



Trabajo Fin de Grado

Estudio bioclimático y geobotánico del Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel y del Monumento Natural de los Mallos de Riglos, Agüero y Peña Rueba: posibles consecuencias del cambio climático.

Autor

Borja Pérez Ventura

Director

José María Cuadrat Prats

Después de tres meses de intenso trabajo, de noches enteras sin dormir, se termina el trabajo que ha conseguido que esta cuarentena no parezca tan larga, como realmente ha sido, y que me ha permitido conocer a fondo una zona tan bonita de Aragón que no conocía y que realmente tengo ganas de visitar.

Agradecer toda la ayuda que me ha sido ofrecida para la realización del mismo, sobre todo a Daniel Gómez, actual director del Patronato de la zona estudiada, cuya aportación de material bibliográfico de una rama más ajena del Grado como es la botánica ha sido de gran ayuda.

También agradecer a Samuel Barrao, quien me ha facilitado el acceso a las bases de datos del proyecto CLIMPY y la metodología utilizada en dicho proyecto.

Sobre todo gracias a los dos por atenderme siempre de manera simpática a todos los correos enviados y por haberme resuelto todas las dudas surgidas.

Resumen: En el presente Trabajo de Fin de Grado se ha hecho un estudio del relieve, el clima y la vegetación del Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel y del Monumento Natural de los Mallos de Riglos, Agüero y Peña Rueba. Estos espacios presentan unas características muy interesantes en estos tres aspectos analizados. Se han establecido las relaciones entre la vegetación y los factores del relieve. Se aprecia un claro control de las orientaciones sobre las formaciones vegetales y una distribución altitudinal en pisos que es más clara en el sector del Monte Oroel. Se ha detectado la estrecha relación de algunas formaciones vegetales con determinadas variables climáticas, lo que las convierte en buenos indicadores bioclimáticos. Se ha realizado la caracterización climática de la zona de estudio a partir de los datos del Proyecto CLIMPY, y se han hecho modelos de clima futuro basados en diferentes escenarios de emisiones de efectos de gases invernadero. En todos ellos las amenazas sobre la vegetación son muy graves, especialmente por el incremento de las temperaturas que estos modelos prevén. Para realizar este trabajo se han utilizado fuentes de información diversas y muy recientes, además de técnicas que pueden tener un gran potencial en los estudios biogeográficos, como son la realización de Modelos Digitales de Copas de la vegetación a partir de datos LIDAR, el análisis de imágenes del satélite Sentinel-2 y la realización de modelos tridimensionales del paisaje vegetal.

Palabras clave: San Juan de la Peña y Monte Oroel, CLIMPY, cambio climático, topoclima, biodiversidad, LIDAR.

Abstract: In this Final Degree Project, a study has been made of the relief, climate and vegetation of the Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel y del Monumento Natural de los Mallos de Riglos, Agüero y Peña Rueba. These spaces present some interesting characteristics in those three analyzed aspects. The relationships between vegetation and relief factors have been established. There is a clear control of the orientations over the plant formations and an altitude distribution in floors that is much clear in the Monte Oroel sector. The close relationship of some plant formations with certain climatic variables has been detected, which makes them good bioclimatic indicators. The climatic characterization of the study area has been carried out from the data of the CLIMPY Project, and future climate models have been made based on different scenarios of greenhouse gas emissions. In all of them the threats to the vegetation are very serious, especially due to the increase in temperatures that these models foresee. To carry out this work, diverse and very recent sources of information have been used, in addition to techniques that may have great potential in biogeographic studies, such as the realization of Digital Models of Treetops of vegetation from LIDAR data, the analysis of Sentinel-2 satellite images and three-dimensional models of the plant landscape.

Key words: San Juan de la Peña y Monte Oroel, CLIMPY, climate change, topoclimate, biodiversity, LIDAR.

Índice

1. Introducción y objetivos	1
2. Metodología	6
3. Descripción del medio físico	10
3.1. Estudio del relieve	11
3.1.1. Fundamentos geológicos	11
3.1.2. Altitudes y red hidrográfica	13
3.1.3. Geomorfología	16
3.1.4. Pendientes y orientaciones	20
3.2. Estudio del clima	24
3.2.1. Introducción	24
3.2.2. Características generales	27
3.2.3. Clasificaciones climáticas	37
3.2.4. Parámetros bioclimáticos	39
3.3. Estudio de la vegetación	41
3.3.1. Introducción	41
3.3.2. Vegetación potencial	43
3.3.3. Unidades de vegetación del SIOSE	47
3.3.4. Unidades de vegetación del mapa de paisajes de Aragón	51
3.3.5. Datos obtenidos mediante la tecnología LIDAR	54
4. Relaciones entre el clima, el relieve y la vegetación	66
4.1. Clima y relieve	67
4.2. Clima y vegetación	72
4.2.1. Relación de ambas variables según la clasificación de SIOSE	72
4.2.2. Relación de ambas variables según la clasificación del Mapa de Paisajes	76
4.3. Relieve y vegetación	80
4.3.1. Altitud, orientaciones y pendientes	80
4.3.2. Perfiles fitotopográficos	86
4.3.3. Modelos tridimensionales	91
5. Proyecciones futuras	97
5.1. Clima	98
5.2. Vegetación	109
6. Conclusiones	114
7. Bibliografía y webgrafía	120

Índice de figuras

1. Figuras de protección de los territorios estudiados.
2. Espacios de la Red Natura 2000.
3. Delimitación de la zona CLIMPY y situación de la zona de estudio.
4. Esquema geológico de la zona de estudio.
5. Mapa del relieve.
6. Distribución de altitudes.
7. Formas del relieve de la zona de estudio.
8. Vista del Monte Oroel desde el oeste.
9. Corte geológico a través del Monte Oroel.
10. Vista de los Mallos de Riglos.
11. Mapa de pendientes.
12. Distribución de pendientes.
13. Mapa de orientaciones.
14. Distribución de orientaciones.
15. Efecto solana-umbría en la cresta del Monte Oroel.
16. Tipos de tiempo de invierno.
17. Localización de las estaciones de precipitación y temperatura que han sido utilizadas en el Proyecto CLIMPY.
18. Localización de las estaciones meteorológicas próximas a la zona de estudio.
19. Distribuciones de las principales variables climáticas.
20. Mapas de precipitaciones y temperaturas medias anuales.
21. Mapas de temperaturas máximas y mínimas anuales.
22. Mapas estacionales de la temperatura media estandarizada.
23. Mapas estacionales de la temperatura máxima estandarizada.
24. Mapas estacionales de las precipitaciones estandarizadas.
25. Anomalías de clima pasado.
26. Clasificación climática de Köppen.
27. Regiones de humedad y regiones de eficacia térmica.
28. Clasificación climática de Thornthwaite.
29. Estacionalidad de las temperaturas y precipitaciones.
30. Selección de parámetros bioclimáticos.
31. Regiones biogeográficas.
32. Mapa de series de vegetación.
33. Algunas formaciones vegetales características de la zona de estudio.
34. Mapa de vegetación según SIOSE y ortofoto.
35. Tipos de vegetación según SIOSE.
36. Mapa de vegetación según el Mapa de Paisajes y ortofoto.
37. Tipos de vegetación según el Mapa de Paisajes.
38. Funcionamiento de la tecnología LIDAR.
39. Modelo Digital de Copas del Paisaje Protegido.

40. Detalles del Modelo Digital de Copas.
41. Estratos de vegetación en el Paisaje Protegido.
42. Ortofoto de un sector de San Juan de la Peña.
43. Modelo Digital de Copas.
44. Modelo vectorial de copas y cimas.
45. Diferentes estadísticas forestales obtenidas.
46. Superposición del modelo vectorial de copas y cimas sobre la ortofoto.
47. Comparación de la calidad del Modelo Digital de Copas.
48. Análisis de regresión entre variables climáticas y la altitud.
49. Índice de humedad en la zona de estudio.
50. Ampliaciones del mapa de Índice de humedad.
51. Distribución de las precipitaciones en los tipos de vegetación SIOSE.
52. Distribución de las temperaturas medias en los tipos de vegetación SIOSE.
53. Distribución de las temperaturas máximas y mínimas en los tipos de vegetación SIOSE.
54. Distribución de dos variables bioclimáticas en los tipos de vegetación SIOSE.
55. Distribución de las precipitaciones en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes.
56. Distribución de las temperaturas medias en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes.
57. Distribución de las temperaturas máximas y mínimas en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes.
58. Distribución de dos variables bioclimáticas en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes.
59. Distribución altitudinal de los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes.
60. Vegetación en el sector San Juan de la Peña y Monte Oroel.
61. Distribución de las orientaciones en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes.
62. Distribución de las pendientes en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes.
63. Distribución altitudinal de los estratos de vegetación.
64. Distribución de las orientaciones en los estratos de vegetación.
65. Localización de los perfiles topográficos en el Paisaje Protegido.
66. Corte fitotopográfico del sector del Barranco Carbonera.
67. Corte fitotopográfico del sector del Monasterio de San Juan de la Peña.
68. Corte fitotopográfico del sector del Monte Oroel.
69. Corte fitotopográfico de la solana de Botayuela.
70. Escena del Monte Oroel desde el OSO.
71. Escena del Monte Oroel desde el ESE.
72. Escena del Monte Cuculo desde el ONO.
73. Escena de la Sierra de San Juan de la Peña desde el S.
74. Perspectiva del Paisaje Protegido desde el O.
75. Escena de un sector del bosque de San Juan de la Peña.
76. Delimitación de la zona CLIMPY y su división en macizos.
77. Escenarios RCP.
78. Modelos de precipitación futuros.
79. Posibles distribuciones futuras de la precipitación.

80. Modelos de temperatura máxima futuros.
81. Posibles distribuciones futuras de la temperatura máxima.
82. Modelos de temperatura mínima futuros.
83. Posibles distribuciones futuras de la temperatura mínima.
84. Posibles clasificaciones de Köppen futuras.
85. Posibles clasificaciones de Thornthwaite futuras.
86. Incidencia de los cambios de precipitaciones en la vegetación del Mapa de Paisajes.
87. Incidencia de los cambios de temperaturas máximas en la vegetación del Mapa de Paisajes.
88. Incidencia de los cambios de temperaturas mínimas en la vegetación del Mapa de Paisajes.
89. Distribución actual y futura potencial de dos formaciones vegetales.

Índice de tablas

1. Fuentes de información utilizadas en el Trabajo de Fin de Grado.
2. Aplicaciones utilizadas en el TFG.
3. Estadísticas altitudinales básicas.
4. Extensión superficial de las principales formas del relieve.
5. Reclasificación de orientaciones.
6. Estadísticas climáticas básicas.
7. Series de vegetación.
8. Ocupación de los tipos de vegetación según SIOSE.
9. Ocupación de los tipos de vegetación según el Mapa de Paisajes.
10. Definición de los estratos de vegetación.
11. Abundancia de los estratos de vegetación.
12. Estadísticas forestales.
13. Correlación temperatura-altitud.
14. Anomalías climáticas.

I.

Introducción y objetivos

El presente Trabajo de Fin de Grado pretende analizar las posibles consecuencias que puede tener el cambio climático sobre la vegetación del Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel y el Monumento Natural de los Mallos de Riglos, Agüero y Peña Rueba.

En la Figura 1 se presenta la localización geográfica de la zona de estudio. Esta se sitúa en el Alto Aragón, repartida entre las comarcas de La Jacetania, Hoya de Huesca y Alto Gállego, aunque la inmensa mayoría del territorio se encuentra en la primera. Este es solamente un esquema de localización. En el anexo final (XVII) se puede consultar el BCN25 del área del Paisaje Protegido para todas las referencias topográficas y toponímicas.

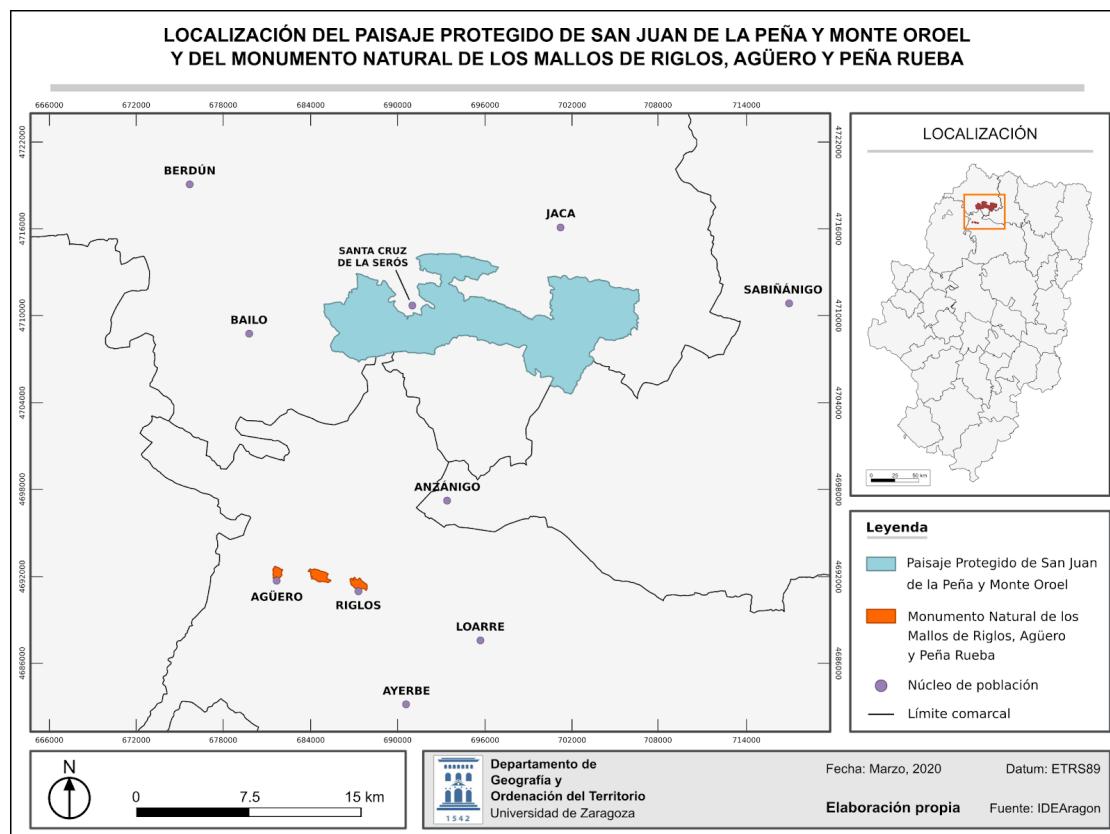


Figura 1. Figuras de protección de los territorios estudiados. Elaboración propia

Este territorio tiene unos altísimos valores, tanto naturales como culturales. En nuestro caso esto resulta más que evidente. El Monasterio de San Juan de la Peña es uno de los lugares más importantes de la historia de Aragón. Su historia se remonta a comienzos del siglo XI, bajo el reinado de Sancho el Mayor. Fue elegido por los reyes aragoneses como sede del panteón de la monarquía, siendo utilizado durante buena parte del siglo XI y comienzos del XII, estando allí enterrados los monarcas Ramiro I, Sancho Ramírez y Pedro I (Gran Enciclopedia Aragonesa [GEA], 2000). Tras el devastador incendio de 1675 se construyó en la Pradera de San Indalecio, en la parte alta de la sierra, el denominado Monasterio Nuevo (Red Natural de Aragón, 2000).

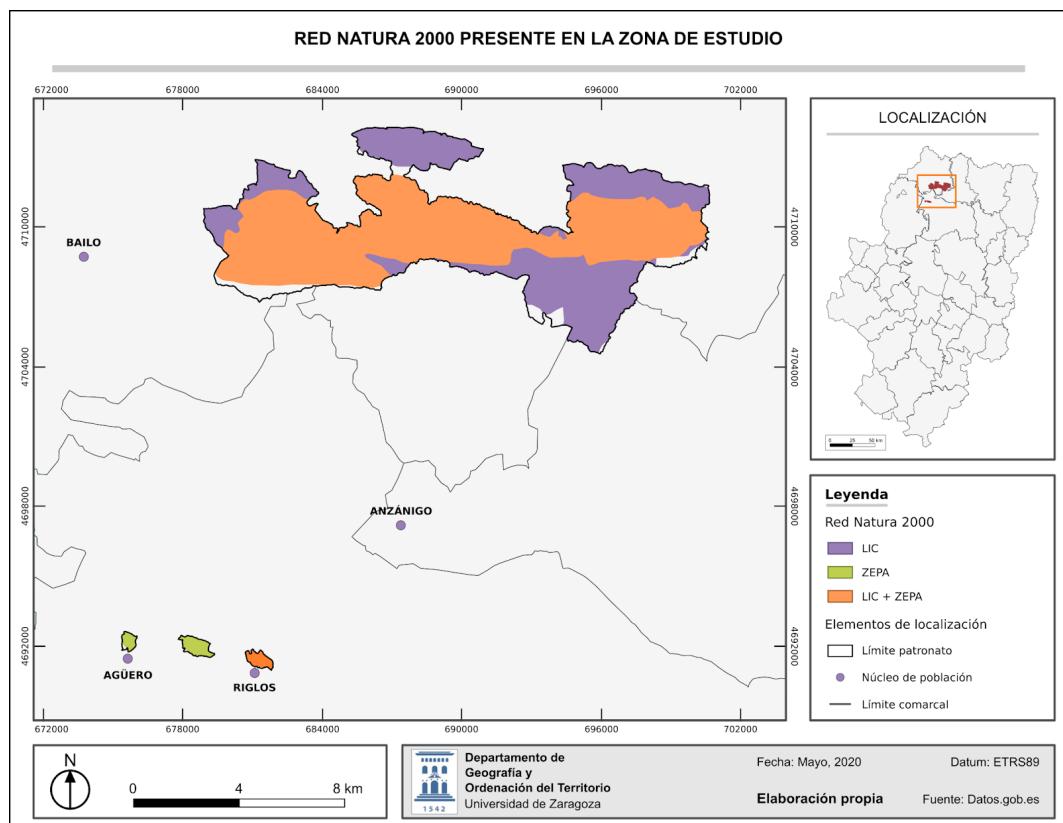
A los valores culturales hay que añadir unos valores naturales extraordinarios, especialmente en cuanto a su vegetación. Esto es objeto de análisis de uno de los apartados de este TFG.

Estos valores naturales y culturales han hecho merecedora a nuestra área de estudio de una larga historia de conservación.

En 1920 el entorno del Monasterio de San Juan de la Peña fue declarado Sitio Natural de Interés Nacional, convirtiéndose en el tercer espacio natural protegido en España, tras el Parque Nacional de Covadonga y el Parque Nacional de Ordesa.

En 1998, la Ley 6/1998, de 19 de mayo, del Gobierno de Aragón, lo reclasificó como Monumento Natural. En aquel momento el espacio contaba con 264 hectáreas de extensión.

En el año 2006 se confirma el LIC *Sierras de San Juan de la Peña y Peña Oroel* y el LIC *Sierras de Santo Domingo y Caballera* (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], s.f.). En la Figura 2 se presenta la localización de los espacios de la Red Natura 2000 en nuestro ámbito de estudio. Además de los LIC incluye Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA).



En el año 2007 el Gobierno de Aragón reclasifica de nuevo el Monumento Natural de San Juan de la Peña y amplía su extensión para incorporar nuevos territorios, declarando así el Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel, que abarca la práctica totalidad del LIC *Sierras de San Juan de la Peña y Peña Oroel*. El espacio pasa a ocupar 9513 hectáreas, repartidas en las tres comarcas citadas anteriormente (Pirineodigital.com, 2008).

Los Paisajes Protegidos, definidos en la Ley 6/1998, de 19 de mayo, de espacios naturales protegidos de Aragón, son *lugares concretos del medio natural merecedores de una protección especial por sus valores naturales, estéticos y culturales* (Noticias.juridicas.com, s.f.). Así que, como ya hemos comentado previamente, parece más que evidente la conveniencia de esta reclasificación.

En 2008 se constituye el Patronato del Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel, en el que están representados los seis municipios incluidos en el espacio protegido, así como muchas otras instituciones y organizaciones sociales (Pirineodigital.com, 2008).

Finalmente, el Gobierno de Aragón en el año 2016 declaró el Monumento Natural de los Mallos de Riglos, Agüero y Peña Rueba (DECRETO 174/2016, de 22 de noviembre). En ese mismo momento se decide que el órgano consultivo y de participación social del espacio sea, junto al Paisaje Protegido, el Patronato del Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel y del Monumento Natural de los Mallos de Riglos, Agüero y Peña Rueba. (D 174/2016, de 22 de noviembre). Según la Ley 6/1998, de 19 de mayo, un Monumento Natural se define como *espacios o elementos de la naturaleza constituidos básicamente por formaciones de notoria singularidad, rareza o belleza, que merecen ser objeto de una protección especial* (Noticias.juridicas.com, s.f.). También en este caso queda claro, en nuestra opinión, que la singularidad y espectacularidad de estas formas del relieve las hacen merecedoras de esta figura de protección.

El cambio climático constituye la mayor amenaza medioambiental a la que se enfrenta la humanidad (<https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/>) y, la comunidad científica internacional, ha subrayado la especial vulnerabilidad y sensibilidad de las áreas de montaña a los impactos del cambio climático (OPCC-CTP.org, s.f. -2-).

Por ese motivo se constituyó en 2010 el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC), que tiene como objetivo realizar un seguimiento y comprender el fenómeno del cambio climático en los Pirineos, para ayudar al territorio a adaptarse a sus impactos (OPCC-CTP.org, s.f. -2-). Uno de sus principales proyectos es el Proyecto CLIMPY, de caracterización de la evolución del clima y provisión de información para la adaptación en los Pirineos (OPCC-CTP.org, s.f. -1-). El presente TFG se enmarca dentro de este proyecto, ya que su director, José María Cuadrat, es el coordinador del mismo y todos los datos climáticos con los que hemos trabajado proceden de su base de datos. En la Figura 3 se puede observar el dominio geográfico del Proyecto CLIMPY y la localización de nuestra zona de estudio en su interior.

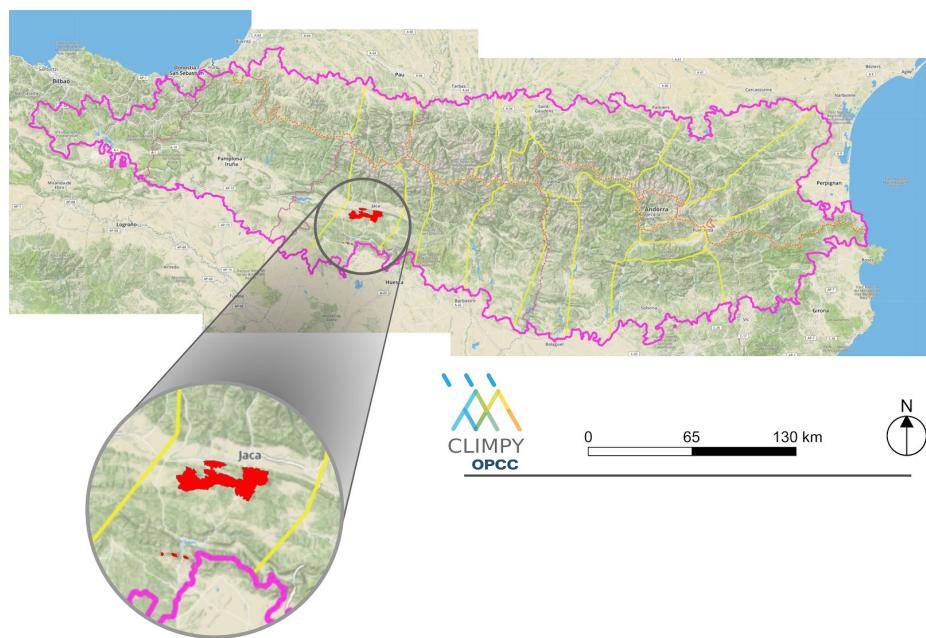


Figura 3. Delimitación de la zona CLIMPY y situación de la zona de estudio. Elaboración propia

Antes de enunciar los objetivos del presente TFG querría hacer una breve referencia a la especial situación en la que se ha desarrollado prácticamente todo el trabajo. El confinamiento en el que hemos vivido con motivo del estado de alarma decretado el 15 de marzo de 2020 por la pandemia de la COVID-19 ha hecho que muchos de los planteamientos metodológicos, e incluso de objetivos previos, se hayan tenido que adaptar. Por ejemplo, nos ha resultado imposible visitar el territorio y, por lo tanto, obtener datos directos importantísimos. Por este motivo, nuestro trabajo ha sido fundamentalmente sobre material cartográfico digital. Los largos momentos de búsqueda de información nos ha permitido descubrir recursos que ni siquiera nos habíamos planteado inicialmente, de modo que nos hemos planteado algunos nuevos objetivos que quizás no habríamos podido ni plantearnos en una situación de actividad normal. Tal vez por ello la extensión del TFG y la abundancia de material gráfico es muy superior al que pudiéramos haber imaginado en principio. Todos los mapas elaborados y presentes en la memoria se pueden observar a mayor tamaño en la sección de anexos.

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo general la caracterización climática y geobotánica del territorio del Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel y del Monumento Natural de los Mallos de Riglos, Agüero y Peña Rueba, dentro de un entorno de cambio climático, con vistas a una posible modelización de sus variaciones en escenarios climáticos futuros. Para alcanzar este objetivo general hemos planteado los siguientes objetivos parciales, todos referidos a la zona de estudio:

1. Describir las características del relieve.
2. Describir las características del clima pasado y actual, con los datos disponibles del Proyecto CLIMPY.
3. Describir las características generales de la vegetación, con las fuentes de información más recientes disponibles.
4. Analizar y documentar las relaciones existentes entre los tres factores anteriores.
5. Analizar y valorar la incidencia del cambio climático, especialmente sobre la vegetación.
6. Explorar nuevas técnicas y herramientas de análisis de la información geográfica.
7. Aplicar las técnicas y conceptos adquiridos durante los estudios de Grado de Geografía y Ordenación del Territorio.
8. Explorar nuevas técnicas y herramientas de análisis de la información geográfica.
9. Plantear posibles líneas futuras de investigación.

II.

Metodología

La metodología de estudio ha sido básicamente la de un proyecto SIG y de análisis estadístico. Los procedimientos que hemos seguido se han adquirido a lo largo de los estudios de grado, fundamentalmente en las asignaturas de *Sistemas de información geográfica, Tratamiento de la información en Geografía, Cartografía temática y Teledetección*, fundamentalmente.

En este apartado explicaremos solamente las líneas generales de la metodología seguida, ya que en las diferentes secciones se explicará más en detalle las mismas.

Una vez que plantemos ya los objetivos principales del trabajo se procedió a un análisis de cuáles serían los productos digitales que necesitaríamos para analizar. Posteriormente se buscaron las fuentes para descargar esa información ya que no podíamos elaborarla nosotros, ni por objetivos, ni mucho menos con la situación de confinamiento. Una vez obtenidos estos ficheros se han introducido en los sistemas de información geográfica utilizados. En este sentido hemos tenido que realizar la reproyección de los ficheros ya que las fuentes eran diversas y no todas presentaban la misma.

En todos los casos se ha procedido a realizar un corte de estos ficheros a los límites de la zona de estudio para circunscribir los análisis al mismo. El análisis vectorial lo hemos utilizado fundamentalmente para el estudio de la vegetación, ya que los ficheros correspondientes se distribuyen en formato shapefile. El análisis más habitual ha sido el de las estadísticas de áreas. El estudio del relieve y el clima se ha realizado con ficheros ráster, ya que tanto el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) como los modelos CLIMPY pertenecen a este modelo de datos. El análisis de las relaciones entre variables se ha hecho prácticamente mediante la técnica de las *estadísticas zonales*. Esta consiste en obtener valores estadísticos de un ráster (p.e. la media) en los polígonos de una capa vectorial (p.e. hayedo).

En el caso del análisis LIDAR se ha desarrollado el Modelo Digital de Superficies (MDS) a partir de los ficheros LAZ descargados. Con el MDS y el MDE se ha obtenido un Modelo Digital de Copas (MDC) de la vegetación, lo que nos ha permitido analizar su estructura vertical y obtener resultados muy interesantes.

Además de obtener datos estadísticos se han realizado múltiples mapas. El análisis visual de los mismos ha sido muy importante a la hora de extraer conclusiones o de indicar líneas de análisis e investigación. En el presente TFG se incluyen un total de 89 figuras y 14 tablas. La confección y el análisis de todas ellas ha supuesto una parte muy importante del trabajo.

Ante la abundancia del material elaborado y analizado hemos enfocado este trabajo más en este sentido que en la búsqueda bibliográfica de información. Esta se ha limitado fundamentalmente a los apartados introductorios y a la búsqueda de formación para el uso de los programas cuyo uso no hemos estudiado durante los estudios del grado.

Las fuentes utilizadas para el presente TFG han sido diversas. En la Tabla 1 se indican todas las fuentes con su dirección de acceso. Con diferencia, las más utilizadas han sido CLIMPY y CNIG.

CLIMPY es uno de los proyectos más importantes del Observatorio Pirenaico de Cambio Climático (OPCC) y nos ha proporcionado los datos que hemos utilizado por dos vías, tanto por medio del geoportal de la página web, como por medio de la dirección de este TFG.

El CNIG es el Centro Nacional de Información Geográfica, dependiente del Instituto Geográfico Nacional y, en su centro de descargas, incluye una cantidad ingente de ficheros digitales que hemos utilizado en prácticamente todos los apartados del TFG.

La tercera fuente más utilizada ha sido IDEAragon (Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón).

Fuente	URL
CLIMPY	https://www.opcc-ctp.org/es/geoportal
CNIG	http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp
IDEAragon	https://idearagon.aragon.es/descargas.jsp
MITECO	https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/default.aspx
SENTINEL	https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home
IGME	http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx
SITEBRO	http://iber.chebro.es/geoportal/
Datos abiertos del Gobierno de España	http://datos.gob.es

Tabla 1. Fuentes de información utilizadas en el TFG. Elaboración propia

Entre las fuentes utilizadas no hemos podido incluir, lamentablemente, fotografías propias. Las fotografías son un elemento fundamental para el estudio de la naturaleza y, de no haber sido por el confinamiento que hemos vivido por la COVID-19. De no haber sido por esta situación habríamos podido hacer alguna excursión al territorio para conocerlo de primera mano y poder obtener material gráfico, tanto a nivel de suelo como mediante un drone, que hubieran sido muy valiosas, no solamente para conocer la vegetación y el relieve, sino para confirmar algunos datos obtenidos de los análisis realizados (p.e. la altura del arbolado obtenido por los modelos LIDAR). Por ese motivo, todo este tipo de material se ha obtenido de otras fuentes.

En la Tabla 2 aparece la lista de todas las aplicaciones que se han utilizado. Todas ellas son software libre. Hemos utilizado este tipo de aplicaciones porque pensamos que, siempre que exista una alternativa de calidad, es más adecuado utilizarlas para reducir los costes económicos en un proyecto de investigación, ya que en muchas de estas aplicaciones las licencias pueden llegar a suponer un coste importante.

Tipo	Aplicación	URL de descarga
SIG	QGIS	https://www.qgis.org/es/site/forusers/download.html
	GRASS	https://grass.osgeo.org/download/
	SAGA	https://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/
Estadística	R	https://cran.rediris.es
Gráficos	Inkscape	https://inkscape.org/es/release/inkscape-1.0/
	LibreOffice	https://es.libreoffice.org/descarga/libreoffice/

Tabla 2. Aplicaciones utilizadas en el TFG. Elaboración propia

Hemos utilizado aplicaciones de tres grupos fundamentalmente: SIG, paquetes estadísticos y aplicaciones gráficas. Lógicamente, las dos primeras han sido durante las fases de análisis, y las últimas para la elaboración de los productos finales y la redacción del informe.

QGIS es un Sistema de Información Geográfica que tiene como principal ventaja el tener un entorno gráfico de uso sencillo. Sin embargo sus capacidades son muy elevadas, sobre todo en el ámbito del formato vectorial. Todos los tipos de análisis que hemos aprendido en la asignatura de SIG con otras aplicaciones los hemos podido hacer sin ningún problema con QGIS. La primera versión es de 2002 y su desarrollo es muy activo debido a que la comunidad de usuarios es muy grande ya que posiblemente sea el SIG libre más utilizado (QGIS, s.f.). Ha sido la herramienta fundamental para todo el análisis espacial y la elaboración de cartografías preliminares, que posteriormente se han procesado con Inkscape.

También se ha utilizado QGIS para las modelizaciones tridimensionales realizadas. Tras comparar sus capacidades con otros sistemas, como por ejemplo el del Google Earth, hemos encontrado el primero mucho más conveniente porque, en primer lugar, nos permite enmascarar la zona de estudio y así limitar a la misma las observaciones. Además, podemos analizar las combinaciones de capas que más nos convienen en cada momento, ya que tenemos control absoluto sobre la información geográfica. A su vez, consideramos que la calidad de los efectos 3D es ligeramente superior a la que tiene Google Earth.

GRASS es un SIG de altas capacidades con muchos años de historia, ya que su primera versión data de 1983 (GRASS GIS, s.f.). Lógicamente, a lo largo de tantos años ha ido evolucionando de una manera constante, desde unos inicios basados en comandos, a un entorno prácticamente gráfico al 100% en la actualidad, lo cual hace más fácil su uso. En nuestro caso hemos utilizado los módulos disponibles desde QGIS, fundamentalmente para el análisis o tratamiento de la información raster, ya que tiene muchas más funciones que las presentes en el menú *Ráster* de QGIS.

SAGA es el acrónimo de *System for Automated Geoscientific Analyses*. Es, en muchos aspectos, similar a GRASS ya que está formado por una gran cantidad de programas modulares que se integran en un entorno único. En nuestro caso lo hemos utilizado solamente para utilizar alguno de estos módulos que no estaban disponibles en GRASS, como el de clasificaciones climáticas y el de las variables bioclimáticas. Como en el caso anterior, se han utilizado módulos de QGIS que acceden a los programas de SAGA.

R es un entorno de programación para el análisis estadístico muy avanzado. Su utilización es bastante compleja porque se basa fundamentalmente en la escritura de comandos. Sin embargo, la documentación y los tutoriales son muy abundantes en internet y, además, existe una aplicación gráfica llamada RStudio que facilita muchas de las tareas de realizar. Se ha utilizado fundamentalmente para el análisis estadístico de los ficheros ráster ya que dispone de un módulo específico para ello y hemos encontrado que tenía muchas ventajas respecto a los análisis que podíamos hacer desde los SIG. Por ejemplo, la realización de los diagramas de caja, que son muy abundantes en esta memoria, son muy sencillos de realizar en R y no hemos encontrado la manera de hacerlos en SIG. También se ha utilizado R para el procesamiento de los datos LIDAR, ya que cuenta con un paquete (*lidR*) que incluye las principales funciones del software LAStools, muy utilizado pero solamente disponible para el sistema operativo Windows.

Inkscape es una aplicación de diseño vectorial de altas capacidades. Nosotros la hemos utilizado en todos los mapas y gráficos que se muestran en este TFG, aunque se hayan realizado en un primer lugar desde un SIG, hoja de cálculo o R, ya que la calidad de sus tipografías, colores, gradientes y su facilidad de uso nos permiten obtener productos finales que son, en nuestra opinión, con una apariencia superior.

LibreOffice es un paquete ofimático que incluye procesador de textos y hojas de cálculos entre otras aplicaciones. En nuestro caso lo hemos usado fundamentalmente para la escritura de la memoria y en algunas ocasiones como hoja de cálculo.

III.

Descripción del medio físico

Estudio del relieve

3.1.1. Fundamentos geológicos

Buena parte de las características naturales de la zona de estudio tienen su explicación en la Historia Geológica que han sufrido en los últimos 65 millones de años. En la Figura 4 se presenta el mapa geológico simplificado en el que aparecen las principales formaciones litológicas y estructuras tectónicas a las que nos referimos en este apartado, para el que hemos seguido, principalmente, la Ruta Geológica Transpirenaica (Ruta Geológica Transpirenaica, s.f.).

Las formaciones geológicas presentes en ella tienen su origen en la Orogenia Alpina, entre finales del Cretácico y el Oligoceno. Durante el Eoceno en este sector se encontraba una amplia cuenca profunda, donde se depositaron potentes series de margas azules que constituyen la Formación Pamplona. Estos son materiales muy blandos y poco resistentes a la erosión. Posteriormente se produjo un progresivo levantamiento del territorio a medida que avanzaba la orogenia, reduciéndose la profundidad del mar. Durante el Oligoceno esto facilitó la formación de deltas y la sedimentación de materiales arenosos que luego se transformarían en areniscas. A finales del Oligoceno, a partir de los grandes relieves pirenaicos los ríos presentes en la zona se generaron amplios depósitos de gravas que formaron conglomerados masivos que reciben el nombre de *molasa* (materiales detriticos depositados en un ambiente tectónico por erosión de los relieves) y que son los últimos materiales en depositarse. De esta manera, encontramos una sucesión vertical de materiales de más blando a más duro, lo cual será decisivo en la formación posterior del relieve. Además, todos los materiales presentes en este sector son detriticos, siendo total la ausencia de las calizas.

A medida que se iban depositando, los materiales fueron deformados por las presiones de la orogenia, ya que la tectónica se extendió durante todo el Eoceno y Oligoceno. Esto ha generado unas direcciones tectónicas claramente pirenaicas (NNW-ESE) que se reflejan en la asociación de varios anticlinales y sinclinales suaves que son los causantes de las claras alineaciones presentes en la zona del Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel (en adelante Paisaje Protegido).

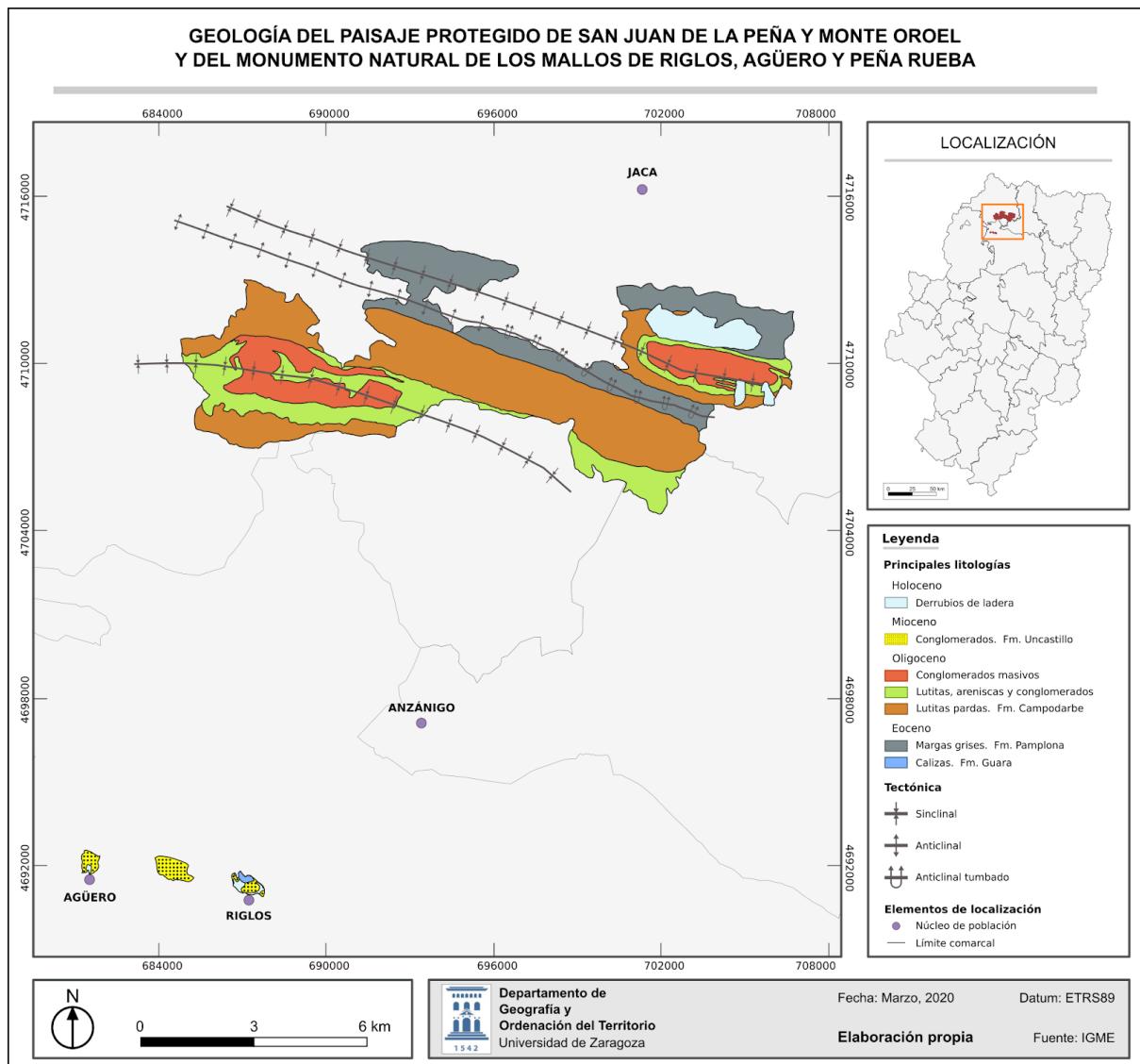


Figura 4. Esquema geológico de la zona de estudio. Elaboración propia

Por su parte, el sector del Monumento Natural de los Mallos de Riglos, Agüero y Peña Rueba (en adelante Monumento Natural) se localiza en un ambiente geológico claramente distinto aunque los materiales son similares. Se encuentra en el frente meridional del Pirineo (Sierras Exteriores), una zona en la que los esfuerzos tectónicos y deformaciones fueron mucho mayores que en la cuenca interna molásica. Por ello, la estructura tectónica es extraordinariamente compleja. Los conglomerados de los mallos (Formación Uncastillo) se depositaron durante el Mioceno, ya en las fases finales de la Orogenia Alpina, en abanicos aluviales al pie de los relieves de las Sierras Exteriores. Por ello sus estratos se encuentran en posición casi horizontal, pero están afectados por un fuerte diaclasado, lo cual determina claramente su relieve, como veremos en breve.

3.1.2. Altitudes y red hidrográfica

Para los resultados de este apartado se ha utilizado el MDE de 5 metros de resolución que proporciona el CNIG y la cartografía vectorial de la Red Hidrográfica a escala 1:25.000 que proporciona el SITEBRO.

El territorio del Paisaje Protegido es claramente montañoso (ver Figura 5), destacando por encima de la depresión de la Canal de Berdún, al norte, y del Gállego, al sur. Se diferencian dos sectores, uno al este del Barranco del Orcal, dominado por la Peña Oroel, que alcanza el punto más alto (1770 m) y otro al oeste de este barranco, con altitudes más bajas, ya que culmina prácticamente 200 m por debajo, en el Pico de Cuculo (1549 m). En adelante nos referiremos a estos sectores como Peña Oroel y San Juan de la Peña, respectivamente.

En el sector del Monumento Natural los contrastes altitudinales son muy importantes debido a las paredes verticales de los mallos y su gran altura. Así, el Puro de Riglos tiene una altitud de 932 m cuando la plaza del pueblo está a 685 m. En el caso de Agüero los desniveles son similares (952 m frente a 680 m).

Debido a las pequeñas dimensiones de la zona de estudio, la red hidráulica tiene poco desarrollo. En el Paisaje Protegido consiste en una serie de barrancos de escaso caudal y multitud de cursos de orden inferior. Su trazado es claramente ortogonal y está controlado por las estructuras tectónicas. Los barrancos más largos, como el Barranco de Pallarón y su continuación en el de Orcal, son paralelos a los ejes de los grandes pliegues aprovechando los materiales menos resistentes hasta que consiguen atravesarlos perpendicularmente (como hace el de Orcal a partir del Corral de la Corona). En algunos casos, como el del Barranco del Rey Moro, cortan los relieves al poco de nacer. En este último caso el ser humano ha aprovechado el trabajo de la naturaleza para establecer la principal vía de comunicación entre el norte y el sur del Paisaje Protegido, ya que por este barranco pasa la carretera que comunica Jaca con Bernués.

Las laderas, especialmente las de solana, están recorridas por pequeños barrancos que bajan perpendiculares a las líneas de cresta. En definitiva, la litología y la tectónica ejercen control en la estructura de la red; podemos encontrar barrancos en dirección pirenaica, organizados según las líneas estructurales (ejes de los pliegues), o perpendiculares a ésta debido a que son zonas con mayor pendiente.

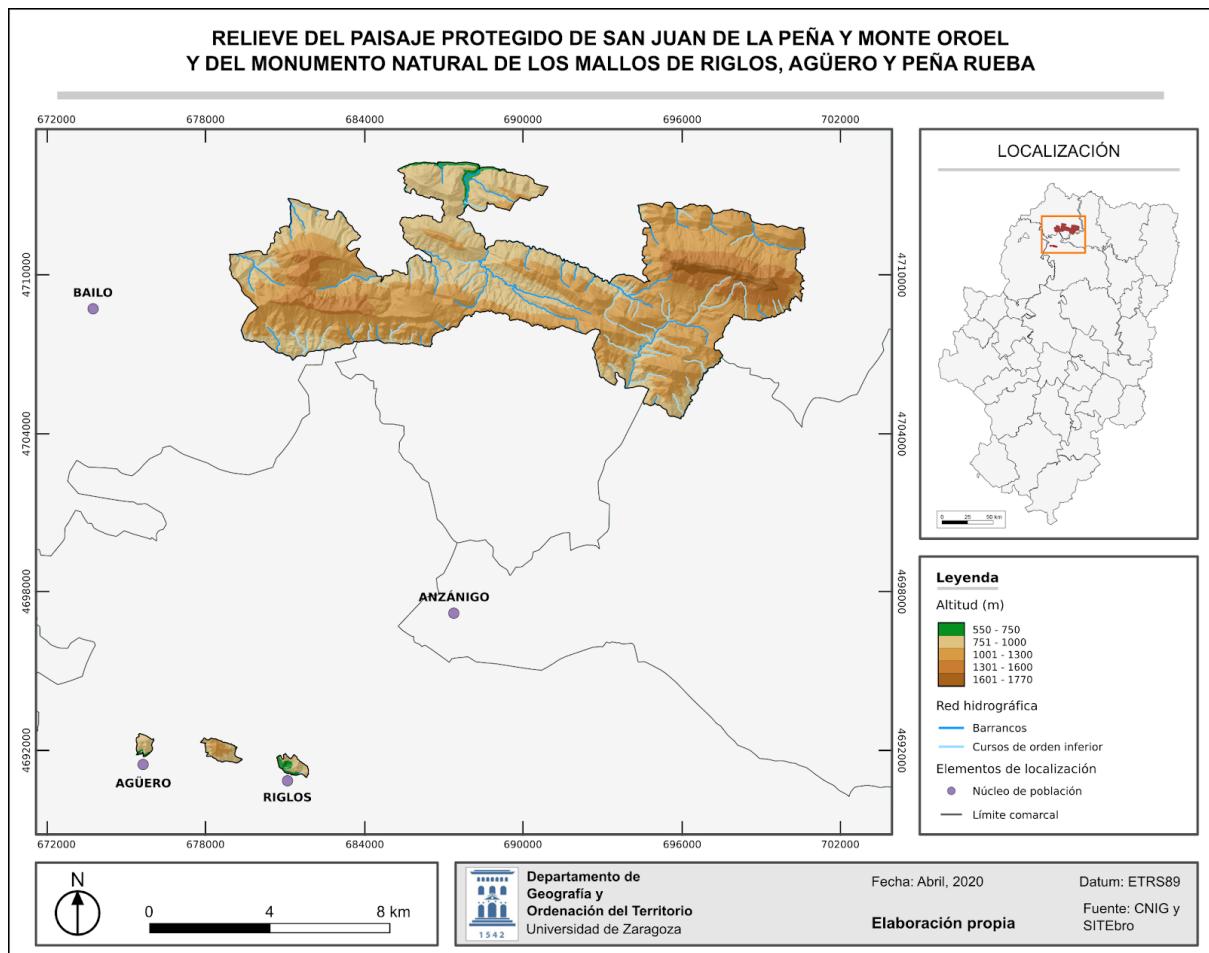


Figura 5. Mapa del relieve. Elaboración propia

En la Figura 6 se presenta el diagrama de caja y el histograma de las altitudes de la zona de estudio. Este es un tipo de gráfico que hemos utilizado muchas veces en este TFG. En él se representa un rectángulo cuya base es el primer cuartil (25%) y el techo es el tercer cuartil (75%). En el interior se localiza una línea que marca la mediana (50%). Por encima y por debajo de la caja se observan unas líneas cuya longitud es 1,5 veces el rango intercuartílico. Siempre se han eliminado, cuando aparecían, los valores atípicos para facilitar su interpretación.

En la Tabla 3 se presentan los valores numéricos. Como puede verse, el rango de altitudes es bastante amplio (1075,5 m), pero el rango intercuartílico es bastante más bajo (219,8 m). En consecuencia, el 50% del territorio se sitúa en una altitud entre los 950,4 m y los 1170,2 m, que podemos considerar de media montaña. La clase modal se sitúa entre los 1000 y los 1100 m de altitud y las frecuencias disminuyen de manera gradual hacia ambos lados, más bruscamente hacia las altitudes más bajas, pero con una distribución estadísticamente normal.

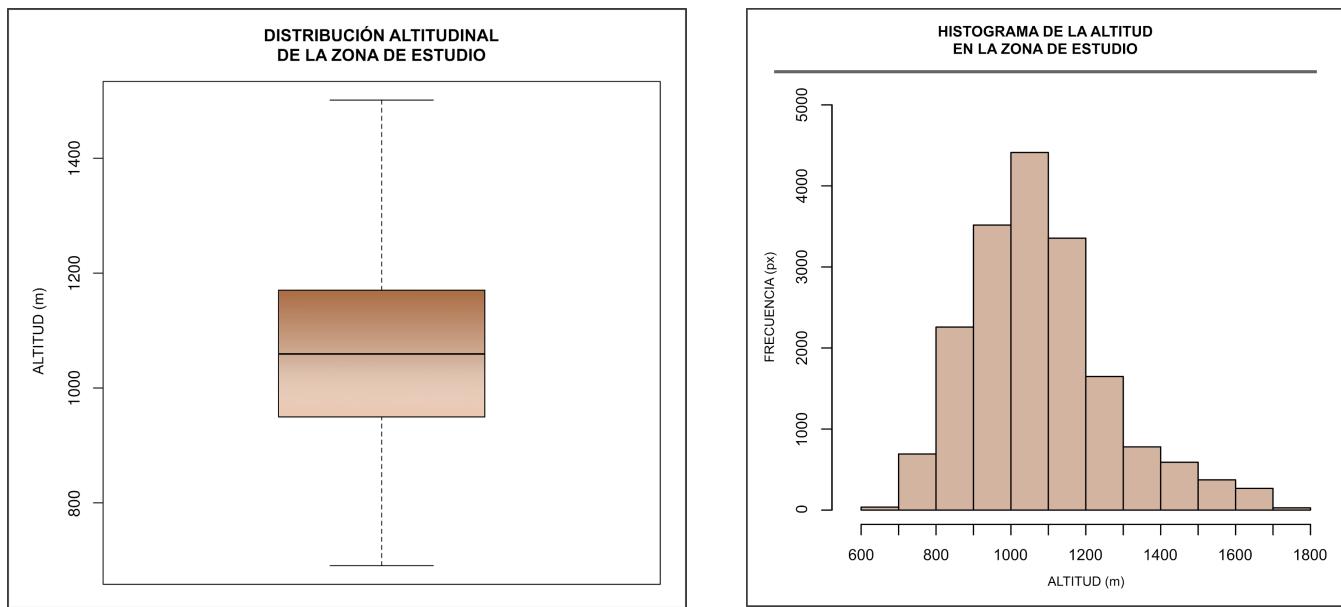


Figura 6. Distribución de altitudes. Elaboración propia

Estadístico	Altitud (m)
Mínima	692,8
Máxima	1768,3
Media	1075,6
Q1	950,4
Q3	1170,2
Mediana	1058,9

Tabla 3. Estadísticas altitudinales básicas.
Elaboración propia

Estas altitudes son relativamente modestas, más si las comparamos con las que hay pocos kilómetros al norte, en las zonas centrales del Pirineo, pero hay que tener en cuenta las altitudes colindantes (p.e. Santa Cruz de la Serós se encuentra a 824 m), lo que hace que el relieve sea imponente en muchas zonas. Esto genera gradientes altitudinales muy importantes, lo cual introduce cambios en el clima y la vegetación muy importantes, como veremos más adelante.

