aragonés). Revista Eria. Págs. 51-64.
- Martínez de Pisón, E. (1990). Morfoestructuras del Valle de Benasque. Anales de Geografía de la Universidad Complutense. Nº10,121-147. Editorial Universidad Complutense.
- Meteoblue, wheater close to you. Archivo meteorológico del puerto de Benasque. Fecha de consulta 20/10/17. Disponible en <https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/modelclimate/puerto-de-benasque_franca_2970150>
- García-Ruiz, J.M., Bordonau, J., Martínez de Pisón, E.y Vilaplana, J.M. (1992): Mapa Geomorfológico de Benasque. Geoforma ediciones. Logroño
- Serrano Notivoli, R., Ollero Ojeda, A., Sánchez Fabre, M., y Saz Sánchez, M.A. (2016). Floodplain occupation and flooding in the Central Pyrenees. Cuadernos de investigación geográfica.
- Ríos, L.M. (1977). "El paso Devoniano-Carbonífero y las atribuciones erróneas al Carbonífero en los ríos Ésera y Baliera, provincia de Huesca". Bol. Geol. Min., Madrid, t LXXXIII, nº IV, pp. 300-305.