3.1.3. Geomorfología

El relieve de nuestro territorio tiene un clarísimo control litológico y estructural. El mapa geomorfológico de la Figura 7 se ha obtenido de manera automática del Modelo Digital de Elevaciones con el SIG GRASS, mediante un algoritmo que compara la distribución de los valores de altitud que rodean a un píxel central en un proceso que recorre todo MDE. Por ejemplo, si todos esos valores fueran muy similares al central, clasificaría ese píxel como llano; si fueran muy diferentes y situados por debajo lo consideraría un pico.

Como puede verse en ella (datos en la Tabla 4), la mayor parte del área de estudio está dominada por las laderas, que ocupan el 60,1% del territorio. Estas laderas están surcadas por gran número de vallonadas separadas por divisorias relativamente suaves. Esto hace que estas dos sean las formas del relieve más frecuentes tras las laderas con un 14,37% y 16,75%, respectivamente. Cabe destacar que las crestas, al ser elementos lineales, no presentan grandes superficies, pero sin duda son de importancia en la zona de estudio ya que ejercen de divisorias de aguas. Exactamente lo mismo ocurre con los valles. El carácter claramente montañoso y de relieve energético queda claramente destacado al analizar la extensión de las zonas llanas, que sólo ocupan el 0,02% del territorio.

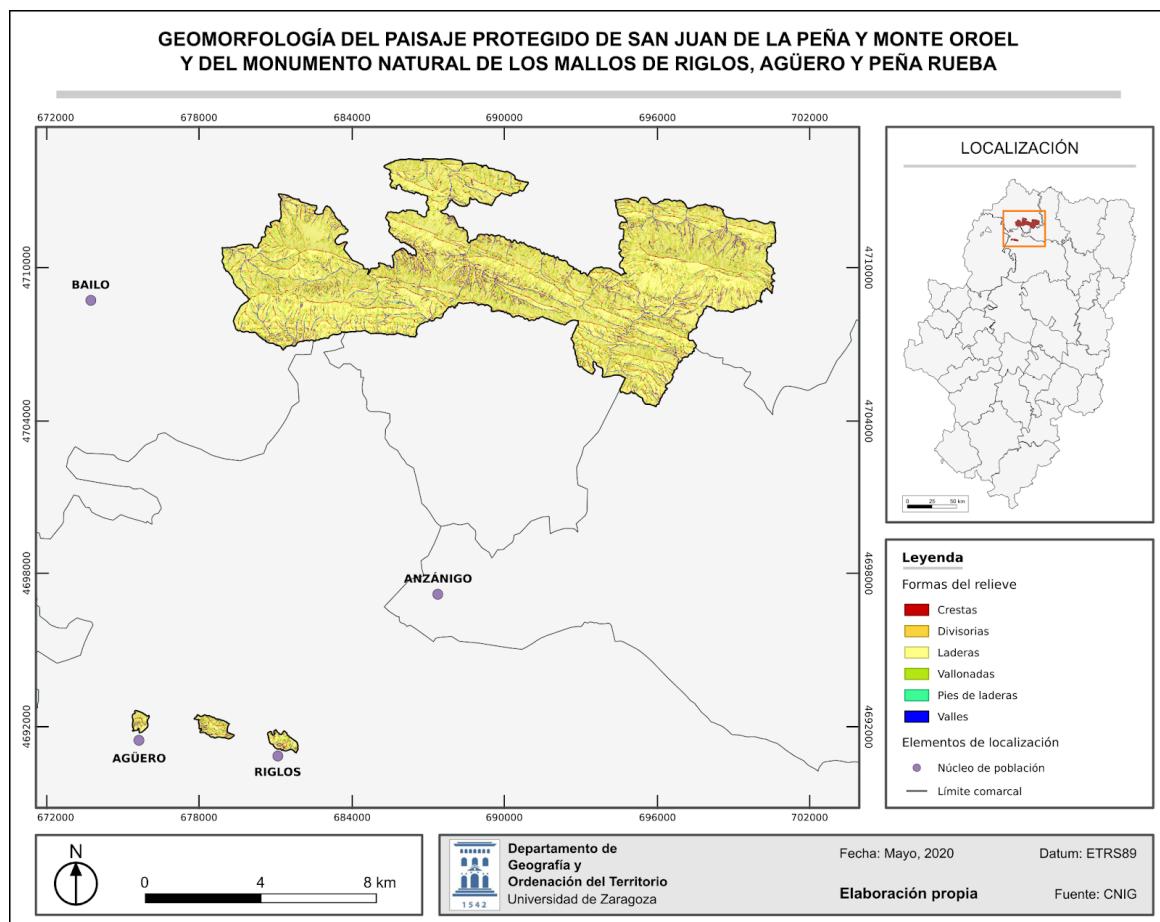


Figura 7. Formas del relieve de la zona de estudio. Elaboración propia

Forma del relieve	Superficie (km ²)	%
Laderas	58.3	60.10
Divisorias	16.3	16.75
Vallonadas	13.9	14.37
Valles	3.8	3.93
Crestas	3.3	3.38
Pies de laderas	0.8	0.86
Picos	0.2	0.24
Hombreras	0.2	0.19
Depresiones	0.2	0.16
Zonas llanas	0.02	0.02

Tabla 4. Extensión superficial de las principales formas del relieve. Elaboración propia

La red fluvial está poco desarrollada, pero los barrancos que inciden en las laderas, principalmente en las de solana, forman vallonadas e interfluvios que, en conjunto, constituyen la segunda forma del relieve más extendida (14.37% y 16,75% respectivamente). Otros barrancos aprovechan las litologías más blandas (arcillas) y generan pequeños valles, como por ejemplo el del Barranco de Pallarón.

Sin embargo, aún con el escaso desarrollo de la red fluvial actual, el origen del relieve es fundamentalmente fluvial, ya que se puede considerar que es el resultado del vaciado erosivo de los materiales más blandos situados al norte y al sur por parte de los ríos Aragón y Gállego, respectivamente. La mayor competencia de los conglomerados es la responsable de la posición elevada del territorio del Paisaje Protegido (Figura 8).



Figura 8. Vista del Monte Oroel desde el oeste. Autor: Miguel López Araus (Flickr)

Una de las características geomorfológicas más destacables es la presencia de un relieve invertido, debido a la presencia de un sinclinal formado por conglomerados masivos coronando los relieves (Figura 9). La aparición de este sinclinal colgado se debe justamente a la naturaleza resistente de los conglomerados, que permite su resalte topográfico. Esto genera frecuentes relieves en cuesta en el Paisaje Protegido, pero que resultan espectaculares en lo alto del Monte Oroel.

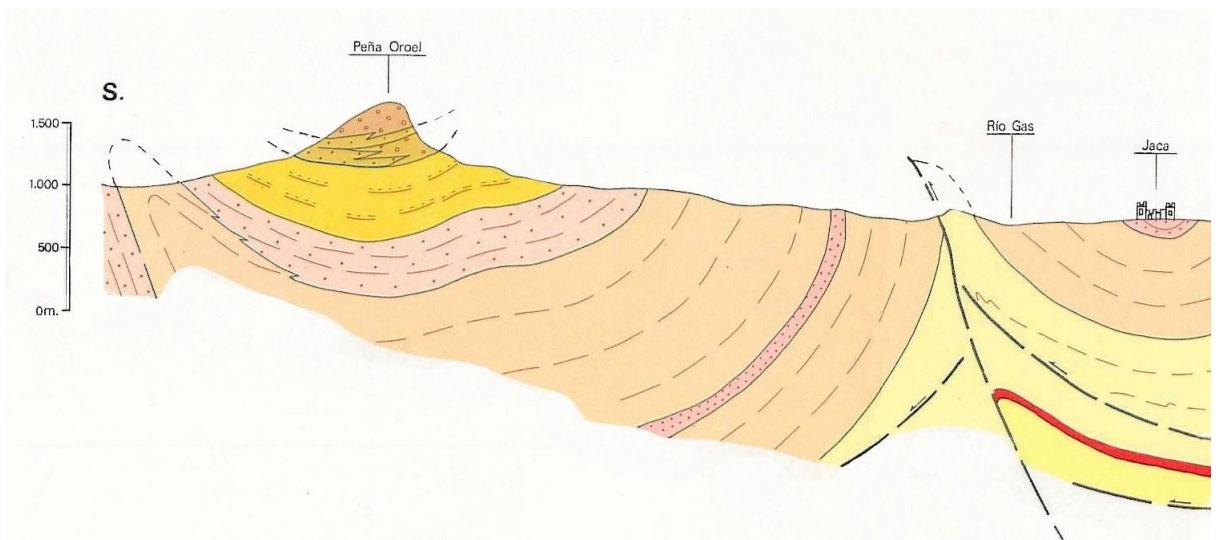


Figura 9. Corte geológico a través del Monte Oroel. Fuente: Magna, hoja 176

La otra es la presencia de imponentes escarpes en el contacto entre los conglomerados masivos y las formaciones inferiores que presentan intercalaciones con lutitas. En estas últimas son habituales los procesos de erosión diferencial, que generan abrigos. Estos han sido utilizados desde tiempos desde la antigüedad como lo demuestra el emplazamiento del Monasterio viejo de San Juan de la Peña.

Cabe destacar que, debido a la ausencia de materiales calizos en la zona de estudio, los relieves kársticos, que son muy importantes en otros sectores del dominio pirenaico (p.e. en las Sierras Interiores) son muy escasos. Sólo en la parte alta de la Peña Oroel, debido a la naturaleza carbonatada de los conglomerados y la escasa pendiente encontramos fenómenos de karstificación (WAA, 2009).

Por su parte, las formas del relieve características del Monumento Natural, los mallos, son, en palabras de María Teresa Echeverría y Francisco Pellicer, *las ruinas de antiguos conos de deyección, cuya morfología actual poco o nada tiene que ver con la disposición original* (Pellicer y Echeverría, 1989). A pesar de que su estratificación es casi horizontal presentan paredes verticales debido a que están fuertemente afectados por una red de diaclasas en enrejado. Estas fracturas son zonas de debilidad por las que se han ido erosionando hasta generar los paredones verticales característicos de este Monumento Natural que hacen de ellos un reclamo para los escaladores y las aves rupícolas, y los hace merecedores de ser un Monumento Natural (Figura 10).



Figura 10. Vista de los Mallos de Riglos. Fuente: heraldo.es

3.1.4. Pendientes y orientaciones

En el apartado anterior hemos visto que la forma del relieve más abundante en nuestro territorio son las laderas, en este apartado vamos analizar cuáles son sus pendientes y sus orientaciones, ya que ambas tienen una gran importancia sobre los posibles microclimas, la vegetación, la humedad del suelo, posibilidades de asentamientos y explotaciones humanas...

En la Figura 11 encontramos el mapa de pendientes de la zona de estudio. A simple vista destaca la presencia de grandes escarpes por debajo de los sinclinales colgados de la Peña Oroel y San Juan de la Peña y, lógicamente, en los mallos del Monumento Natural. También se pueden observar las alineaciones tectónicas pirenaicas. La mayor parte del territorio presenta pendientes relativamente elevadas, por lo que podemos decir que el relieve es abrupto y, localmente, muy energético. Las zonas más elevadas y las más bajas presentan pendientes más suaves debido a que coinciden con los ejes de los pliegues y con materiales más arcillosos, lo que demuestra el control litológico que presentan las pendientes.

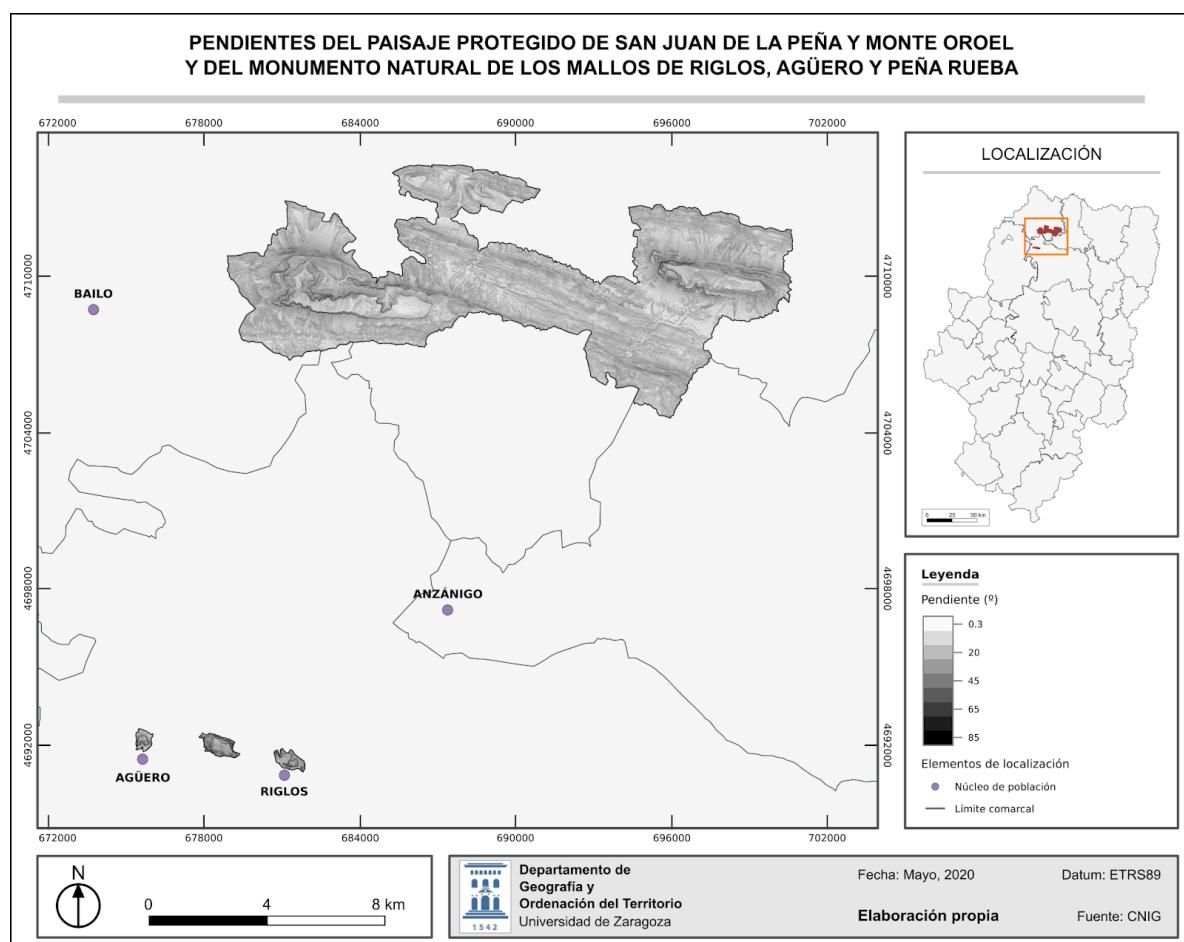


Figura 11. Mapa de pendientes. Elaboración propia

En la Figura 12 se presenta el diagrama de caja y el histograma de las pendientes, cuyo comentario es muy similar al de las altitudes, con un amplio rango, pero un rango intercuartílico mucho más reducido. Se ve claramente en el histograma el sesgo que introducen los fuertes escarpes con pendientes superiores a los 50° y que pueden alcanzar incluso la verticalidad. Sin embargo, las zonas con escasa pendiente son reducidas y pasan muy rápidamente a zonas de mayor pendiente. La moda se sitúa entre 20° y 25° , y la mitad del territorio tiene pendientes entre $8,2^\circ$ y $15,7^\circ$. La Memoria técnica de los Tipos de Paisaje de la comarca de La Jacetania clasifica las laderas en tres grupos en función de su pendiente, considerándose suaves cuando tienen menos de 10° , muy pendientes cuando están entre 10° y 50° y escarpes cuando tienen más de 50° (VVAA, 2009). Hemos seguido esta clasificación para colorear el histograma, que confirma claramente que el relieve del territorio es muy abrupto, con un 63,3% del territorio situado por encima de los 10° . Las laderas suaves suponen el 36,7%. Es destacable que, desde el punto de vista de la superficie, los escarpes suponen tan solo el 0,3% de la superficie. Esto es lógico ya que son zonas muy verticalizadas pero su importancia paisajística es muy superior a su extensión superficial.

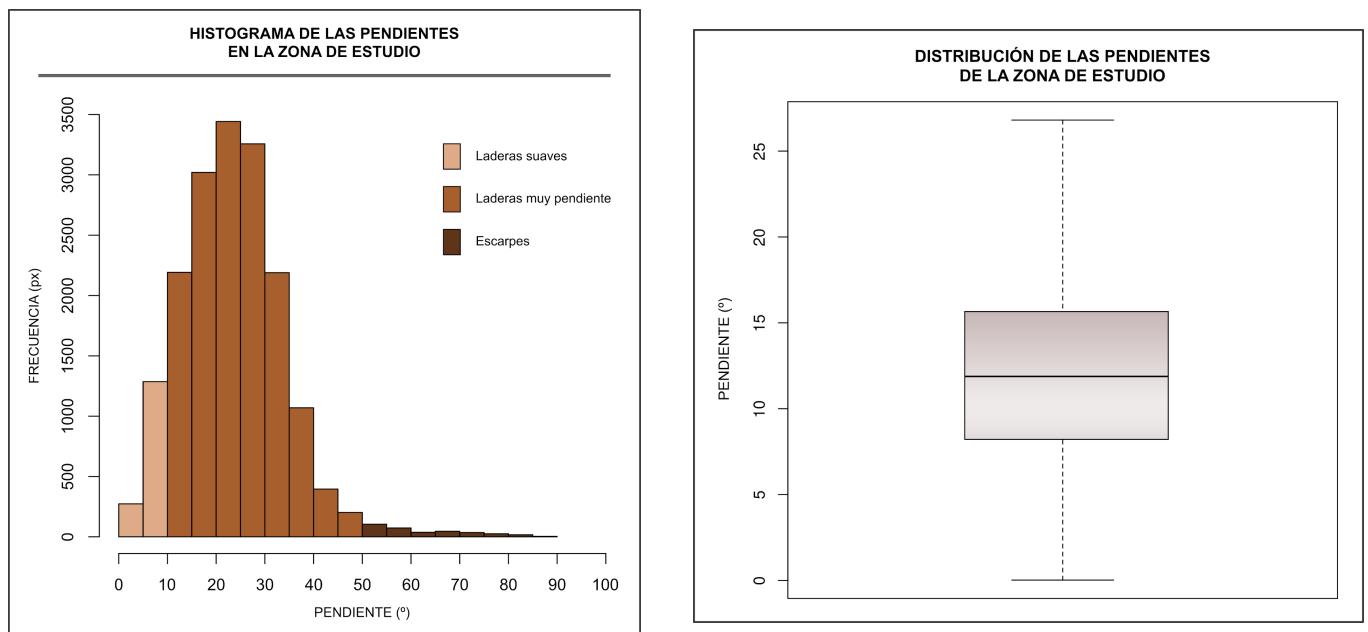


Figura 12. Distribución de pendientes. Elaboración propia

Además de la pendiente, la orientación es un factor importantísimo porque determina la insolación que va a recibir una ladera. Las Figuras 13 y 14 nos permiten analizar en detalle esta importante variable.

Hemos clasificado las orientaciones en cuatro sectores siguiendo el criterio que aparece en la Tabla 5.

Orientación reclasificada	Rumbo (N = 0°)
N	315 - 45
E	45 - 135
S	135 - 225
W	225 - 315

Tabla 5. Reclasificación de orientaciones. Elaboración propia

El mapa nos permite ver de nuevo el control estructural que impone la geología del territorio, con grandes laderas con orientación N (umbrías) y otras de orientación sur (solanas). Separando unas de otras se encuentran las crestas y los valles que pudimos observar en el mapa geomorfológico.

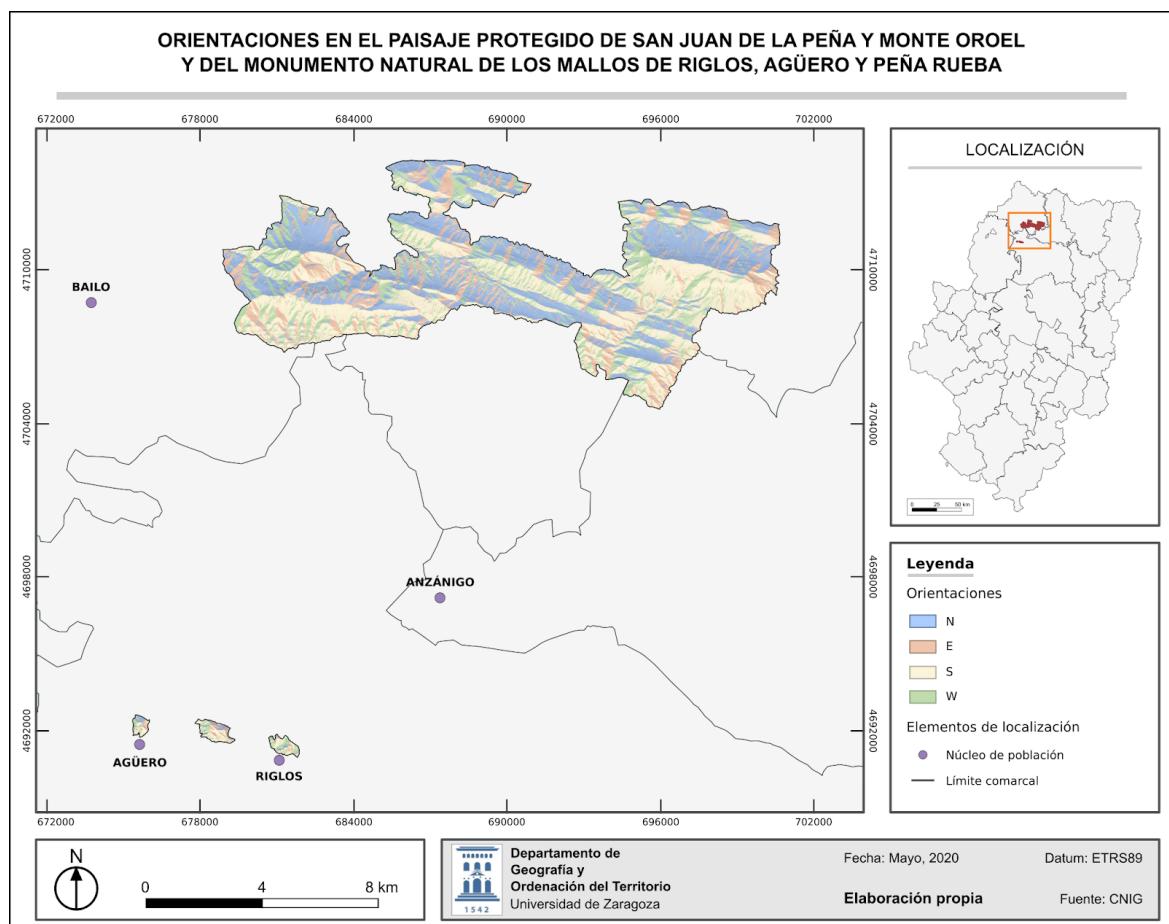


Figura 13. Mapa de orientaciones. Elaboración propia

En el histograma se ve claramente cómo predominan las orientaciones hacia el Noreste, con las dos clases predominantes situadas entre los 0° y los 30° . Lo mismo se observa en las solanas, con la clase modal situada entre los 195° y los 210° . En el diagrama de sectores manifiesta claramente que predominan las orientaciones de umbría sobre las de solana y que las laderas orientadas al levante y al poniente son mucho menos frecuentes, aunque, entre ellas, predomina ligeramente las segundas.

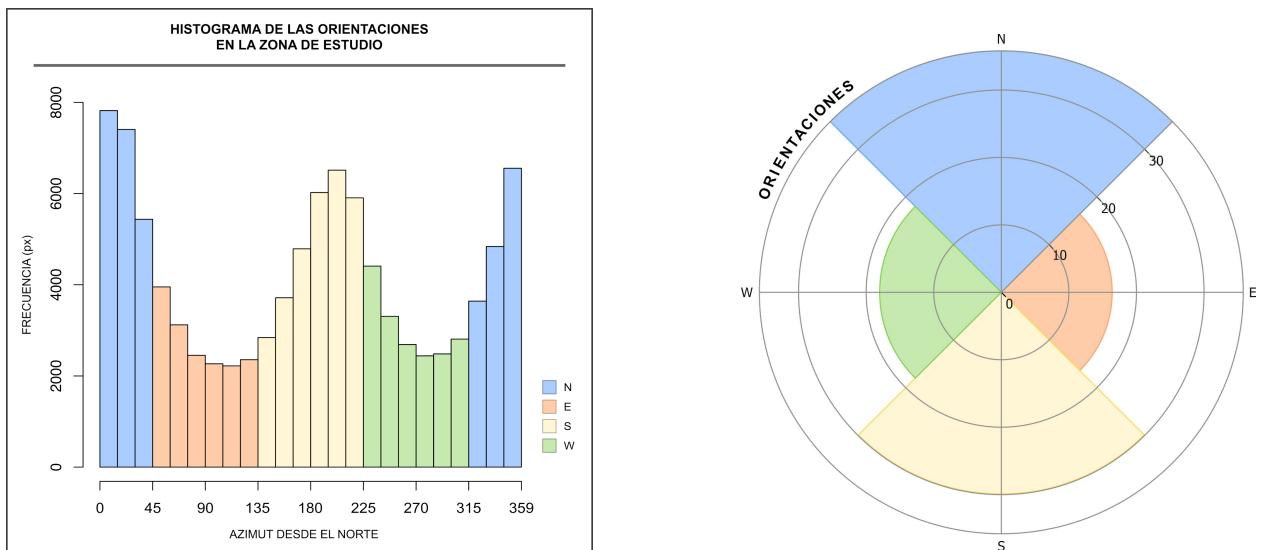


Figura 14. Distribución de orientaciones. Elaboración propia

Como veremos en un apartado posterior, esta distribución de orientaciones resulta clave para comprender la distribución de la vegetación, ya que las laderas orientadas al Sur tienen muchas más horas y mayor potencia de radiación solar que las orientadas al Norte (Figura 15). Posiblemente en un relieve orientado N-S los contrastes serían mucho menores.



Figura 15. Efecto solana-umbría en la cresta del Monte Oroel.
Fuente: Google Earth

Estudio del clima

3.2.1. Introducción

En palabras de Gómez (2004) *la Jacetania, por su situación geográfica, tiene un clima caracterizado por la transición de lo mediterráneo y lo subcantábrico, con matices de continentalidad*. Esto se explica por la cercanía al Mar Cantábrico, la influencia continental de la Meseta Ibérica y del Sobrarbe. Sin embargo, “estas influencias resultan matizadas por los factores del relieve”, lo que le da una elevada heterogeneidad climática que “resta valor a las medidas con que habitualmente se trabaja en Climatología” (Villar, 1982). Estos factores del relieve son importantísimos para explicar los contrastes climáticos que pueden observarse, tanto en el espacio (altitudes, orientaciones...) como en el tiempo (estacionales, interanuales...) (Pedrochi, 1987).

Creus (1977) hace un estudio detallado de los *estados del tiempo* en el Alto Aragón Occidental, reconociendo diferentes situaciones atmosféricas que se repiten a lo largo de las estaciones del año. Documenta que hay un claro predominio de las lluvias asociadas a flujos provenientes del O y NO, ya que más del 50% de las precipitaciones en la zona las proporcionan dichos flujos. El resto de las precipitaciones se reparte de una manera bastante equilibrada en el resto de las direcciones. En la Figura 16 se pueden observar dos situaciones típicas de lluvias de invierno, a la izquierda en condiciones de *frío* (las que más lluvia aportan) y, en la de la derecha, en situaciones *mucho frío*.

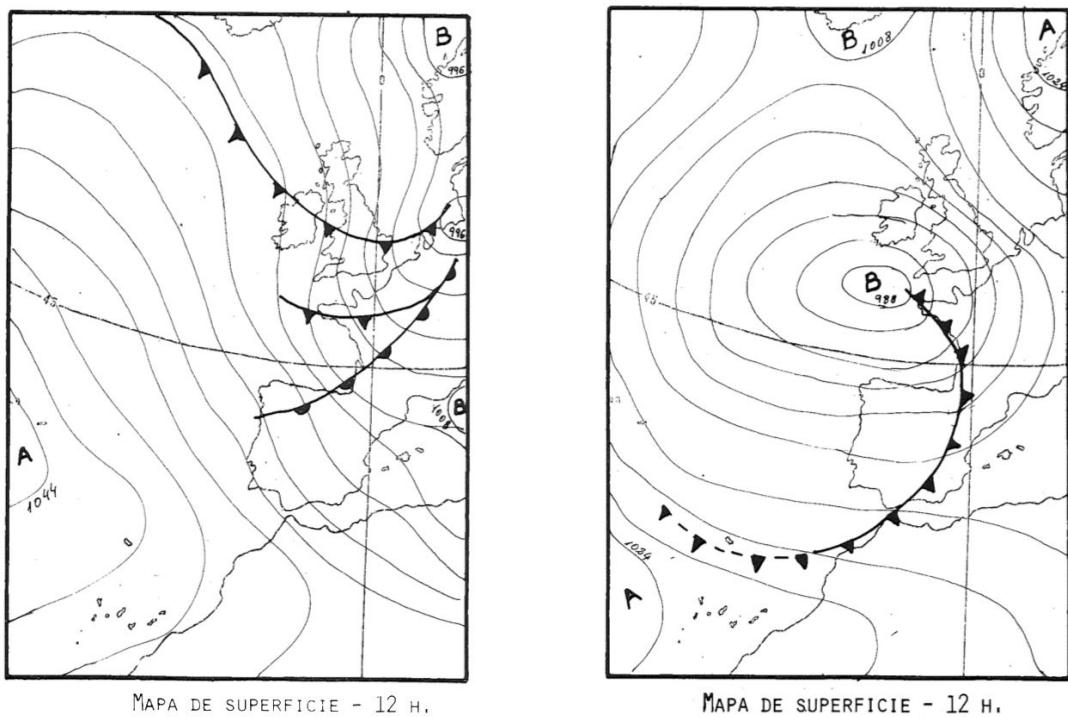


Figura 16. Tipos de tiempo de invierno. Fuente: Creus (1977)

Esto explica que se observe un claro gradiente desde el oeste hacia el este en el territorio, desde unas condiciones con temperaturas más suaves y estables en el sector occidental, hasta unas condiciones más continentales en las zonas orientales (Villar, 1982).

La presencia de situaciones anticiclónicas, especialmente durante el invierno, dificulta la entrada de estos flujos, lo cual determina que las condiciones adquieran un carácter mediterráneo. Esto se traduce en una modificación del carácter general del clima en años diferentes (Pedrocchi, 1987).

A modo de síntesis climática, Montserrat (1971) reconoce tres climas en esta zona: el submediterráneo continental, caracterizado por máximos pluviométricos en primavera y una fuerte sequía estival e invernal, el subcantábrico montano, en el que la sequía estival es mucho menos acusada y con menores contrastes térmicos y, finalmente, un clima controlado por la posición topográfica, el mediterráneo orófito, con características similares al submediterráneo continental pero con un verano más corto y un periodo seco muy intenso.

En el sector concreto de la zona de estudio, es decir, las *sierras de la molasa*, también se observa el citado gradiente climático oeste-este. Las aportaciones de precipitaciones de diciembre-enero son relativamente bajas, lo que parece indicar que los vientos procedentes del Cantábrico no penetran tanto en estas sierras como en la Depresión Media y en el Pirineo axial, de modo que, tan solo las umbrías elevadas o en localidades occidentales bien expuesta hacia el NO, reciben precipitaciones algo superiores a las normales (Pedrocchi, 1987). Aún así, la Sierra de San Juan de la Peña y del Monte Oroel presentan un carácter cantábrico incluso en aquellos años en los que el carácter general de la zona se sitúa en un punto intermedio entre los extremos cantábrico y mediterráneo ya comentados (Villar, 1982).

Todos estos estudios históricos sobre el clima del Pirineo son los antecedentes del proyecto más ambicioso y completo de caracterización climática de nuestra cadena montañosa, que se realizan en el marco del proyecto *Caracterización de la evolución del clima y provisión de información para la adaptación en los Pirineos* (en adelante CLIMPY). El objetivo general de este proyecto es "completar el conocimiento del clima pasado/presente/futuro en los Pirineos desde la perspectiva de la adaptación al cambio climático" (CLIMPY, s.f.). Este se pretende alcanzar mediante una serie de objetivos específicos que son los siguientes:

1. Creación de una amplia base de datos de temperatura y precipitación.
2. Creación de una base de datos de la cubierta de nieve.
3. Diseño de unos indicadores climáticos para el seguimiento del clima de los Pirineos.
4. Realización de proyecciones climáticas para los Pirineos con base en los escenarios del IPCC.
5. Apoyo al geoportal del proyecto OPCC-2 para incluir la mayor parte de la información obtenida y hacerla disponible para los usuarios.

Para el presente TFG son especialmente importantes los objetivos 1, 4 y 5. En el caso de la base de datos de temperatura y precipitación, se ha hecho especial hincapié en el control de la calidad de los datos y su homogeneidad, ya que el número de estaciones utilizado es muy elevado (660 estaciones con datos de precipitación y 493 con datos de temperatura).

El trabajo de homogeneización de las series climáticas es fundamental para asegurarnos de que cualquier cambio o tendencia observada en la serie sea una respuesta directa a la evolución del clima y no de aspectos externos no climáticos (p.e. cambios de emplazamiento, de instrumentación...). Para el control de calidad y homogeneización se ha empleado el método *HOMER*, que incorpora los últimos métodos y técnicas de gestión de datos, de modo que las series finales proporcionan datos homogeneizados para analizar la evolución del clima y el comportamiento climático del conjunto del Pirineo (Cuadrat et al, 2013).

Uno de los principales problemas para la correcta caracterización climática es la desigual distribución de estas estaciones, como puede observarse en los mapas de la Figura 17.

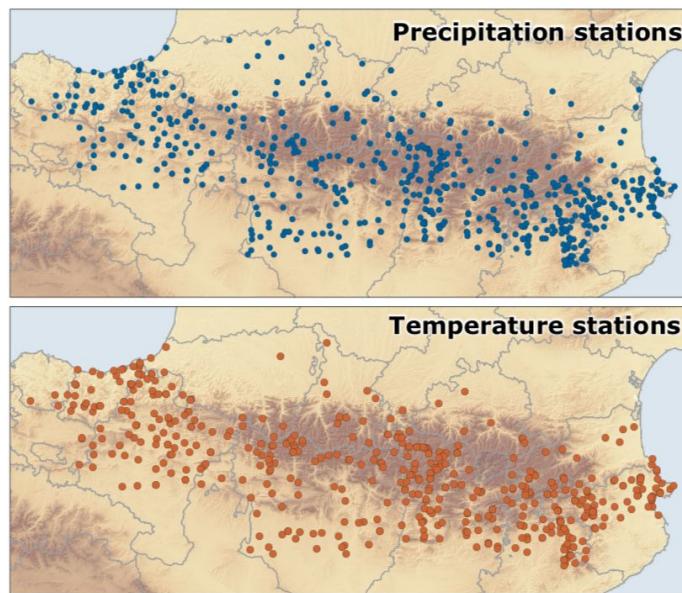


Figura 17. Localización de las estaciones de precipitación y temperatura que han sido utilizadas en el Proyecto CLIMPY. Fuente: Serrano et al, 2017

Nuestra zona de estudio, en concreto, no presenta ninguna estación de la AEMET (Figura 18). Las más próximas se sitúan en Jaca, al norte; Bailo, al oeste, y Bernúes, al sur.

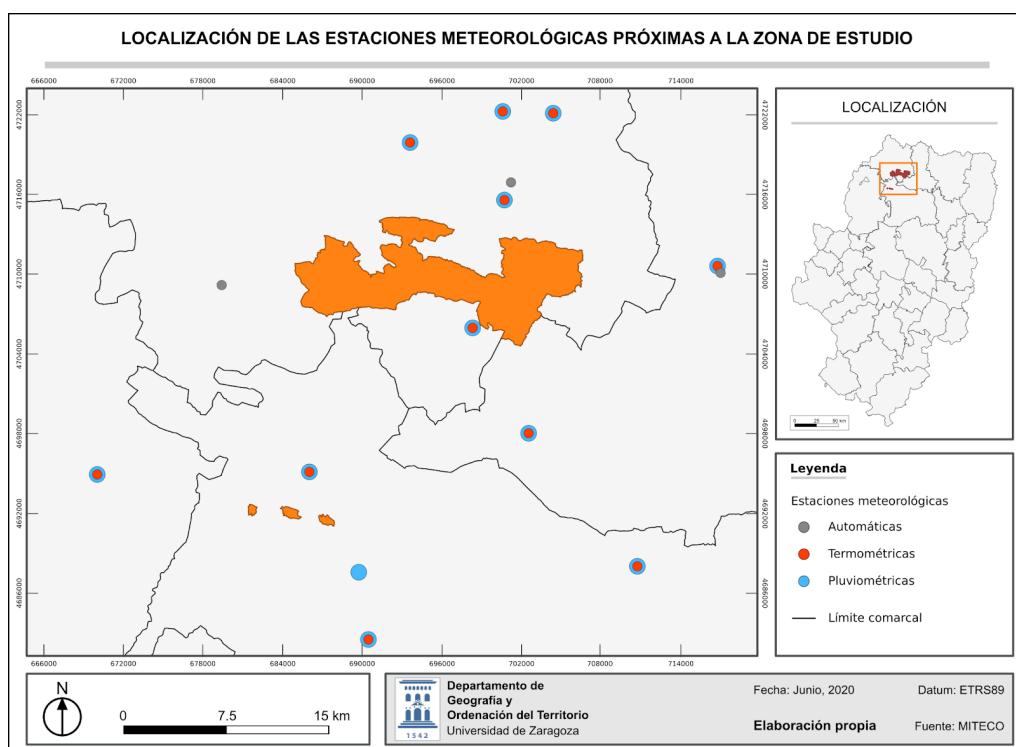


Figura 18. Localización de las estaciones meteorológicas próximas a la zona de estudio. Elaboración propia

Además del problema de la distribución geográfica de las estaciones meteorológicas, hay un problema en su reparto altitudinal, ya que estas son mucho menos frecuentes en las zonas más altas del Pirineo. Además, tenemos un problema de la calidad de las series de datos en estas estaciones, ya que, por ejemplo, en el rango altitudinal en el que se encuentra nuestro territorio (750-2000 m) tenemos 23 series disponibles, de las cuales, 13 tienen una calidad débil y ninguna la tiene muy buena (Cuadrat et al, 2013).

Después de las tareas de control de calidad y homogeneización de las series, se obtienen por interpolación ficheros raster de 1x1 km de resolución diarios de temperatura máxima, mínima, media y precipitación para todo el territorio pirenaico y para el periodo 1981-2015, que permiten la caracterización climática más correcta que se ha podido hacer jamás del Pirineo.

Además de caracterizar la situación del clima pasado y presente del Pirineo, el proyecto CLIMPY tiene como objetivo realizar proyecciones del clima futuro en un contexto de cambio climático. Estas se han realizado de manera conjunta, y con la misma metodología, entre la Agencia Estatal de Meteorología española (AEMET) y su equivalente francesa (Météo-France).

El presente apartado del TFG intenta analizar el clima pasado y actual del área de estudio. Las proyecciones futuras se analizarán en el apartado 5.

3.2.2. Características generales

En la Tabla 6 y en los gráficos de caja de la Figura 19 se presentan los valores de las principales variables climáticas en la zona de estudio. En todos los casos se observa un rango elevado. Esto se corresponde con el relieve del territorio, con grandes diferencias altitudinales. Así, en el caso de las P, encontramos desde los 496 mm anuales hasta casi 1760 mm. En el caso de las temperaturas, las que tienen mayor rango son las máximas (6,1 °C), que contrasta con el de las mínimas (4,4 °C), lo cual puede deberse a los fenómenos de inversión térmica durante el invierno, con nieblas y heladas en las zonas más bajas del territorio.

A pesar de estos rangos tan amplios, los rangos intercuartílicos son bastante menores. En el caso de la P, el 50% del territorio presenta unos valores situados entre 829 mm y 1138,1 mm anuales, lo que podemos considerar valores bastante elevados (en Jaca, 779 mm -Climate-Data.org, s.f.-). Si nos fijamos en las temperaturas medias, se sitúan entre 9,9 °C y 13,3 °C, lo que podemos considerar como templadas. En el caso de las máximas, son bastante elevadas para la altitud de la zona, mientras que las mínimas son bajas, lo que es lógico justamente por lo mismo.

Estadístico	Precipitación (mm)	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
Máxima	1759,4	13,3	19,3	7,3
Mínima	496,5	8,6	13,1	2,9
Rango	1262,9	4,7	6,1	4,4
Media	1015,5	10,3	15,6	5,0
Q1	829,0	9,9	15,0	4,8
Q3	1138,1	13,3	16,2	5,4
Mediana	1017,8	10,9	15,4	5,1

Tabla 6. Estadísticas climáticas básicas. Elaboración propia

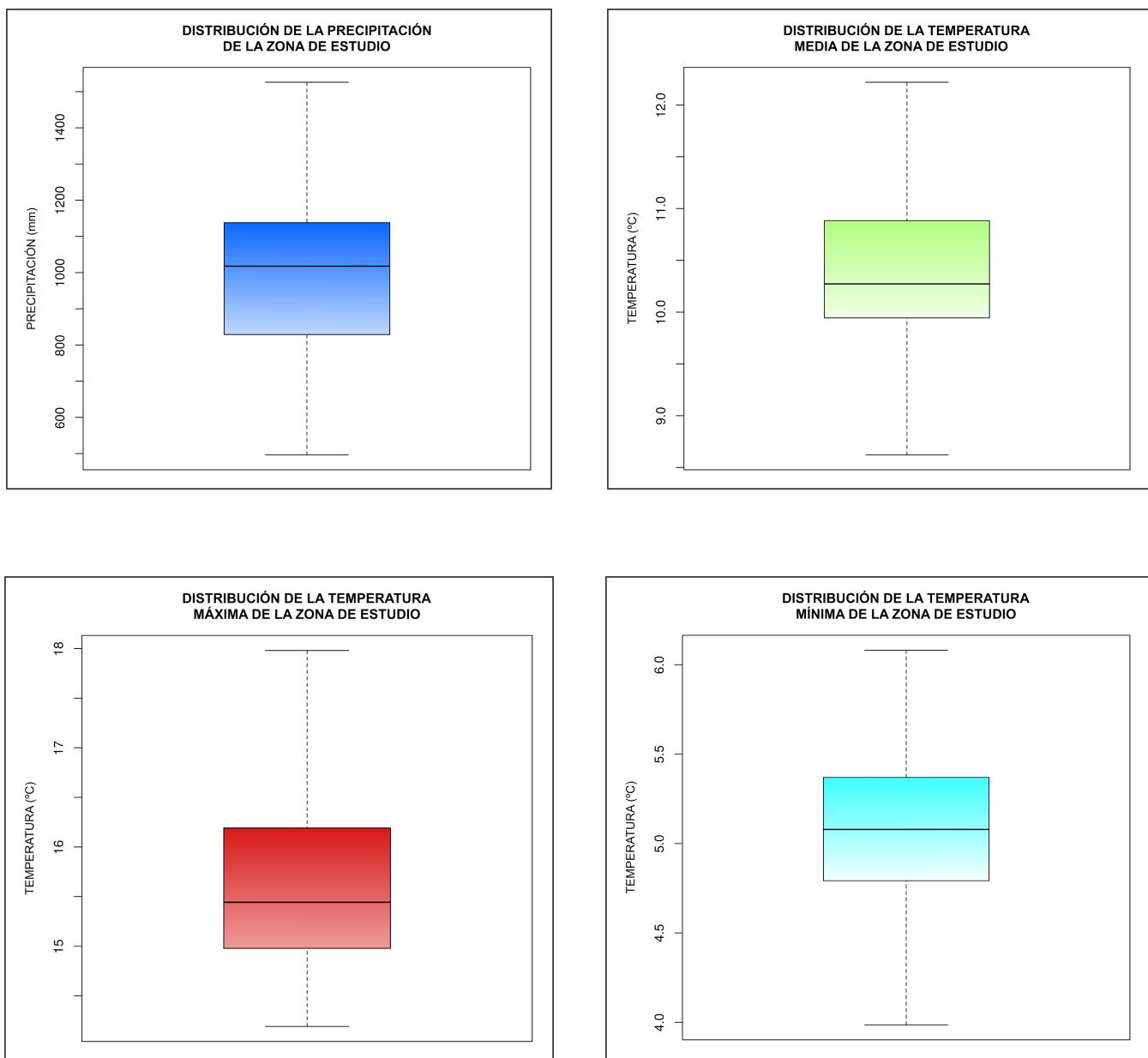


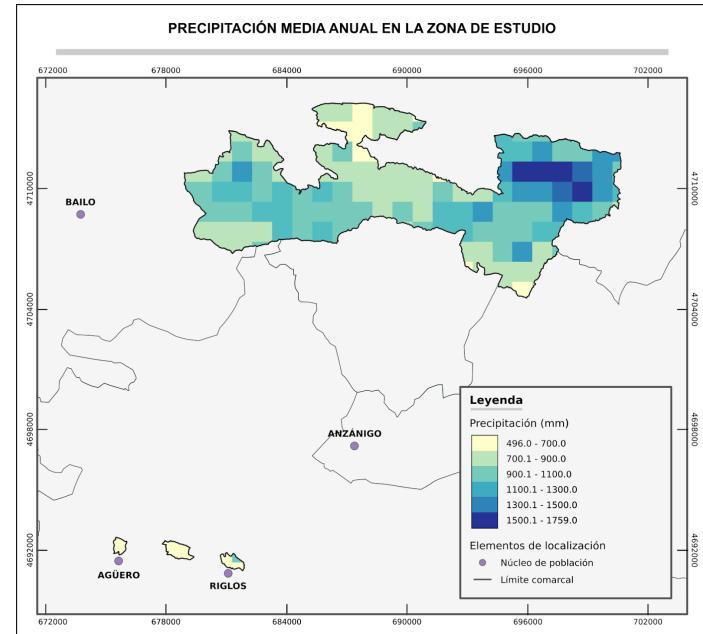
Figura 19. Distribuciones de las principales variables climáticas. Elaboración propia

En la Figura 20 se presentan los mapas que muestran la distribución espacial de la precipitación y la temperatura media. En la parte superior aparecen los valores absolutos y en la inferior los valores estandarizados para poder apreciar con más claridad las diferencias. En los dos casos queda muy clara la relación entre ambas variables y la altitud (ver Figura 5). Como es lógico, las temperaturas medias disminuyen al aumentar la altitud y las precipitaciones aumentan. Quedan claramente delimitados los macizos de la Peña Oroel y de San Juan de la Peña separados por el Barranco del Orcal. En la zona oeste vemos claramente un píxel destacado, que se sitúa en el Pico Cuculo. En él las diferencias son más importantes en la temperatura media, que tiene una anomalía similar a la que tiene la Peña Oroel, lo cual convierte a ese píxel en una zona anómalamente fría para su altitud. Como veremos en otras variables, esa zona presenta características climáticas especiales.

En los mapas también se observa claramente el papel que juega la latitud sobre ambas variables ya que el Monumento Natural, situado apenas a 15 kilómetros aprox. más hacia el sur, alcanza los valores más extremos de anomalías espaciales, teniendo las temperaturas más altas y las precipitaciones más bajas de la zona de estudio.

En la Figura 21 se muestran los mapas de la temperatura máxima y mínima. En líneas generales son similares al de la temperatura media, sin embargo habría que destacar de nuevo el *píxel anómalo* que tiene máximas claramente más bajas de las que les correspondería por altitud, ya que es inferior a la que tiene la Peña Oroel, que está 200 m más elevada. Sin embargo, la temperatura mínima es claramente más baja en la zona de la Peña Oroel.

PRECIPITACIÓN ANUAL



TEMPERATURA MEDIA ANUAL

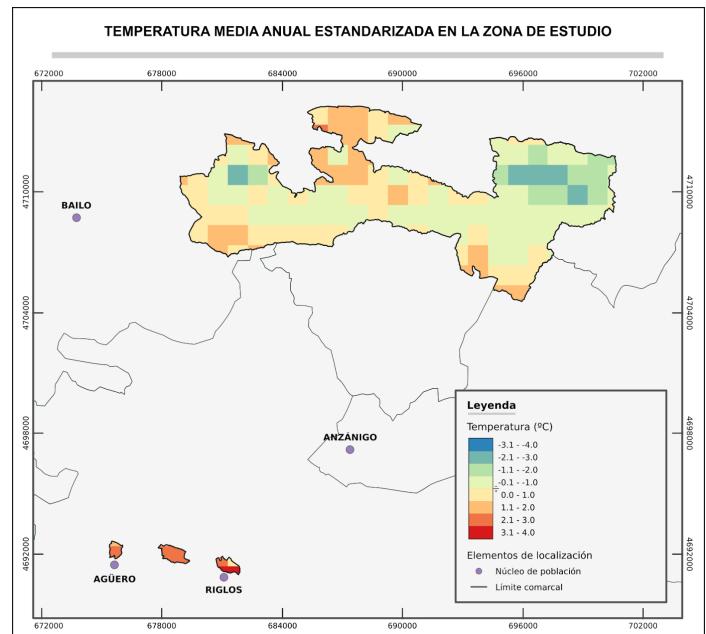
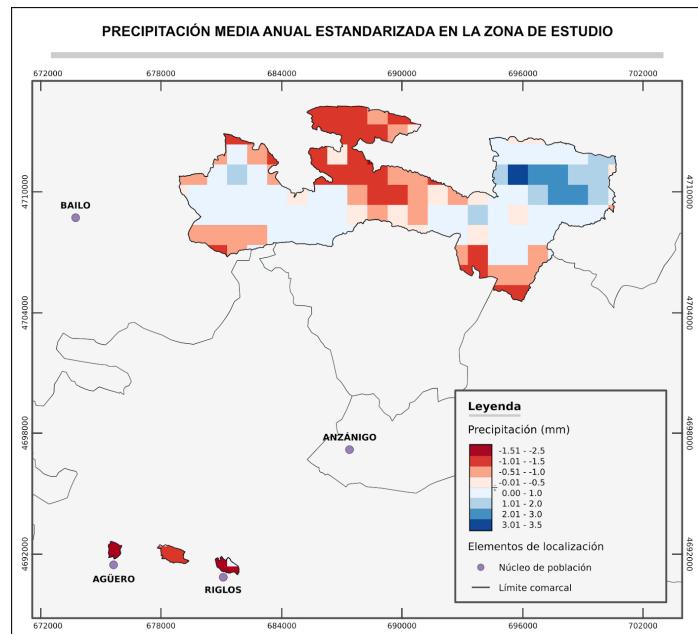
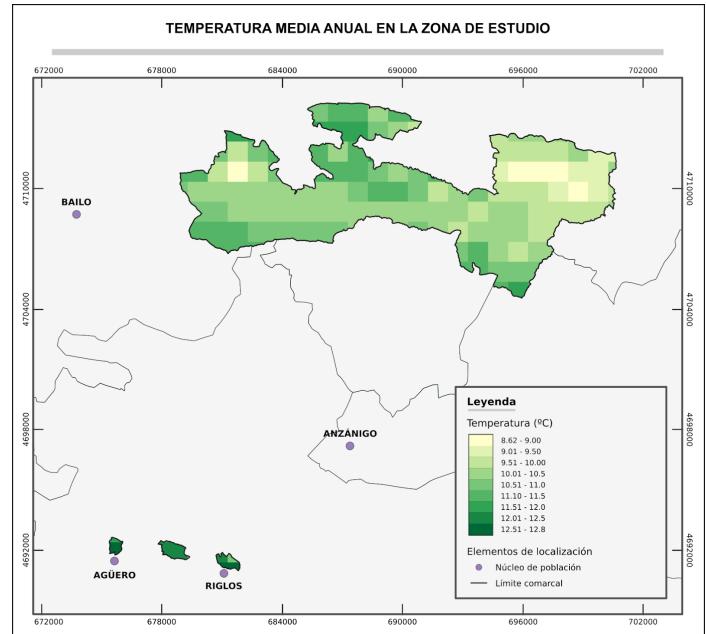


Figura 20. Mapas de precipitaciones y temperaturas medias anuales. Elaboración propia

TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL

TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL

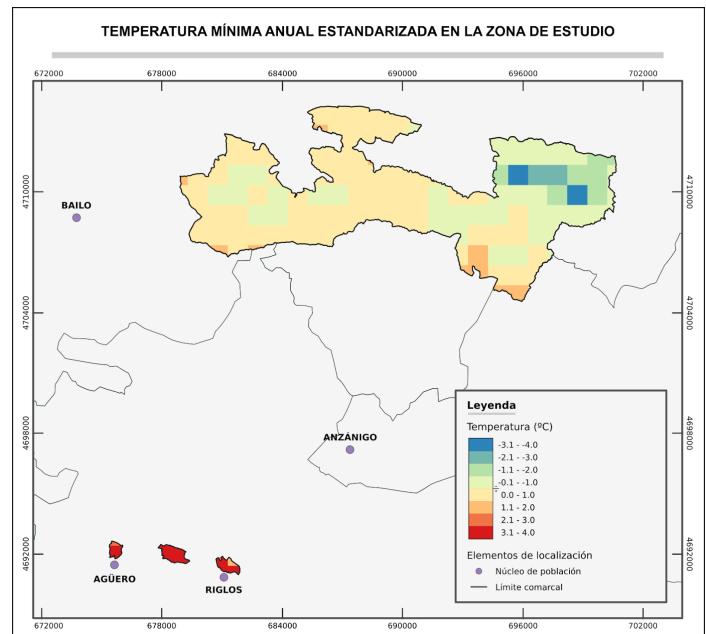
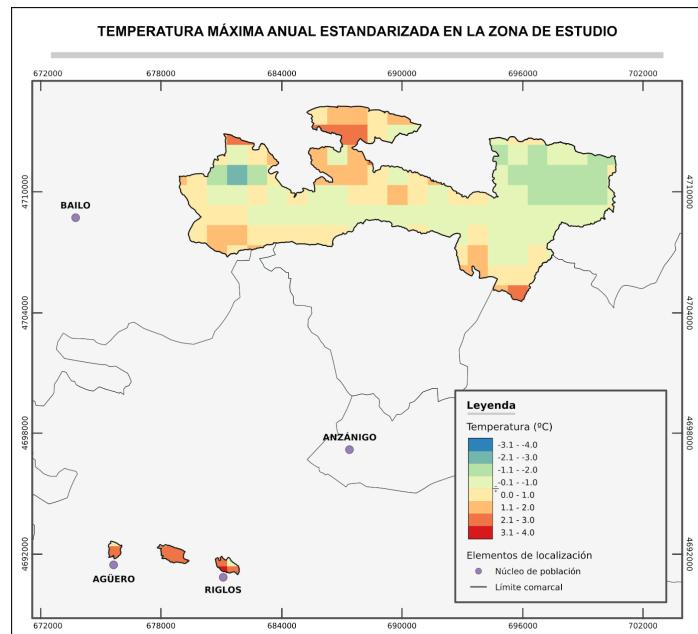
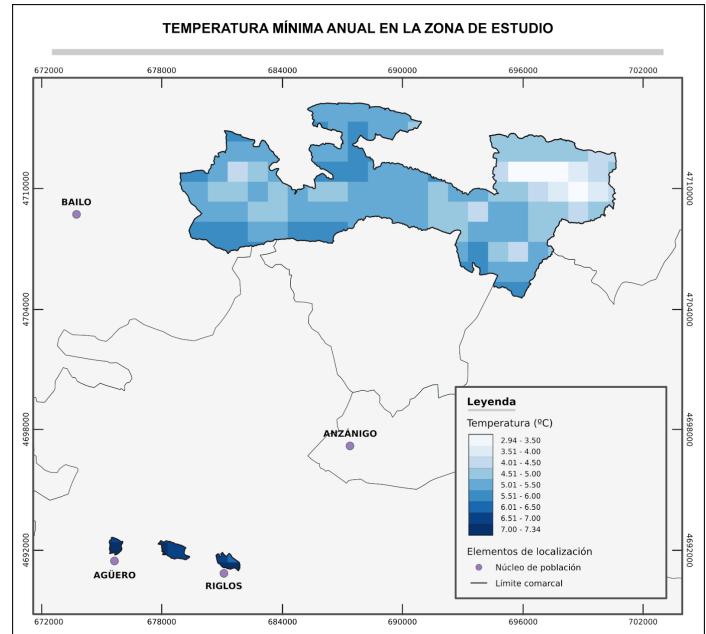
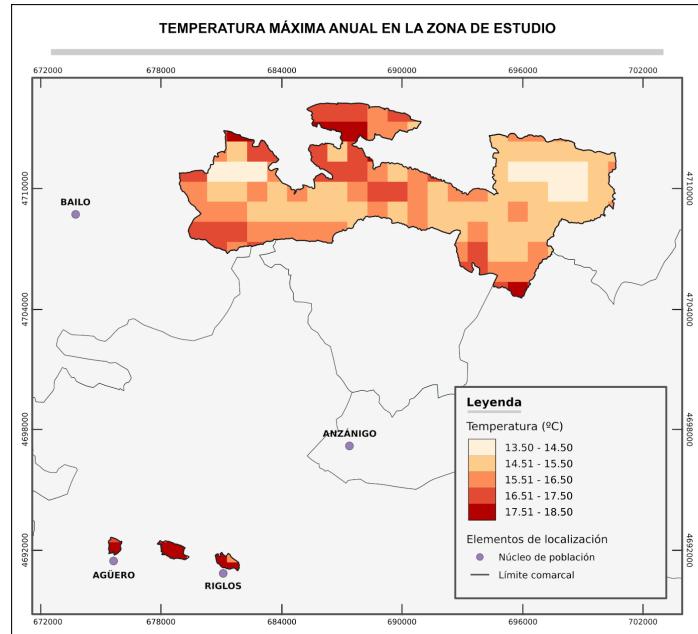


Figura 21. Mapas de temperaturas máximas y mínimas anuales. Elaboración propia

En el anexo VII (págs. 141-186) se presentan una extensa lista de mapas con las variables estacionales tanto absolutas como estandarizadas. Por cuestiones de presentación en este apartado solamente comentamos aquellos que nos parecen más interesantes. En la Figura 22 podemos ver la temperatura media estacional estandarizada. El píxel anómalo vuelve a destacar ya que presenta el valor más bajo de temperatura media durante el invierno, primavera y verano. En el caso de las máximas (Figura 23) destaca que su anomalía es mayor en invierno y en verano.

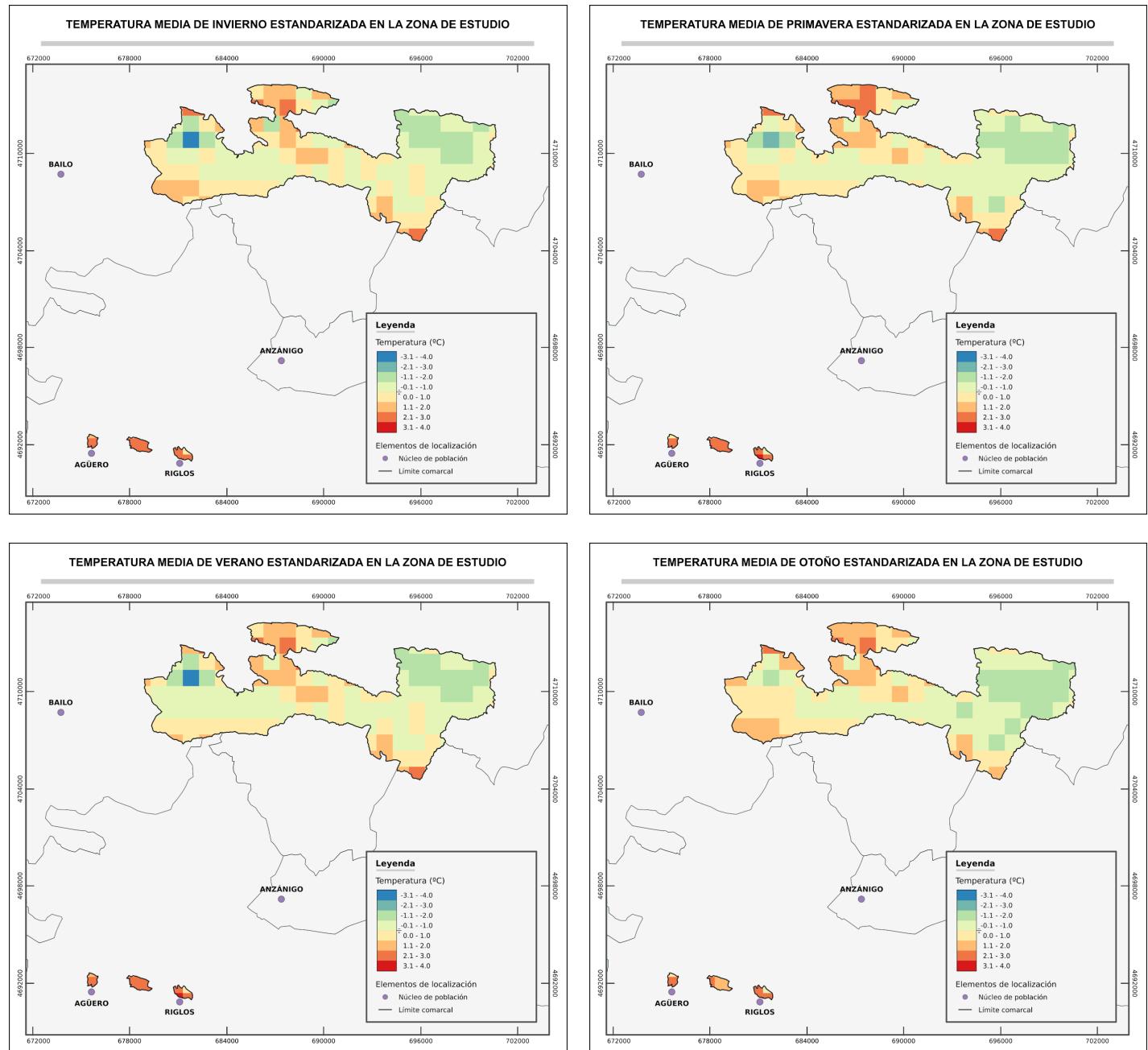


Figura 22. Mapas estacionales de la temperatura media estandarizada. Elaboración propia

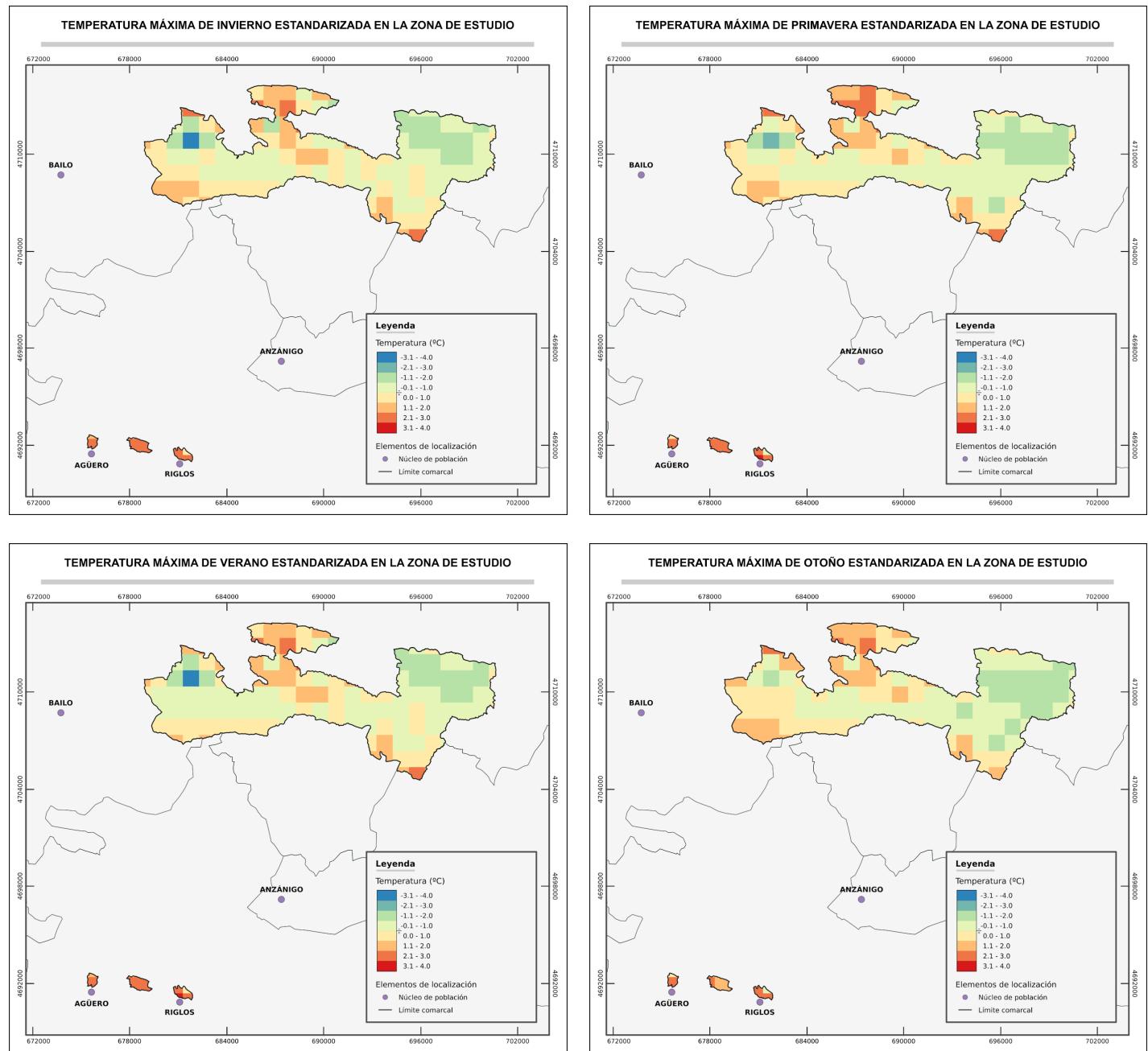


Figura 23. Mapas estacionales de la temperatura máxima estandarizada. Elaboración propia

En el caso de las precipitaciones estacionales (Figura 24), al igual que en las temperaturas, se sigue el patrón altitudinal y latitudinal esperado. Sin embargo, cabe destacar de nuevo el pixel anómalo, ya que en las precipitaciones de invierno y primavera, que en esta zona son muy importantes, presenta valores más bajos de lo que le correspondería por altitud.

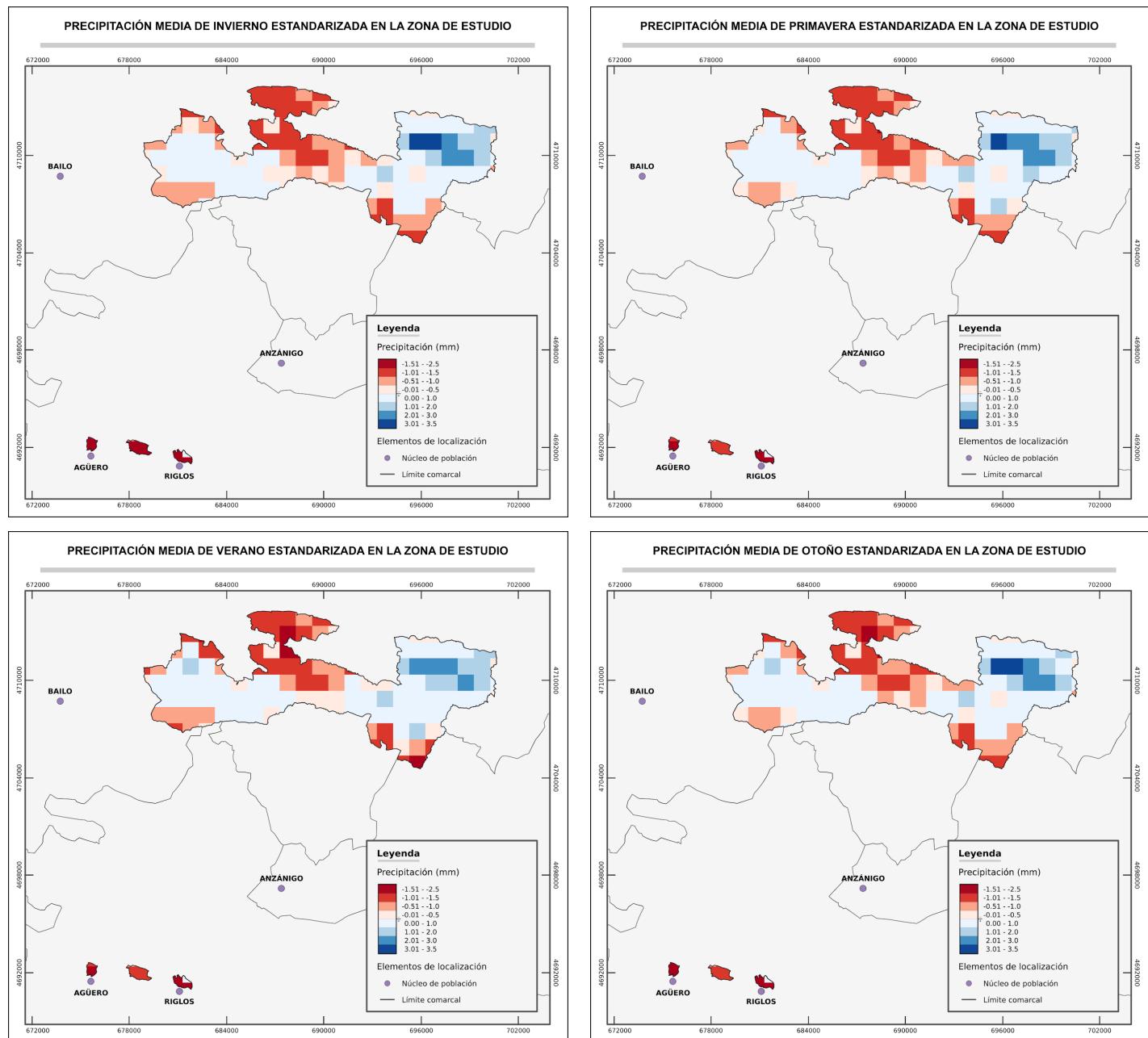


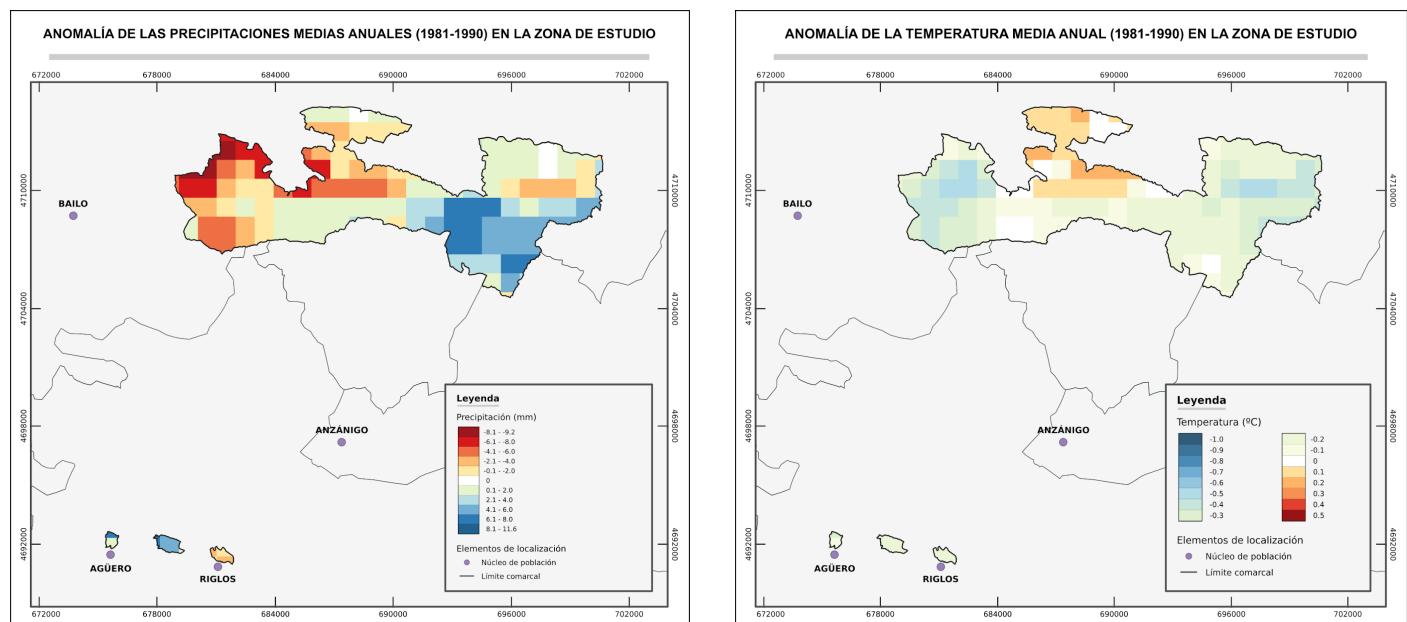
Figura 24. Mapas estacionales de las precipitaciones estandarizadas. Elaboración propia

Los párrafos precedentes hacen referencia a los valores medios de las variables climáticas del modelo CLIMPY que están calculadas para el periodo 1950-2015, sin embargo este es un periodo muy largo, de modo que hemos procedido a estudiar las anomalías de las tres últimas décadas ya que el clima es un fenómeno cambiante. Las medias de 65 años de serie pueden dar una imagen demasiado estática del clima.

En la Figura 25 aparecen los mapas de estas anomalías, y se observan algunas cuestiones muy interesantes. En primer lugar confirman que, efectivamente, el clima es muy cambiante. Por ejemplo, en el caso de las precipitaciones durante la década de los años 80 se aprecia una clara anomalía negativa en el sector de San Juan de la Peña y positiva en la zona de la Peña Oroel, pero especialmente en la zona meridional de este último. En la década siguiente las cosas cambian casi completamente, y la anomalía positiva se desplaza hacia San Juan de la Peña. En estas dos décadas, el territorio del Paisaje Protegido presenta una clara diferenciación de espacios. En la siguiente década, en los años 2000, las circunstancias cambian completamente y se aprecia una gran anomalía negativa en toda la zona de estudio, especialmente en la zona meridional, no habiendo una distinción de macizos. En la zona del Monumento Natural las dos primeras décadas son, en general, de anomalía positiva, mientras que en la última década presentan anomalías negativas.

En el caso de las temperaturas también se observa una evolución muy clara durante estas décadas. En las dos primeras se ve muy claramente un control altitudinal. En el caso de los años 80 con una leve anomalía negativa en los macizos, que se hace mucho mayor en los años 90. Sin embargo, en la década de 2001-2010 el cambio es radical, con una fuerte anomalía positiva que prácticamente no entiende de macizos y que es bastante superior en la zona de San Juan de la Peña.

Combinando las anomalías térmica y de precipitaciones de la última década analizada vemos una tendencia compatible con lo que indican los modelos de cambio climático, hacia un ascenso de las temperaturas y disminución de las precipitaciones. En un apartado posterior de este TFG se analizarán con detalle estos modelos de proyección futura.



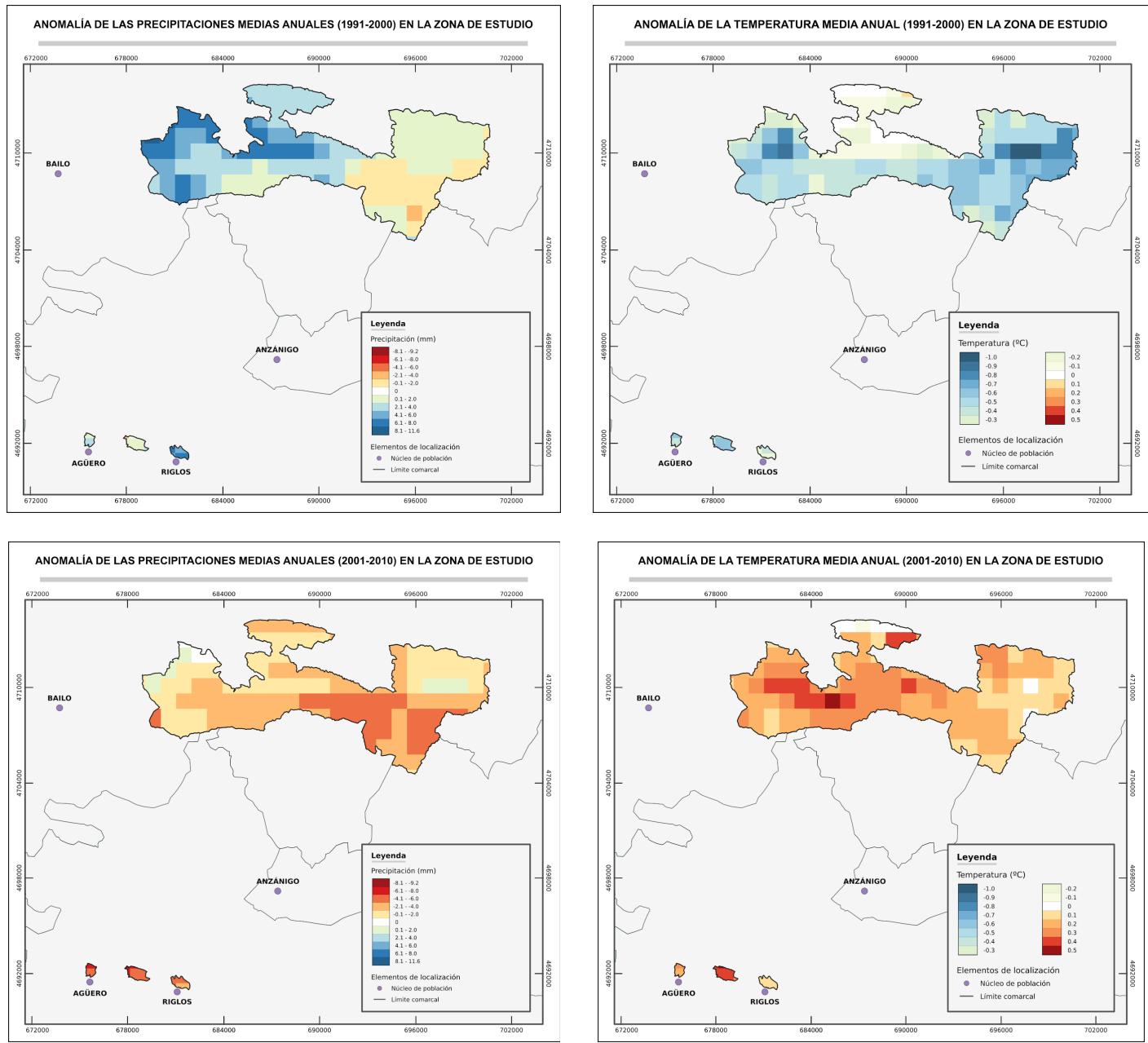


Figura 25. Anomalías de clima pasado. Elaboración propia

3.2.3. Clasificaciones climáticas

Como el modelo CLIMPY dispone de datos promedios mensuales, tanto de la precipitación como de la temperatura media, es posible realizar una clasificación climática de territorio puesto que la mayoría de ellas se basan en estos datos. En concreto hemos utilizado el SIG SAGA, en concreto la herramienta *Tool Climate Classification* desarrollada por O.Conrad (2018) y que permite hacer las clasificaciones de Thornthwaite (1931), Köppen-Geiger (1936), Wissmann (1939) y Troll-Paffen (1964). En nuestro caso se han aplicado las de Köppen-Geiger y la de Thornthwaite ya que son las de uso más habitual.

En la Figura 26 aparece la clasificación climática de Köppen para la zona de estudio. Como puede verse, todo el área del Paisaje Protegido pertenece a la categoría *Cfb*, es decir, un clima templado sin estación seca y con verano templado; este es el clima predominante en gran parte de los Pirineos exceptuando las áreas de mayor altitud. Tan sólo algunas zonas situadas en el Monumento Natural presentan otras categorías como son la *Cfa* o la *Csb*. El *Cfa* es un clima templado sin estación seca pero con veranos calurosos, mientras que el *Csb* es un clima templado con un verano seco (Agencia Estatal de Meteorología [AEMET], 2011). Esto cuadra perfectamente con la situación más meridional del Monumento Natural.

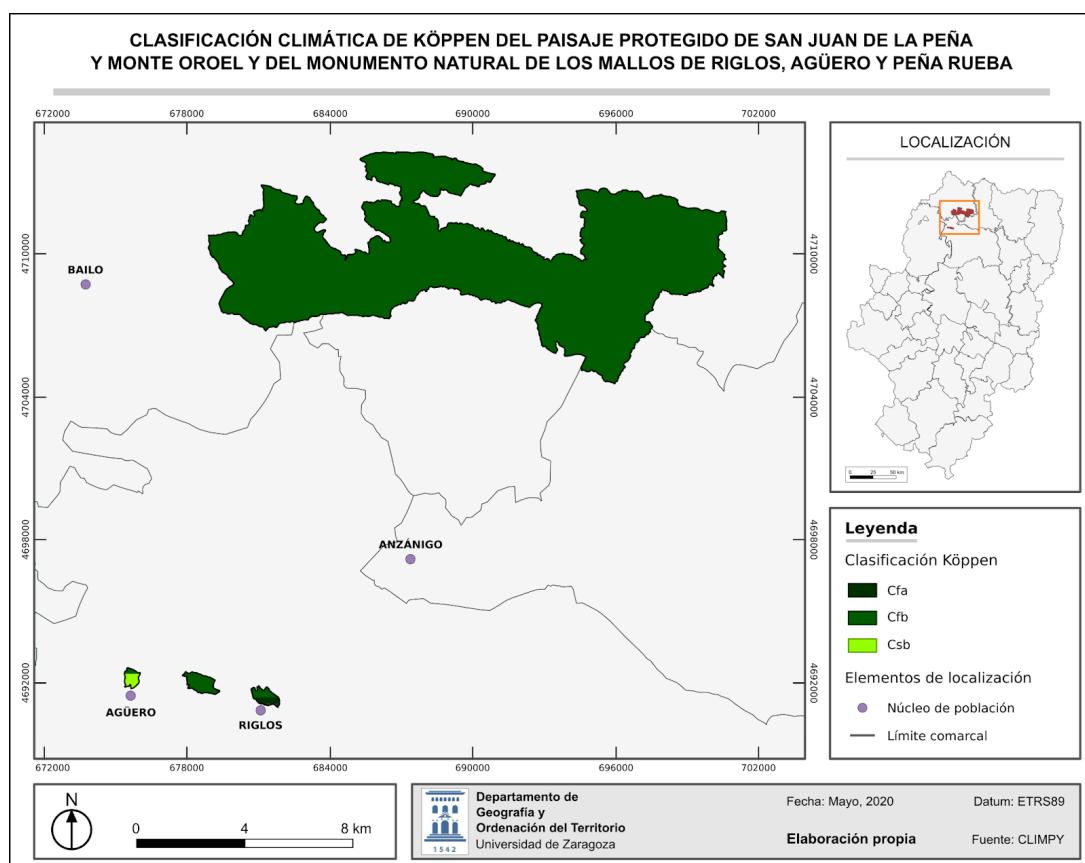


Figura 26. Clasificación climática de Köppen. Elaboración propia

Por su parte, en la Figura 28 se presenta la clasificación climática de Thornthwaite, en la que se ven matices que no se discriminan en la clasificación de Köppen. Podemos ver cómo el macizo del Monte Oroel y el píxel anómalo de la zona oeste son de un clima *Perhúmedo/micotérmico*, lo cual significa que tienen un índice de humedad superior a 100 y una ETP situada entre 285 y 570 mm (Cuadrat y Pita, 2000); es decir, las áreas más frías y húmedas de la zona de estudio. Sin embargo, la mayor parte del territorio tiene un clima del tipo *Húmedo/micotérmico*, es decir, desde el punto de vista de las temperaturas presentan un rango similar, pero el índice de humedad se reduce. Por último encontramos las zonas altitudinalmente más bajas del Paisaje Protegido cuyo clima se clasifica como *Subhúmedo/micotérmico*, ya que continúa el descenso en la disponibilidad de las precipitaciones. Así, se observa que, desde el punto de vista de las temperaturas nos encontramos en la categoría *micotérmico*, mientras que en relación a la humedad se observa una gradación de la misma en función de la altura. Sería lógico pensar que todas las subcategorías intermedias de la clasificación se encuentran representadas, pero el algoritmo utilizado no las diferencia.

En lo que respecta al Monumento Natural, como ya se ha comentado, debido a su posición más meridional y más interior y alejada de las zonas de costa el clima pasa a ser *Subhúmedo/mesotérmico*, es decir, con unas temperaturas más altas y precipitaciones más modestas.

Desde el punto de vista de las regiones de humedad la clasificación es claramente compatible con la presentada por Chazarra (2006), que clasifica toda la mitad meridional del dominio pirenaico dentro del clima *Húmedo* (Figura 27). Sin embargo, desde el punto de vista de la eficacia térmica, el mismo autor clasifica este dominio pirenaico como *Mesotérmico I*, cuando nosotros obtenemos una clasificación de *Micotérmico*. Esto posiblemente se deba a la escala, que en el trabajo citado es a nivel nacional, y no tiene en cuenta el efecto altitudinal de nuestro territorio.

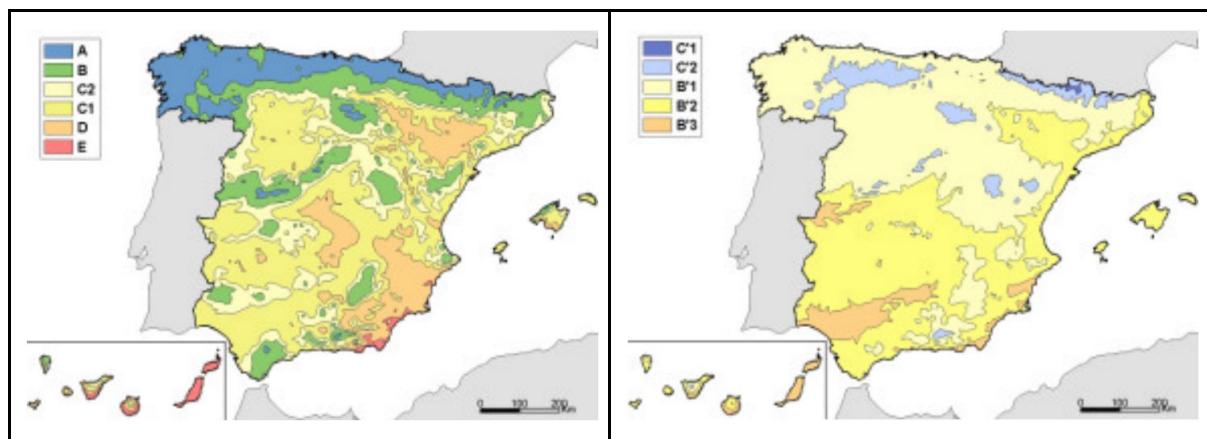


Figura 27. Izda. Regiones de humedad. Dcha. Regiones de eficacia térmica. Fuente: Chazarra (2006)

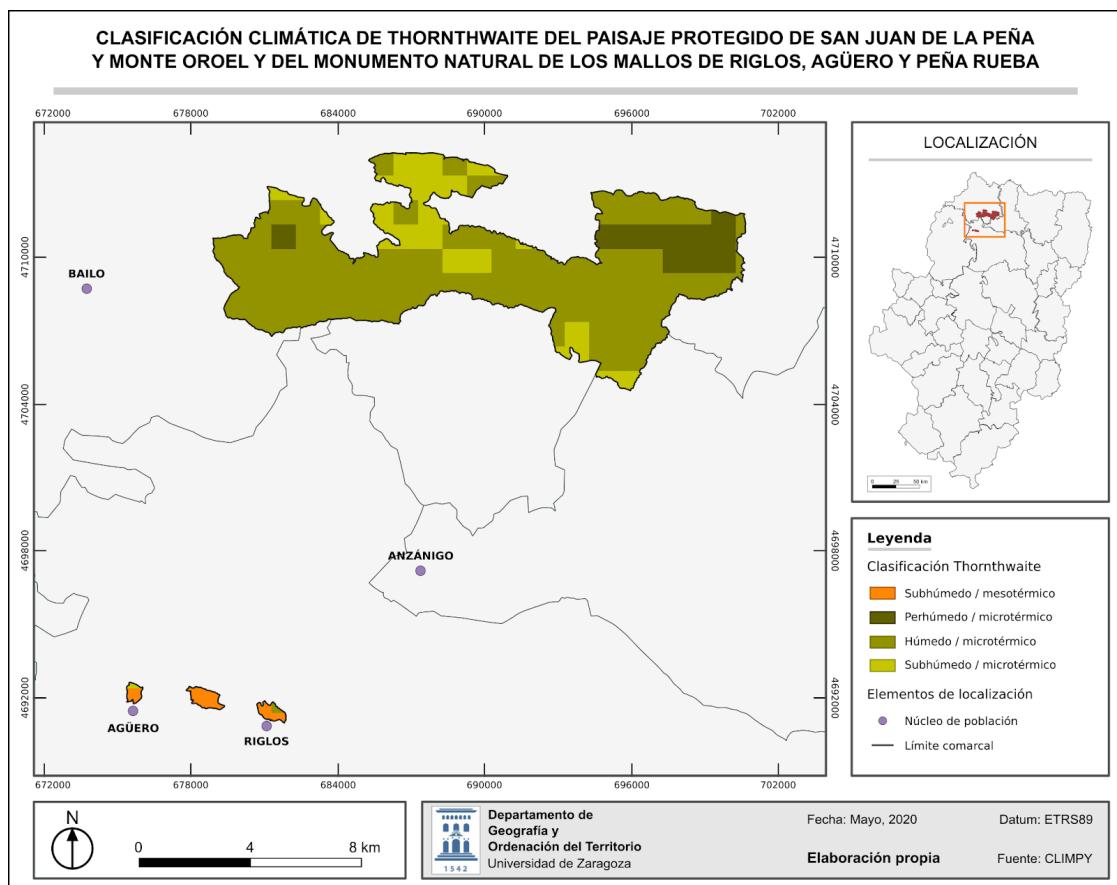


Figura 28. Clasificación climática de Thornthwaite. Elaboración propia

3.2.4. Parámetros bioclimáticos

Uno de los objetivos principales de este TFG es estudiar las relaciones entre el clima y la vegetación presente en la zona de estudio. Las relaciones de los ecosistemas con el clima es algo que está más que documentado y que hemos estudiado en profundidad en la asignatura de Biogeografía del Grado. Eso ha llevado a los científicos a definir diferentes variables bioclimáticas por su capacidad de explicar la distribución de los ecosistemas. Por ejemplo, los índices bioclimáticos son la base para la clasificación de las series de vegetación de Rivas Martínez (2004) (Biogeografía.net, s.f.).

En nuestro caso hemos utilizado el módulo Bioclimatic Variables del SIG SAGA. A partir de las precipitaciones y temperaturas medias mensuales hace el cálculo de diversas variables.

El número de variables que calcula el algoritmo es muy elevado (19): temperatura media anual, amplitud térmica media diaria, isotermalidad, estacionalidad térmica, temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, amplitud térmica anual, temperatura media del periodo más húmedo, temperatura media del periodo más seco, temperatura media del periodo más cálido, temperatura media del periodo más frío, precipitación anual, precipitación del mes más húmedo, precipitación del más seco, estacionalidad de las precipitaciones, precipitación del periodo más húmedo, precipitación del periodo más seco, precipitación del periodo más cálido y precipitación del periodo más frío.

Por motivos de claridad de exposición, los mapas correspondientes a cada una de estas variables se muestran en el Anexo IX (págs. 191-206). En este apartado solamente se presentan los que hemos encontrado que tienen más interés desde el punto de vista de la relación con la vegetación como veremos en el apartado correspondiente.

En la Figura 29 aparecen los mapas de la estacionalidad de las temperaturas y de las precipitaciones. En el primer caso destaca la diferencia entre el macizo del Monte Oroel, con la mínima estacionalidad, y el macizo de San Juan de la Peña, en el que la estacionalidad es más elevada. Tan sólo en la parte más elevada del Monte Cuculo la estacionalidad es también baja. Los valores más altos de estacionalidad se alcanzan en las zonas más bajas y en el Monumento Natural.

En el caso de las precipitaciones, el patrón es similar o todavía más claro. El sector del Monte Oroel, tiene precipitaciones mucho más regulares a lo largo del año que la zona de San Juan de la Peña.

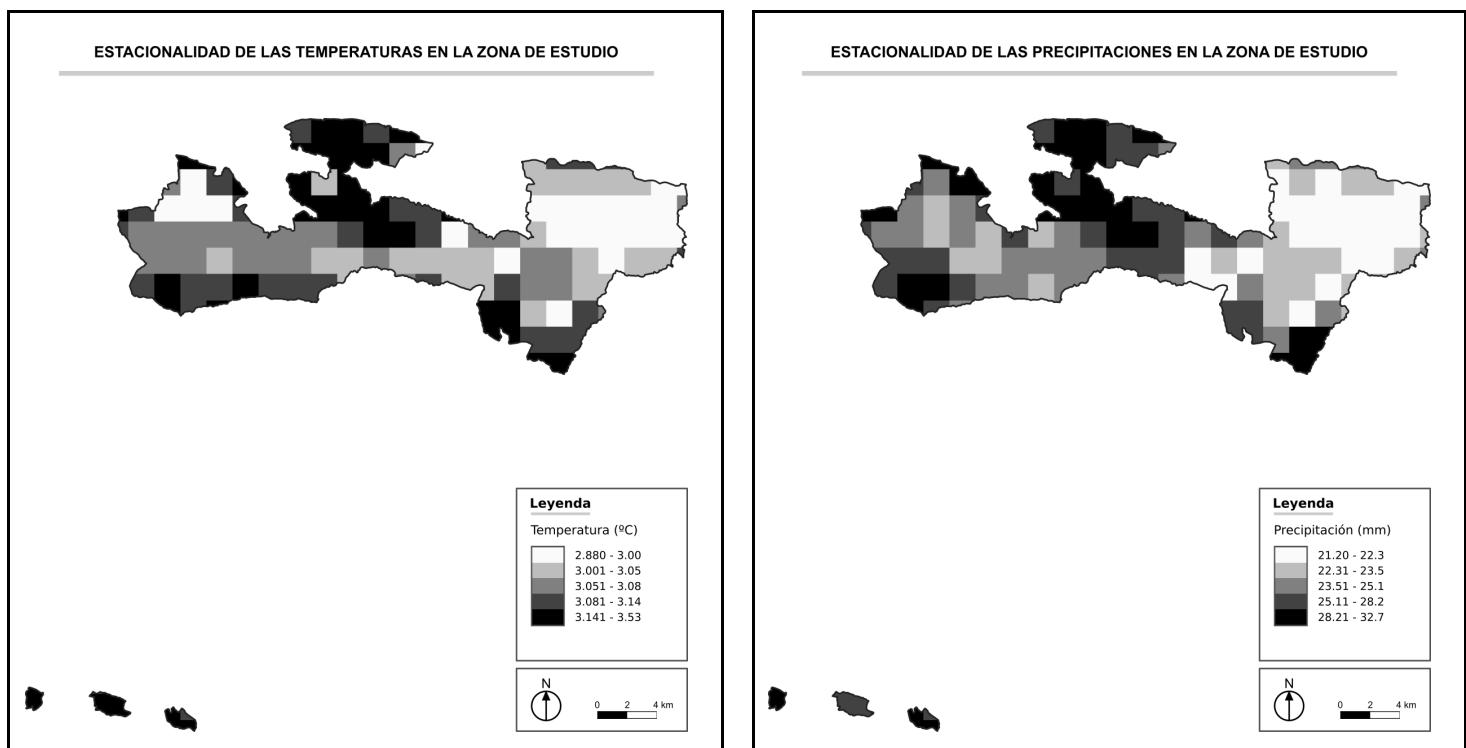


Figura 29. Estacionalidad de las temperaturas y precipitaciones. Elaboración propia

En la Figura 30 se presentan otras cuatro variables bioclimáticas. En el caso de la amplitud térmica anual destaca de nuevo la zona del Monte Cuculo, con los valores más bajos con diferencia de esta variable. Todo el sector de San Juan de la Peña tiene amplitudes térmicas más bajas que el sector del Monte Oroel. Las mayores amplitudes se alcanzan en los territorios más bajos. En lo que respecta a la temperatura máxima del mes más cálido vuelve a destacar el pixel anómalo, que es más frío que el Monte Oroel a pesar de estar 200 m por debajo del mismo. Sin embargo, a nivel de los macizos, presentan características muy similares.

Los parámetros bioclimáticos relacionados con las precipitaciones también tienen algunos aspectos interesantes que comentar. Se observa claramente precipitaciones más elevadas en la zona del Monte Oroel durante el invierno y durante la estación húmeda, pero en este último caso las diferencias con San Juan de la Peña son menores. Habría que aclarar que el algoritmo considera *periodo* una serie sucesiva de tres meses; en este caso, los tres meses consecutivamente más fríos o los tres meses con mayores precipitaciones. Por último, siguiendo el control altitudinal que se ha comentado anteriormente, se observa que las zonas más bajas presentan los valores de precipitación más bajos.

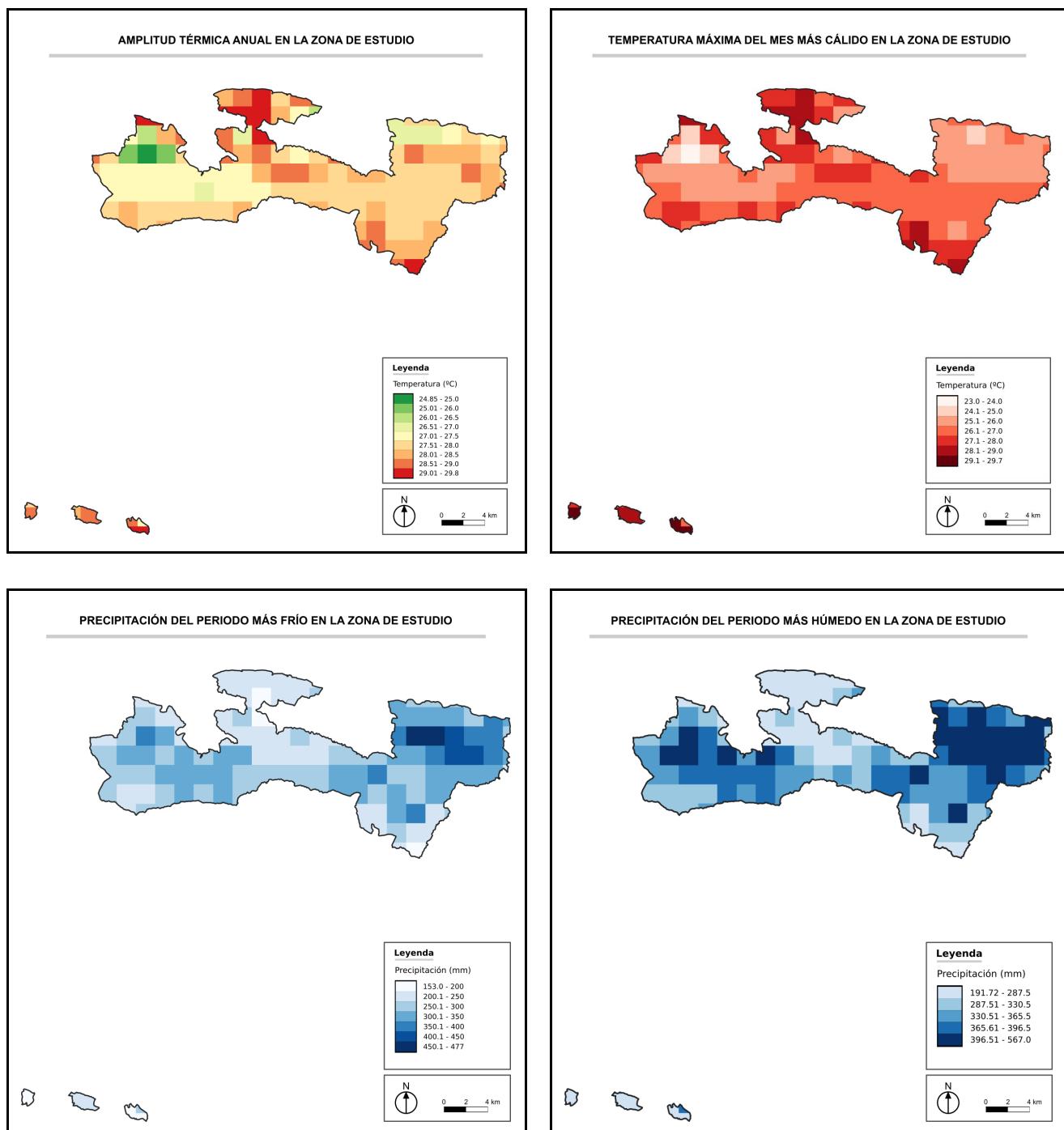


Figura 30. Selección de parámetros bioclimáticos. Elaboración propia

Estudio de la vegetación

3.3.1. Introducción

En palabras del doctor Enrique Balcells, cofundador del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE) y grandísimo conocedor de la zona, *el macizo de San Juan de la Peña ofrece variados topoclimas de ladera, constituyendo una encrucijada faunística y florística notable; su vegetación y su fauna varían en pocos metros. Mientras hacia el norte y poniente aparecen bosques de caducifolios higrófilos en sus laderas alimentadas por manantiales, en las vertientes meridionales dominan (según altitud y exposición) carrascales y cajicares, aclarados por el hombre y el fuego, de índole así más xerófila, debiendo soportar temperaturas muy elevadas durante la canícula* (Balcells, 1983).

Podemos decir que este pequeño párrafo resume perfectamente las características de la vegetación y sus relaciones con el clima y el relieve en nuestra zona de estudio, aunque ésta incluya el sector del Monte Oroel y el Monumento Natural de los Mallos de Riglos, Agüero y Peña Rueba.

Este es justamente el objeto de estudio principal de nuestro TFG. En este apartado concreto analizaremos las características de la vegetación y dejaremos para un apartado posterior las relaciones con dichos factores.

Hoy en día nuestro conocimiento de la flora y vegetación del Pirineo es muy profundo. Esto lo debemos, sin duda, a figuras como la de Pedro Montserrat Recoder, el otro cofundador del IPE y maestro de muchos de los botánicos que han hecho posible este profundo conocimiento, aún incompleto, y que todavía continúa creciendo. A él le debemos, por ejemplo, la creación del "herbario JACA", al que aportó decenas de miles de plantas (Gómez, 2004), y la división de la vegetación pirenaica en seis pisos: *mesomediterráneo, submediterráneo, montano inferior seco, montano húmedo, subalpino y de alta montaña mediterránea, y pastos alpinos* (Pedrocchi, 1987).

A continuación presentamos brevemente los principales tipos de formaciones vegetales presentes en el área de estudio. Para ello seguiremos a Gómez (2004).

Las partes más bajas del territorio están ocupadas por enclaves termófilos en los que la especie más característica es la carrasca (*Quercus ilex rotundifolia*); a esta la acompañan arbustos que escapan del frío como la coscoja (*Quercus coccifera*), el aladierno (*Rhamnus alaternus*), etc.

Por encima, pero siempre en unas transiciones difusas y por ello muchas veces conviviendo, se sitúan los quejigales. En ellos encontramos una combinación de robles marcescentes como *Quercus gr. cerrioides*, *Q. humilis* y *Q. faginea*, que se corresponden con lo que podríamos llamar "piso submediterráneo". En este caso, el ambiente es más fresco y la sequía estival es menos importante.

Si seguimos ascendiendo, al superar los 1000 m, el quejigo empieza a desaparecer y pasaríamos a los pinares de pino albar (*Pinus sylvestris*), marcando el comienzo del piso montano y de la vegetación de características eurosiberianas. A partir de este momento, en los claros del bosque y allí donde este no se desarrolla, o se ha perdido (por deforestación o incendios), hace acto de presencia una de las plantas más características de la zona: el erizón (*Echinospartum horridum*), un claro ejemplo de matorral pulvinular.

En zonas más húmedas encontramos los bosques típicamente montanos. En nuestro territorio encontramos ejemplos de hayedos, hayedos-abetales, abetales y pinares-abetales. Muchas veces pueden compartir la misma altitud y diferenciarse según la naturaleza del suelo. Por ejemplo, el haya (*Fagus sylvatica*) requiere ambientes parecidos al abeto (*Abies alba*), pero este último aparece en lugares con suelos más profundos. A pesar de sus preferencias, el pino albar, el haya y el abeto conforman muchas veces bosques mixtos de este piso montano húmedo.

Finalmente, la altitud de nuestra área de estudio se encuentra justamente en el límite del piso subalpino. La Peña Oroel se sitúa a 1770 m, y el límite inferior de este piso se sitúa entre 1700-1800 m. Aún así, podemos encontrar el pino negro (*Pinus uncinata*) en la parte más alta de la ladera de umbría del Monte Oroel.

En definitiva, a modo de resumen, la zona estudiada tiene un elevadísimo interés biogeográfico y, especialmente, en lo relativo a la vegetación. En este apartado la estudiaremos con las fuentes de información cartográfica más recientes de que disponemos, que son la cartografía de SIOSE, la cartografía del mapa de vegetación confeccionado para elaborar el Mapa de Paisajes de La Jacetania, y los datos LIDAR del vuelo de 2010. Pero, en primer lugar, haremos un breve repaso a la vegetación potencial de nuestro territorio.

3.3.2. Vegetación potencial

El territorio estudiado se sitúa en la Región biogeográfica Mediterránea, Provincia Aragonesa, pero a escasos kilómetros de la frontera de la Región Eurosiberiana, Provincia Pirenaica. Esto lo vemos claramente en la Figura 31, sin embargo, su fuerte relieve introduce las características climáticas que se han comentado en apartado anterior, de modo que el territorio presenta un mosaico de vegetación eurosiberiana y mediterránea (Montserrat, 1971).

En la Figura 32 se presenta el Mapa de Series de Vegetación de Rivas Martínez (1987) de la zona de estudio, que muestra la vegetación potencial. Este confirma la particularidad de la zona hasta el punto de que la inmensa mayoría del territorio del Paisaje Protegido está ocupado por series de vegetación eurosiberianas, apareciendo solamente en las partes meridionales más bajas series mediterráneas. Llama la atención que en la zona del Monumento Natural, la Peña Rueba pertenece a las series eurosiberianas y los mallos de Agüero y Riglos, situados a ambos lados, a las mediterráneas, si bien hay que hacer constar que en los tres casos nos encontramos en el dominio del encinar. Esto se encuentra en consonancia con la peculiaridad climática de esa zona en concreto, que ya se ha visto en los mapas climáticos.

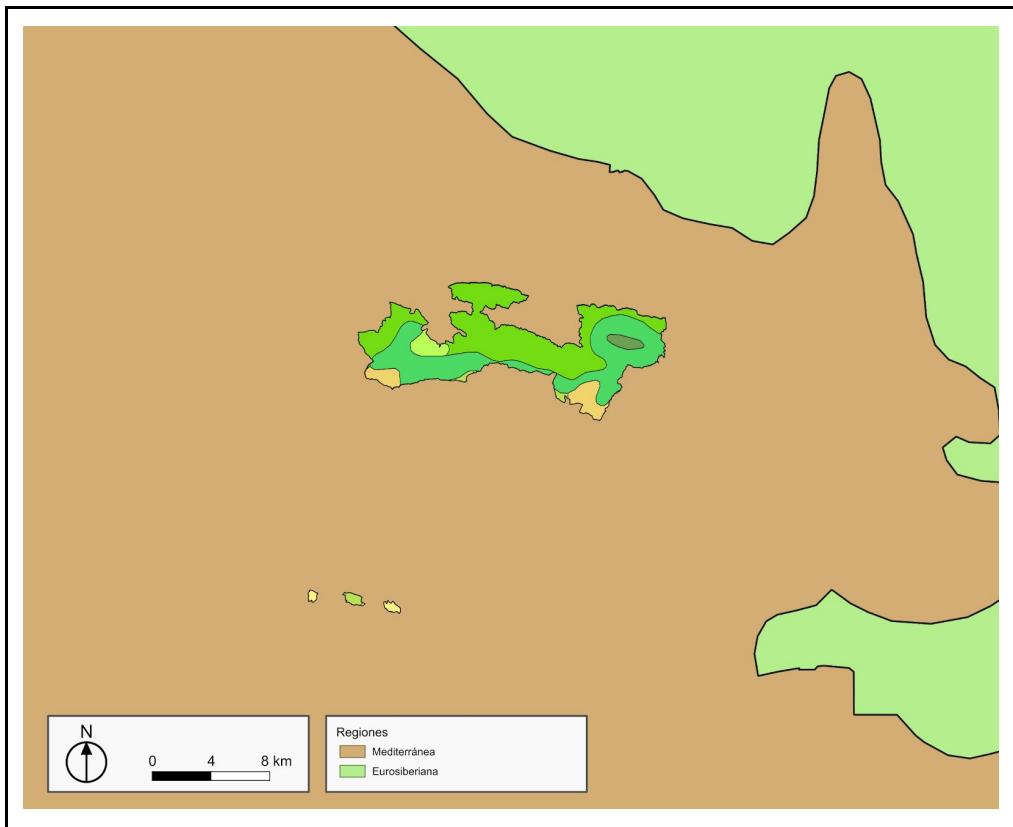


Figura 31. Regiones biogeográficas. Elaboración propia (fuente: MITECO)

El análisis detallado del Mapa de Series de Vegetación del Paisaje Protegido deja entrever la existencia de pisos de vegetación, especialmente en la zona del Monte Oroel. En él vemos cómo pasamos mientras ascendemos desde la serie *montana pirenaica del roble peloso* (10), hacia la *altimontana pirenaica central calcícola del pino albar* (3c) y, finalmente, situada en la cima del monte, la serie *montana pirenaica basófila y ombrófila del haya* (5a). En el resto del territorio, especialmente en la zona de San Juan de la Peña, los pisos no se observan con tanta nitidez. Este es un aspecto que estudiaremos más en detalle en un apartado posterior.

En conjunto, la series predominantes son la serie *montana pirenaica del roble peloso* (10) y la *altimontana pirenaica central calcícola del pino albar* (3c). El resto de series de vegetación potencial que podemos encontrar se muestran en la Tabla 7.

En la Figura 33 podemos ver algunos ejemplos de las formaciones vegetales más características del área de estudio.

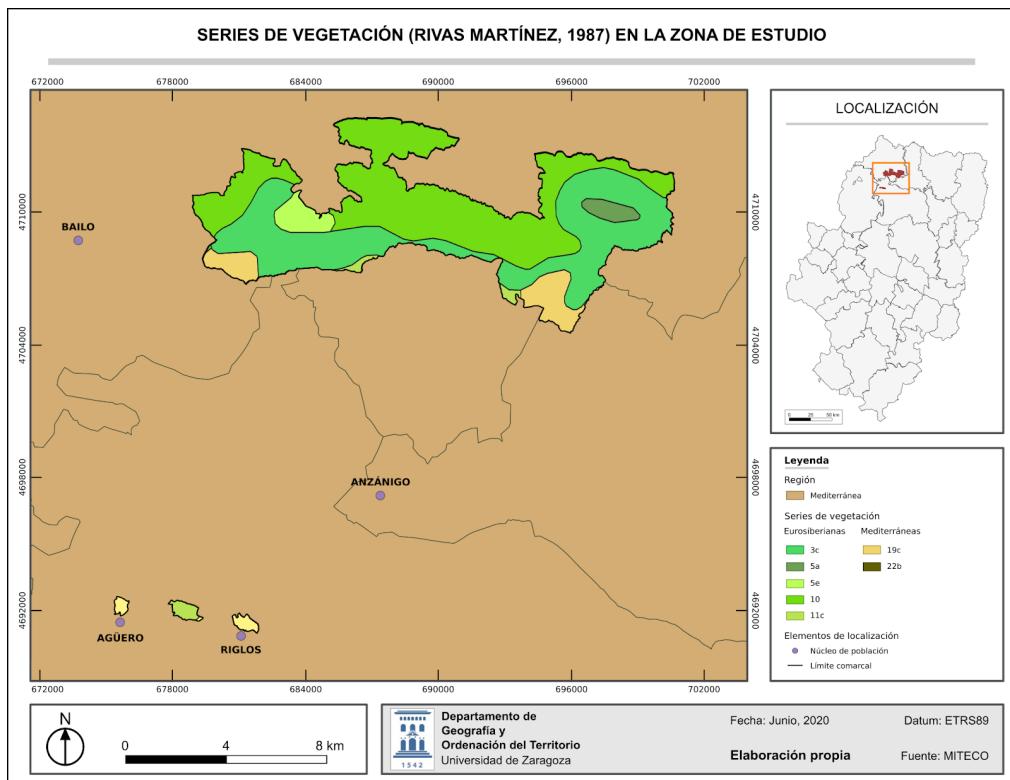


Figura 32. Mapa de series de vegetación. Elaboración propia

REGIONES BIOGEOGRÁFICAS					
Eurosiberiana			Mediterránea		
Código	Descripción		Código	Descripción	
3c	Serie altimontana pirenaica central calcícola del pino albar *		19c	Serie supra-mesomediterránea tarraconense, maestrañense y aragonesa basófila del quejigo	
5a	Serie montana pirenaica basófila y ombrófila del haya				
5e	Serie montana pirenaica calcícola y termófila del haya				
10	Serie montana pirenaica del roble peloso		22b	Serie mesomediterránea manchega y aragonesa basófila de la encina	
11c	Serie montana pirenaica y supramediterránea aragonesa de la encina				

* En negrita se señala la vegetación potencial de cada serie

Tabla 7. Series de vegetación. Elaboración propia (fuente: biogeografía.net)



Erizonal con boj, solana del Monte oroel.
Autor: Babuto (Wikiloc)



Hayedo y abetal, umbría de San Juan de la Peña
Autor: Santiago Usabiaga (Google Earth)



Pinar submediterráneo y bojeda con erizón,
Sierra de San Juan de la Peña
Autor: José Vicente Ferrández (Google Images)



Encinar y quejigal, Sierra de San Juan de la Peña.
Autor: Jesús Sánchez Beorlegui (Google Earth)

Figura 33. Algunas formaciones vegetales características de la zona de estudio.

3.3.3. Unidades de vegetación del SIOSE

SIOSE es el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España. Se integra dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT) y tiene como objetivo principal generar una base de datos uniforme de Ocupación del Suelo a escala 1:25.000 para todo el Estado (SIOSE, s.f.). El principal producto del SIOSE son cartografías vectoriales de polígonos, a los cuales se les asigna un código denominado *CODIGE* (Consejo Directivo de la Infraestructura de Información Geográfica en España) que indica el uso de suelo. Además, cuando el polígono es de ocupación forestal, tiene asignado un valor *FCC*, que indica el tanto por ciento de ocupación forestal en el mismo. Existen versiones de SIOSE de los años 2005, 2009, 2011 y 2014.

De una manera muy resumida podemos decir que las principales fuentes de información para generar la base de datos son las imágenes de satélite SPOT5 y Landsat 5 TM; las ortofotografías de alta resolución del PNOA; bases de datos de ocupación del suelo de las Comunidades Autónomas; Información Geográfica de Referencia del IGN; el Catastro; SIGPAC y el Mapa Forestal de España (MFE), entre otras. Además, hay campañas de trabajo sobre el terreno para confirmar la calidad de las asignaciones de las parcelas (SIOSE, s.f.).

La organización del proyecto SIOSE tiene su antecedente en el desarrollo del proyecto CORINE Land Cover en España (SIOSE, s.f.). Hemos analizado las dos cartografías y nos hemos decantado por las del SIOSE 2014 ya que hemos observado que en la zona estudiada tiene más precisión y esto lo hemos considerado importante dadas las dimensiones de la misma.

En la Figura 34 se puede observar el mapa de formaciones vegetales y usos de suelo de nuestro territorio. Para poder comparar se ha incluido también el recorte del PNOA más reciente, aunque es interesante hacer notar el desfase temporal entre la ortofotografía (2019) y el SIOSE (2014). Como puede apreciarse en la leyenda, SIOSE agrupa los grandes bosques en tres grupos: bosques de frondosas, de coníferas y mixtos; sin entrar en subclasificaciones de ningún tipo. A primera vista se aprecia que el territorio del Paisaje Protegido está dominado por las formaciones boscosas y que en el Monumento Natural son mucho menos frecuentes. También se observa muy claramente que el *Bosque de coníferas* se encuentra casi exclusivamente en la mitad oriental del Paisaje Protegido, y que en la mitad occidental es sustituido por *Bosque mixto* y *Bosque de frondosas*. También se observa que hay amplias zonas del territorio ocupadas por *Pastizal o herbazal*, especialmente en la zona del Monte Oroel y en el extremo más occidental de la zona de estudio.

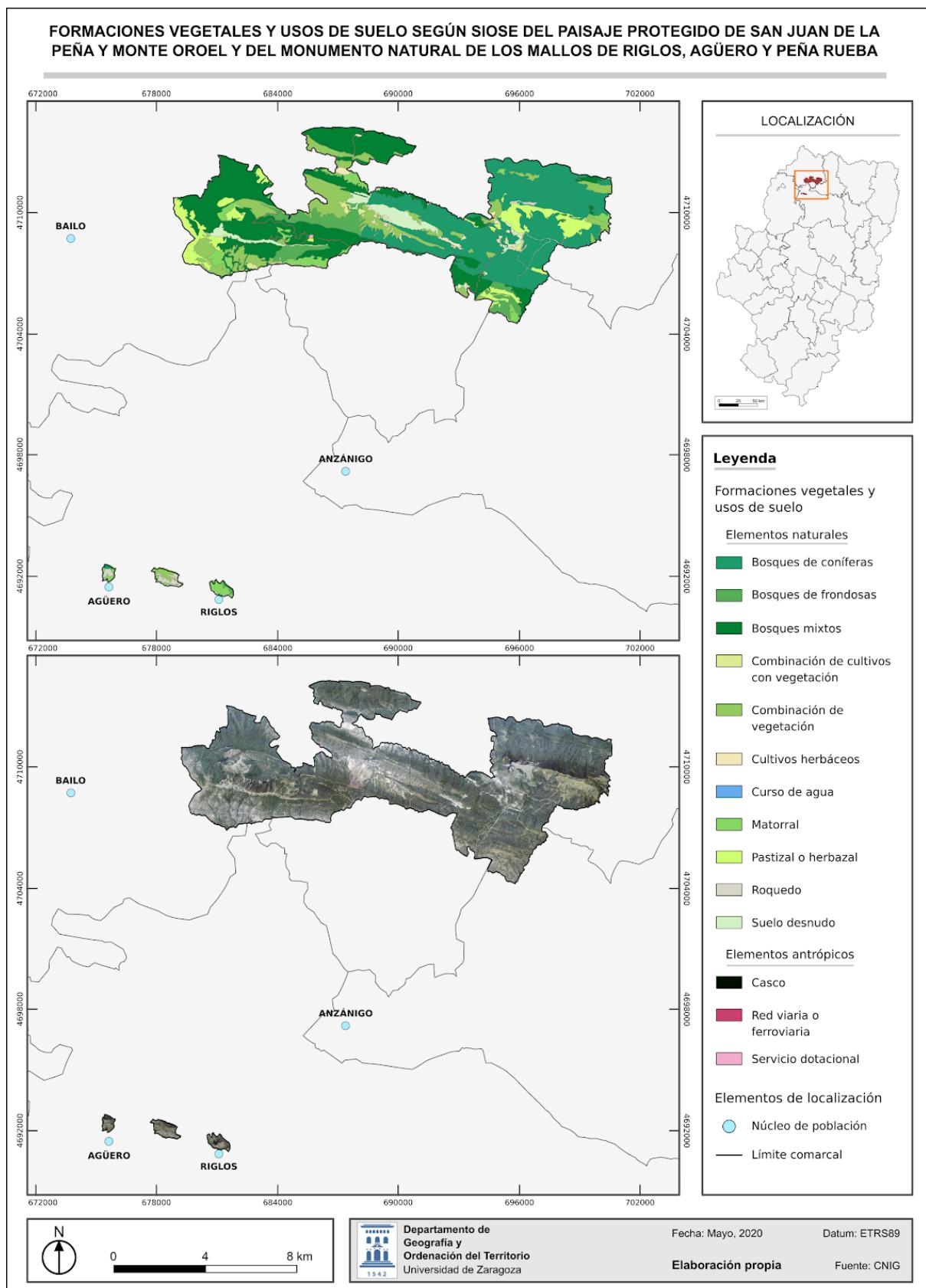


Figura 34. Mapa de vegetación según SIOSE y ortofoto. Elaboración propia

Esto queda más claramente de manifiesto en la Tabla 8 y en la Figura 35, donde muestran los datos estadísticos. Se aprecia que la formación vegetal predominante en la zona de estudio es el *Bosque de coníferas*, seguido de cerca por el *Bosque mixto*. A gran distancia se sitúa lo que se clasifica como *Combinación de vegetación*, y el *Pastizal o herbazal*. Cabe destacar la reducida presencia de los cursos de agua, como ya se comentó en el apartado correspondiente; y de la red viaria, lo cual indica que es un territorio muy poco permeable para los tránsitos humanos; en definitiva, un espacio natural en todo sentido. También es destacable que solamente el 4% del territorio está ocupado por *Suelo desnudo* o *Roquedo*.

CODIIGE	Tipo de vegetación y usos de suelo	Ocupación (%)
111	Casco	0,00
140	Servicio dotacional	0,03
150	Asentamiento agrícola y huerta	0,01
161	Red viaria o ferroviaria	0,36
210	Cultivo herbáceo	1,27
260	Combinación de cultivos con vegetación	0,73
311	Bosque de frondosas	5,81
312	Bosque de coníferas	33,36
313	Bosque mixto	29,45
320	Pastizal o herbazal	7,31
330	Matorral	4,54
340	Combinación de vegetación	12,56
352	Roquedo	0,68
354	Suelo desnudo	3,88
511	Curso de agua	0,03

Tabla 8. Ocupación de los tipos de vegetación según SIOSE. Elaboración propia

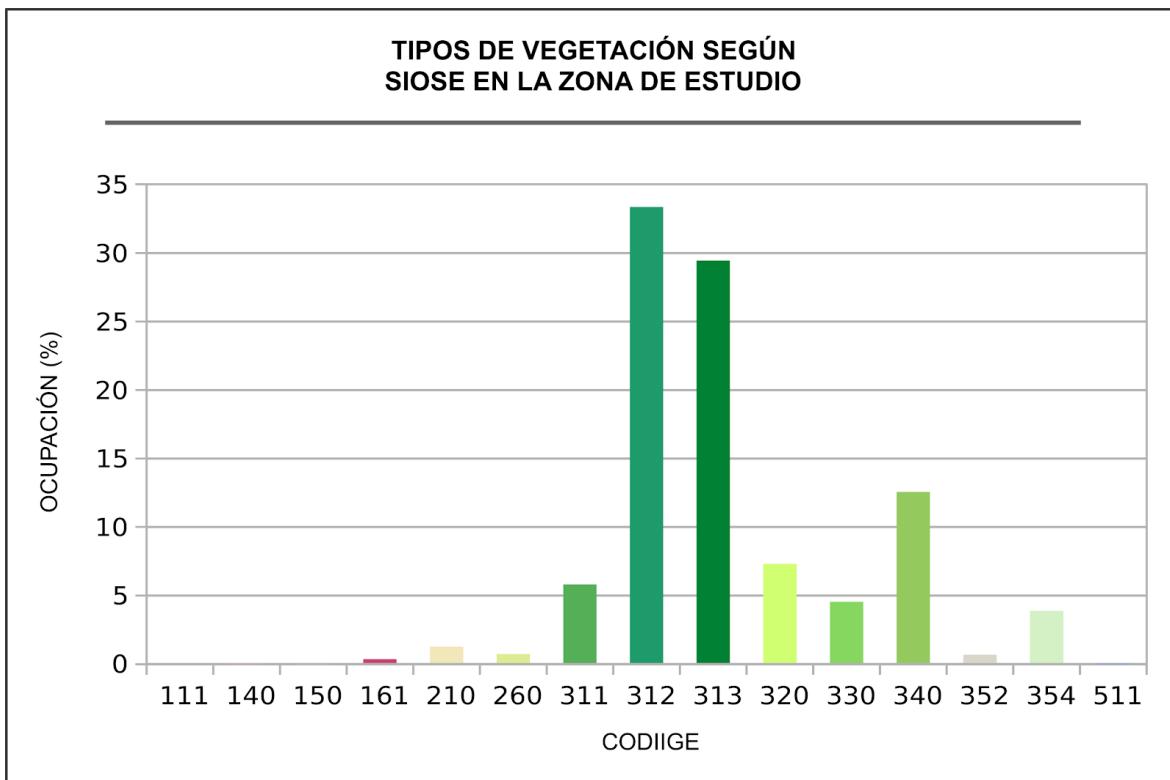


Figura 35. Tipos de vegetación según SIOSE. Elaboración propia

Como se puede observar, el 88,5% del territorio se distribuye entre tan solo 5 clases SIOSE. Como hemos considerado que esto es un nivel de agregación demasiado grande para un estudio de una zona relativamente pequeña, hemos analizado otra fuente de información que nos aporta una mayor precisión en cuanto a las categorías. Esta es la que estudiaremos en el próximo apartado.

3.3.4. Unidades de vegetación del mapa de paisajes de Aragón

La Comunidad Autónoma de Aragón está elaborando desde hace tiempo los Mapas de Paisaje de nuestro territorio a escala comarcal. Estos documentos los conocemos perfectamente ya que los hemos utilizado intensamente en la asignatura de "Paisaje y Ordenación del territorio" en nuestros estudios de Grado. Para los objetivos de este TFG nos interesa especialmente la cartografía de Vegetación y Usos de suelo, que se utiliza como base para la confección del mapa de Tipos de Paisaje junto con el mapa de Unidades Fisio-geomorfológicas y de Grandes Dominios del Paisaje.

El mapa de Vegetación y Usos de suelo se ha realizado tomando como cartografías de base el Mapa Forestal de España Escala 1:50.000, el SIOSE 1:50.000, el Mapa Forestal de Aragón 1:50.000 y la fotografía aérea PNOA 2006. También ha habido un trabajo de análisis in situ de los resultados (VVA, 2009).

Como nuestra zona de estudio se distribuye entre tres comarcas (Jacetania -mayoritariamente-, Hoya de Huesca y Alto Gállego) se ha tenido que realizar una unión de las cartografías descargadas de IDEAragón y unificar la leyenda. Como se puede ver en la Tabla 9, esta es mucho más detallada que la del SIOSE. Por ejemplo, la categoría de *Bosques de coníferas* (CODIIGE 312) se distribuye en esta cartografía en tres clases (*Pinares mediterráneos y submediterráneos, Abetales y pinares eurosiberianos y Repoblaciones poco integradas*), los *Bosques mixtos* (CODIIGE 313) se distribuye en dos: *Pinares con frondosas marcescentes y Bosques mixtos de frondosas caducifolias*. Finalmente, los *Bosques de frondosas* (CODIIGE 311) se diferencia en *Bosques de frondosas marcescentes y Bosques de frondosas perennifolias*. Como se observa en el mapa de la Figura 36, esto proporciona un nivel de detalle mucho mayor.

Código	Tipo de vegetación y usos de suelo	Ocupación (%)	Código	Tipo de vegetación y usos de suelo	Ocupación (%)
1	Prioriza unidad fisio-geomorfológica	0,02	11	Pinares con frondosas perennifolias	1,73
3	Bosques de frondosas marcescentes	4,95	13	Bojedas y otros matorrales	10,83
4	Bosques de frondosas perennifolias	3,90	14	Matorrales mediterráneos	0,51
5	Bosques de frondosas perennifolias y marcescentes	1,75	15	Matorral-pastizal	0,07
6	Abetales y pinares eurosiberianos	11,62	17	Pastos	0,22
7	Pinares mediterráneos y submediterráneos	32,95	18	Prados y praderas	0,32
8	Repoblaciones poco integradas	4,23	19	Cultivos herbáceos	0,90
9	Bosques mixtos con frondosas caducifolias	9,05	21	Mosaico agroforestal	0,01
10	Pinares con frondosas marcescentes	16,27	24	Caucas	0,04
			26	Roquedos	0,60
			29	Áreas urbanizadas	0,01

Tabla 9. Ocupación de los tipos de vegetación según el Mapa de Paisajes. Elaboración propia

FORMACIONES VEGETALES Y USOS DE SUELO SEGÚN EL MAPA DE PAISAJES DEL PAISAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA

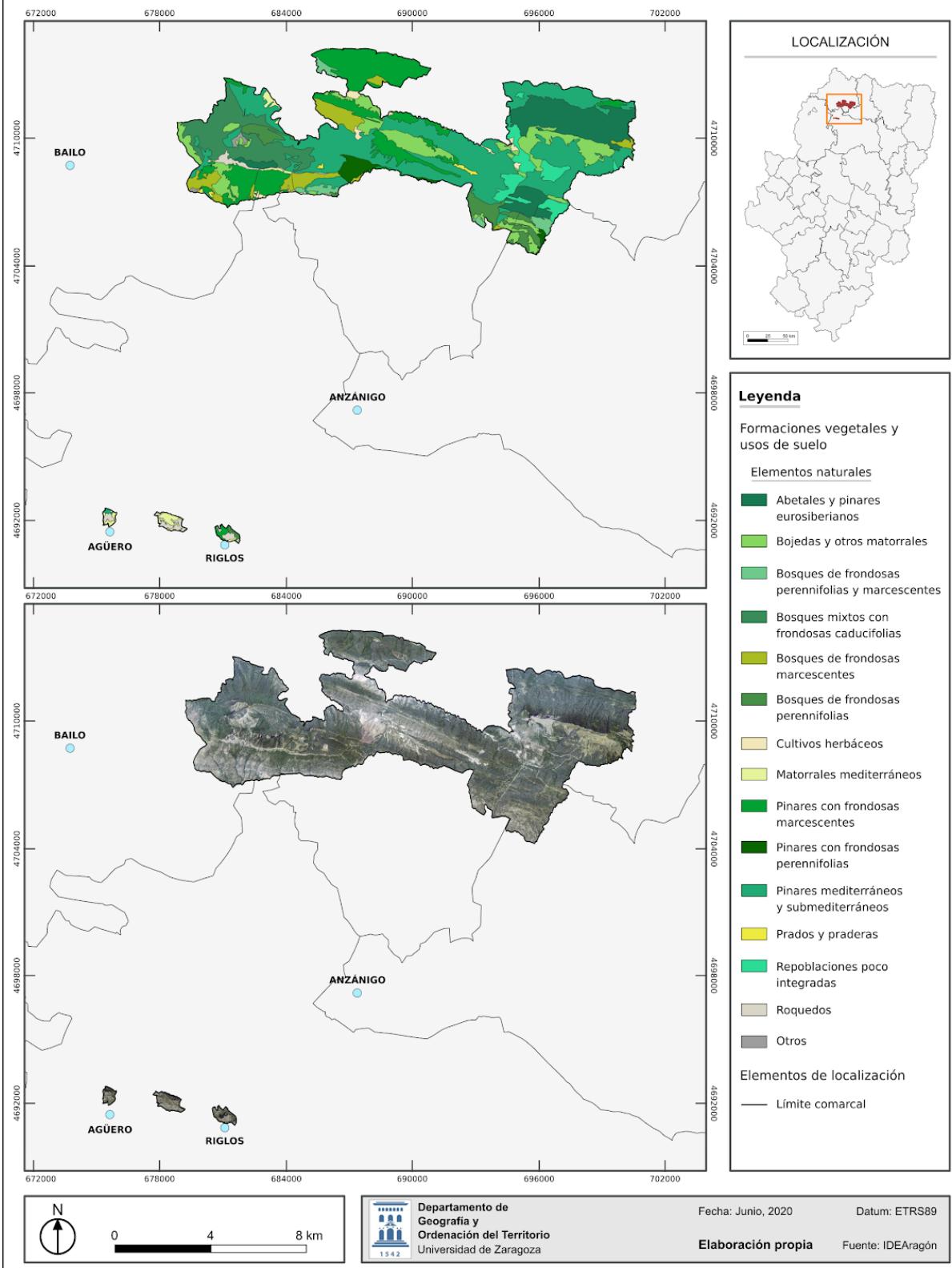


Figura 36. Mapa de vegetación según el Mapa de Paisajes y ortofoto. Elaboración propia

Como las denominaciones de las unidades que utiliza el Mapa de Paisajes son extensas y generales, en el resto del TFG utilizaremos frecuentemente un término más concreto, aunque en ocasiones pueda ser algo menos exacta. El objetivo es hacer la lectura del texto más sencilla. En cualquier caso, siempre se hará mención al categoría utilizada en la memoria. Así, el bosque de frondosas marcescentes lo llamaremos *quejigal*; al de frondosas perennifolias, *encinar*; a los abetales y pinares eurosiberianos les llamaremos *pinar-abetal*; los bosques mixtos con frondosas caducifolias, *hayedo-abetal*; los pinares con frondosas marcescentes, *pinar con quejigos*; y, a las bojedas y otros matorrales, *bojedas y erizionales*.

Como se puede observar en la Figura 37 el tipo de vegetación predominante, con gran diferencia, son los pinares mediterráneos y submediterráneos (7), que ocupan un 33% del territorio aunque se distribuyen fundamentalmente por el sector central y oriental de la zona estudiada y ocupando, preferentemente, las zonas más bajas. En la umbría del Monte Oroel se reconocen perfectamente dos pisos de vegetación: un pinar mediterráneo en la parte más baja y un pinar eurosiberiano en la parte más alta. Esta distinción no se puede apreciar en SIOSE porque todos los bosques de coníferas aparecen en la misma categoría.

A mucha distancia se encuentran los pinares con quejigos (10), el pinar-abetal (6), las bojedas con erizón (13) y los hayedos-abetales (9).

Los pinares con quejigos se distribuyen principalmente en la zona más septentrional y la zona suroccidental del Paisaje Protegido. Los pinares-abetales se localizan preferentemente en el sector oriental de la zona de estudio. Por su parte, las bojedas y erizionales se distribuyen prácticamente por todo el territorio y, los hayedos-abetales, se sitúan únicamente en el sector occidental del Paisaje Protegido.

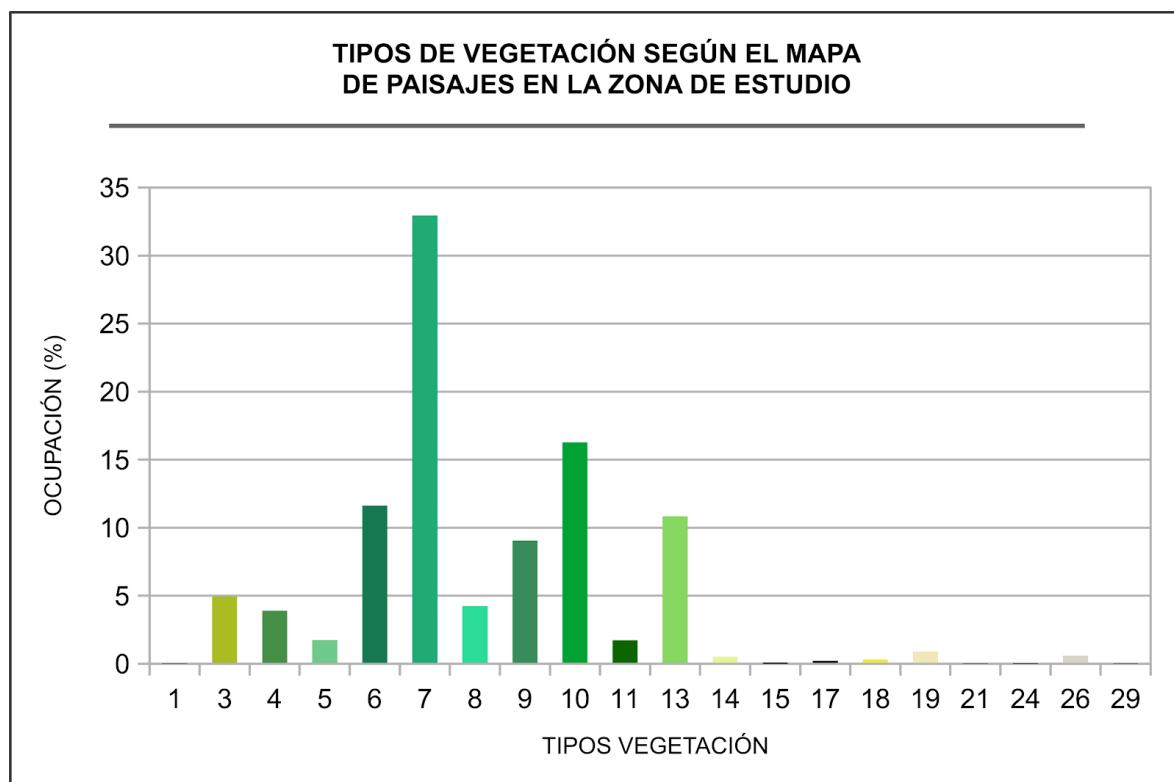


Figura 37. Tipos de vegetación según el Mapa de Paisajes. Elaboración propia

3.3.5. Datos obtenidos mediante la tecnología LIDAR

LIDAR es un acrónimo que significa Light Detection And Ranging. Básicamente consiste en un emisor-receptor láser que va aerotransportado. La precisión de la medición de los tiempos de salida y de llegada de los pulsos es tan elevada que nos permite detectar diferentes reflejos que se producen en diferentes puntos de la cubierta vegetal, edificaciones, o suelo (Figura 38) (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [MAPA], s.f.).

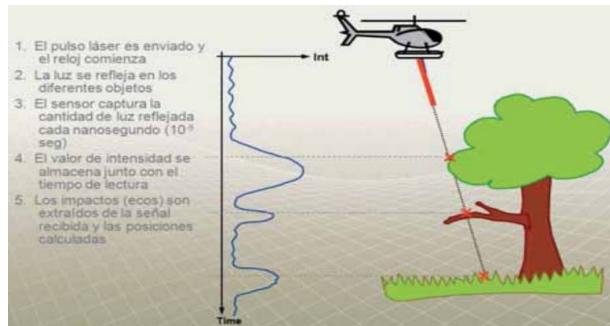


Figura 38. Funcionamiento de la tecnología LIDAR.
Fuente: MITECO -1-

El resultado final es un fichero de millones de puntos georreferenciados que indican estas reflexiones. Estos ficheros se distribuyen en formato LAS o comprimidos, en formato LAZ. Actualmente son distribuidos públicamente por muchas administraciones como el CNIG o IDEAragón. Un parámetro fundamental es la densidad de puntos, que en el caso de Aragón, y en la mayor parte del territorio nacional, es de 0,5 puntos por metro cuadrado. En la Comunidad Foral de Navarra la resolución aumenta hasta los 14 puntos por m^2 , lo cual permite estudios de altísima resolución (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agencia Urbana [MITMA], s.f.).

En la zona del Pirineo solamente disponemos de un vuelo LIDAR realizado en 2010, aunque en otras zonas de Aragón, como por ejemplo en el Bajo Aragón, ya hay disponible datos del año 2018. Hemos hecho una consulta al CNIG y nos han indicado que durante la segunda mitad de este año 2020 se va a hacer el vuelo de la zona de estudio, y que para el año 2021 ya estarán disponible para descargar los ficheros en su portal. Ello permitirá hacer estudios de la evolución de la vegetación que pueden resultar muy interesantes.

El tratamiento de los ficheros LIDAR se ha realizado con el entorno estadístico R, en concreto con el paquete especializado en este tipo de datos llamado *lidR*, siguiendo las instrucciones del tutorial que propone Jean-Romain (2020). Básicamente consiste en la conversión del fichero de puntos en un fichero ráster mediante un proceso de interpolación. De este modo se obtienen dos productos: un modelo digital de superficies (MDS), que viene de las primeras reflexiones del láser, y un modelo digital de elevaciones (MDE), a partir de los últimos retornos. Al restar del modelo digital de superficies el modelo digital de elevaciones obtenemos un Modelo Digital de Copas, que indica la altura de la vegetación en cada punto del territorio.

El primer producto LIDAR que hemos obtenido se puede observar en la Figura 39. Como en otros aspectos del estudio de la vegetación y sus relaciones con las variables climáticas y topográficas nos hemos centrado en la zona del Paisaje Protegido por su mayor extensión, conectividad y accesibilidad. En este caso, además hay que añadir una nueva razón y es que, en zonas de pendientes muy elevadas, los programas de procesamiento de los ficheros LIDAR "confunden" estas zonas con arbolado alto.

En la figura se representa la altura de la vegetación en esta zona, que se ha obtenido por interpolación de la nube de puntos LIDAR con una resolución de 10 m. Hay que hacer mención a que este producto tiene una parte de intervención “manual”, ya que los datos LIDAR presentan problemas en las zonas prácticamente verticales, como los escarpes, que interpreta como vegetación alta. Además, las edificaciones deben ser removidas, ya que evidentemente no son vegetación. Para resolver el primer problema se aplicó una técnica muy habitual el Teledetección. Se hizo una máscara en el mapa de pendientes convirtiendo en “0” todos los valores superiores a 70° y “1” todos los demás, de modo que multiplicando esta máscara por el Modelo Digital de Copas preliminar obtenemos un resultado más correcto ya que todos los valores erróneos debidos a las pendientes elevadas se convirtieron en ceros. El Monasterio Nuevo de San Juan de la Peña se ha diferenciado editando manualmente el ráster de altura de la vegetación.

El Modelo Digital de Copas del LIDAR dibuja claramente las manchas de vegetación más boscosas, situadas en las laderas de umbría del Monte Oroel y en la parte más alta del macizo de San Juan de la Peña, especialmente alrededor del Monasterio Nuevo. Además perfila claramente las laderas de solana y umbría del Paisaje Protegido. Globalmente se aprecia que la vegetación predominante tiene una altura de 0 a 5 m.

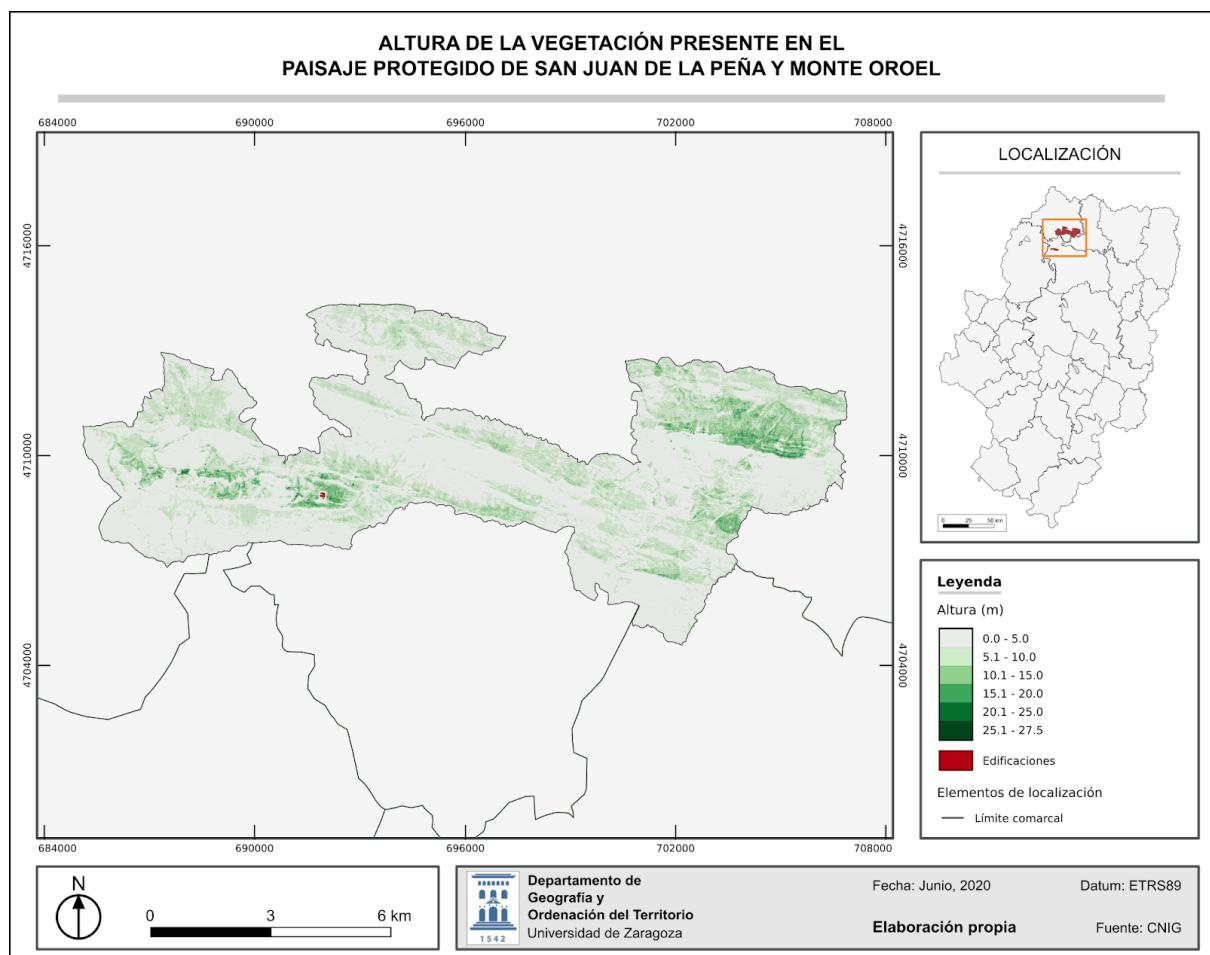


Figura 39. Modelo Digital de Copas del Paisaje Protegido. Elaboración propia

La Figura 40 muestra dos recuadros de 4 km² de la zona del Monasterio Nuevo de San Juan de la Peña, a la izquierda, y de la ladera de umbría del Monte Oroel, a la derecha. A pesar de la baja densidad de puntos LIDAR y de la resolución del modelo se pueden observar algunas características que demuestran las posibilidades de esta tecnología, como por ejemplo, cómo se delinean perfectamente las superficies de estratificación en la ladera norte de Oroel. En los niveles menos competentes se desarrolla arbolado y en los menos resistentes no. También se observa perfectamente cómo se ha deforestado toda la zona colindante al Monasterio Nuevo, con un trazado muy regular.

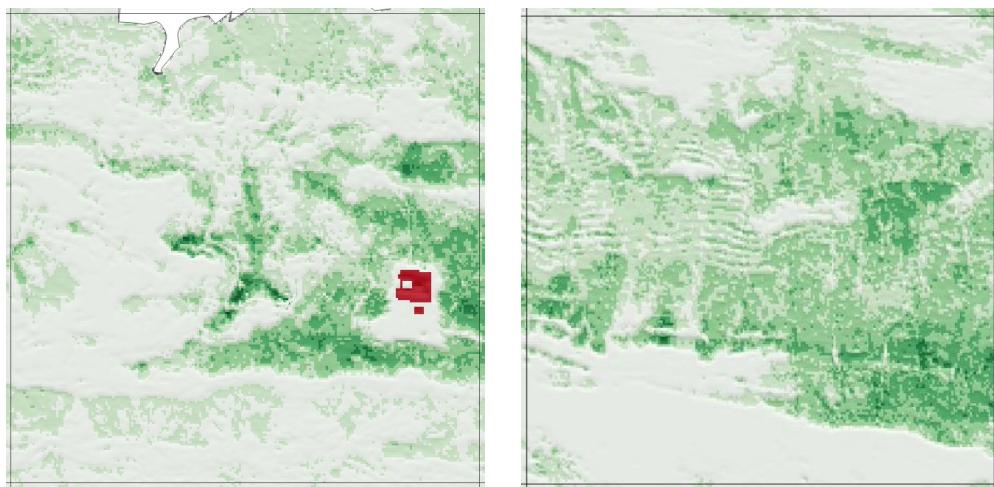


Figura 40. Detalles del Modelo Digital de Copas. Elaboración propia

Uno de los procesos más básicos de la Ecología Vegetal es clasificar la vegetación en función de su altura, ya que esto nos permite definir los estratos de vegetación. A partir del Modelo Digital de Copas esta es una tarea muy sencilla ya que consiste en una reclasificación de los valores de la altura. En nuestro caso hemos seguido los intervalos propuestos para el Parque Nacional de Monfragüe (Tabla 10) (MITECO, s.f. -1-).

El resultado se puede ver en la Figura 41. Se observa claramente el contraste de la altura de la vegetación en el Monte Oroel en función de si se encuentra en la ladera de umbría o en la de solana, encontrándose arbolado alto en la primera y matorral pulvinular, pastos ralos o incluso suelo desnudo en la segunda. Como es de esperar el mismo suceso ocurre en el Monte Cuculo, salvo que en este encontramos arbolado algo más bajo en la ladera de umbría. La zona de San Juan de la Peña presenta una gran superficie de arbolado alto, especialmente en la parte más alta. También se aprecia el efecto topográfico, como veremos en profundidad en un apartado de este TFG.

Estrato de vegetación	Altura (m)
Matorral pulvinular/ Pastos ralos/ Suelo desnudo	< 0,2
Pastos altos	0,2 - 0,5
Matorral alto	0,5 - 2,0
Arbustivo	2,0 - 4,0
Arbolado bajo	4,0 - 10,0
Arbolado alto	> 10

Tabla 10. Definición de los estratos de vegetación. Elaboración propia

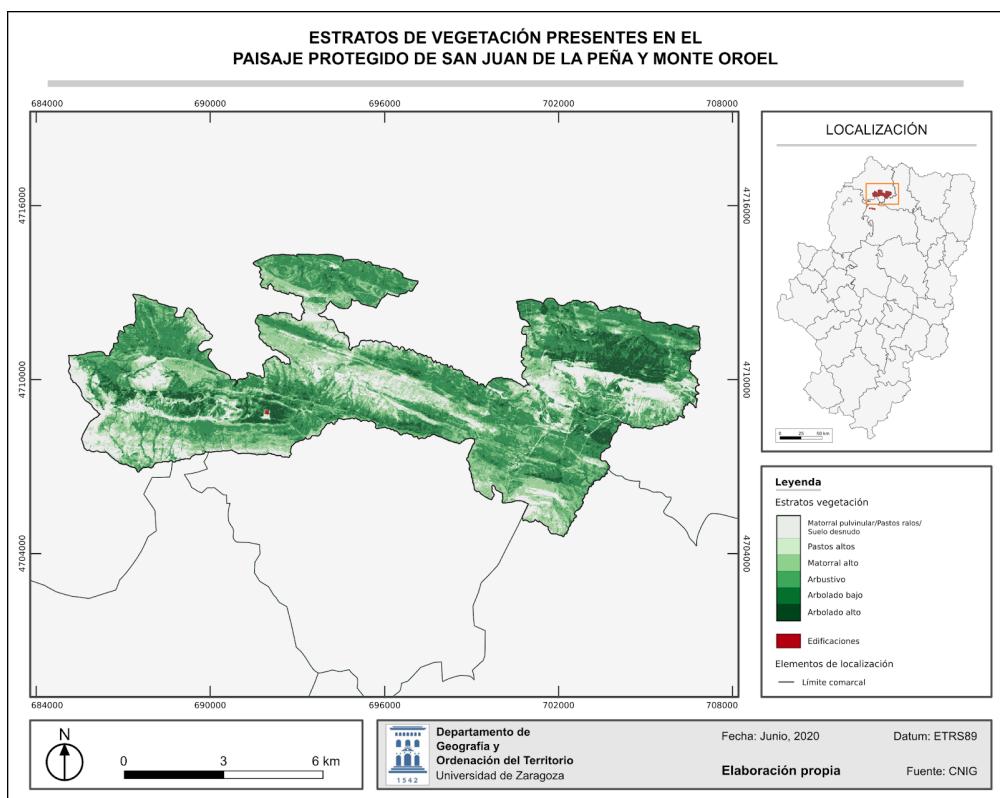


Figura 41. Estratos de vegetación en el Paisaje Protegido. Elaboración propia

La Tabla 11 presenta los datos estadísticos de este mapa de estratos de vegetación. Globalmente el estrato predominante es el arbolado, que en conjunto supone el 42,45% del territorio. Este se diferencia en dos niveles, siendo mucho más abundante el arbolado bajo (34,62%) que el arbolado alto (7,92%). El segundo estrato más abundante es el matorral alto, con un 20,37%, seguido del arbustivo, que presenta el 17,96%. Un 11,44% está ocupado por una clase que los datos LIDAR no es capaz de discriminar y que incluye el suelo desnudo, pero también pastizales bajos, e incluso el matorral pulvinular tan frecuente en bastantes zonas del Paisaje Protegido y que muchas veces tapiza el suelo muy densamente.

Estrato de vegetación	Superficie (km ²)	% superficie total
Matorral pulvinular/Pastos ralos/Suelo desnudo	10,81	11,44
Pastos altos	7,22	7,64
Matorral alto	19,25	20,37
Arbustivo	16,98	17,96
Arbolado bajo	32,72	34,62
Arbolado alto	7,50	7,92
Edificaciones	0,02	0,02

Tabla 11. Abundancia de los estratos de vegetación. Elaboración propia

Estudio de caso de la aplicación de la tecnología LIDAR

para el análisis de alta resolución de la vegetación

Después de haber estudiado la tecnología LIDAR y haber descubierto cómo es aplicada en estudios forestales (hasta el punto de poder calcular el número de árboles, la cantidad de madera que pueden producir...), hemos hecho un pequeño estudio de una zona concreta del Paisaje Protegido. El objetivo es explorar lo que se podría hacer con el LIDAR en el ámbito de la Geografía para el estudio de la vegetación.

Para ello hemos utilizado el paquete estadístico R y, seguido a modo de tutorial, el procedimiento propuesto por Andrew Plowright (2020) en la documentación del paquete *Forest Tools*.

En la Figura 42 aparece la ortofoto de esta zona de estudio. Es un recuadro de aproximadamente 14 ha de bosque situado entre el Monasterio Viejo y el Monasterio Nuevo de San Juan de la Peña. Se puede apreciar que es una zona en la que el arbolado es considerablemente denso, salvo en los márgenes de la carretera. También se pueden reconocer en algunos casos copas individualizadas y un arbolado de diferentes tallas, así como diversos claros.

Para esta misma área se ha elaborado un Modelo Digital de Copas de una resolución mucho mayor a la que se hizo el Modelo Digital de Copas de todo el Paisaje Protegido presentado en la Figura 39. Si aquel tenía una resolución de 10 metros, este tiene una resolución de 0,5 m. El resultado se presenta en la Figura 43. Como podemos ver, en líneas generales el modelo de alturas dibuja perfectamente el arbolado, incluso en muchas de las copas se aprecia cómo diferencia la altura de la parte más alta de la parte media, siendo capaz de distinguir dentro de los árboles más altos diferentes zonas. Igualmente se dibuja perfectamente el trazado de la carretera y la presencia de árboles grandes aislados entre otros de menor talla. El modelo digital confirma en muchos aspectos las primeras impresiones visuales que nos proporciona la ortofoto. De confirmarse esto sería una ayuda extraordinaria ya que la ortofoto es un elemento básico y fundamental para la investigación de la vegetación, al menos en las fases de estudio previo de gabinete, antes de hacer las campañas de trabajo en el campo. Si el geógrafo dispusiera de una herramienta digital y automatizada para la realización de estudios sería extraordinariamente interesante y útil, ya que podría permitirnos hacer unas campañas de campo mucho más dirigidas. En cualquier caso, las condiciones especiales en las que se ha desarrollado este TFG nos ha impedido ir al terreno y confirmar si los valores que proporciona el modelo digital, por ejemplo en árboles concretos, son correctos o si presentan algún error. Esto quedaría pendiente para un análisis futuro.

Lógicamente, el Modelo Digital de Copas nos permite obtener productos derivados como los que vemos en la Figura 44. Por ejemplo, podemos localizar el ápice de las copas, lo que, a su vez, posibilita hacer un recuento del número de árboles presentes en una zona. En el caso de este área son 3998. Además, es capaz de hacer una delimitación de las copas de los árboles. Este es un proceso con mucho tiempo de cálculo, pero aporta muchos datos relevantes, como por ejemplo el tamaño de las copas. En la Tabla 12 aparecen todos los datos que el algoritmo es capaz de recopilar. Cabe destacar que la altura mínima es de 3 metros porque en el algoritmo se ha puesto este límite inferior para definir qué entendemos por un árbol.

Estadístico	Valor
Número de árboles	3998
Media del área de las coronas (m ²)	27,3
Mediana del área de las coronas (m ²)	23,5
Desviación estándar del área de las coronas (m ²)	18,3
Área mínima de las coronas (m ²)	0,3
Área máxima de las coronas (m ²)	164
Altura media de los árboles (m)	12,3
Mediana de la altura de los árboles (m)	12,5
Desviación estándar de la altura de los árboles (m)	4,4
Altura mínima de los árboles (m)	3,0
Altura máxima de los árboles (m)	24,4

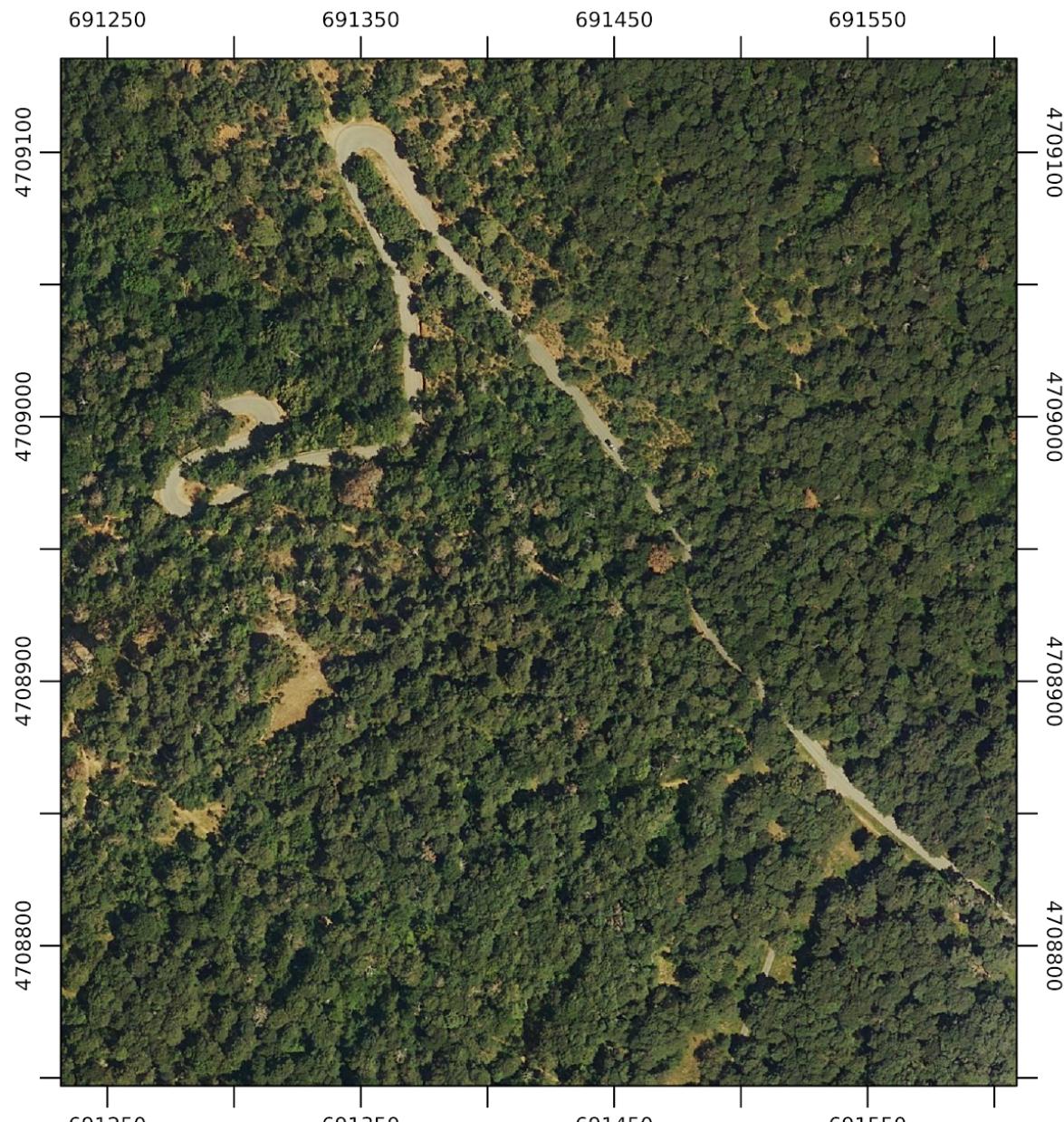
Tabla 12. Estadísticas forestales. Elaboración propia

Además de los valores medios podemos obtener una representación espacial de la distribución de estas variables, como vemos en la Figura 45, en la que se hace una reducción de la resolución a 12 m con interpolación de estas variables. Por ejemplo, se ve claramente que la altura media del arbolado es superior en la parte meridional, en la que además el número de árboles es inferior. Esto nos indica que ahí el bosque es más maduro y tiene menos árboles pero muy grandes y altos. Sin embargo, en la zona norte el número de árboles es más elevado pero tienen menos porte. Este tipo de conclusiones serían mucho más difíciles de obtener a partir del análisis visual de la ortofoto.

En la Figura 46 se han superpuesto los productos LIDAR vectoriales sobre la ortofoto de la zona. Como se puede apreciar, en líneas generales hay una coincidencia muy buena (por lo menos en la localización de los ápices). Es cierto que hay zonas de arbolado que no quedan reflejadas en el modelo, pero no sabemos si esto es debido a que este es el resultado del vuelo de 2010 y la ortofoto es de 2019. Por otro lado, la delimitación de las copas en algunas zonas no parece perfecta. Esto puede tener la misma causa, o también puede deberse a la baja densidad de puntos de este vuelo LIDAR. Tal vez, de haber tenido una densidad de 14 puntos por m², como tiene el territorio Navarro, el ajuste sería mayor.

Queda por tanto de manifiesto la necesidad e importancia del estudio de campo para comprobar la validez de los modelos digitales. Estos no se pueden tomar nunca como una representación de la Naturaleza hasta que no haya una comprobación, por mucho que puedan resultar impactantes.

ORTOFOTO PNOA ACTUAL DE UN SECTOR DEL PAISAJE
PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL



Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad de Zaragoza

Fecha: Junio, 2020

Datum: ETRS89

Elaboración propia

Fuente: CNIG

Figura 42. Ortofoto de un sector de San Juan de la Peña. Elaboración propia

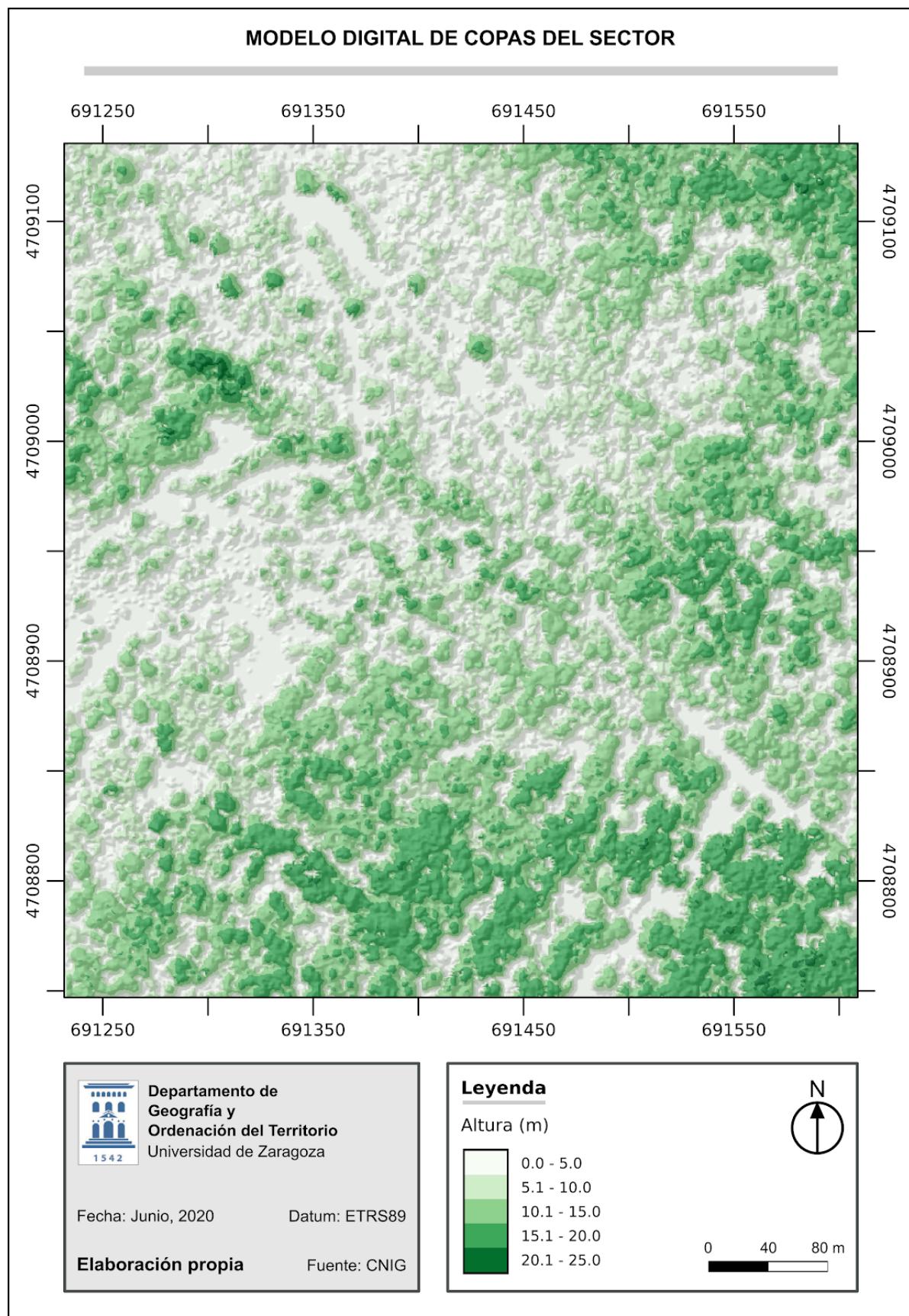


Figura 43. Modelo Digital de Copas. Elaboración propia

MODELO VECTORIAL DE COPAS Y CIMAS DEL SECTOR

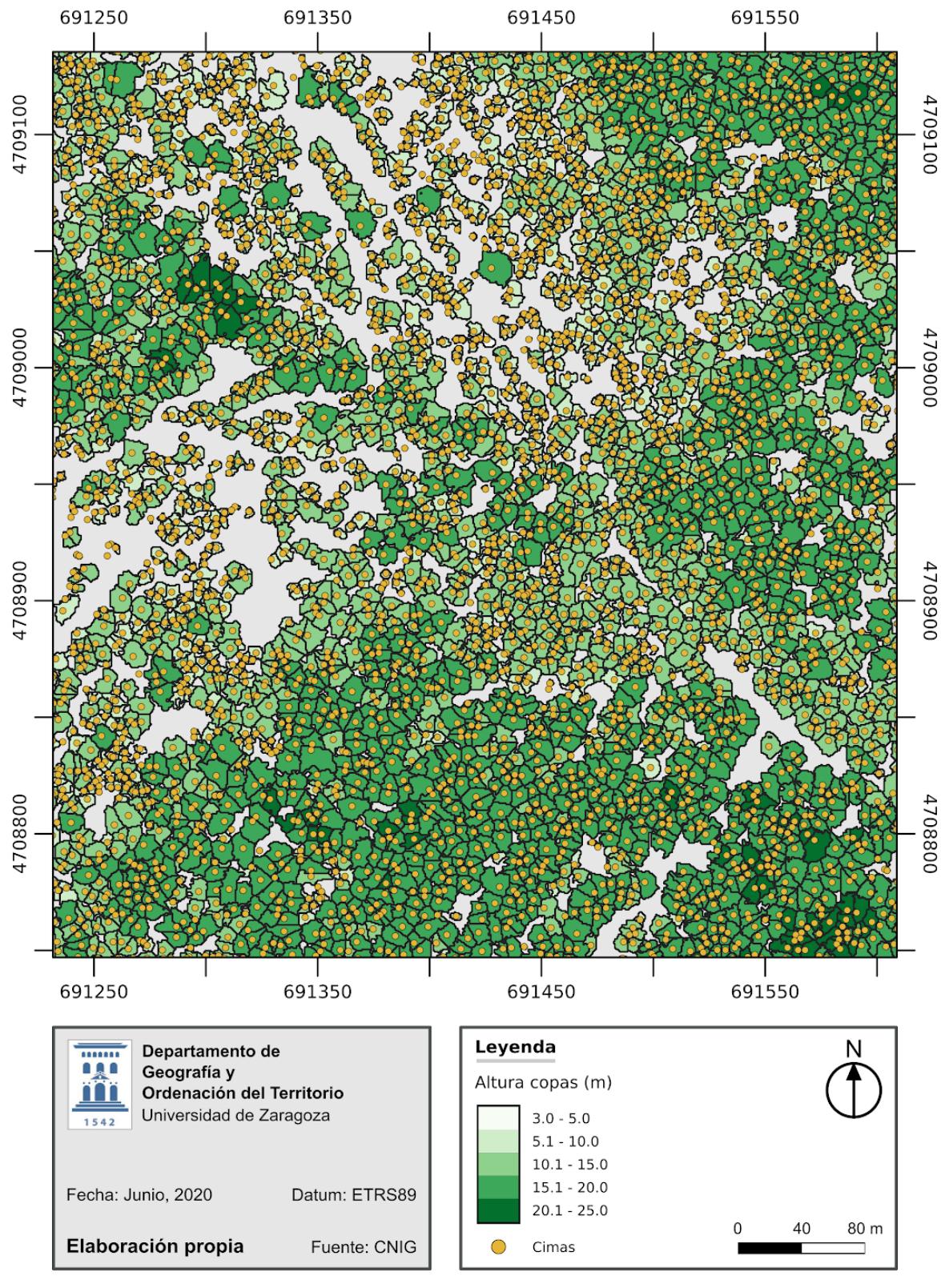


Figura 44. Modelo vectorial de copas y cimas. Elaboración propia

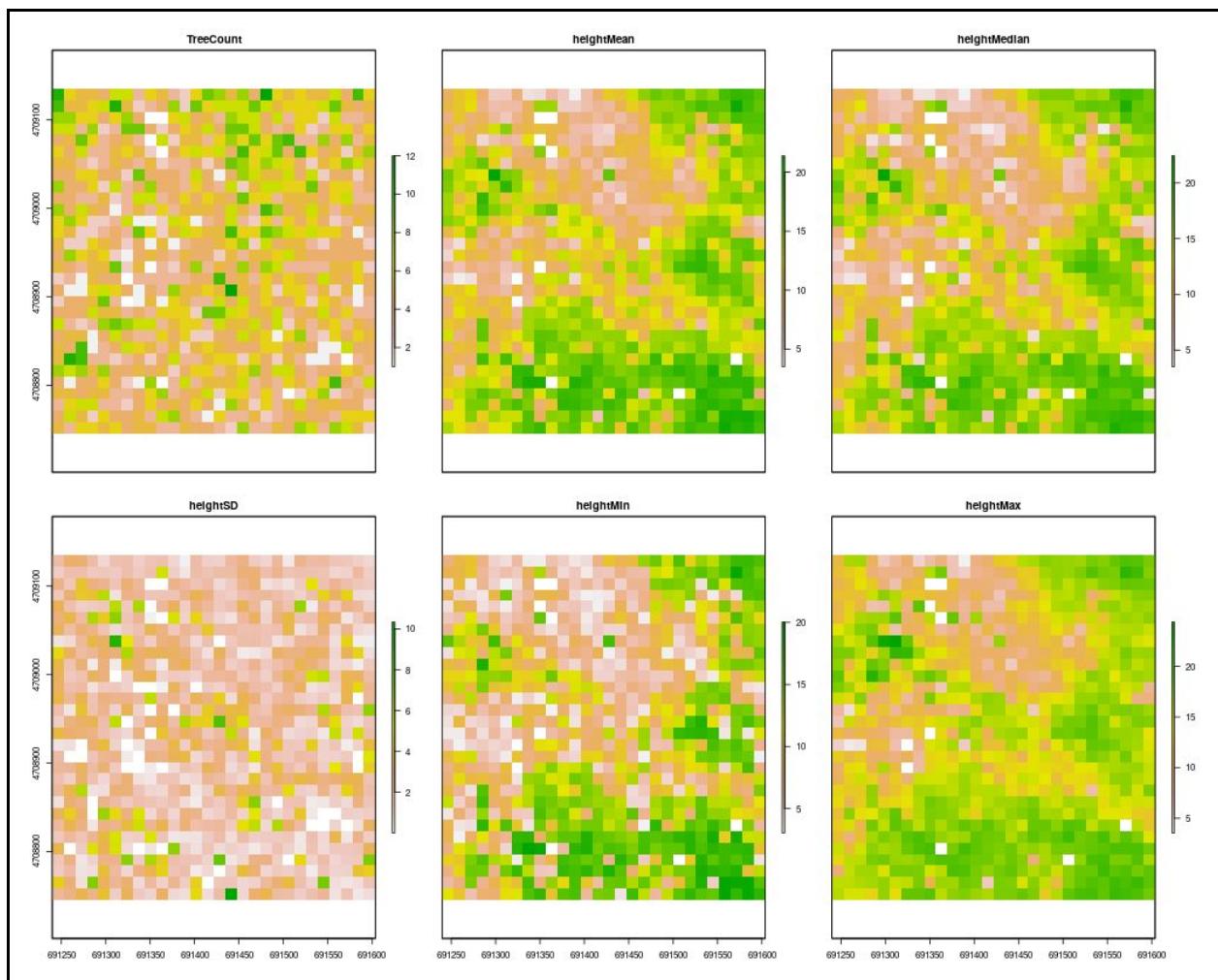


Figura 45. Diferentes estadísticas forestales obtenidas. Elaboración propia

**SUPERPOSICIÓN DEL MODELO VECTORIAL DE COPAS
Y CIMAS SOBRE LA ORTOFOTO DEL SECTOR**

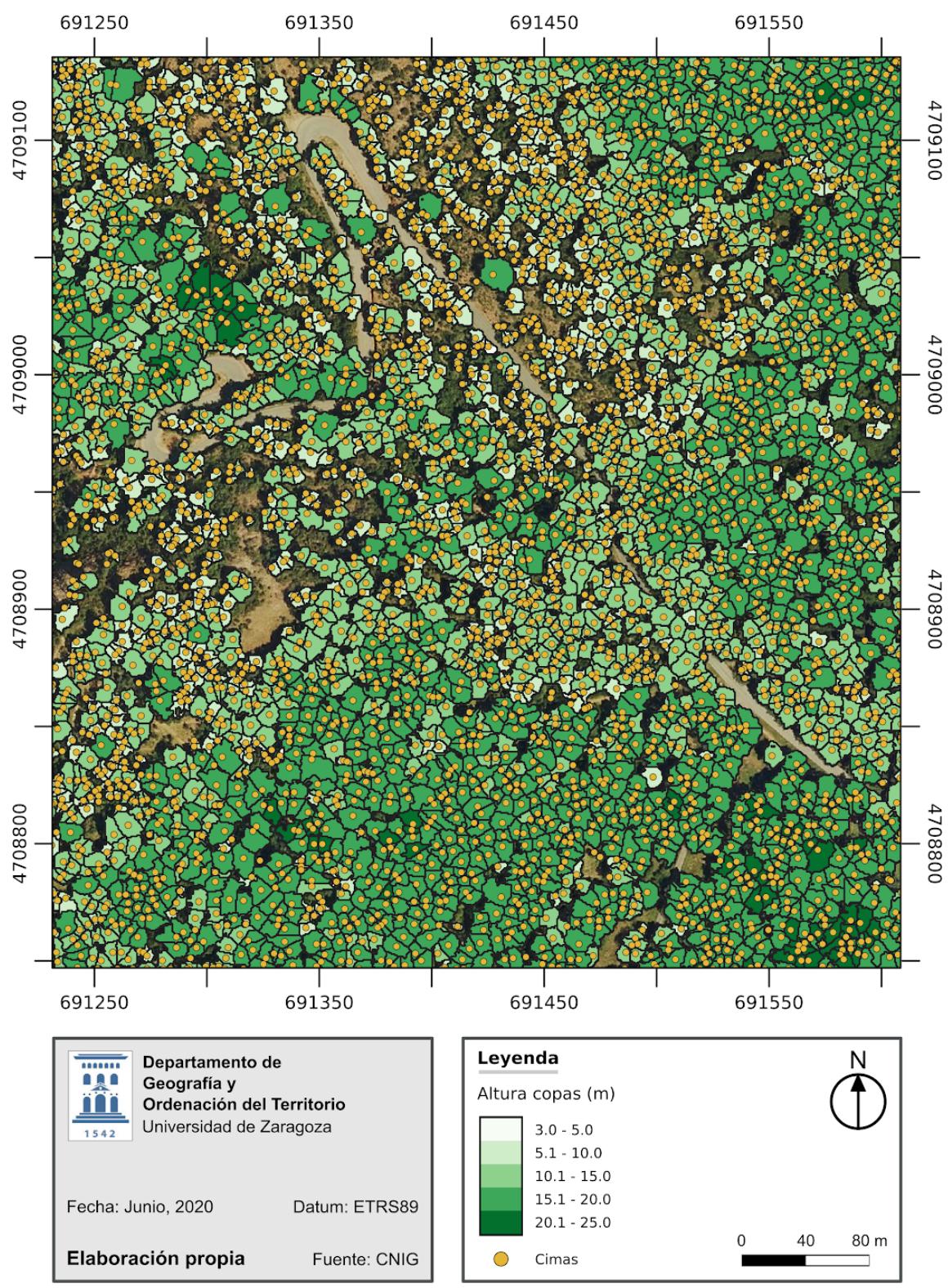


Figura 46. Superposición del modelo vectorial de copas y cimas sobre la ortofoto. Elaboración propia

Para acabar con nuestra exploración con las aportaciones de la tecnología LIDAR hemos querido confirmar la calidad del Modelo Digital de Superficies obtenido. Para ello lo hemos comparado con el mapa LIDAR que distribuye el CNIG y, a su vez, comparar ambos con la ortofotografía correspondiente.

Los resultados los podemos ver en la Figura 47. En la parte superior se observa la ortofotografía del extremo occidental de la Sierra de San Juan de la Peña. En la parte inferior, a la izquierda, se encuentra el mapa LIDAR de esa misma zona y, a la derecha, nuestro Modelo Digital de Superficies, con una paleta y un sombreado que intentan reproducir el del CNIG.

En nuestra opinión, la similitud de nuestro modelo con el de el CNIG se puede considerar aceptable. En líneas generales, no se aprecian grandes diferencias. Como ya se ha indicado, las grandes pendientes son consideradas como vegetación elevada, lo cual se observa muy claramente en nuestro modelo y, por ese motivo nosotros la hemos enmascarado. En el mapa del CNIG se ha optado por sombrearlas con una iluminación estratégica.

Comparando ambos productos con la ortofoto se aprecia que ninguno de los dos refleja perfectamente la realidad. Tal vez sea por una cuestión de desfase temporal. Llama la atención la *punta* occidental del relieve, que en nuestro modelo aparece ocupada por vegetación de alto porte y en el mapa del CNIG aparece con una coloración muy indefinida, cuando en la realidad no hay vegetación de ningún tipo.

En definitiva, creemos que nuestro modelo es perfectamente equiparable al del IGN, a pesar de haberse realizado de una manera muy básica.

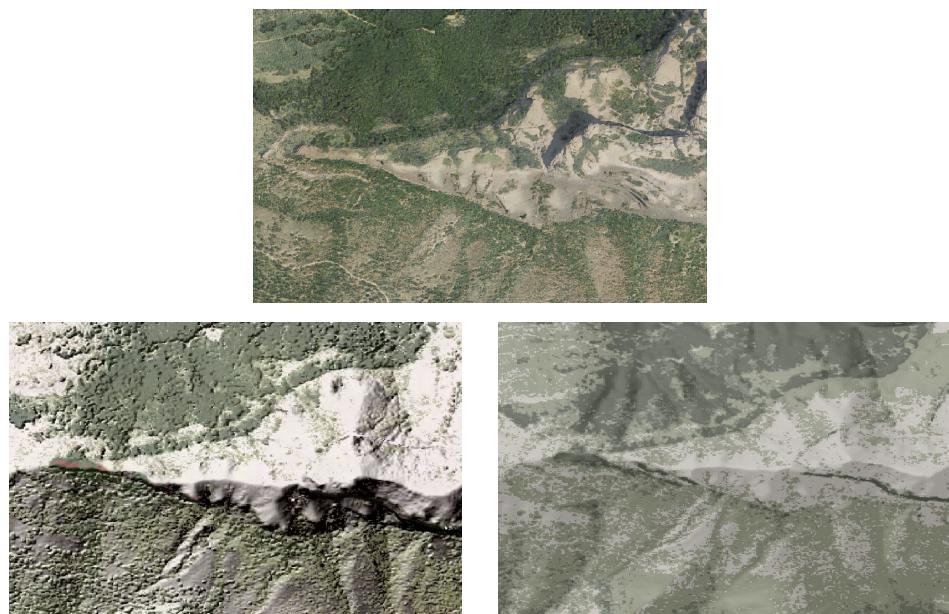


Figura 47. Comparación de la calidad del Modelo Digital de Copas. Elaboración propia

Como podemos ver, las posibilidades son inmensas, pero es cierto que los requerimientos de computación y cálculo son extraordinariamente elevados, dado el número de puntos que incluye un fichero LIDAR. En nuestro caso, con tan solo una densidad de 0,5 puntos por kilómetro cuadrado, la confección del modelo digital de copas para todo el Paisaje Protegido se prolongó durante prácticamente toda una noche (algo más de 7 horas), cuando su resolución era de tan solo 10 metros. Por su parte, en esta zona de estudio concreta tan reducida, ya a 0,5 metros de resolución, el cálculo del Modelo Vectorial de Copas se prolongó durante más de 4 horas en un ordenador de sobremesa. Evidentemente, si hubiera que extenderlo a todo el Paisaje Protegido sería necesario utilizar equipos de computación muy avanzados.

IV.

Relaciones entre el clima, el relieve y la vegetación

Aunque resulta evidente que estos tres elementos están claramente relacionados, no siempre es fácil conocer en detalle esas relaciones, porque en muchas ocasiones pueden ser muy complejas, o haber factores que no se tienen en cuenta. Por ejemplo, en nuestro caso, por el planteamiento del trabajo, no hemos tenido en cuenta el trascendental papel que juega el ser humano en la configuración del paisaje vegetal de un territorio. Por ese motivo, se analiza la vegetación actual, la que se observa en el territorio, y no la vegetación potencial que podría tener sin la intervención humana.

Por otro lado, la intervención humana sobre el clima parece evidente, pero esa cuestión se abordará en un apartado distinto, de modo que en este estudiaremos la relación de la vegetación con el clima actual.

En el caso del relieve no se nos presentan estos problemas, ya que podemos considerarlo fruto de un proceso geológico que no cambia a escala humana.

Para facilitar el análisis lo hemos organizado en tres bloques, combinando de dos en dos las tres variables.

Clima y relieve

Las leyes de la física establecen el gradiente térmico vertical, que hace que la temperatura disminuya a medida que ascendemos hacia terrenos más altos, y las estadísticas señalan que en ese mismo sentido las precipitaciones aumentan. Pero, sin embargo, si vamos a escalas más detalladas, hay otros factores, además de la altitud, que influyen de manera decisiva en las variables climáticas, como por ejemplo la orientación del terreno.

Entre nuestros objetivos está el de analizar estas relaciones, pero nos encontramos con un problema casi insalvable de "mezcla" de resoluciones. El Modelo Digital de Elevaciones con el que hemos trabajado tiene una resolución de 5 metros, lo cual nos permite un nivel de detalle de los análisis topográficos (altitudes, orientaciones y pendientes) muy elevado. Sin embargo, los datos climáticos que proporciona el modelo CLIMPY como ya sabemos es de 1000 metros. La diferencia es demasiado grande para analizar los detalles que pensamos que podemos encontrar en un relieve tan variado como el que presenta la zona de estudio. Por este motivo planteé la posibilidad de incrementar la resolución espacial mediante un proceso de interpolación a partir de los puntos centrales de cada píxel, pero se me aconsejó que era mejor no hacerlo ya que CLIMPY es un modelo muy bien diseñado. Además, esto resulta muy arriesgado en áreas de montaña tal y como indica Villar (1982).

Por lo tanto, sería interesante disponer de una red de estaciones meteorológicas dentro del territorio que pudiera proporcionar datos de mayor resolución o, incluso, afinar los datos obtenidos por el modelo CLIMPY, para poder hacer un cruce de información con el MDE a mayor resolución y así poder descubrir relaciones que actualmente pueden estar enmascaradas. Otra posibilidad sería explorar otras fuentes de información de alta resolución como las que nos proporciona la teledetección espacial. En este sentido hemos explorado las posibilidades que ofrecen los datos de SENTINEL.

La relación de las precipitaciones y temperaturas con la altitud la hemos estudiado desde el punto de vista estadístico. Para ello se ha hecho un análisis de regresión lineal entre la temperatura media y la precipitación anual con la altitud en la zona del Paisaje Protegido con la ayuda de herramientas SIG (cruzando los rásteres de variables climáticas con el MDE). Para ello se ha reducido la resolución del MDE para hacerla coincidir con la de los ficheros CLIMPY. Los diagramas de dispersión de ambas variables con respecto a la altitud se pueden observar en la Figura 48.

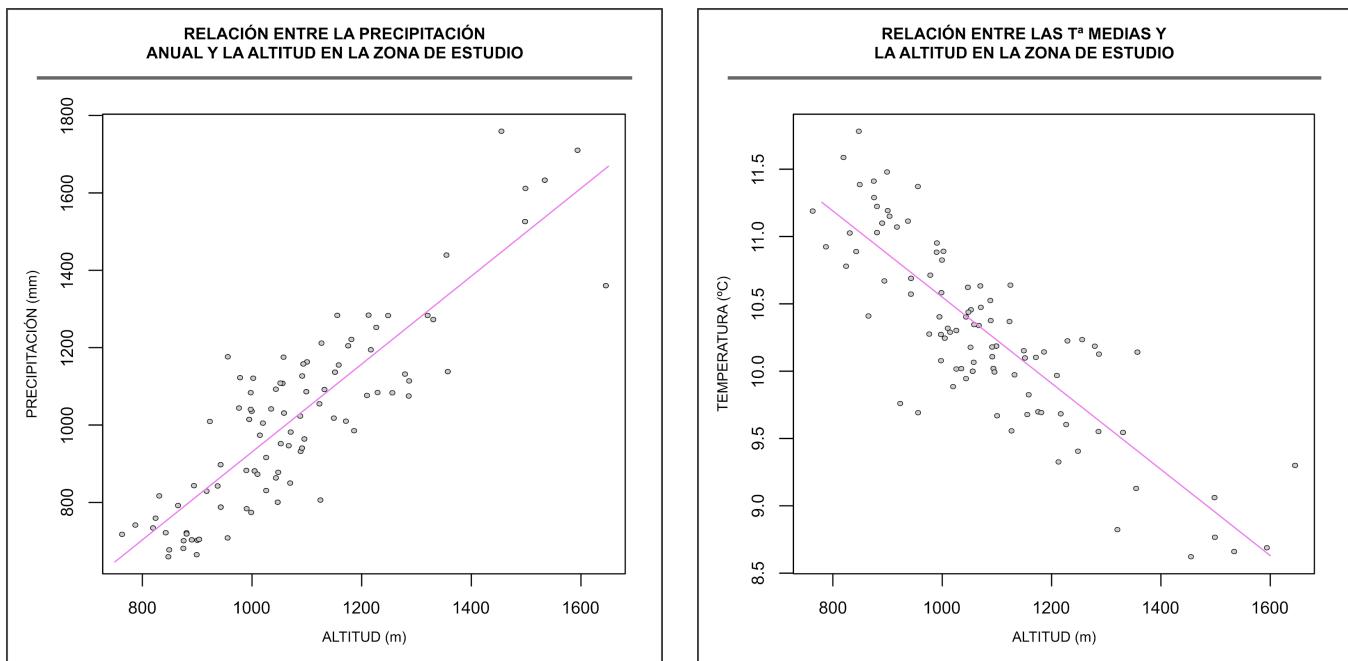


Figura 48. Análisis de regresión entre variables climáticas y la altitud. Elaboración propia

Para comparar los resultados se ha hecho un análisis similar con los datos del Atlas Climático de Aragón. Ambos modelos son distintos en muchos sentidos, pero destaca especialmente la resolución, que en el caso del CLIMPY es de 1000 metros y en el caso del Atlas Climático de Aragón es de 100 metros.

En la Tabla 13 se presentan los principales resultados de este análisis. La función de regresión para las temperaturas medias obtenidas por CLIMPY tiene un valor de $R = -0,843$, lo cual supone un $R^2 = 0,711$. Esto significa que las variaciones en la altitud explican en un 71,1% las variaciones en la temperatura media. Este valor es muy similar al que hemos obtenido al hacer el estudio con el Atlas Climático de Aragón, en el que $R^2 = 0,682$. Hay que recordar que ambos son modelos, y da la sensación de que en el modelo CLIMPY y en el modelo del Atlas Climático de Aragón el peso de la altitud es muy parecido.

En el caso de las precipitaciones los dos modelos son muy diferentes, con un valor de R^2 de 0,747 y 0,508, respectivamente.

El análisis de regresión confirma en gran parte la relación directa entre precipitaciones y altitud e inversa entre las temperaturas y la altitud.

CLIMPY		
	Temperatura media anual	Precipitación anual
Ecuación	$T_{med} ({}^{\circ}C) = 13,75 - 0,0032 \cdot \text{altitud (m)}$	$P_a (\text{mm}) = -205,80 + 1,136 \cdot \text{altitud (m)}$
R	-0,843	0,864
R²	0,711	0,747

Atlas Climático Aragón		
	Temperatura media anual	Precipitación anual
Ecuación	$T_{med} ({}^{\circ}C) = 13,371 - 0,00287 \cdot \text{altitud (m)}$	$P_a (\text{mm}) = 676,379 + 0,098 \cdot \text{altitud (m)}$
R	-0,826	0,713
R²	0,682	0,508

Tabla 13. Correlación temperatura-altitud. Elaboración propia

Como hemos comentado en la introducción de este apartado, si queremos analizar en detalle las relaciones entre estas dos variables necesitamos datos de mayor resolución. Por ello hemos explorado las posibilidades de la misión Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA), ya que aporta datos multiespectrales (13 canales) de alta resolución espacial (10 m).

Como hemos estudiado en la asignatura de Teledetección del Grado de Geografía y Ordenación del Territorio, las imágenes multiespectrales permiten establecer índices que se correlacionan con variables ambientales.

Los datos de la misión Sentinel-2 están disponibles para acceso libre en el portal *Copernicus Open Access Hub*. Sin embargo, también hay disponible un servicio WMTS para acceder ya a productos elaborados. Explorando esta fuente desde QGIS hemos encontrado el *Normalized Difference Moisture Index*, que resulta de la combinación de bandas (B8-B11) / (B8+B11), siendo B8 el Infrarrojo Cercano y B11 la banda corta del Infrarrojo. Este índice nos informa sobre el contenido de agua de la vegetación, o de la presencia de suelo desnudo (Martínez, 2019).

Este parámetro, evidentemente, está muy relacionado con las variables climáticas, ya que la disponibilidad de agua de las plantas depende los aportes de agua de las precipitaciones y de la evapotranspiración. Por ello hemos considerado oportuno hacer una exploración de esta fuente de información para ver si podría ser interesante, ya que nos daría una resolución espacial adecuada y, además, múltiples datos temporales, ya que el satélite tiene un periodo de 100 minutos (ESA, s.f.), lo cual significa que revisita muchas veces a lo largo de un mes nuestro territorio.

Después de presentar la misión Sentinel 2 pasamos a analizar los datos obtenidos. En la Figura 49 se puede observar el índice de humedad en la zona de estudio para el día 20-02-20. Hemos elegido este día por la ausencia total de nubes en todo el territorio y los adecuados contrastes del valor del índice. El producto WMTS de SENTINEL no ofrece la leyenda, pero el índice es mayor en aquellas zonas con tonos más oscuros de azul marino y más bajo en las zonas azuladas, amarillas y rojas. Para facilitar la interpretación, la imagen SENTINEL se ha superpuesto sobre el modelo de sombras con un cierto grado de transparencia, pero sin distorsionar los colores del índice.

El análisis general de la imagen deja bien claro que el índice discrimina perfectamente el efecto solana-umbría, con un índice de Humedad muy superior en las laderas orientadas hacia el norte. En la zona de los mallos quedan perfectamente definidas las paredes verticales rocosas, secas, situadas hacia el sur, y la mayor humedad de las vertientes orientadas hacia el norte.

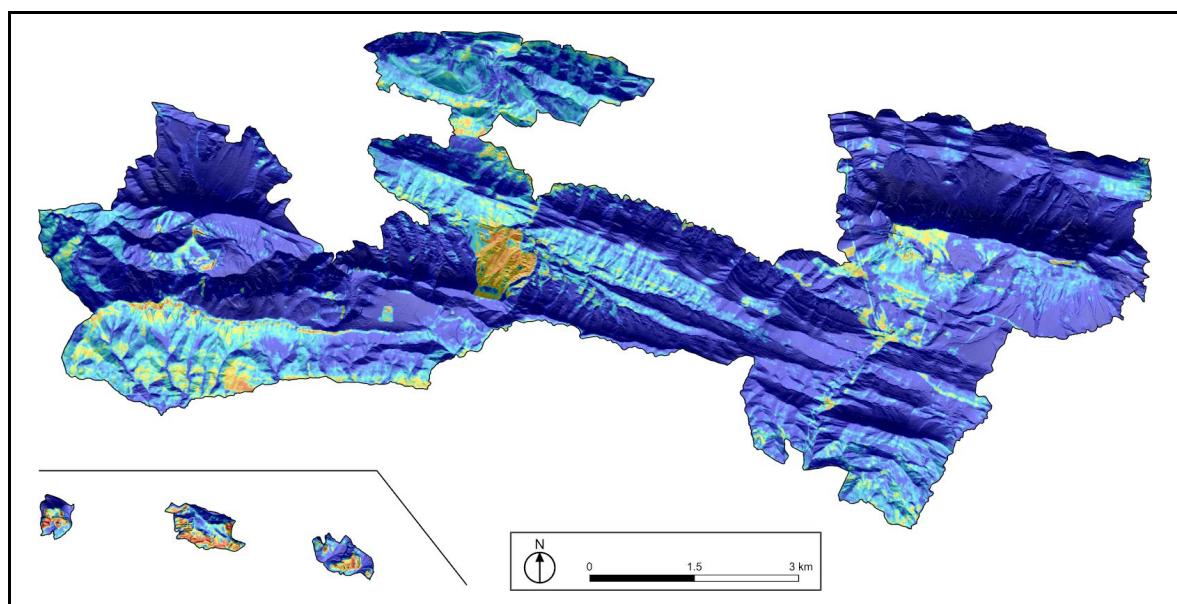


Figura 49. Índice de humedad en la zona de estudio. Elaboración propia. Fuente: SENTINEL

Con los zooms que se presentan en la Figura 50 podemos hacer un análisis más detallado. La parte superior corresponde al sector más occidental de la Sierra de San Juan de la Peña. Además de la diferencia entre la solana y la umbría queda perfectamente delimitada la red hídrica por la mayor humedad en los fondos de las vallonadas. También se ve claramente cómo pequeños escalones presentes en la ladera y que están orientados hacia el norte también son reconocidos y presentan un mayor valor del índice de Humedad.

La parte inferior de la figura es una ampliación que nos muestra la zona del Monte Oroel y dibuja claramente el efecto de solana y umbría, especialmente en la zona misma de la Peña Oroel en la que se pasa en cuestión de un píxel de los tonos azules más oscuros a tonos amarillos. Del mismo modo se dibujan perfectamente en la base de la ladera norte pequeñas solanas y umbrías de la alineación que va desde el Cerro Mondaín hasta el Monte Santa Eulalia.

En definitiva, el Moisture Index de SENTINEL tiene una magnífica capacidad de discriminación de las variables topográficas del área de estudio, y puede correlacionarse con algunos de los cambios de vegetación de alta resolución que se van a analizar en detalle en el próximo apartado. Esto nos lleva a pensar que es una herramienta que se debería explorar con mayor profundidad por su elevado potencial, máxime porque es de acceso libre, lo que nos permitiría hacer análisis basándonos en muchas imágenes capturadas a lo largo de períodos de tiempo muy prolongados y sin coste económico.

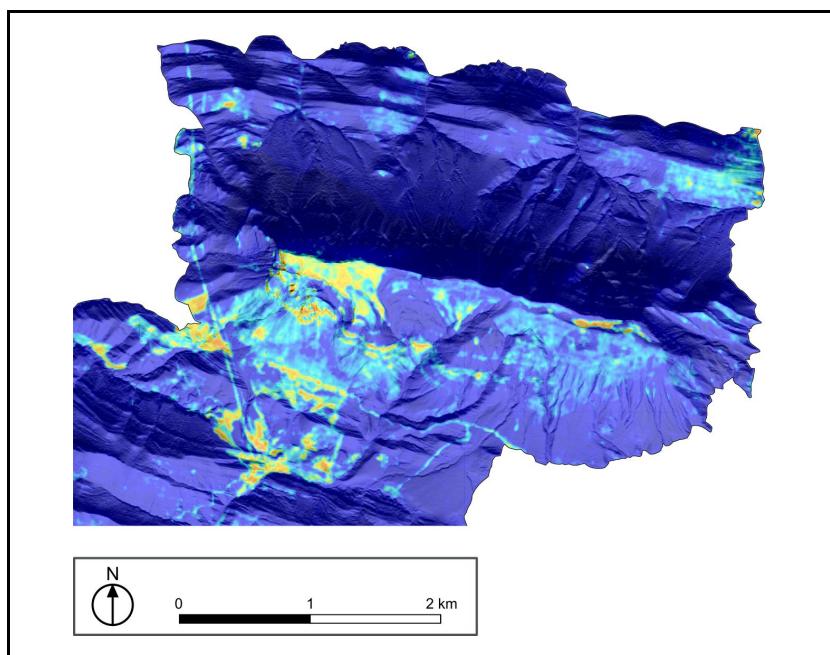
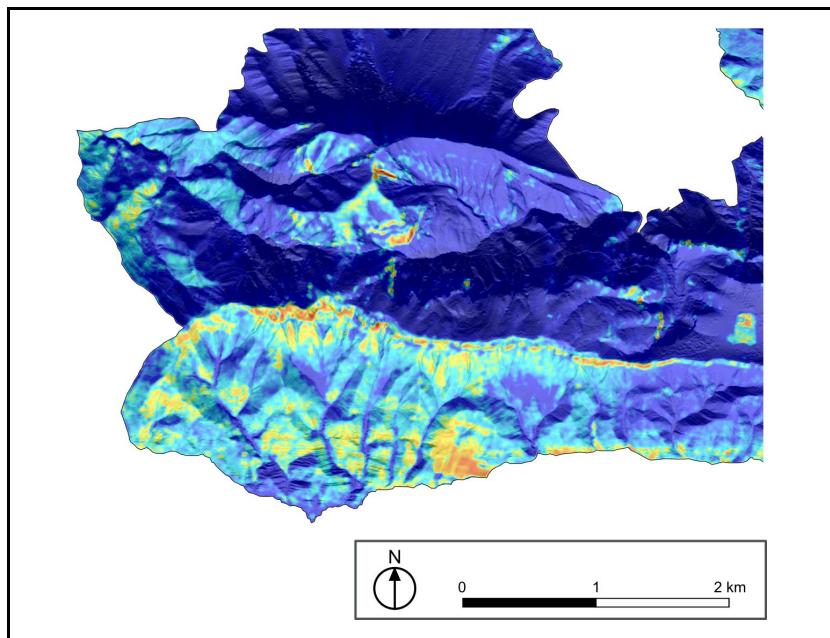


Figura 50. Ampliaciones del mapa de Índice de humedad.
Elaboración propia. Fuente: SENTINEL

Como conclusión se podría plantear para el futuro un estudio que investigara si hay correlación entre los valores del Moisture Index con datos climáticos tomados sobre el terreno con una red de estaciones meteorológicas perfectamente georeferenciadas en la zona de estudio. En el caso de que sí hubiera tal correlación, estaríamos en condiciones ya de hacer una estimación de esas variables a lo largo del territorio y, por lo tanto, relacionar las mismas con el relieve a la resolución que nos interesa.

Clima y vegetación

Como hemos estudiado en la asignatura *Biogeografía* del Grado, la relación entre clima y vegetación es obvia. A la escala de la Biosfera controla la distribución de los grandes biomas terrestres, que siguen una distribución, principalmente, latitudinal, pero sigue siendo válida a resoluciones espaciales mucho más reducidas. La razón, evidentemente, hay que buscarla en la influencia de las precipitaciones y las temperaturas como principales factores ecológicos abióticos en todos los seres vivos y, todavía más, en las plantas, que como es lógico, no pueden desplazarse del lugar en el que viven.

Aunque en el apartado de vegetación se ha analizado la vegetación potencial de nuestra zona estudiada, en este nos centraremos sólo en la vegetación real. Para ello cruzaremos la información de los productos obtenidos del modelo CLIMPY con los obtenidos de los mapas de vegetación de SIOSE y del Mapa de Paisajes. El objetivo es analizar si se pueden reconocer algunos patrones climáticos de distribución de las principales unidades de vegetación.

El método que hemos seguido ha sido de tratamiento ráster de los mapas. CLIMPY proporciona ficheros en formato ráster pero de resolución 1000 m, y los mapas de vegetación vienen como polígonos vectoriales. Para ello se ha hecho una rasterización de estos polígonos, conservando como valor del píxel la categoría correspondiente (CODIGE en el caso del SIOSE y el valor *Cat* en el caso de los Mapas de Paisaje). Como no tenía mucha lógica rasterizar a una resolución de 1000 m los mapas de paisaje, ya que se perderían muchos detalles, se ha realizado un aumento de la resolución de los ficheros CLIMPY, sin modificar sus valores. La resolución que hemos elegido ha sido la de 10 metros. Por sus mayores capacidades para el tratamiento de los ficheros ráster hemos utilizado el SIG GRASS y, para la obtención de todos los gráficos y tablas, el entorno estadístico *R*.

4.2.1. Relación entre ambas variables según la clasificación del SIOSE

La primera variable que vamos a analizar es la precipitación anual. Como la precipitación es una variable cuantitativa y el tipo de vegetación es una variable cualitativa (aunque tenga un código numérico), hemos utilizado los diagramas de cajas para analizar las relaciones entre ambas. Este tipo de gráficos lo veremos muy a menudo en las próximas secciones. Para facilitar el análisis en todos ellos se ha añadido la mediana de las variables cuantitativas correspondientes. Por motivos de claridad solamente se han analizado los tipos de vegetación que tienen una ocupación superior al 5% del territorio del Paisaje Protegido. En todos los casos, la anchura de la caja es proporcional a el porcentaje de presencia de ese tipo de vegetación en el área de estudio.

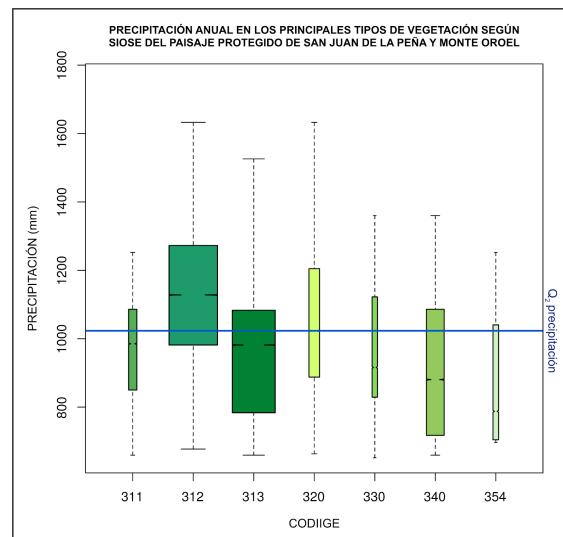


Figura 51. Distribución de las precipitaciones en los tipos de vegetación SIOSE. Elaboración propia

En la Figura 51 se observa cómo los bosques de coníferas (312) se localizan en las zonas de precipitaciones más altas; casi el 75% de los píxeles de esta categoría se sitúan por encima de la mediana. Los otros dos tipos de bosques (frondosas -311- y mixtos -313-) presentan una distribución bastante similar, y con la mayor parte de los píxeles situados por debajo de la mediana.

Esto indica una preferencia de los bosques de coníferas por los ambientes más lluviosos. El pastizal (320) tiene una distribución que se extiende prácticamente por todas las precipitaciones sin mostrar una clara preferencia. Sin embargo, lo que SIOSE clasifica como *Combinación de vegetación y Suelo desnudo*, se distribuye preferentemente por las zonas menos lluviosas.

En general todos tienen rangos muy altos, incluido el intercuartílico, que en el bosque de frondosas, que es el que lo tiene más bajo, alcanza los 240 mm. Esto significa que ninguno de estas categorías se puede considerar como un buen indicador de la precipitación anual.

En la Figura 52 aparece la otra variable climática por excelencia, la temperatura media anual. También se observan algunos patrones claramente definidos. Los bosques de coníferas (312) tienen una preferencia clarísima por las zonas más frías del territorio, situándose algo más del 75% por debajo de la mediana. Justamente lo contrario ocurre con los bosques de frondosas (311). Los bosques mixtos (313), los matorrales (330), las combinaciones de vegetación (340) y los suelos desnudos (354) tienen una clara apetencia por las zonas de temperaturas más cálidas. Tan solo los pastizales y herbazales se distribuyen más o menos por todo el territorio sin una clara preferencia.

En cualquier caso, también es destacable que en muchas de las formaciones vegetales el rango total es casi el mismo, y abarca 3°C. Sin embargo, el 50% de todos estos tipos de vegetación se encuentran entre los 9.5°C y los 11.2°C.

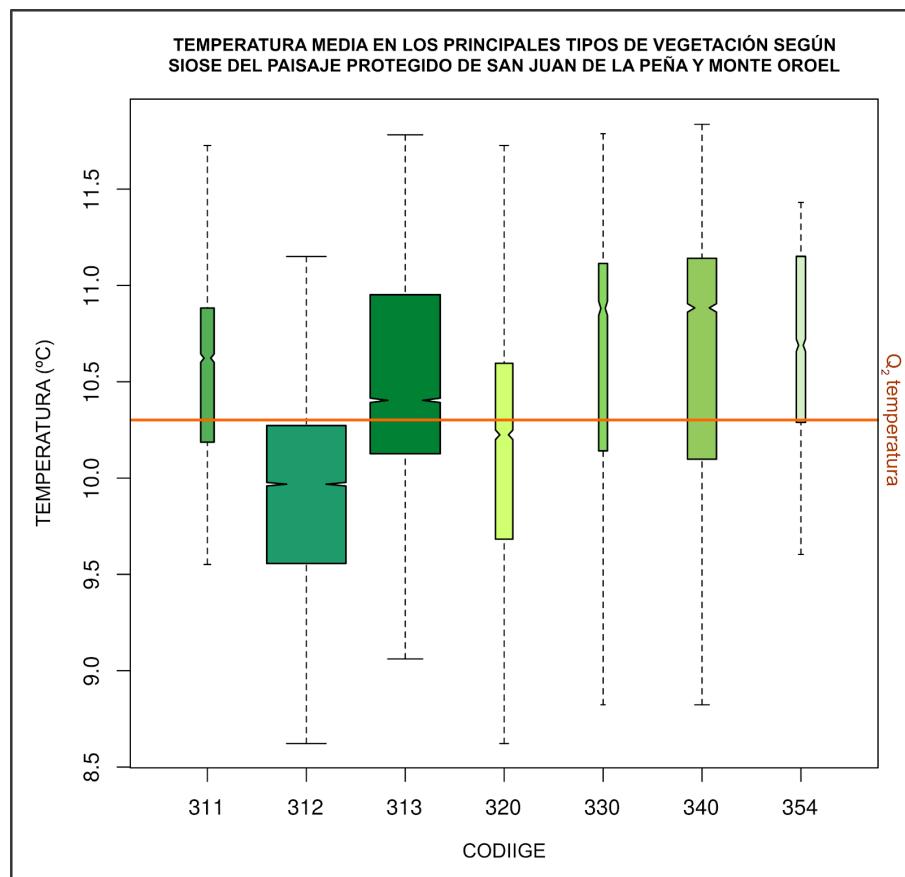


Figura 52. Distribución de las temperaturas medias en los tipos de vegetación SIOSE. Elaboración propia

Las dos siguientes variables analizadas aparecen en la Figura 53. Estas son la media de las temperaturas máximas y la media de las mínimas. Como podemos ver, las distribuciones no presentan apenas diferencias con las que hemos visto en las temperaturas medias, de modo que posiblemente podemos considerar a esta última como un buen indicador general y reducir el número de variables a utilizar en futuros estudios de distribución de la vegetación.

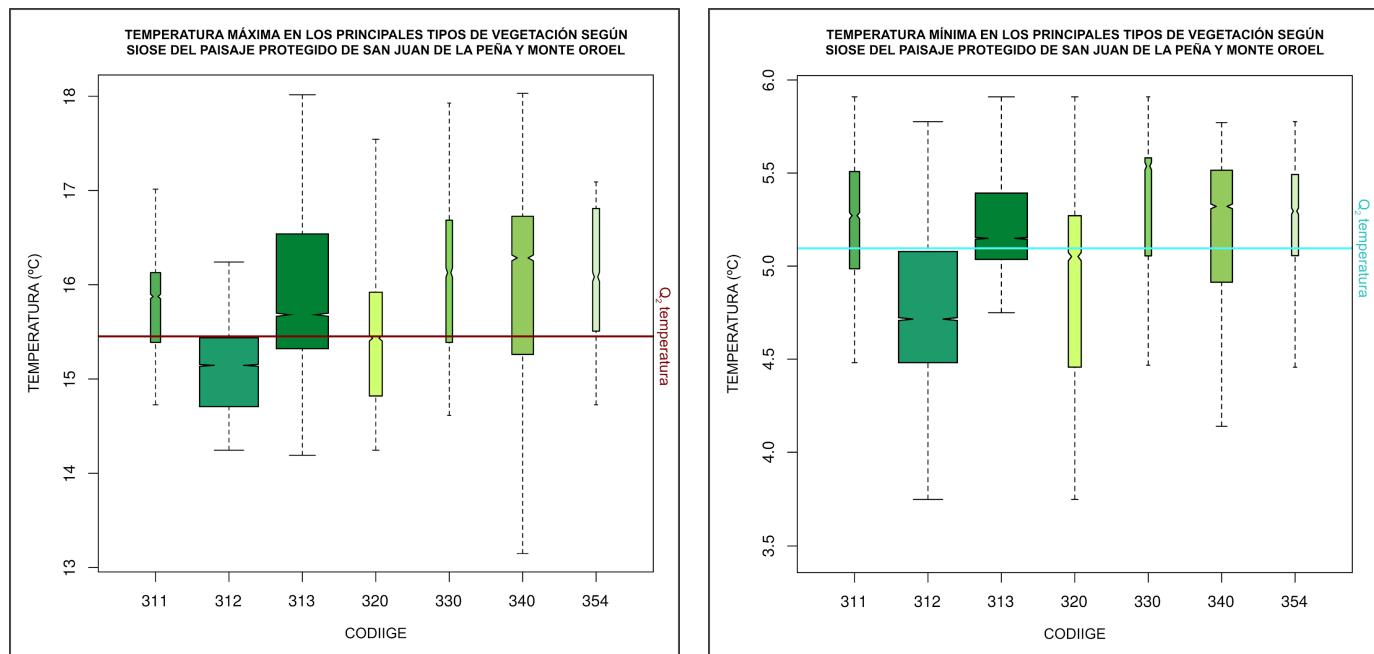


Figura 53. Distribución de las temperaturas máximas y mínimas en los tipos de vegetación SIOSE. Elaboración propia

Para finalizar, analizamos dos variables bioclimáticas: la precipitación del periodo más húmedo y la temperatura máxima del mes más cálido (Figura 54). En esta última es destacable cómo los tres tipos de bosques, que presentaban claras diferencias en la temperaturas medias, prácticamente presentan la misma distribución. Prácticamente el 75% de todos ellos se sitúan por debajo de la mediana, aunque de nuevo, los bosques de coníferas (312) aparecen en las zonas menos cálidas. Esto mismo ocurre en el resto de tipos de vegetación. En cuanto a la precipitación del periodo más húmedo observamos que todas las cajas "suben" con respecto a la posición frente a la precipitación anual, lo cual es lógico. Sin embargo, ese ascenso es superior en los bosques de frondosas (311) y mixtos (313) que en los bosques de frondosas, lo cual parece indicar una mayor estacionalidad de las precipitaciones en las zonas en las que se encuentran los dos primeros.

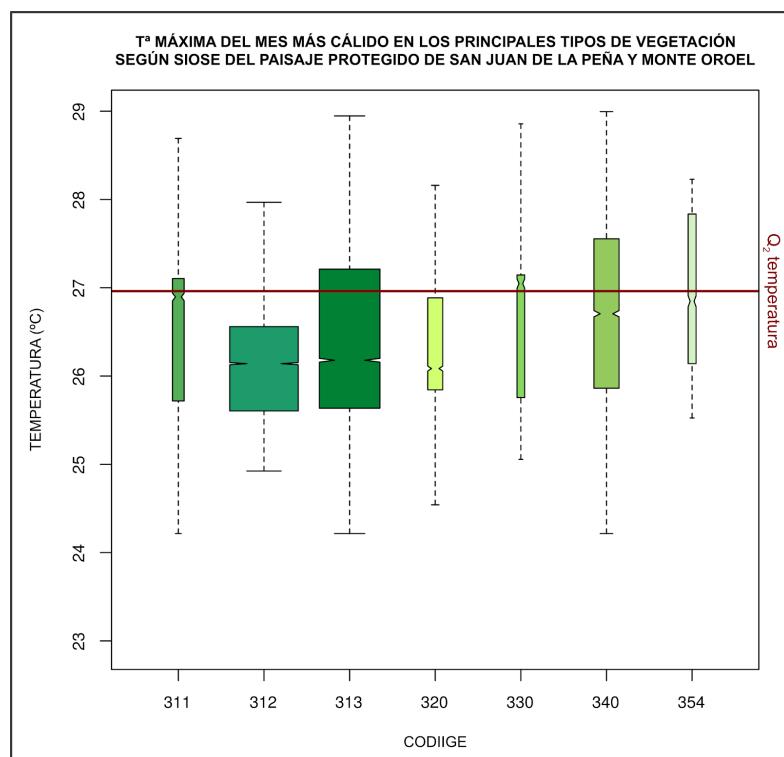
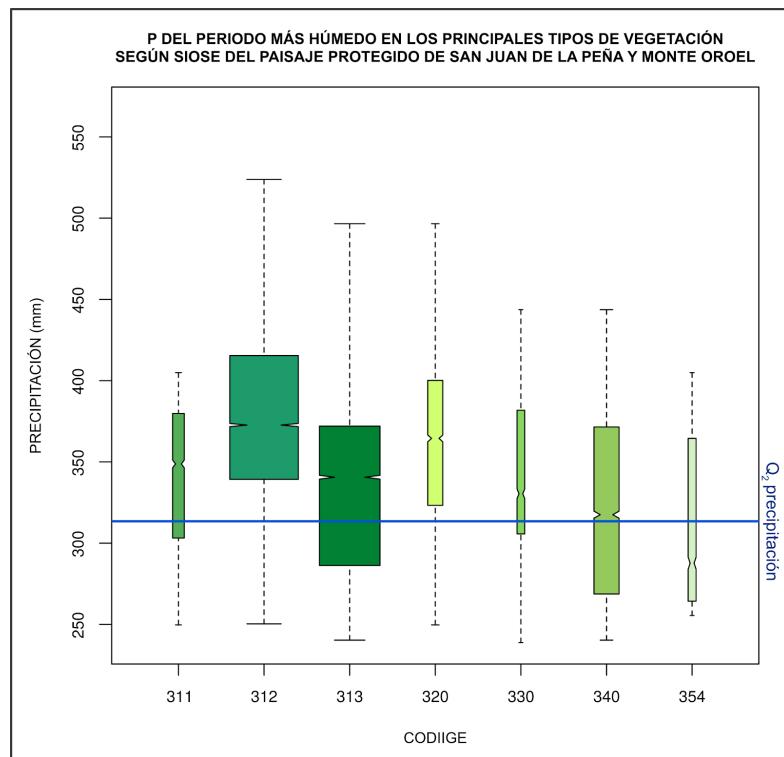


Figura 54. Distribución de dos variables bioclimáticas en los tipos de vegetación SIOSE.

4.2.2. Relación entre ambas variables según la clasificación del Mapa de Paisajes

La leyenda de este mapa de vegetación, como ya hemos comentado, es mucho más detallada que la del SIOSE, de modo que es de esperar que pueda discriminar mejor sus relaciones con las diferentes variables climáticas. La Figura 55 confirma esto claramente con respecto a las precipitaciones.

Lo primero que llama la atención es que los bosques de frondosas (quejigales (3), encinares (4) y hayedos-abetales (9)) tienen distribuciones claramente diferenciadas. Los dos primeros se sitúan claramente en las zonas de precipitaciones más bajas aunque con un rango total e intercuartílico muy amplios. Por el contrario, los hayedos-abetales se sitúan en casi un 75% por encima de la mediana, aunque sin alcanzar zonas de precipitaciones muy altas. En realidad, es una de las formaciones vegetales con un rango más corto, es decir, con unas exigencias de precipitaciones más estrictas. El 50% se localizan entre los 1000 mm y los 1100 mm aproximadamente, lo que los convierte en un buen indicador de las precipitaciones. Solo las repoblaciones forestales (8) tienen un comportamiento similar, pero en este caso claramente se debe a las decisiones que tomasen los que las planificaron.

Los bosques de coníferas de SIOSE se dividen aquí en dos categorías con una distribución claramente distinta. Los pinares-abetales (6) se distribuyen por las zonas más húmedas del territorio y tienen un rango total e intercuartílico muy amplio. El 75% de los mismos se encuentran por encima de los 1150 mm anuales, siendo con diferencia la formación vegetal con mayores requerimientos pluviométricos. Por su parte, los pinares mediterráneos y submediterráneos (7) se encuentran por debajo. De hecho, su Q3 coincide prácticamente con el Q1 de los abetales y pinares eurosiberianos. Sin embargo, su mediana se encuentra por encima de la mediana del territorio, lo que indica que es una formación vegetal con unos requerimientos hídricos medio-altos. También se observa que su rango intercuartílico es mucho más estrecho que en las otras formaciones de coníferas.

Para concluir, los pinares con quejigos (10) son claramente los que menos exigencias hídricas presentan de todo el Paisaje Protegido, situándose prácticamente en su totalidad por debajo de la mediana y, el 50%, entre a los 700 mm y 900 mm anuales. Por su parte, las bojedas y erizionales (13) se extienden en un rango muy amplio aunque con una cierta preferencia por las precipitaciones medias-bajas.

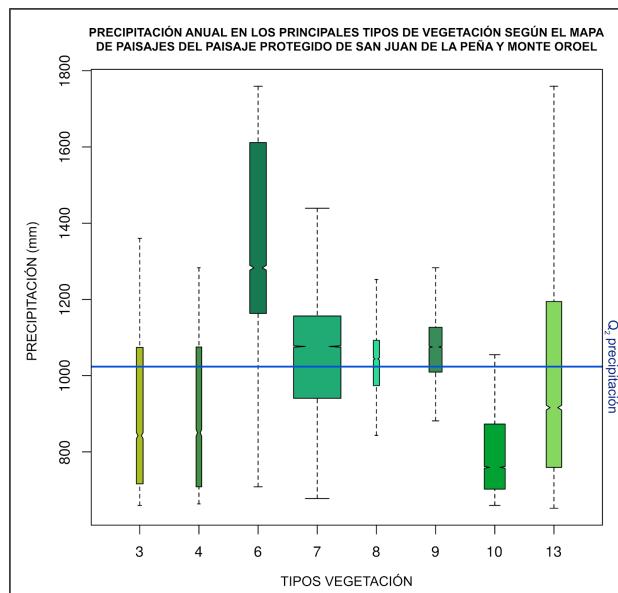


Figura 55. Distribución de las precipitaciones en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes. Elaboración propia

Debido a la relación inversa entre temperaturas y precipitaciones, en la Figura 56, que muestra la relación de la vegetación con las temperaturas medias, se puede observar que la posición de las cajas se invierte con respecto a la que ocupaban en las precipitaciones. Sin embargo, hay algunas cuestiones interesantes que comentar. En primer lugar destaca que los quejigales (3), que presentaban un rango intercuartílico muy grande en las precipitaciones, lo presentan muy pequeño en el caso de las temperaturas. Esto les convierte en un buen indicador térmico, ya que el 50% de estos bosques se sitúa entre los 10.9°C y los 11.2°C. Son con diferencia la formación vegetal más termófila de todas. Justamente lo contrario ocurre con encinares (4), que ya tenían un rango intercuartílico grande y lo aumentan todavía más en las temperaturas. Esto parece indicar que la altitud no es el único factor que influye en la localización de este tipo de bosques.

Los pinares con quejigos (10) también tienen un comportamiento ligeramente diferente, ya que en el caso de las precipitaciones se situaba casi el 100% por debajo de la mediana y ahora algo más del 75% se sitúa por encima de la misma.

El resto de las formaciones vegetales tienen un comportamiento prácticamente inverso al de las temperaturas, lo cual parece indicar que sí tienen un control altitudinal más claro.

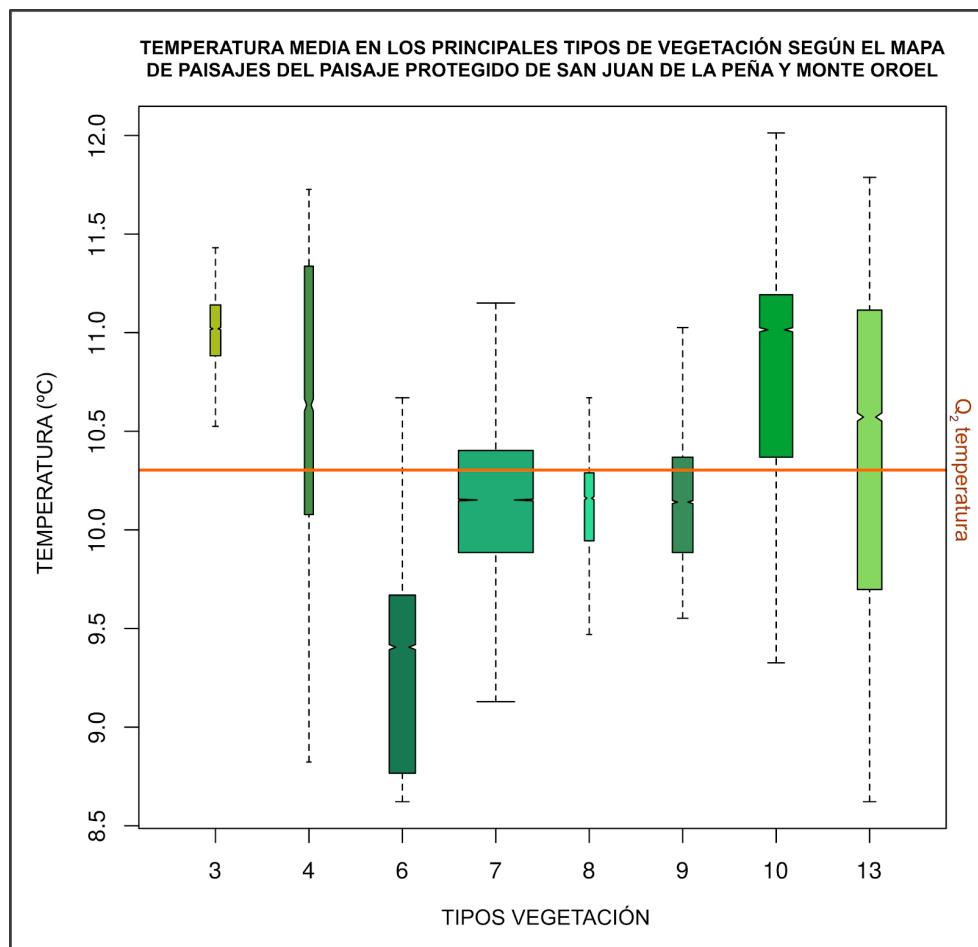


Figura 56. Distribución de las temperaturas medias en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes. Elaboración propia

En la Figura 57 aparecen las distribuciones en función de la temperatura máxima y la temperatura mínima. El aspecto más destacable es la gran diferencia que existe en el caso de los pinares-abetales (6). El rango de las máximas es muy reducido y en su totalidad se sitúa por debajo de la mediana. Sorprendentemente, en el caso de las temperaturas mínimas el rango es mucho más grande, siendo, de hecho, el mayor de entre todos los tipos de vegetación. Con los datos con los que disponemos no sabríamos explicar el porqué de esta diferencia. También es destacable el escasísimo rango de los quejigales (3) en las temperaturas mínimas, ya que se distribuye prácticamente en dos décimas de grado por encima y por debajo de los 5.5°C. Esto hace de ellos un perfecto indicador térmico de las temperaturas mínimas. Una situación similar, aunque no con tanta precisión, ocurre con los hayedos-abetales (9), que indicarían una temperatura mínima de entre 4.8°C y 5.1°C. En el caso de las temperaturas máximas, los ya citados pinares-abetales (6) y las repoblaciones forestales (8) son también buenos indicadores por su reducido rango intercuartílico.

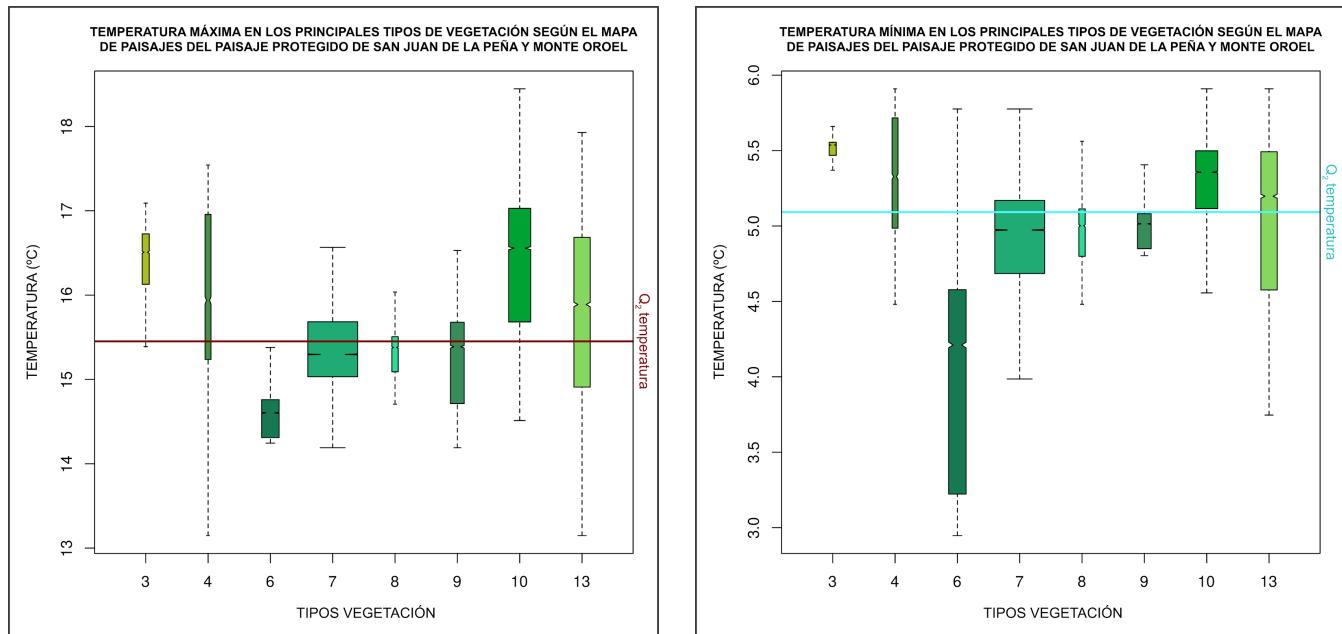


Figura 57. Distribución de las temperaturas máximas y mínimas en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes. Elaboración propia

En la Figura 58 se presentan los gráficos correspondientes a dos variables bioclimáticas: la precipitación del periodo más húmedo y la temperatura máxima del mes más cálido.

En líneas generales no hay unas diferencias muy notables con lo que se observa con las precipitaciones anuales y las temperaturas máximas anuales. Hay una subida generalizada de las cajas en el caso de las precipitaciones, ya que cuatro se sitúan por encima de la mediana, cuando en el caso de las precipitaciones anuales eran solamente dos. En el caso de las temperaturas máximas se observa el fenómeno contrario, ya que hay un descenso y cuatro se sitúan por debajo de la mediana cuando solamente era una en las temperaturas máximas anuales.

Como ya ocurría en el SIOSE, las variables bioclimáticas no aportan más información relevante que la que ya nos aportan las variables climáticas "tradicionales". En este caso, la desagregación que ha introducido el mapa de vegetación según la cartografía de Paisajes no se ha traducido en información de detalle con las variables bioclimáticas. Esto tal vez se deba a que estas variables están pensadas más para caracterizar grandes unidades biogeográficas (p.e. biomas) y no para espacios tan reducidos como el que estudiamos en este TFG.

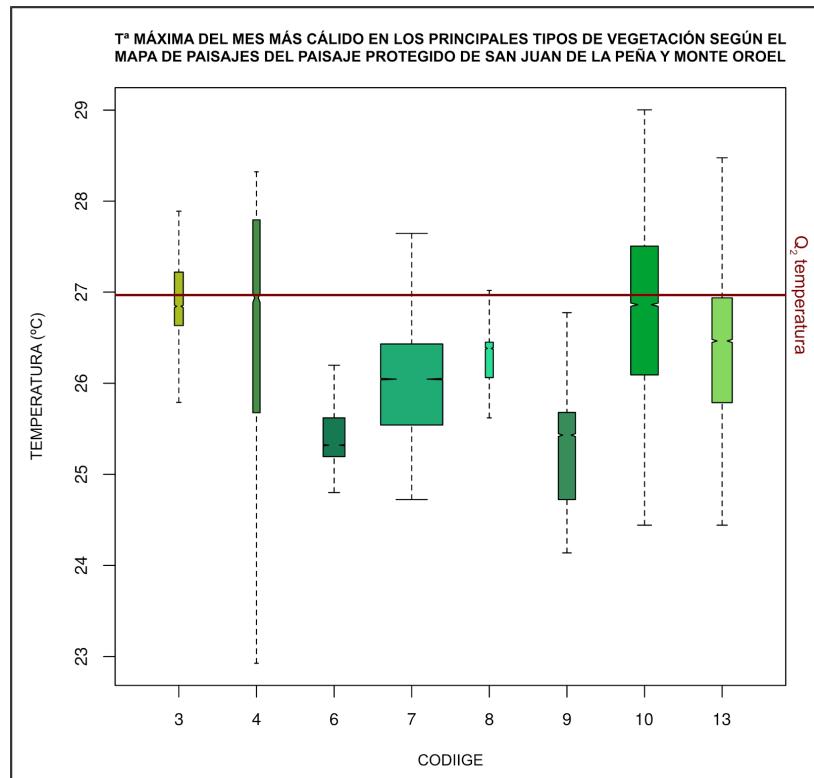
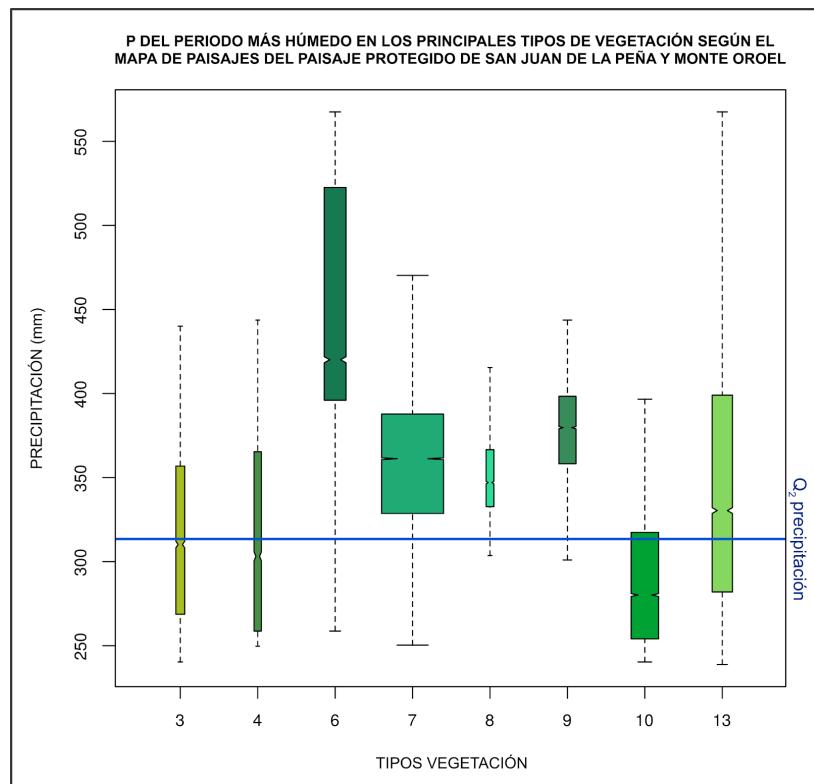


Figura 58. Distribución de dos variables bioclimáticas en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes. Elaboración propia

Relieve y vegetación

En el apartado anterior hemos documentado que la cartografía de vegetación del Mapa de Paisajes comarcal permite un análisis mucho más detallado de las variables climáticas y tiene una mayor precisión que la que tiene la cartografía del SIOSE. Por este motivo, en el resto del TFG nos centraremos exclusivamente en la primera para todos los análisis que realicemos.

En este apartado vamos a analizar las relaciones que presentan las unidades vegetales con tres variables topográficas: la altitud, las orientaciones y las pendientes. Además, a modo de síntesis, realizaremos unos perfiles fitotopográficos que permiten ilustrar estas interesantes relaciones.

4.3.1. Altitud, orientaciones y pendientes

En la Figura 59 se pueden observar los diagramas de cajas con la distribución altitudinal de los principales tipos de vegetación de la zona del Paisaje Protegido. En este caso, los hemos ordenado de modo que se vea la clarísima relación altitudinal que presentan. Se puede ver cómo se van reemplazando unas a otras a medida que vamos ascendiendo en el territorio, dando lugar en algunas zonas a ejemplos claros de pisos de vegetación.

La formación vegetal que ocupa las zonas más bajas son los pinares con quejigos (10). Cuando alcanzamos los 900 m ya hemos observado el 50% de todos estos bosques, pero tan apenas hemos visto otras formaciones vegetales. A partir de los 900 m este pinar de frondosas marcescentes convive con los encinares (4), hasta llegar aproximadamente a los 1000 m. Ese sería el piso submediterráneo (Montserrat, 1971). A partir de esta cota empezamos a encontrar bien desarrollados los quejigales (3), los pinares mediterráneos y submediterráneos (7) y los hayedos-abetales (9), de modo que, hasta casi los 1200 m, encontramos una combinación de cuatro tipos distintos de vegetación natural (la categoría "8" hace referencia a las repoblaciones forestales). Estos bosques constituyen lo que podríamos considerar un piso de vegetación intermedio en las laderas del territorio en el que encontramos bosques del piso montano inferior seco y montano húmedo. A partir de los 1200 m solamente quedan bien desarrollados los hayedos-abetales (9) y los pinares-abetales (6). A partir de los 1250 m estos últimos son los únicos bosques que ocupan áreas extensas del territorio, formando lo que podría ser el tercer piso de vegetación de la zona de estudio. Sería el piso montano húmedo.

Por su parte, las bojedas y erizionales (13) ocupan una amplísima banda altitudinal pudiendo coexistir lateralmente con todos los tipos de bosques.

El reemplazo altitudinal de las formaciones vegetales que se observa tan bien en la Figura 59 se puede observar sobre el terreno en algunas zonas muy claramente. Posiblemente, el ejemplo más claro sea el del Monte Oroel, como ya se comentó en un apartado anterior (Figura 60B). Llama la atención que en el otro macizo del Paisaje Protegido, el de San Juan de la Peña, esta sustitución no sea tan nítida. Allí también vemos ejemplos de pisos de vegetación como el reemplazo del bosque caducifolio por el pinar eurosiberiano en la parte más occidental de la sierra. Sin embargo, también tenemos ejemplos de cambio lateral a la misma cota, como por ejemplo en la zona del Monasterio Nuevo de San Juan de la Peña, donde podemos observar el cambio del bosque caducifolio por el pinar mediterráneo y submediterráneo (Figura 60A). Estos cambios laterales son muy frecuentes en esta zona del Paisaje Protegido.

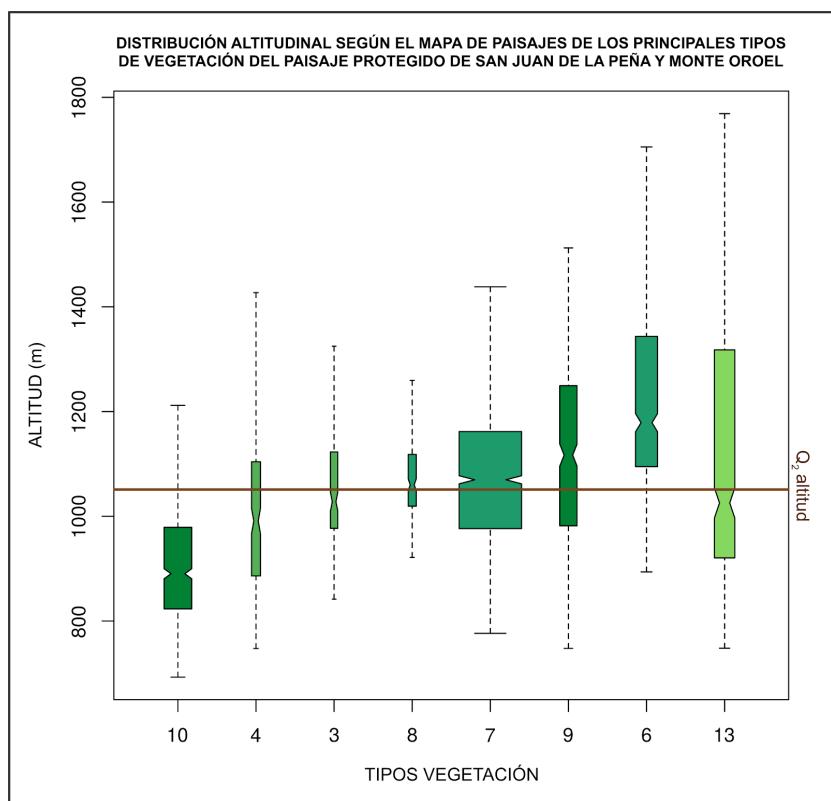


Figura 59. Distribución altitudinal de los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes. Elaboración propia



Figura 60. Vegetación en el sector San Juan de la Peña (izda) y Monte Oroel (dcha). Elaboración propia

La segunda variable topográfica que hemos analizado es la orientación de las laderas. Como ya se comentó, el efecto solana-umbría es el ejemplo más espectacular de cómo la orientación de una ladera puede influir sobre su vegetación. En la Figura 61 se presenta el gráfico que nos indica la distribución de los principales tipos de vegetación en función de cuál es la orientación del pixel en el que se localiza ésta. A la derecha se muestra la distribución global de las orientaciones de la zona del Paisaje Protegido para poder comparar y decidir si hay alguna orientación preferente. Como ya se comentó en el apartado correspondiente, la orientación pirenaica de las sierras hace que predominen las exposiciones *norte* y *sur* sobre las *este* y *oeste*.

La conclusión que se obtiene en un primer análisis es evidente: en la mayoría de los casos la distribución de la vegetación se aparta de la esperada en la zona (en el caso de que la orientación no jugase ningún papel en la distribución). Tan solo pinares con quejigos (10) tienen una distribución casi idéntica a la del territorio. Los pinares mediterráneos y submediterráneos (7) tampoco presentan unas diferencias muy grandes, aunque parecen tener una mayor preferencia por las laderas de umbría. En todos los demás casos las diferencias son muy notables. Encontramos cuatro formaciones vegetales que tienen un rechazo muy grande a las orientaciones de umbría: los quejigales (3), los encinares (4), las repoblaciones forestales (8) y las bojedas y erizionales (13). En el caso de las repoblaciones forestales es evidente que será porque los ingenieros forestales han optado por especies que no se desarrollan adecuadamente en esas condiciones. En estos cuatro casos la orientación preferente es la de solana. Si combinamos esta información con la del apartado anterior queda claramente de manifiesto que los bosques de frondosas marcescentes y perennifolias gustan de las zonas más bajas y soleadas del Paisaje Protegido, lo cual deja bien claro su carácter termófilo.

En el extremo opuesto están las formaciones vegetales que presentan una clara apetencia por las laderas de umbría. Destaca especialmente el pinar-abetal (6). En este caso, su rechazo por la solana es tal que incluso es más frecuente en las orientaciones de levante y de poniente que en las orientaciones sur. Esto lo convierte en un bosque claramente ombrófilo. La otra formación con esta afinidad son los hayedos-abetales (9), que lógicamente tiene unos mayores requerimientos de humedad que los encinares (4) o quejigales (3).

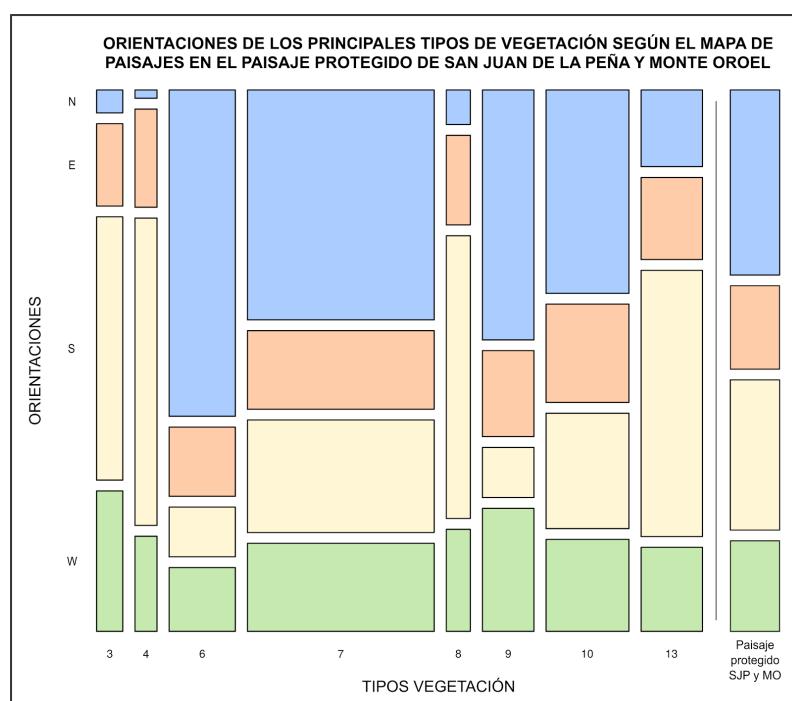


Figura 61. Distribución de las orientaciones en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes. Elaboración propia

La tercera variable topográfica que hemos analizado es la pendiente del terreno. Como vemos en la Figura 62, prácticamente no hay unas aptitudes muy definidas. Entre las formaciones naturales, sólo el hayedo-abetal (9) tiene unas claras aptitudes por laderas más bruscas, ya que prácticamente el 75% de los mismos se sitúan por encima de la mediana del territorio. Las repoblaciones forestales (8) se sitúan sobre terrenos con menores pendientes, lo cual parece lógico para facilitar las tareas de explotación. El resto se sitúan prácticamente en lo que es la distribución normal de las pendientes en el Paisaje Protegido.

En cuanto a los rangos, se observa que todas lo tienen amplio y que pueden aparecer en terrenos horizontales, pero que muy poco porcentaje de prácticamente todos los tipos de vegetación se sitúan por encima de los 20º. En cualquier caso, por encima de los 28º ya solamente podemos encontrar algunos hayedos-abetales (9) y casos anómalos que no aparecen representados en el diagrama.

En definitiva, podemos sacar como conclusión que la pendiente tiene un control importante como limitante del desarrollo de la vegetación. Sin embargo, dentro del rango en el que esta se puede desarrollar, las diferencias no son muy destacables. Por eso podemos decir que es una variable que no tiene una capacidad discriminatoria como las que hemos visto en la altitud y en orientación.

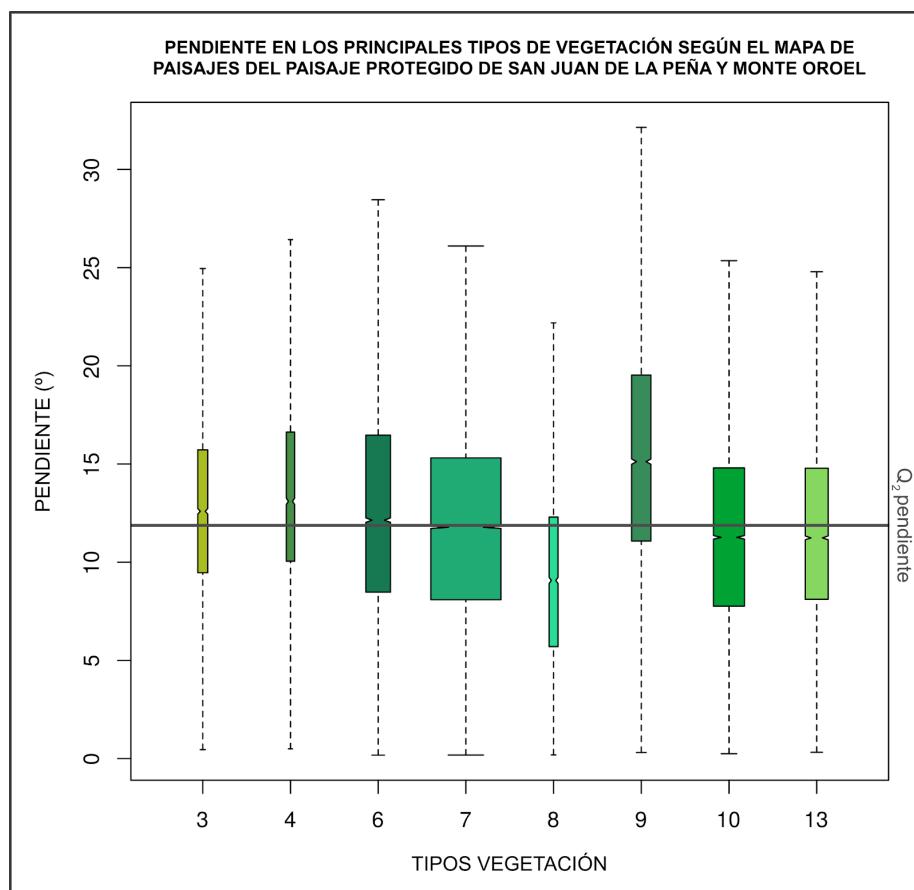


Figura 62. Distribución de las pendientes en los tipos de vegetación del Mapa de Paisajes. Elaboración propia

Después de haber analizado la relación que hay entre los tipos de vegetación y las variables topográficas se va a hacer lo mismo con los distintos estratos de vegetación.

La Figura 63 nos permite reconocer que en casi todos los casos las medianas se localizan cercanas a la mediana general. Sólo el arbolado alto (6) se sitúa claramente por encima. Llama la atención que los rangos intercuartílicos son bastante reducidos y comparten la misma banda altitudinal. Esto parece indicar que la altitud no controla mucho la talla de la vegetación; dicho de otro modo, a la misma altitud coexisten todos los estratos, salvo a partir de una altura en la que solamente encontramos *arbolado alto* y *matorral pulvinular/pastizal ralo/suelo desnudo* (1). En este último caso, el rango y el rango intercuartílico son los más amplios. Esto puede estar debido a que son tres categorías englobadas en una.

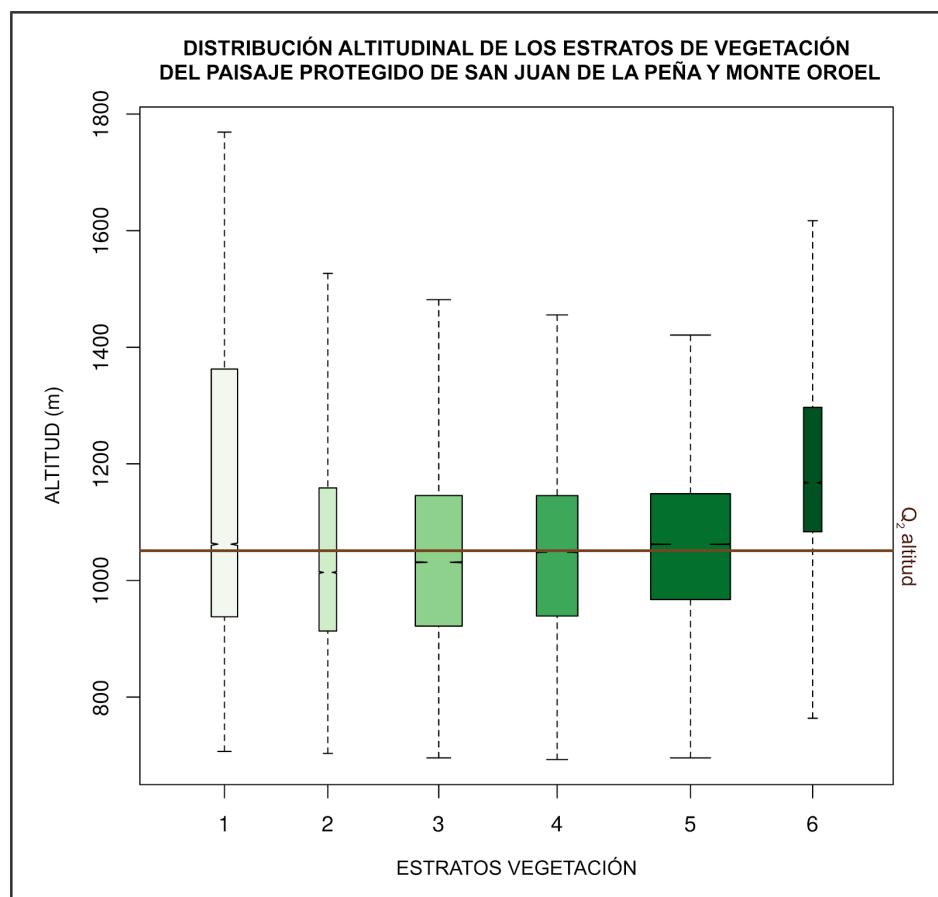


Figura 63. Distribución altitudinal de los estratos de vegetación. Elaboración propia

Para acabar este apartado analizamos los estratos de vegetación y las orientaciones del Paisaje Protegido (Figura 64). De nuevo observamos claras aptitudes ya que a medida que aumenta la altura del estrato la vegetación se hace más umbrófila. A la inversa, los estratos de menor porte (*matorral pulvinular/pastizal ralo/suelo desnudo* -1-, *pastizal alto* -2- y *matorral* -3-) se desarrollan preferentemente por las laderas de solana. El estrato intermedio, el arbustivo (4), se localiza prácticamente siguiendo la distribución del Paisaje Protegido, pero el arbolado lo hace clarísimamente en las laderas de umbría, dando un salto muy notable en este sentido.

Las orientaciones *Este* y *Oeste* no parecen tener ninguna incidencia sobre el porte de la vegetación.

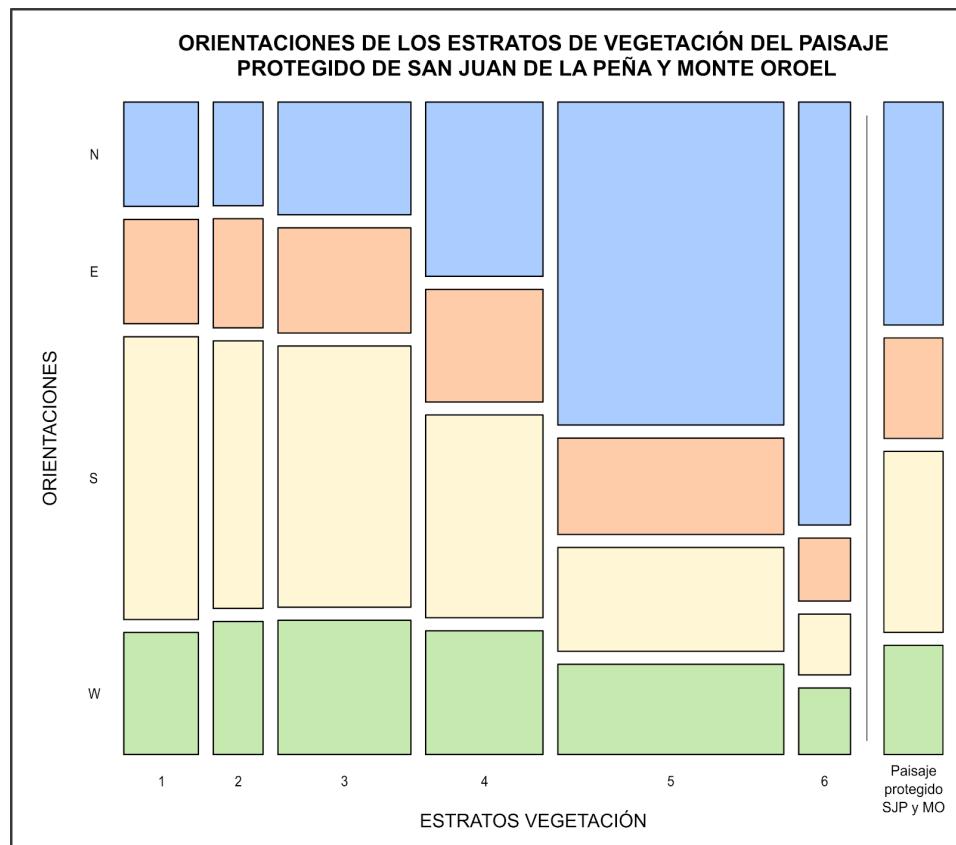


Figura 64. Distribución de las orientaciones en los estratos de vegetación. Elaboración propia

4.3.2. Perfiles fitotopográficos

Uno de los productos gráficos más frecuentes en los libros y trabajos de geobotánica son los perfiles topográficos en los que se representa las variaciones en la vegetación. En nuestro caso hemos aprovechado el Modelo Digital de Superficies y el Modelo Digital de Elevaciones obtenido a partir de los ficheros LIDAR para realizar una serie de perfiles fitotopográficos. Hay que destacar que no son perfiles interpretativos sino que son un producto digital obtenido a partir de dos ficheros ráster. En todos los cortes el Modelo Digital de Copas se ha exagerado en un factor de 7.5 para destacar los detalles de la altura de la vegetación. Se ha coloreado en diferente color el Modelo Digital de Elevaciones para destacar mejor la vegetación. Es importante aclarar que este modelo no distingue tipos de vegetación sino tan sólo la altura.

En la Figura 65 aparece la localización de los perfiles, que hemos realizado en zonas estratégicas del Paisaje Protegido: dos atravesando transversalmente la Sierra de San Juan de la Peña (1 y 2), otro atravesando transversalmente la zona del Monte Oroel (3) y un perfil longitudinal a lo largo de la ladera de solana de la Sierra de San Juan de la Peña (4). Los resultados los podemos ver en las figuras que comentamos a continuación.

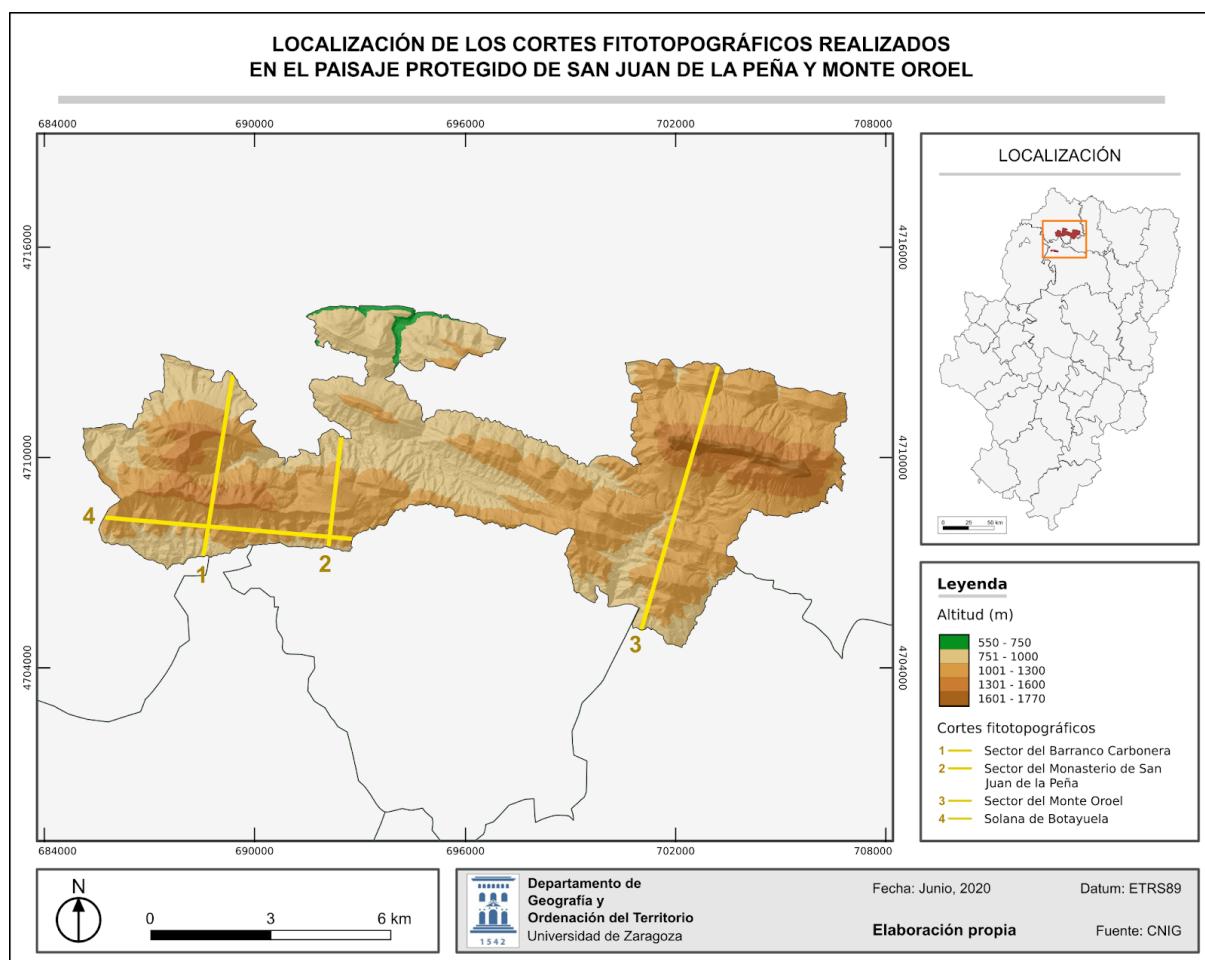


Figura 65. Localización de los perfiles topográficos en el Paisaje Protegido. Elaboración propia

En la Figura 66 se representa el primer corte que atraviesa la Sierra de San Juan de la Peña, ligeramente al oeste del Monte Cuculo. Se observa perfectamente cómo el Barranco Carbonera se sitúa en el eje del sinclinal colgado. También se aprecia la fuerte pendiente de las dos laderas, que va incrementándose hacia la parte superior. De hecho, en la solana encontramos un imponente escarpe de casi 200 m de altura.

La figura nos muestra claramente algunas de las conclusiones a las que hemos llegado en el apartado anterior. Por ejemplo, se ve claramente cómo la ladera de umbría está completamente cubierta de una vegetación de elevado porte y cómo cambia bruscamente al rebasar la cresta. El MDS no indica el tipo de vegetación, pero en el apartado correspondiente a la vegetación hemos visto que la parte situada por debajo de los 1000 m de altura correspondía con el pinar mediterráneo y submediterráneo y la parte superior a los hayedos-abetales. También se aprecia perfectamente cómo en las pequeñas laderas que encontramos en la cima de la sierra se produce el efecto de solana-umbría, a pesar de que la vegetación alcance un menor porte debido a la altitud. La umbría que antecede al gran escarpe está ocupada por pinares-abetales. En la ladera de la solana, a los pies del escarpe se desarrolla un bosque de pinares con quejigos claramente de menor porte que los bosques de umbría.

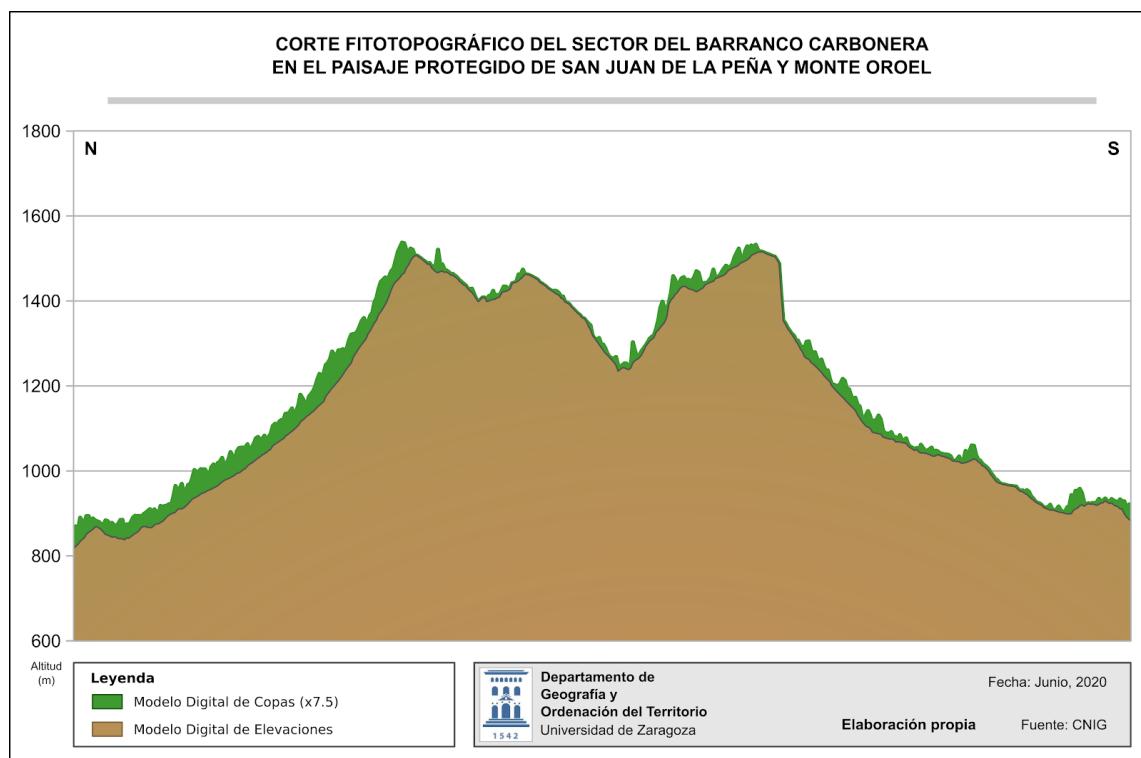


Figura 66. Corte fitotopográfico del sector del Barranco Carbonera. Elaboración propia

El segundo corte atraviesa la zona del Monasterio de San Juan de la Peña (Figura 67). Aquí el relieve es mucho menos abrupto pero sigue reconociéndose perfectamente el sinclinal colgado, que marca el relieve estructural de las sierras del Paisaje Protegido. En esta zona llama la atención del desarrollo de un magnífico bosque, muy denso y de alto porte en la parte alta de la sierra, en los alrededores del Monasterio Nuevo. En esta zona, tanto la umbría como la parte alta corresponde con formaciones de pinar mediterráneo y submediterráneo. En la ladera de umbría se observa claramente cómo la altura del bosque aumenta progresivamente a medida que aumenta la altitud. En la ladera de solana el porte es claramente más bajo y hacen acto de presencia las formaciones con quejigales.

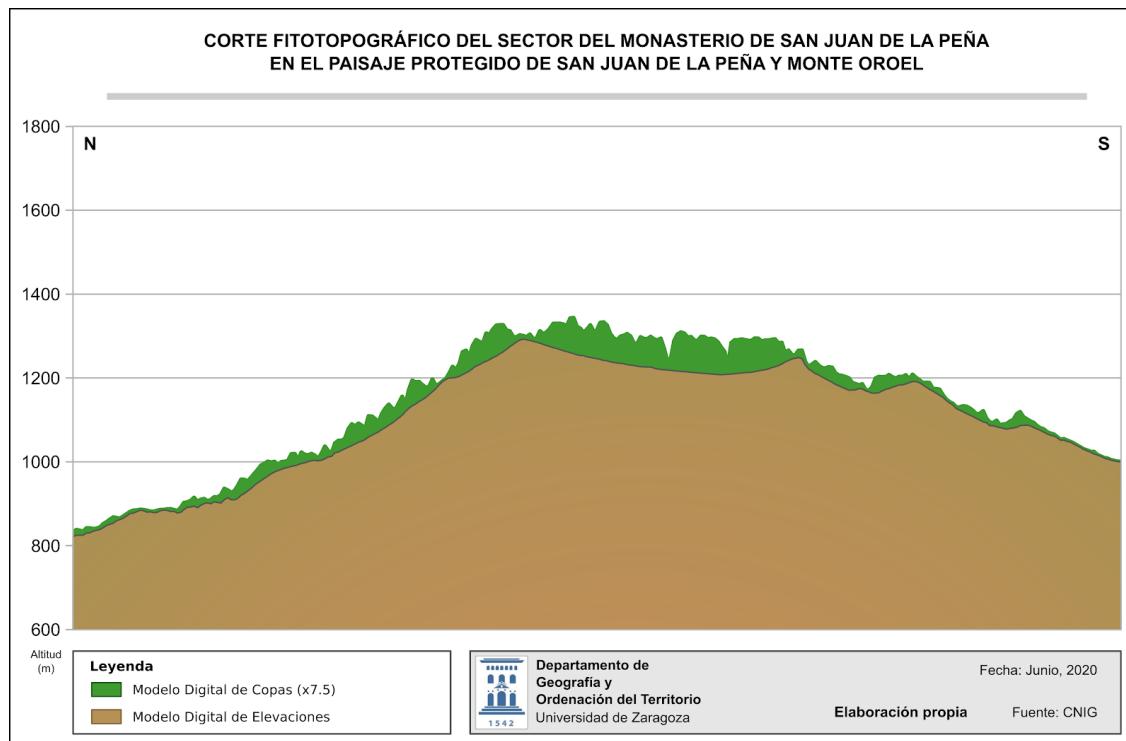


Figura 67. Corte fitotopográfico del sector del Monasterio de San Juan de la Peña. Elaboración propia

El tercer corte (Figura 68) presenta un relieve extraordinariamente abrupto, destacando claramente el Monte Oroel. De nuevo el efecto de los factores topográficos es clarísimo, tanto por la altitud, como por la orientación y las pendientes. En la parte baja del Monte Oroel (Monte de la Solaneta) el efecto solana-umbría resulta espectacular, ya que el bosque prácticamente desaparece en una pequeña solana que antecede a la gran ladera de umbría dominada por los pinares-abetales. En ésta se puede observar perfectamente el límite superior del bosque y cómo este se sitúa a diferentes cotas en las umbrías y en las solanas. En la umbría el bosque termina poco antes de los 1500 m. Como ya hemos comentado se trata de un pinar-abetal de gran densidad y porte. Sin embargo, en la solana, el límite del bosque se encuentra alrededor de los 1550 metros, unos 50 m por encima. En este caso el porte es mucho menor. También es manifiesto el efecto de la pendiente, que en la umbría llega a ser casi vertical, lo cual evidentemente limita el desarrollo del bosque. Sin embargo, en la solana, por encima de los 1600 metros la pendiente no es un factor limitante y, sin embargo, no presenta arbolado.

En este caso la limitación tiene que ser la altitud y la escasa humedad del suelo. Hacia los 1480 m de altitud, un pequeña faja con unas pendientes mucho más suaves permite al arbolado alcanzar una altura muy considerable. Todo el resto de la solana del Monte Oroel sigue ocupado por un pinar mediterráneo y submediterráneo muy discontinuo y de porte bastante bajo. Cuando termina la solana reaparece un bosque alto y denso de pinares-abetales que se desarrolla incluso en las pequeñas laderas de solana, como vimos en el apartado anterior. Tras alcanzar el Cerro Larrañán este pinar desaparece y es reemplazado en la solana final por una vegetación muy baja de bojedas y encinares.

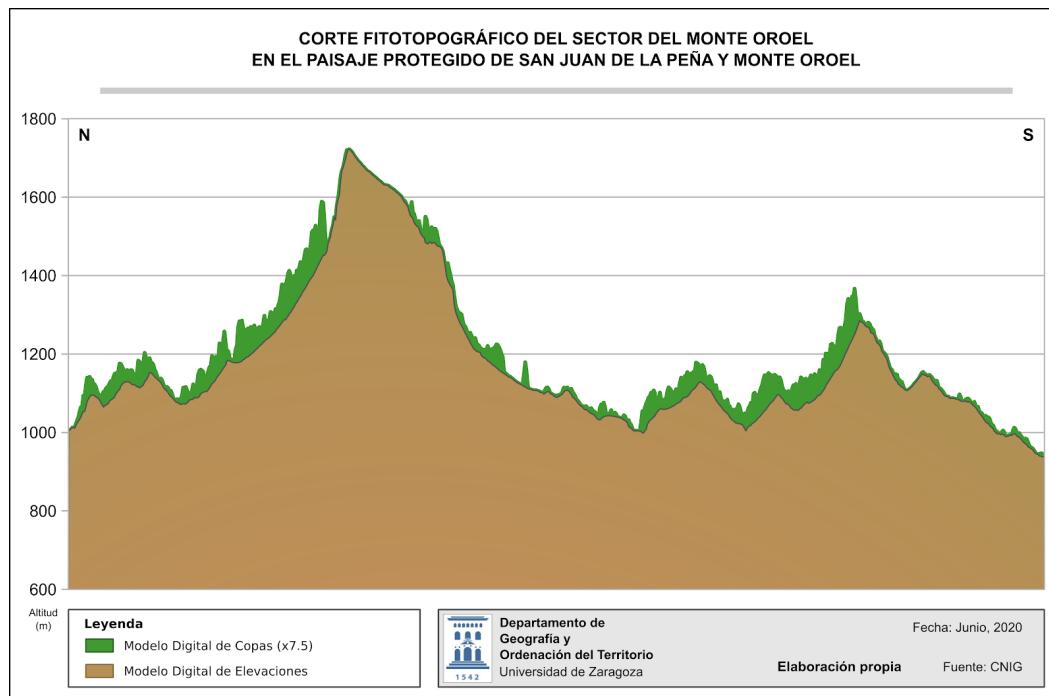


Figura 68. Corte fitotopográfico del Sector del Monte Oroel. Elaboración propia

Finalmente hemos realizado un corte ONO-ESE a lo largo de la ladera solana de la Sierra de San Juan de la Peña para investigar si los datos LIDAR discriminan el efecto de las orientaciones a levante y poniente, ya que en esas zonas, como se comentó en el apartado de geomorfología, hay una sucesión de vallonadas e interfluvios. El resultado se puede observar en la Figura 69.

Se observa que el corte mantiene una altitud media de unos 1100 m y que presenta un claro perfil en "dientes de sierra", como corresponde a su localización a lo largo de una ladera con la geomorfología elegida. Lo primero que llama la atención en cuanto a la vegetación es el escaso porte en general, lo cual es claramente compatible con su posición de solana. Un análisis detallado deja bien claro que podemos hablar de un efecto levante-poniente, ya que en este caso las laderas orientadas hacia el levante presentan alturas de vegetación mayores. En algunos casos este efecto es muy manifiesto. Este es un fenómeno claramente inesperado ya que la mayor parte de los frentes lluviosos provienen del este y nuestra hipótesis de partida era que esas orientaciones tendrían más vegetación. Sin embargo, el análisis detallado de la ortofotografía confirma lo que nos indica el modelo digital de copas. Esto probablemente se deba a factores edáficos que favorezcan el desarrollo del suelo en esas laderas ya que los factores geológicos hay que descartarlos, en principio, ya que la formación geológica en toda la ladera es la misma: una alternancia de lutitas, areniscas y conglomerados, con planos de estratificación con dirección paralela a la ladera.

Como otros aspectos tratados en el TFG, requeriría un estudio detallado en el campo. En cualquier caso este ejemplo ilustra la utilidad de la tecnología LIDAR, ya que orienta los objetivos de los estudios de campo.

También se observa claramente cómo en el fondo de las vallonadas la altura de la vegetación también es superior. Lógicamente esto se explica por una mayor disponibilidad de agua que desciende por las laderas hasta el fondo de los valles.

En todos los casos la vegetación es una sucesión variada de bojedas y pinares con quejigales.

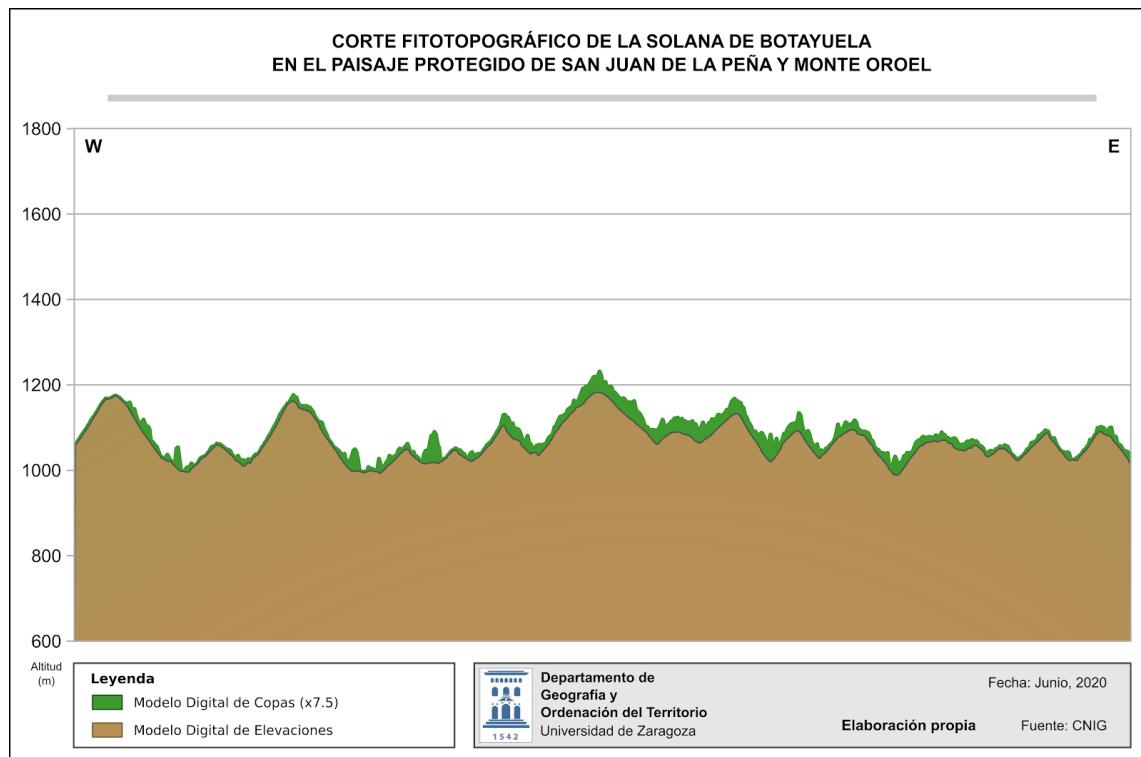


Figura 69. Corte fitotopográfico de la solana de Botayuela. Elaboración propia

Para acabar este apartado habría que volver a destacar que estos productos no tienen ninguna intervención humana y que no son interpretativos. Son productos digitales que proceden de los datos LIDAR. La coherencia de estos productos con los datos de campo es muy elevada y, en ocasiones, sorprendente. Esto vuelve a mostrarnos la potencialidad que presenta la tecnología LIDAR para los estudios de la Geografía de la vegetación.

4.3.3. Modelos tridimensionales

Para terminar esta sección vamos a realizar un análisis de los productos tridimensionales que se pueden obtener con las cartografías digitales disponibles. Cada vez se utiliza más estos modelos en estudios de todo tipo y, en el ámbito de la biogeografía, también podrían tener mucha utilidad. Como se puede ver en las siguientes figuras, estos son espectaculares desde el punto de vista visual. Sin embargo, son muy interesantes también desde el punto de vista científico, como iremos viendo.

El primero (Figura 70) es una vista del Monte Oroel desde el OSO. Como en todas las demás, en la parte superior se proyecta la ortofotografía sobre el MDE y, en la inferior, se proyecta la cartografía vegetal del Mapa de Paisajes. Esta imagen deja claro algo que repetiremos en las siguientes y es la necesidad de realizar una revisión de la cartografía vegetal ya que se observan claras discrepancias en detalles entre ambas imágenes. En nuestra opinión, el efecto 3D (profundidad, perspectiva...) facilita enormemente el análisis de estas discrepancias.

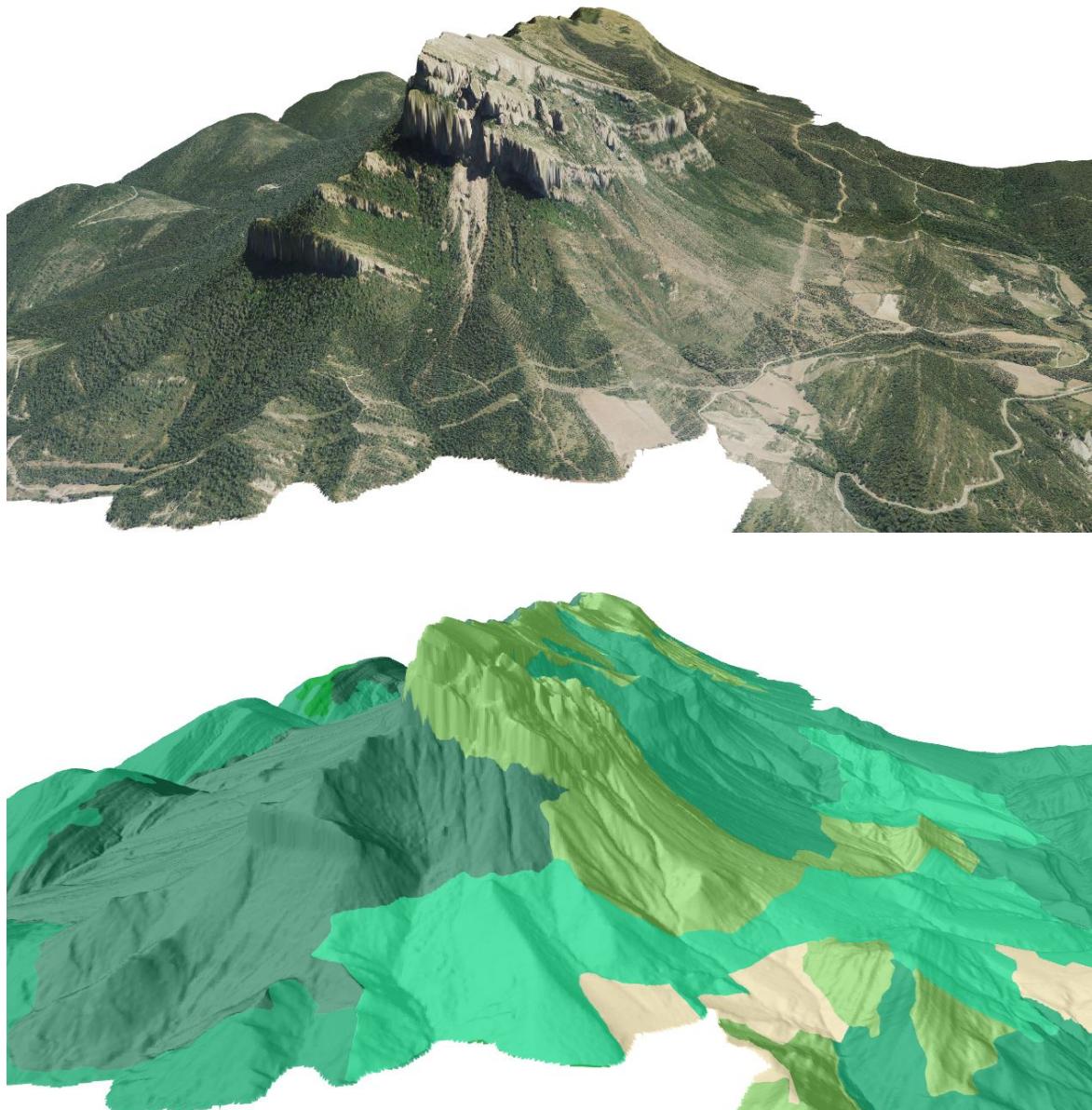


Figura 70. Escena del Monte Oroel desde el OSO. Elaboración propia

La siguiente escena (Figura 71) vuelve a mostrar el Monte Oroel pero, en este caso, desde una vista más alta y desde el ESE. Esta nos permite ver perfectamente los efectos de solana-umbría, comentados en el apartado correspondiente, y la transición que introduce la cresta superior del monte.

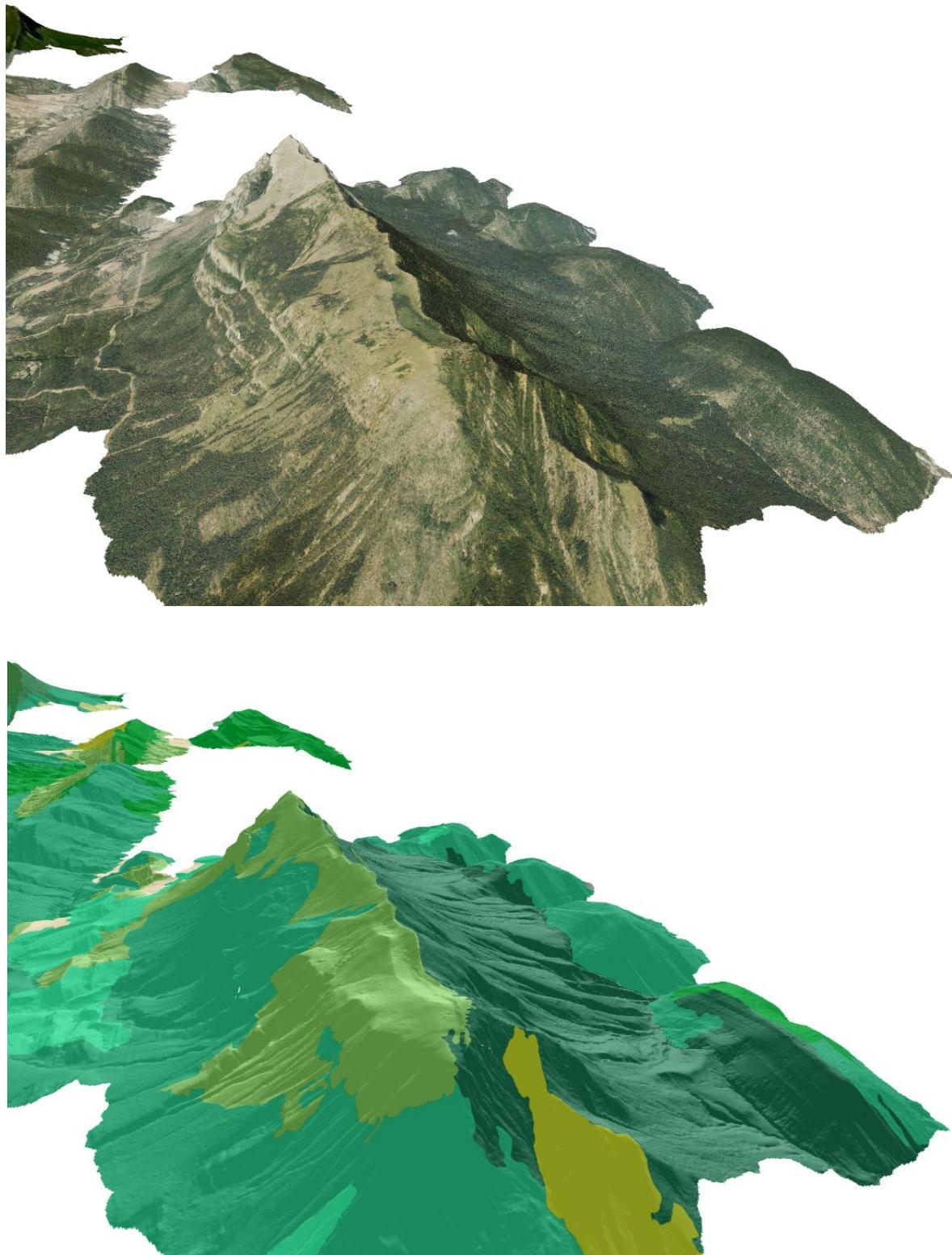


Figura 71. Escena del Monte Oroel desde el ESE. Elaboración propia

Sin embargo, en la siguiente escena (Figura 72), este efecto se observa de manera todavía más espectacular. En ella se observa el Monte Cuculo desde el ONO. La ladera de umbría aparece como un tapiz denso boscoso. Se observa muy bien cómo, en el lado de la solana, hay un efecto de orientación ya que, a la misma altitud, la vegetación es distinta en el lado situado hacia el oeste a la que encontramos en el lado situado hacia el este. En este sector la cartografía vegetal parece corresponderse mejor con la ortofotografía. En segundo plano se ve perfectamente cómo en la parte alta de la Sierra de San Juan de la Peña encontramos un pinar-abetal en posición elevada situado por encima de un hayedo-abetal.

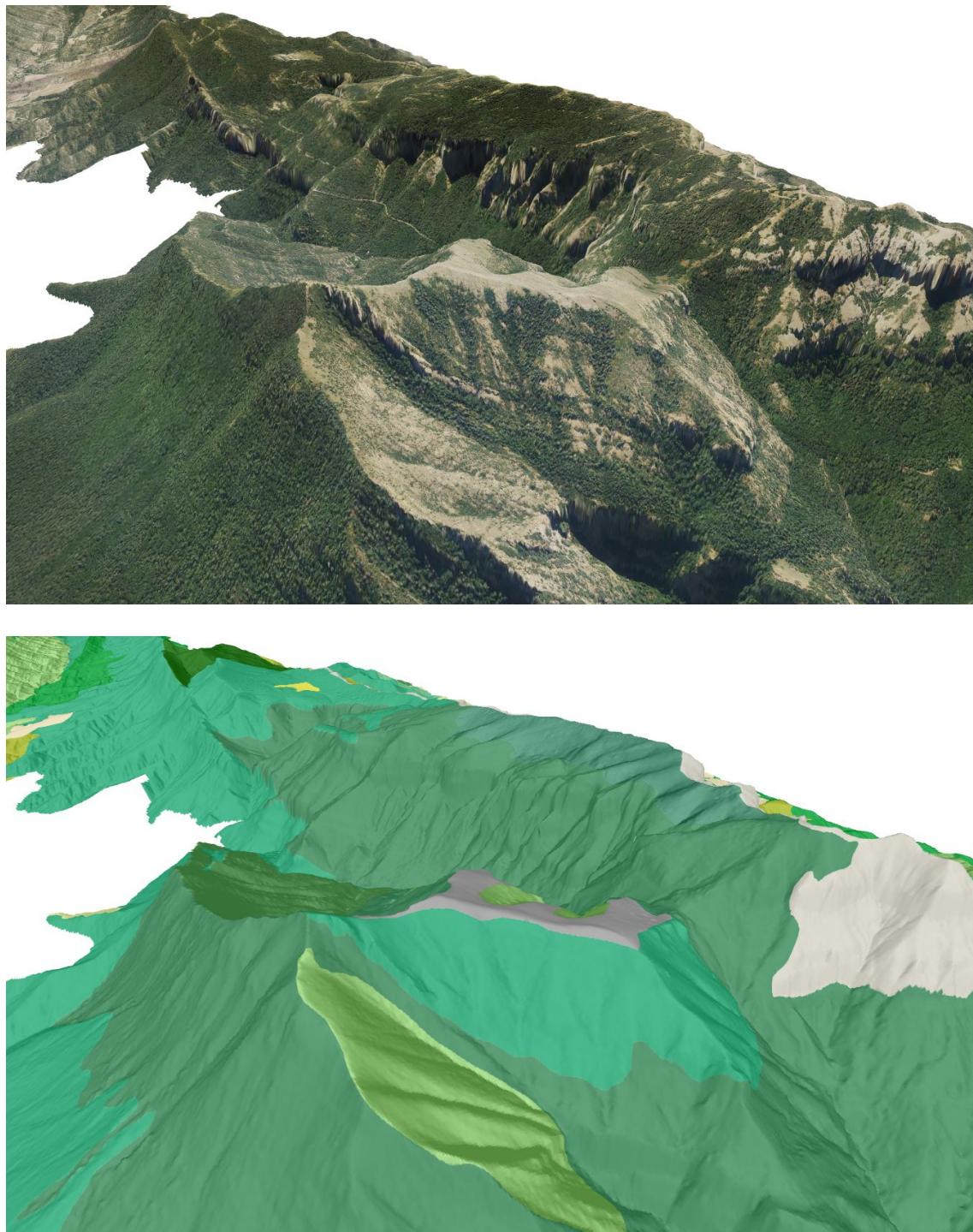


Figura 72. Escena del Monte Cuculo desde el ONO. Elaboración propia

En la Figura 73 observamos la ladera de solana de San Juan de la Peña. Se aprecia perfectamente cómo, la mayor densidad de vegetación, se corresponden con las zonas de recepción y en las zonas de desagüe de las vallonadas presentes en la ladera. También se observa claramente la necesidad de una revisión de la cartografía vegetal, ya que vemos zonas de vegetación muy rala clasificadas en dos categorías. Además, la cartografía vegetal no recoge las notables diferencias de vegetación que encontramos en las zonas de recepción y desagüe de la que encontramos en los interfluvios. En el escarpe de la cima también encontramos diferentes categorías de vegetación cuando es todo uniforme.

En esta escena se localiza el perfil fitotopográfico 4 de la Figura 65 en el que se observaron algunas particularidades de efectos de la orientación sobre la vegetación.

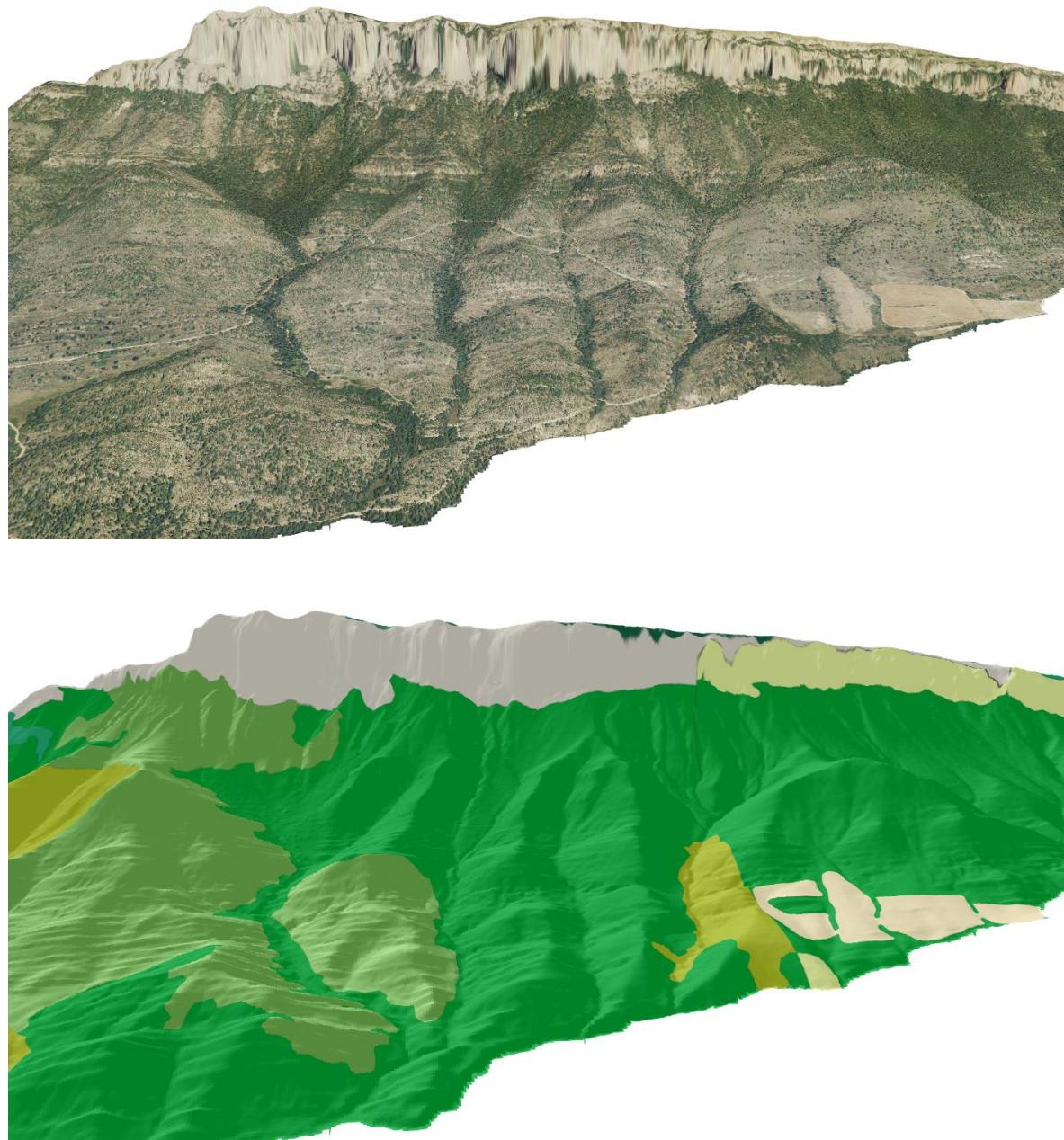


Figura 73. Escena de la Sierra de San Juan de la Peña desde el S. Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 74 se presenta una panorámica larga de todo el territorio del Paisaje Protegido visto desde el O y a baja altura. Esta permite ver en primer plano toda la Sierra de San Juan de la Peña y el Monte Oroel al fondo. La imagen inferior representa clarísimamente el mosaico de vegetación tan espectacular que encontramos en este espacio natural que, como ya se ha comentado en repetidas ocasiones, hacen de él de una zona extraordinariamente interesante desde el punto de vista botánico y biogeográfico. Todas las variables del relieve que influyen en la vegetación (altitud, orientación y pendiente) se pueden observar en esta escena, en la que, lógicamente por la posición de la visual, solo las comunidades de umbría quedan enmascaradas.

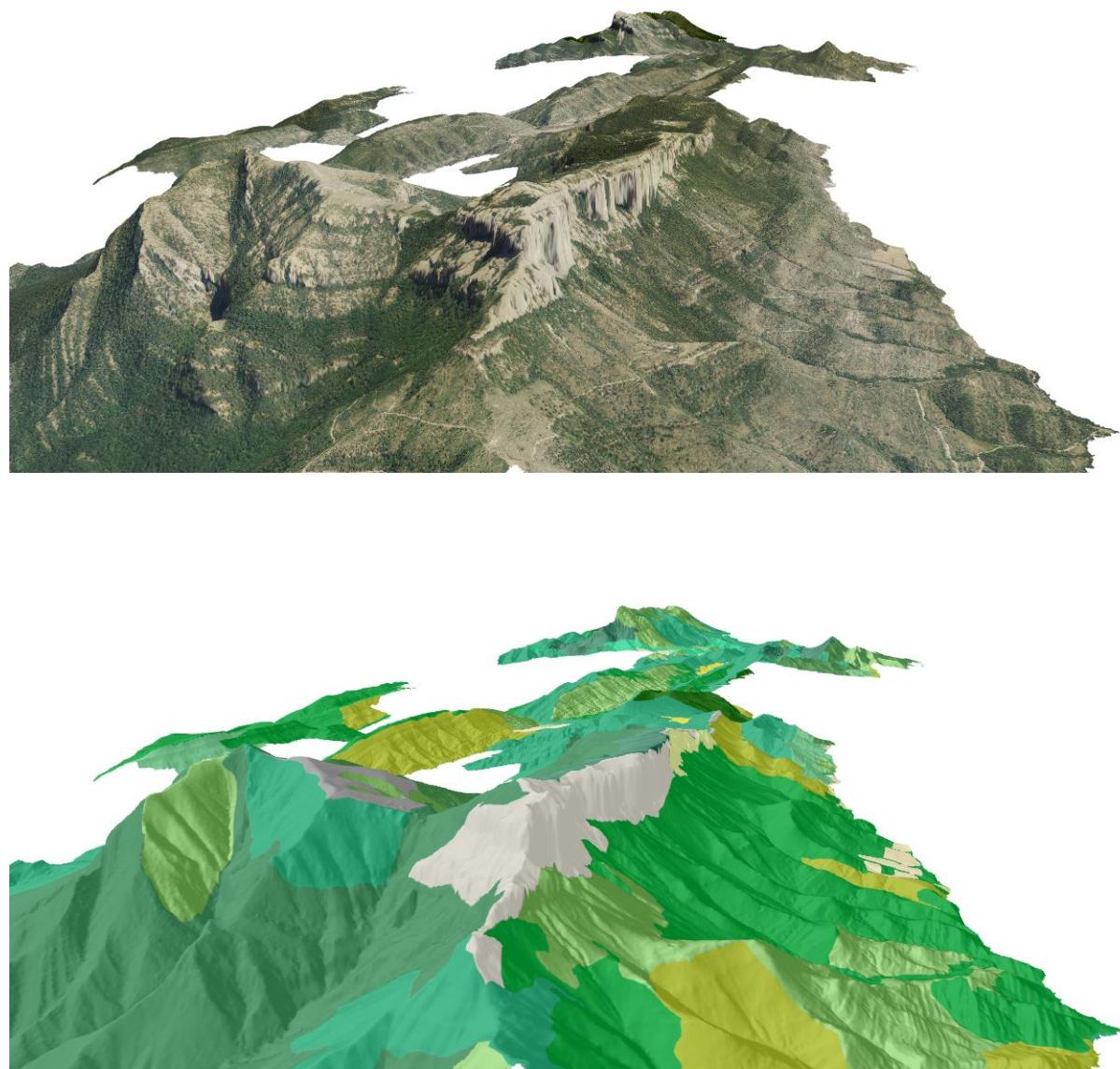


Figura 74. Perspectiva del Paisaje Protegido desde el O. Elaboración propia

Además de los estudios tridimensionales tomando como base el Modelo Digital de Elevaciones podemos hacerlos a partir del Modelo Digital de Superficies. Esto lo hemos realizado en el sector próximo al Monasterio Nuevo de San Juan de la Peña al que aplicamos las técnicas de análisis forestal y se muestra en la Figura 75. Al proyectar el MDS sobre la ortoimagen de alta resolución podemos ver cómo la vegetación adquiere un efecto 3D. Como hemos comentado anteriormente, esto no solamente tiene un efecto estético sino que puede servirnos para analizar la estructura vertical y horizontal de la vegetación.



Figura 75. Escena de un sector del bosque de San Juan de la Peña. Elaboración propia

* * *

Para acabar haremos una valoración sobre estos modelos tridimensionales. En nuestra opinión, pueden resultar muy útiles para la investigación por varios motivos:

- Facilitan el análisis de las relaciones entre la vegetación y altitud, pendientes, orientaciones, formas del relieve y litología. Comparando con las visiones en 2D hemos notado que muchos aspectos que pasaban desapercibidos aparecen claramente cuando tenemos la posibilidad de modificar la perspectiva, ya que podemos rotar y alejar la escena según nuestros intereses.
- También hacen más fácil el contraste de las cartografías realizadas anteriormente con la situación actual de la vegetación. Las ortoimágenes se actualizan muy rápidamente pero las cartografías no lo hacen tanto, por lo que una técnica que haga fácil su revisión y posible modificación es muy interesante.
- Lógicamente, permiten explorar, aunque sea virtualmente, zonas de muy difícil acceso y que posiblemente no podríamos visitar salvo que fuéramos montañeros. Además, estas exploraciones seguramente necesitarían una gran inversión económica y de tiempo.
- Por último y relacionado con el motivo anterior, los modelos 3D permitirían optimizar las exploraciones del territorio ya que permiten detectar zonas de especial interés y descartar otras que puedan no tener tanto.

V.

Proyecciones futuras

Como ya se comentó en el apartado introductorio de este TFG, el proyecto CLIMPY pretende caracterizar la evolución del clima y proporcionar información que sea importante para la adaptación a esos cambios en el Pirineo. En este último apartado de nuestro trabajo vamos a analizar, justamente, cuál puede ser el futuro del clima en la zona de estudio, basándonos en los modelos establecidos por el proyecto CLIMPY. Posteriormente se hará un intento de análisis de cómo podría ser la vegetación en algunos de los escenarios analizados. Esto podría servir de base para plantear medidas de adaptación o protección de los ecosistemas presentes en ella.

Clima

En la Figura 76 se puede ver la delimitación del territorio de los estudios que realiza la Comunidad de Trabajo de los Pirineos (CTP) y que es el ámbito para el que se han hecho los estudios climáticos en el marco del proyecto CLIMPY. Este territorio es dividido para los estudios de clima futuro en una serie de macizos. El territorio aragonés se reparte de oeste a este en los macizos denominados "Navarra", "Jacetania", "Gállego", "Sobrarbe", "Esera" y "Ribagorza". Nuestra área de estudio se distribuye íntegramente por el macizo de La Jacetania. A efectos de modelización, todo el territorio de cada macizo presenta los mismos valores de anomalías.

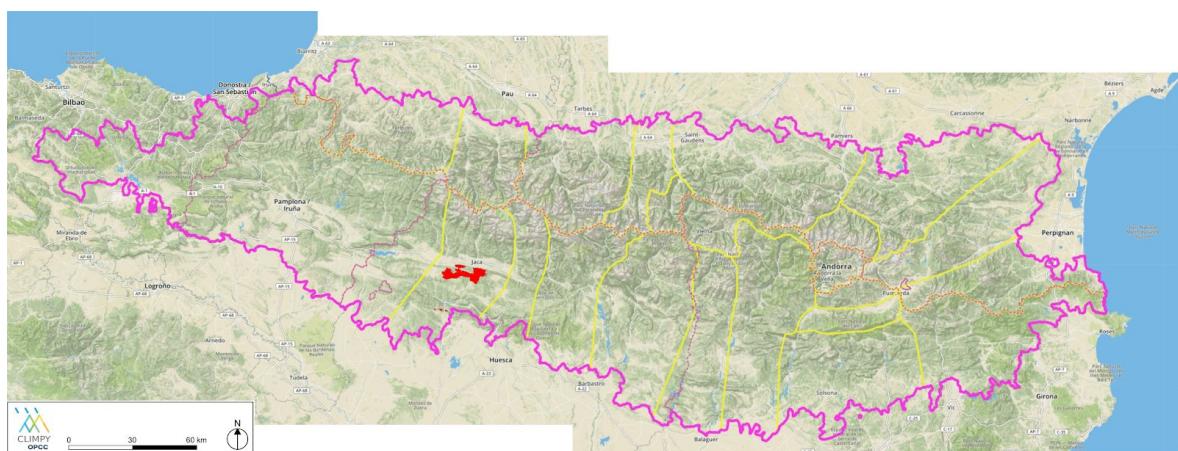


Figura 76. Delimitación de la zona CLIMPY y su división en macizos. Elaboración propia

Los modelos de cambio climático definen lo que se llaman *Trayectorias de Concentración Representativas* (en inglés *Representative Concentration Pathways*). Estas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100, es decir, la diferencia entre la insolación absorbida por la tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio. El valor del FR es el valor numérico que aparece en la denominación del RCP. Las unidades son en W/m². Cuando el FR es positivo significa que la tierra recibe más energía solar que la que irradia y, por tanto, habrá un calentamiento (REFERENCIA OSC.GOB.ES -observatorio de salud y cambio climático). Como es lógico, los RCPs se correlacionan con las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Existen muchas modelizaciones de escenarios RCP (Figura 77). El modelo CLIMPY solo toma en consideración dos RCPs: el 4.5 y el 8.5. Como vemos en la figura, el RCP 4.5 simula una estabilización de las emisiones a partir de 2050, pero por el contrario, el RCP 8.5 supone un incremento continuo de las mismas. Por tanto, el RCP 4.5 es más optimista que el RCP 8.5.

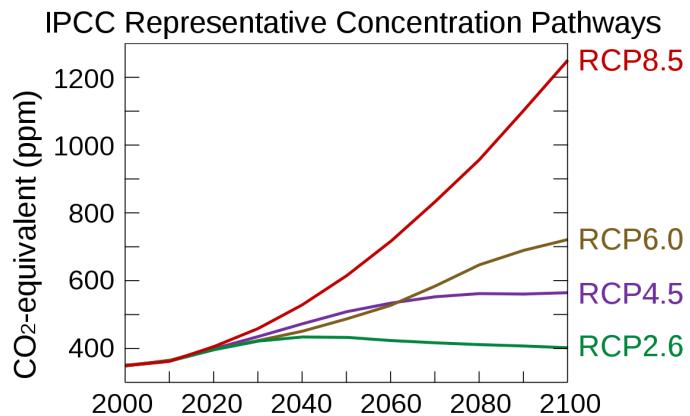


Figura 77. Escenarios RCP. Fuente: Wikipedia

Desde el punto de vista estadístico, CLIMPY realiza dos modelos de clima futuro: estadísticos, basados en precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, y dinámicos, que tiene en cuenta muchas otras variables como la ETP, la escorrentía, la humedad del suelo... (Rodríguez, 2017). Una diferencia importante entre ambos es que los modelos dinámicos permiten estudiar los valores anuales de las variables a diferentes cotas (1500 m, 1800 m y 2100 m). Por el contrario, los modelos estadísticos proporcionan datos anuales y estacionales sin diferenciar altitudes.

En este TFG hemos trabajado con los modelos estadísticos ya que se pueden descargar directamente desde la página web del proyecto CLIMPY, además la altitud máxima de nuestro territorio es de 1770 metros.

Los modelos de clima futuro analizan tres variables: las precipitaciones anuales, las medias de las temperaturas máximas y las medias de las temperaturas mínimas. Los escenarios analizados son, como ya se ha indicado, el RCP 4.5 y el RCP 8.5. En cada uno de ellos hay un análisis muy detallado de variables, ya que se proporcionan valores anuales y estacionales para los años 2030, 2050, 2070 y 2090. En nuestro estudio hemos analizado los escenarios para el año 2030 por ser el más próximo en el tiempo, y el de 2090, para ver cómo puede ser la situación del territorio a finales de siglos tanto en el mejor de los casos como en el peor de los casos.

Como se ha indicado en el apartado climático, la resolución del modelo CLIMPY para los modelos futuros presenta también una resolución espacial de 1000 metros.

La metodología seguida para investigar los escenarios futuros ha consistido en un simple álgebra de rásteres, consistente en sumar al valor de la variable actual para cada píxel del territorio de estudio, el valor de la anomalía correspondiente al escenario analizado. En la Tabla 14 aparecen los valores de esas anomalías.

2030		2090	
	4.5	8.5	4.5
Pa	-5,53	-6,21	-4,71
T ^a max	1,48	1,48	2,9
T ^a min	0,95	1,06	1,99
			4,28

Tabla 14. Anomalías climáticas. Fuente: CLIMPY. Elaboración propia

La primera variable que se va a analizar es la precipitación anual (Figura 78). En la parte superior se presenta el mapa de la situación actual, que es la media del periodo 1950-2015. Aunque a simple vista dé la sensación de que no hay grandes cambios entre los dos escenarios y la actualidad, un análisis más detallado deja entrever para 2030 el aumento de zonas con precipitaciones más bajas, ya que se produce una caída de en torno al 5,5% y 6,2%, respectivamente. Esto se deja notar más en las zonas más bajas del territorio, aunque en la zona del Monte Oroel la caída llega a ser de 100 mm en el mejor de los casos (RCP 4.5).

Los escenarios para el año 2090 indican un cierto regreso hacia las condiciones actuales. Cabe destacar que en el escenario RCP 8.5 (de mayores emisiones) la anomalía de precipitaciones es inferior (-1,78%) a la que modeliza el escenario de menores emisiones (-4,71%).

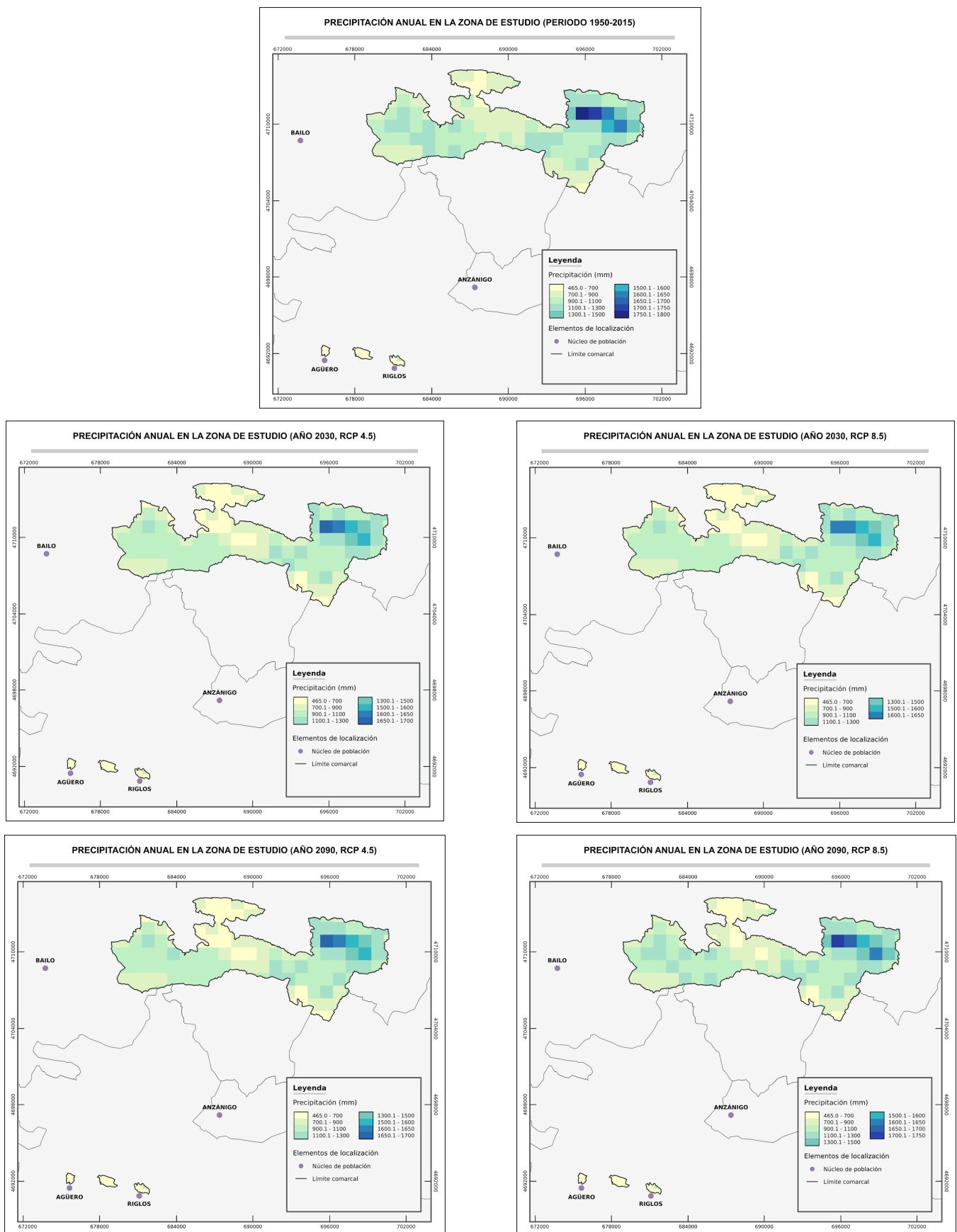


Figura 78. Modelos de precipitación futuros. Elaboración propia

El gráfico de la Figura 79 visualiza los cambios en las precipitaciones comentados. Para elaborarlo se parte del supuesto de que las distribuciones de frecuencia futuras son iguales que las actuales, de modo que hemos desplazado todo el diagrama de cajas el valor correspondiente a la anomalía. No sabemos exactamente cómo será la distribución de frecuencias en el futuro, pero esta suposición puede ser de ayuda para tener una aproximación de los posibles cambios futuros.

De ser esto así, durante todo el s.XXI el 50% de la zona de estudio tendrá unas precipitaciones que se situarán entre los 760 mm y los 1150 mm.

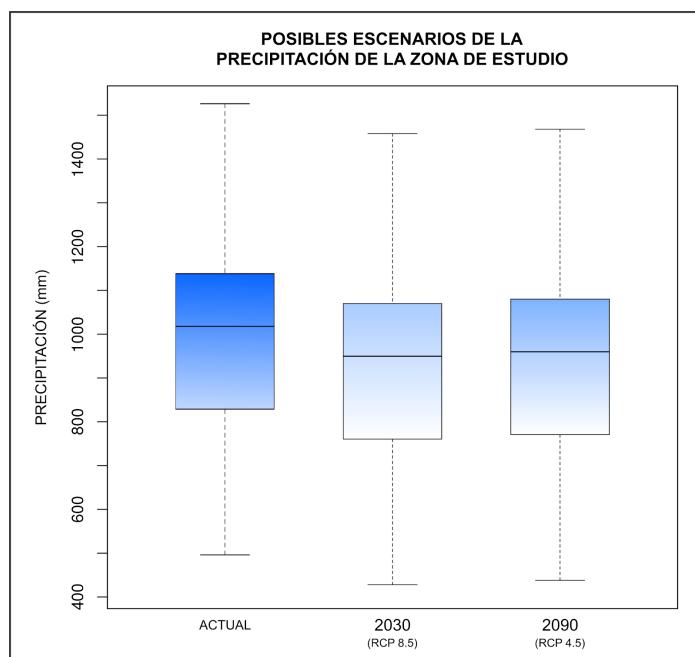


Figura 79. Posibles distribuciones futuras de la precipitación. Elaboración propia

La siguiente variable analizada son las temperaturas máximas, en las que las diferencias son mucho más notables (Figura 80). Para el año 2030 no hay diferencias entre los escenarios 4.5 y 8.5, pero sí que hay muchas diferencias con la situación actual ya que prácticamente todo el territorio presenta unos tonos de naranja que actualmente sólo encontramos en las zonas más bajas. En la zona del Monumento Natural las medias de las máximas se sitúan en el entorno de los 19°C. La situación se acentúa de manera drástica en los escenarios para el año 2090. Entonces, en el mejor de los casos, la mayor parte del territorio tendrá medias de las máximas por encima de los 17°C, cosa que en la actualidad solamente ocurre en la zona de los mallos. Las zonas más frías como el Monte Oroel y el Monte Cuculo presentarán temperaturas que actualmente encontramos en la zona de Santa Cruz de la Serós, ¡situada casi 1000 m por debajo! El escenario se vuelve catastrófico si consideramos el RCP 8.5. Como puede verse, toda la zona estudiada aparece teñida de rojo, con temperaturas máximas verdaderamente extremas para el ámbito geográfico en el que se localiza. En la zona de los mallos y en las partes más bajas del Paisaje Protegido, la media de las máximas estaría sobre los 25°C; es decir, 6°C más que lo que encontramos actualmente.

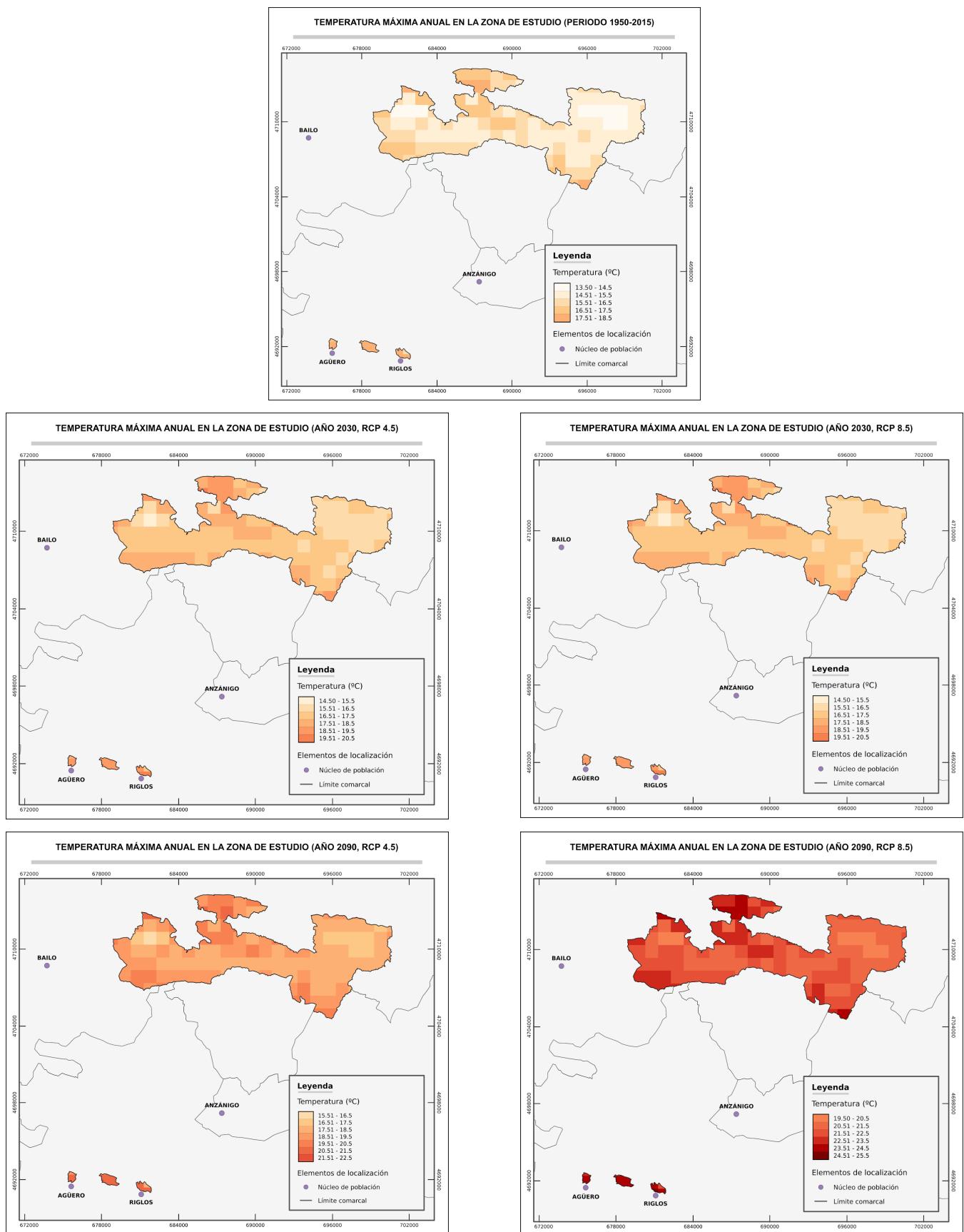


Figura 80. Modelos de temperatura máxima futuros. Elaboración propia

Estas diferencias quedan de manifiesto en el diagrama de cajas presente en la Figura 81. De nuevo se considera que las distribuciones del futuro son como la actual. En ese caso se observa que va ha haber un reemplazo prácticamente total de las condiciones térmicas. En 2030, es decir, dentro de 10 años, en un escenario de RCP 8.5, más del 75% del territorio tendrá unas temperaturas que en la actualidad corresponden con menos del 25% de las zonas más cálidas actuales. En el año 2090, en el mejor de los casos (RCP 4.5), el 75% del territorio tendrá unas temperaturas máximas que actualmente no existen en nuestra zona.

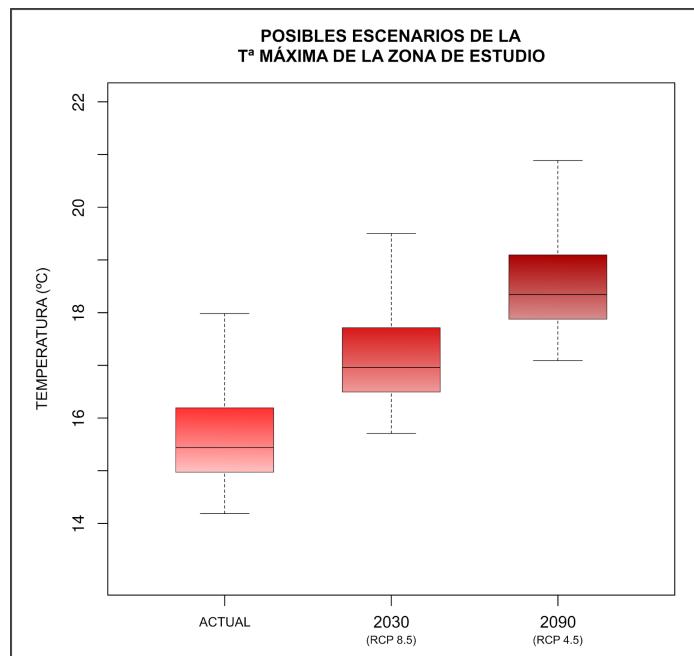


Figura 81. Posibles distribuciones futuras de la temperatura máxima. Elaboración propia

Si los escenarios analizados para las temperaturas máximas son preocupantes, lo mismo ocurre con el caso de las mínimas, ya que sus evoluciones son muy similares. En la Figura 82 se observa la distribución de las mismas en la zona de estudio.

Para el año 2030 ya se observa que la leyenda pierde el intervalo de las temperaturas más bajas actuales (2.5°C - 3.5°C). Las diferencias entre los dos escenarios no son muy notables ya que las anomalías son muy similares. Sin embargo, para el año 2090 los cambios son más que notables. En el mejor de los casos la anomalía es de prácticamente 2°C y en el escenario RCP 8.5 es de más de 4°C. En este último caso se observa que la temperatura más baja se encuentra solamente en el Monte Oroel y que coincide con el intervalo más alto en el mapa de hoy en día (6.5°C - 7.5°C). En el caso de los mallos las medias de las mínimas se situarían alrededor de los 11°C.

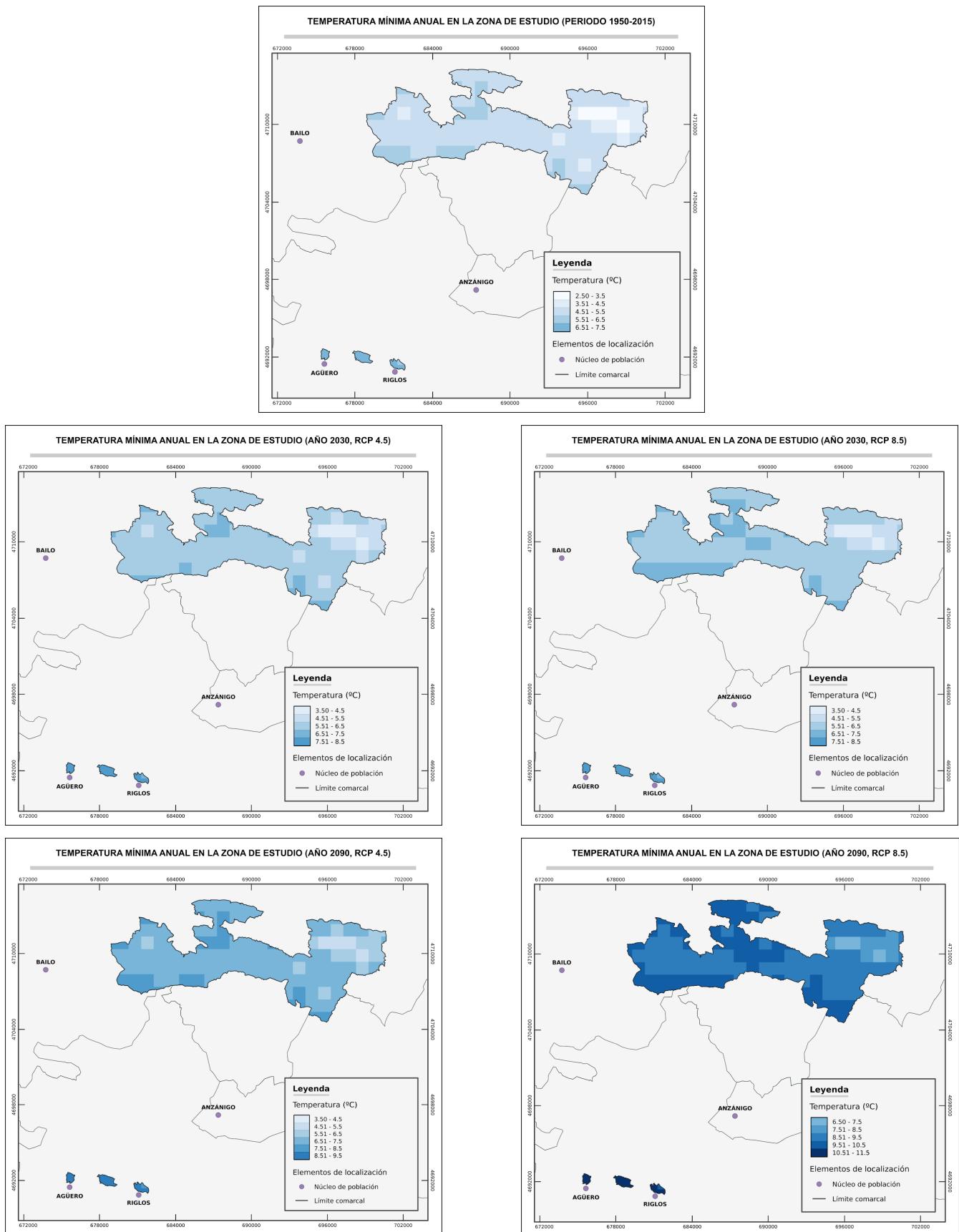


Figura 82. Modelos de temperatura mínima futuros. Elaboración propia

Como antes, hemos representado las simulaciones como diagramas de cajas en la Figura 83. En este caso, la sustitución térmica es todavía más evidente que en las máximas. De hecho, para dentro de tan solo 10 años el modelo prevé que todo el territorio se sitúe por encima de la mediana actual, independientemente del escenario de emisiones que consideremos. A finales de siglo, en cualquier caso, todo el territorio tendrá temperaturas medias mínimas desconocidas en la actualidad!

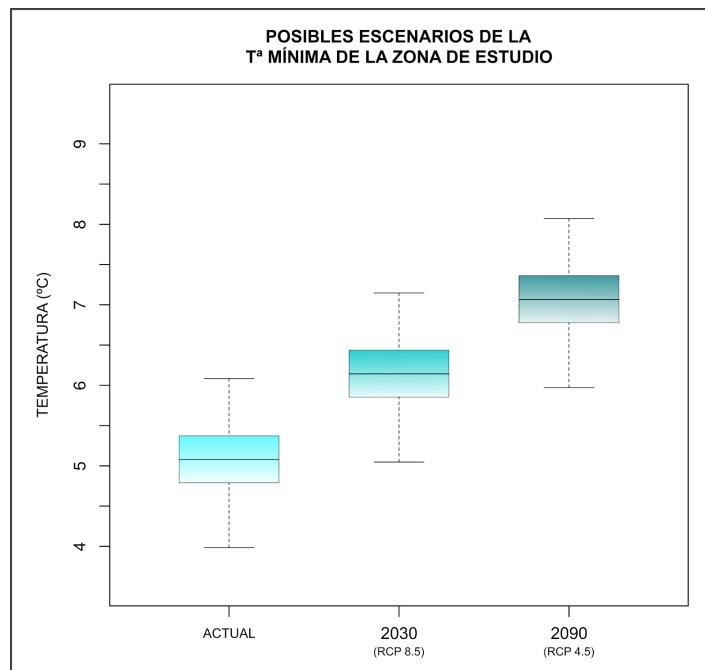


Figura 83. Posibles distribuciones futuras de la temperatura mínima. Elaboración propia

Lógicamente, este incremento térmico, combinado con el ligero descenso en las precipitaciones, tendría un tremendo impacto sobre el balance hídrico del suelo, ya que, aunque la pérdida de aportes por precipitaciones no sea muy importante, el incremento de la evapotranspiración potencial debido al aumento de las temperaturas será extraordinario. Esto sin duda alguna tendrá efectos sobre la vegetación, lo cual es el objeto de análisis del último apartado del presente TFG.

Resultaría muy interesante poder comprobar si estos cambios recién comentados modifican la clasificación climática actual en el área estudiada. Para ello necesitaríamos datos mensuales de las precipitaciones y las temperaturas medias. Como vemos que las temperaturas mínimas y máximas suben más o menos de una manera paralela, podemos hacer la suposición de que también puedan hacerlo en la misma medida las precipitaciones mensuales, ya que da la sensación de que los modelos no indican cambios en la estacionalidad de las temperaturas. En el caso de las precipitaciones esta suposición es más difícil de argumentar porque los modelos de cambio climático sí que indican mayores eventos extremos (sequías y grandes precipitaciones). Aún así, hemos aplicado el mismo método para calcular las precipitaciones medias mensuales en dos escenarios.

Hemos elegido el escenario próximo más negativo (2030 RCP 8.5) y el escenario lejano más optimista (2090 RCP 4.5). En este último caso para poder ver qué territorio nos encontraríamos a finales de siglo si se toman las medidas adecuadas. Los resultados de estas proyecciones climáticas las encontramos en las Figuras 84 y 85. Se incluyen también las clasificaciones actuales para poder facilitar las comparaciones entre sí.

Los climas de Köppen (Figura 84) no cambian excesivamente para el año 2030, ni siquiera en el peor de los casos, pero es destacable que el clima *Csb* (clima templado con verano seco) es reemplazado por el *Csa* en la zona de los mallos de Agüero, lo cual significa que aparece, aunque sea localmente, el clima templado con verano seco y caluroso. A finales de siglo, en el mejor escenario de emisiones, el cambio es más notable. Aunque no hay aparición de nuevos climas, se observa claramente cómo en las zonas más bajas y meridionales del territorio del Paisaje Protegido el clima *Cfb* (clima templado sin estación seca y con verano templado) es sustituido por el *Cfa* (clima templado sin estación seca pero con veranos calurosos).

La conclusión es que aparentemente los cambios de categoría climática no son tan grandes como los que se observan en las temperaturas.

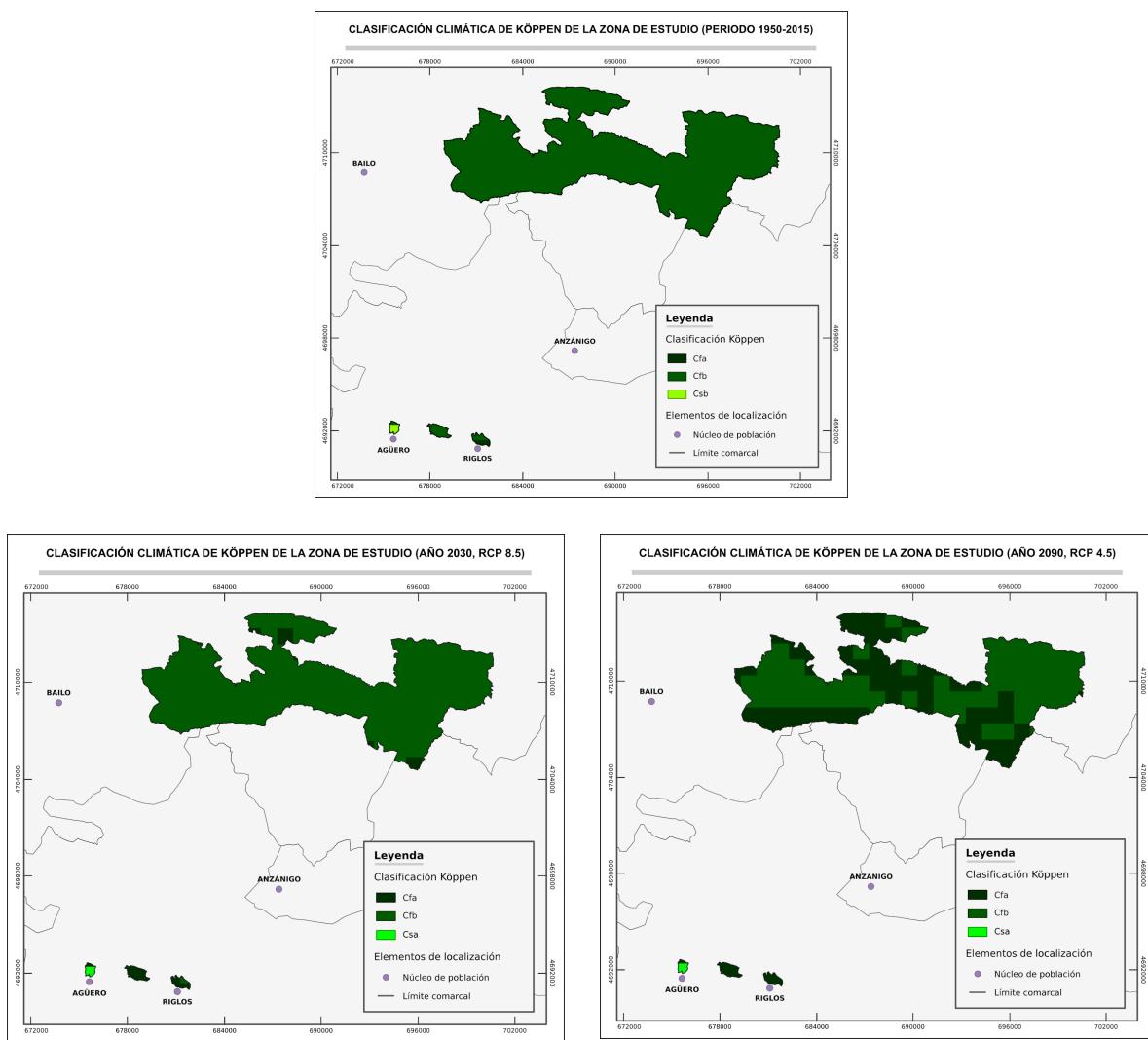


Figura 84. Posibles clasificaciones de Köppen futuras. Elaboración propia

Por su parte, en la Figura 85 aparece la distribución de los climas según la clasificación de Thornthwaite. En este caso, las diferencias son mucho más visibles que en el caso anterior, tanto al comparar los escenarios futuros entre sí, como con la situación actual.

Para el año 2030 se observan cambios importantes en las zonas más bajas y meridionales, ya que amplias zonas del territorio pasan del régimen microtérmico al régimen mesotérmico, aunque no cambia el régimen de humedad.

El escenario a finales de siglo es casi totalmente distinto al actual, ya que las zonas clasificadas como microtérmicas prácticamente desaparecen y quedan relegadas al Monte Oroel y el ya famoso píxel anómalo del Monte Cuculo...

En la zona del Monumento Natural no hay cambios en la clasificación climática de Thornthwaite.

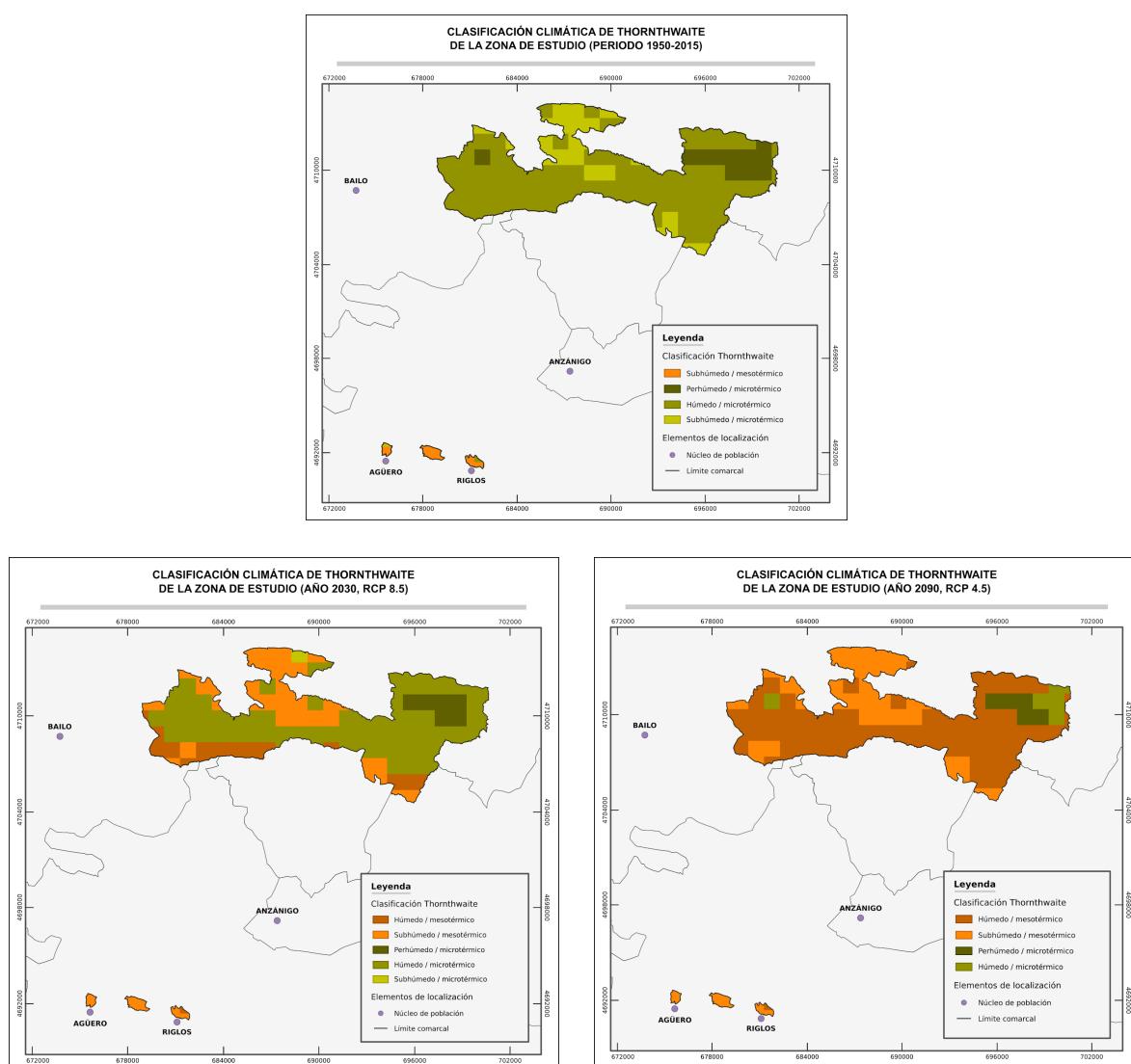


Figura 85. Posibles clasificaciones de Thornthwaite futuras. Elaboración propia

Vegetación

Uno de los objetivos principales del proyecto CLIMPY es hacer proyecciones futuras para hacer estrategias de adaptación al cambio climático (CLIMPY, s.f.). En lo que respecta a nuestro TFG, básicamente nos interesan los cambios que puedan afectar a la vegetación, de modo que en este último apartado del trabajo haremos un intento de proyección de futuro.

Este es un tema que requiere de estudios y modelos más complejos de los que vamos a realizar, por lo que lo planteamos sólo como una aproximación cualitativa a lo que podría llegar a ocurrir. No podemos entrar en detalles sino tan solo destacar los cambios que creemos que son poco discutibles, sea cual sea el modelo.

El método seguido ha sido el comparar las distribuciones de la vegetación actual estudiadas en el apartado correspondiente con el clima futuro suponiendo que sumamos las anomalías y se mantiene la forma de las cajas

En la Figura 86A se analiza el escenario de las precipitaciones para el año 2030 con un RCP 8.5. A la izquierda de la imagen se han colocado los diagramas de caja de la distribución de las precipitaciones actuales y del escenario futuro (para mayor claridad solamente se ha introducido el rango intercuartílico). En la parte principal del gráfico se puede observar el diagrama de cajas que hemos analizado en el apartado correspondiente.

Como se puede ver, el escenario futuro no es muy diferente al actual. El ligero descenso de las precipitaciones hace que la distribución intercuartílica no deje de solaparse con ninguno de los tipos de vegetación en la zona de estudio. Sin embargo, se puede vislumbrar que la vegetación que podría padecer más este descenso es el bosque de frondosas caducifolias (9), ya que es el que tiene un rango intercuartílico más corto, es decir, unas mayores exigencias de precipitaciones y el 50% de sus masas forestales actuales vive en el tercer cuartil de las precipitaciones. El descenso que se produce para 2030 es ligeramente menor a un cuartil, por lo que prácticamente el 25% de los que viven en las partes más húmedas verían reducir sus aportaciones. En el caso del abetal y pinar eurosiberiano (6), este ligero descenso podría no afectarle mucho ya que actualmente ya vive fuera del rango intercuartílico de las precipitaciones, por lo que parece que su distribución depende más del factor térmico.

El escenario para 2090 (Figura 86B), con un RCP de 4.5, es más parecido al actual que el 2030 8.5, de modo que las formaciones vegetales se verían todavía menos afectadas.

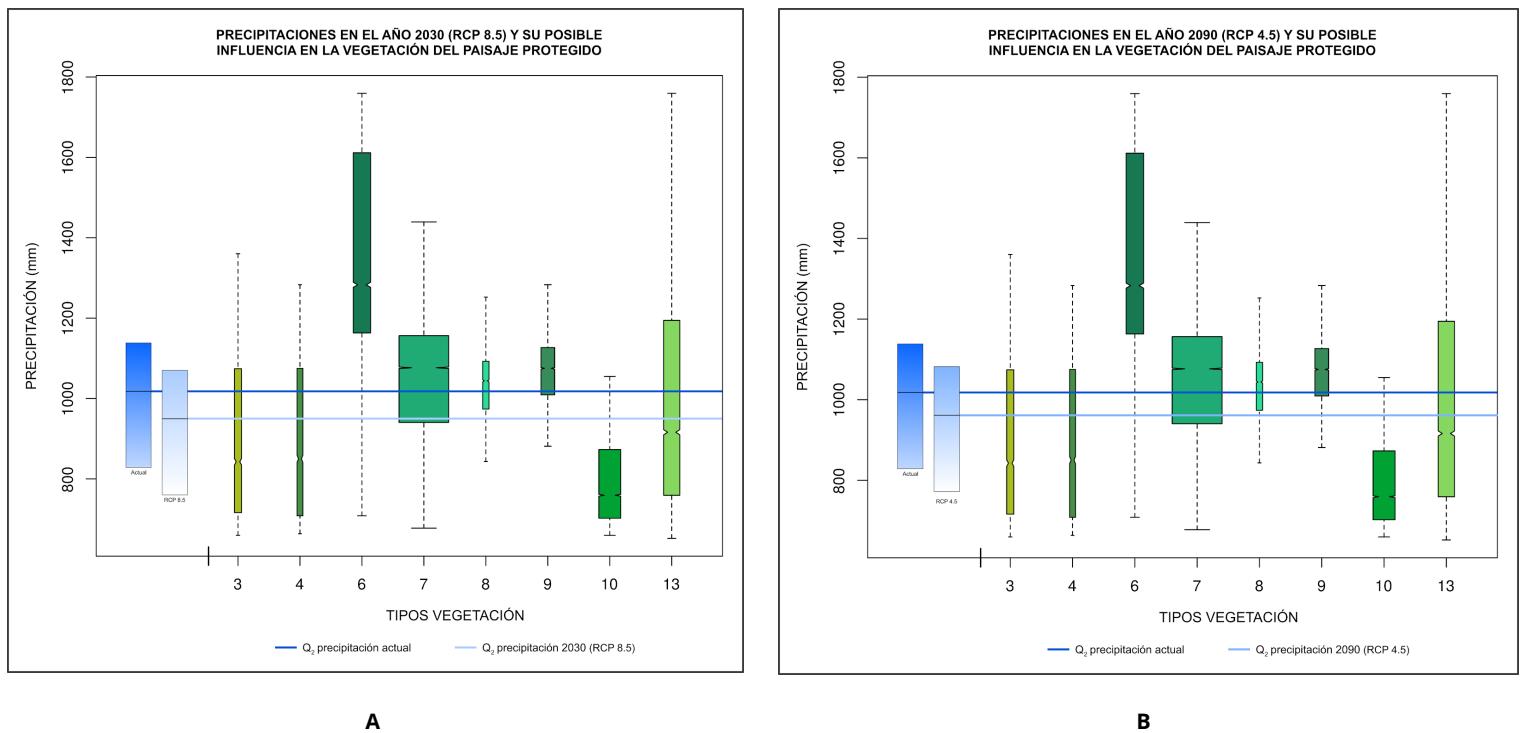


Figura 86. Incidencia de los cambios de precipitaciones en la vegetación del Mapa de Paisajes. Elaboración propia

La situación es claramente más preocupante cuando analizamos las temperaturas futuras, tanto las máximas como las mínimas, confirmando los temores que hicimos en el apartado anterior. Como vemos en la Figura 87A, el aumento de las temperaturas tiene algunas consecuencias claras. Por ejemplo, el pinar-abetal (6) quedaría fuera de rango. La temperatura máxima más baja prevista en el píxel más fresco es superior a la temperatura más cálida de cualquier píxel en el que se encuentre el abetal actual. Esto nos permite plantear la hipótesis de que el abetal y pinar eurosiberiano puede sufrir graves consecuencias. Si no desaparecer completamente, sí podría sufrir pérdidas de densidad, posibles enfermedades, reducción de las áreas por las que se distribuye... Los hayedos-abetales (9) y los pinares mediterráneos y submediterráneos (7) también se verán posiblemente muy afectados ya que, aunque no se queden fuera de rango, la mitad de su territorio térmico (el más fresco actualmente) desaparecerá en 2030; solamente la mitad de sus áreas de distribución (las más cálidas) se encontrarán representadas en las zonas más frescas del territorio en el escenario futuro. Esto podría producir en ese escenario de nuevo pérdidas de densidad, de áreas, o "desplazamientos" de las mismas, lo cual implicaría entrar en competencia con otras formaciones.

Por su parte, las formaciones más termófilas pueden verse "favorecidas" por los problemas que sufren las formaciones anteriormente citadas ya que no sería descartable que unas perdieran áreas de superficie y las otras las ocupasen. Esto podría hacer incrementar las masas de quejigal (3), encinar (4) y los pinares con quejigo (10).

Obviamente, también es posible que las formaciones y especies vegetales tengan una capacidad de adaptación a los cambios en las condiciones climáticas. Para ello necesitaríamos tener datos de ecología vegetal de las principales especies de cada formación para poder hacer una mejor simulación. Por ejemplo, tendríamos que saber exactamente si algunas de estas variables climáticas son factores limitantes del desarrollo de estas especies y cuáles son sus umbrales para poder simular si puede desaparecer completamente o no.

En el caso del año 2090 la situación más que preocupante es alarmante ya que estamos considerando el mejor de los escenarios, es decir, que si el modelo CLIMPY no falla, podemos dar por segura. Como vemos en la Figura 87B, en esas condiciones quedarían fuera de rango cinco de las formaciones vegetales analizadas, entre ellas incluso el quejigar (3). El resto de las termófilas tampoco se encontrarán en condiciones óptimas, ya que menos del 25% de su distribución actual se localiza en condiciones que en el año 2090 serán las más frescas del territorio.

Esto tiene que suponer obligatoriamente unos cambios totales en la vegetación del territorio, ya que a semejantes cambios es muy difícil que las especies y las formaciones vegetales puedan adaptarse.

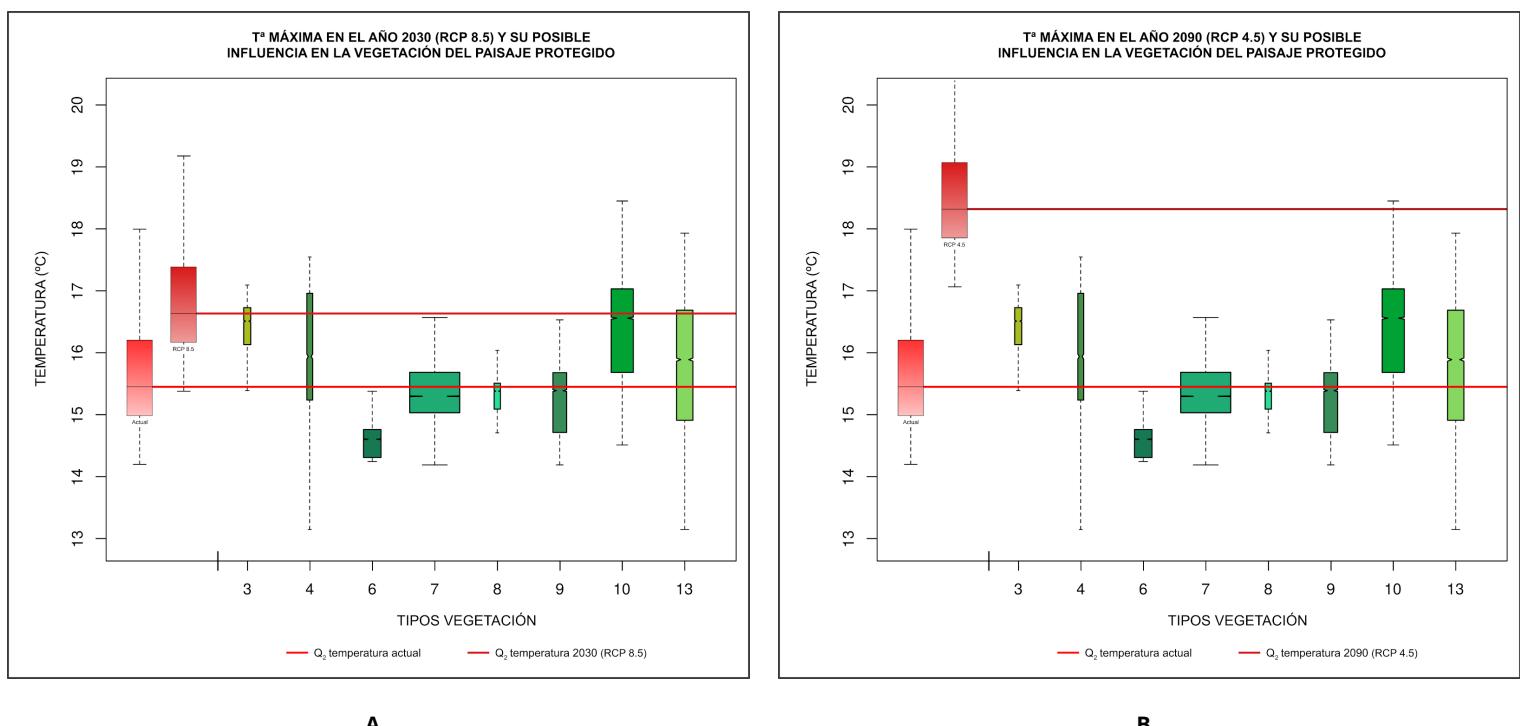


Figura 87. Incidencia de los cambios de temperaturas máximas en la vegetación del Mapa de Paisajes. Elaboración propia

El comentario para los escenarios en las temperaturas medias de las mínimas (Figura 88) no difiere demasiado del anterior. En todo caso, parece ser todavía algo más extremo. Por ejemplo, en el escenario de 2090, todas las formaciones vegetales analizadas quedarían fuera del rango de temperaturas previstas. Como ya se ha comentado, el quejigar (3) es una formación claramente termófila y, por lo tanto, se podría esperar que un aumento de las temperaturas pudiera no afectarle demasiado. Sin embargo, como ya se comentó, su rango es muy reducido (es un buen indicador térmico), situándose en torno a los 5,5°C; esto hace que cualquier cambio de las mínimas pueda afectarle en gran medida. Como el cambio de las mínimas es de 1,48°C para todo el territorio, y su rango es muy inferior a este valor, podemos afirmar que esta formación vegetal se encontrará con serios problemas ya que si no se adapta a esos cambios va a tener muchas dificultades para encontrar zonas favorables para su desarrollo.

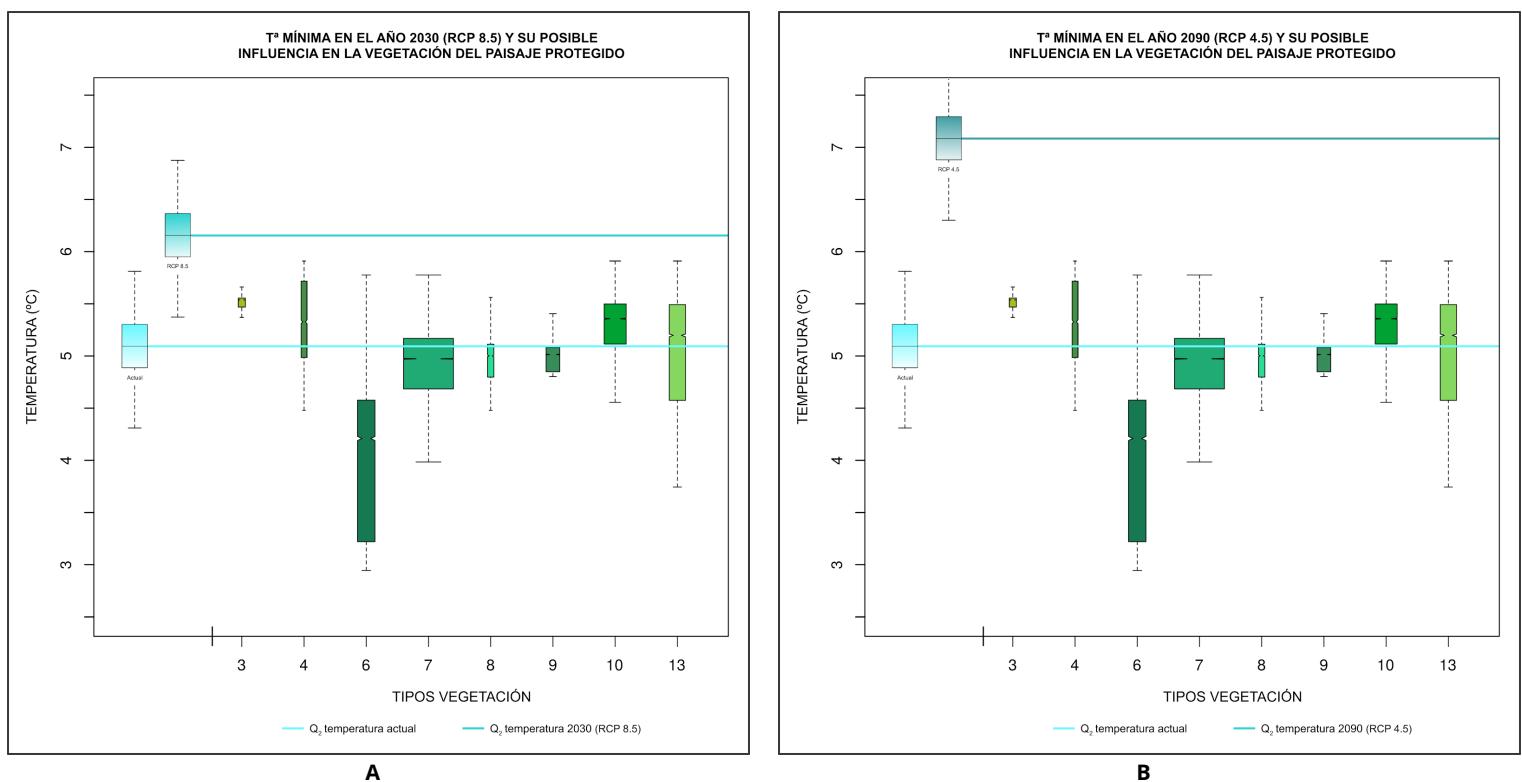


Figura 88. Incidencia de los cambios de temperaturas mínimas en la vegetación del Mapa de Paisajes. Elaboración propia

Para acabar el apartado de resultados de este TFG vamos a proponer un método de análisis de la evolución de la vegetación y que vemos aplicado en la Figura 89A y 89B para el caso del quejigar y el abetal y pinar eurosiberiano, respectivamente.

En los mapas se cartografía la distribución actual de ambas formaciones vegetales así como las condiciones climáticas en las que aparecen. Del mismo modo se indican las zonas en las que se encontrarán esas mismas condiciones pero en dos escenarios futuros.

Las conclusiones son evidentes. En el caso del abetal, en 2030 sólo habrá en el territorio estudiado un píxel en el que pueda desarrollarse. Y es el píxel anómalo del Monte Cuculo. Es decir, si la temperatura media de las máximas es un factor limitante y se cumple el escenario, el abetal desaparecerá prácticamente. Quedan pocos años para 2030 y parece un poco arriesgado hacer tal hipótesis, pero nos parece interesante plantear que el panorama es realmente complicado.

En el caso del quejigar vemos que tan solo uno de los píxeles en los que hoy se desarrolla tienta temperaturas mínimas dentro del rango actual. En él es de esperar que se mantenga. Si esta variable fuera limitante, desaparecería de todos los demás píxeles. En el resto del Paisaje Protegido sólo le quedarían seis píxeles en los que poder desarrollarse, pero muchos están ocupados actualmente por pinares mediterráneos y submediterráneos y en 2030 todavía se darán las condiciones para que se mantengan así que difícilmente podrán ocuparlos. De este modo, sólo les queda como opción la adaptación o la desaparición...

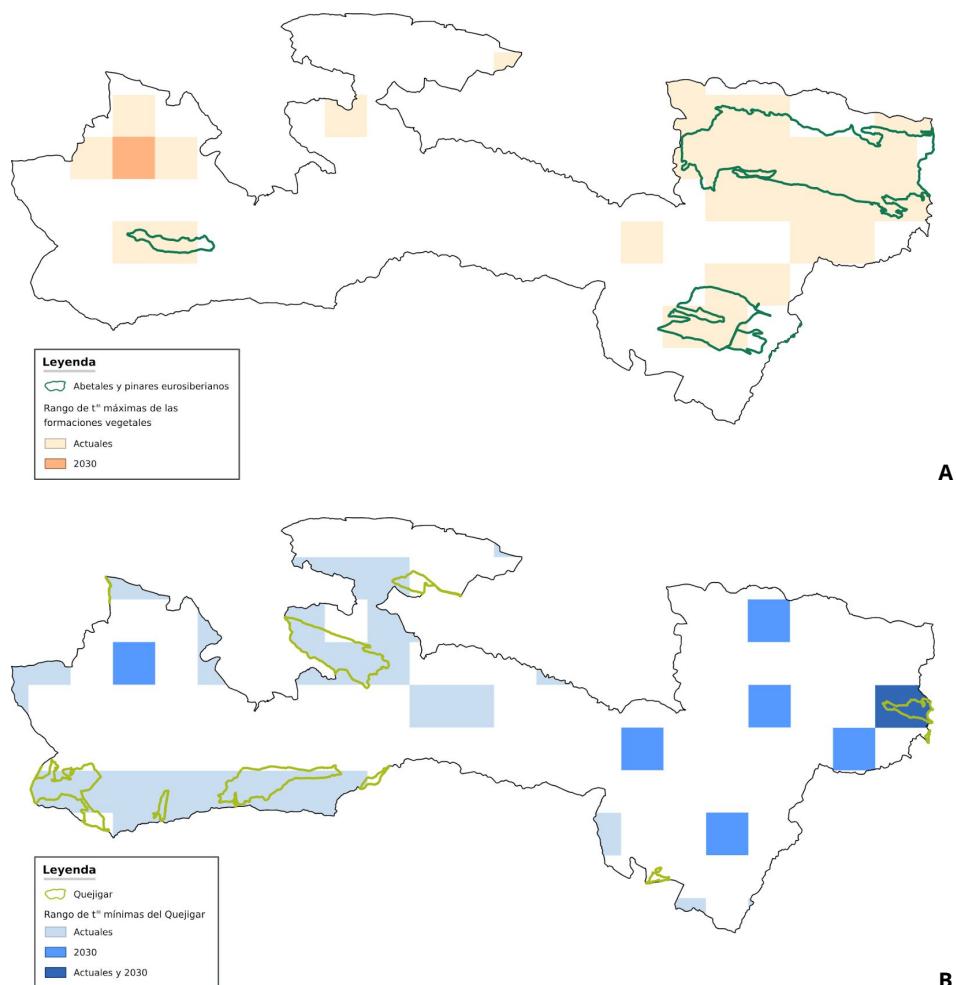


Figura 89. Distribución actual y potencial de dos formaciones vegetales. Elaboración propia

Para acabar hay que destacar que el análisis realizado ha sido sobre lo que puede ocurrir con las formaciones vegetales, no sobre especies concretas. Es posible que una formación se mantenga pero que haya una sustitución de su flora. En este caso lo que suponemos es que las especies menos termófilas puedan desaparecer y ser sustituidas por otras que lo sean más, sobre todo en los estratos inferiores de las formaciones boscosas.

En cualquier caso, parece obvio que las formaciones y especies de carácter eurosiberiano tienen un futuro muy incierto en cualquiera de los escenarios climático analizados, lo que les puede llevar a situaciones críticas (OPCC-CTP.org, 2018). Sin embargo, esto obviamente requiere de estudios biogeográficos, ecológicos y modelizaciones más desarrolladas.

VI.

Conclusiones

En el presente TFG hemos analizado una gran cantidad de cuestiones y, como consecuencia, hemos extraído muchas conclusiones. Para facilitar su organización y lectura, en este último apartado de la memoria del TFG, las vamos a exponer separadas por apartados.

Conclusiones extraídas del análisis del medio físico.

1. El territorio estudiado tiene un relieve energético; sólo el 0,02% son zonas planas. El 50% se sitúa entre los 950 m y los 1170 m de altitud, que podemos considerar de media montaña. La mayor parte está dominada por las laderas, que ocupan el 60,1% del mismo. La moda de sus pendientes se sitúa entre 20º y 25º, y la mitad del territorio tiene pendientes entre 8,2º y 15,7º. Las orientaciones están controladas por la dirección pirenaica de las estructuras geológicas, que condicionan la dirección de las sierras. Esto hace que el 35% del territorio se oriente al norte y el 30% al sur.
2. La resolución espacial de los datos climáticos del Proyecto CLIMPY es de 1x1 km. A pesar de ser una alta resolución para los estudios a escala del Pirineo, no es tan adecuada para el estudio de una zona tan reducida como la que hemos estudiado en este TFG. Esto se nota especialmente al intentar analizar las relaciones del clima con el relieve y la vegetación, para los que tenemos datos con resoluciones mucho más detalladas.
3. Los sectores del Monte Oroel y de San Juan de la Peña tienen características climáticas ligeramente distintas a pesar de estar muy próximos. En este último, los datos del modelo indican una anomalía en muchas variables en la zona del Monte Cuculo que, por ejemplo, es más fría que la Peña Oroel a pesar de situarse 200 m por debajo o tiene precipitaciones de invierno relativamente bajas.
4. El clima de la zona es variable en el tiempo. El análisis de las anomalías de las últimas tres décadas indican cambios importantes. En el periodo 2001-2010 se aprecia un incremento de las temperaturas y un descenso de las precipitaciones muy importante en comparación con las anteriores, lo que es compatible con la situación de cambio climático.
5. La clasificación climática de Köppen de todo el área del Paisaje Protegido pertenece a la categoría *Cfb*, es decir, un clima templado sin estación seca y con verano templado. Este es el clima predominante en gran parte de los Pirineos exceptuando las áreas de mayor altitud. Tan sólo algunas pequeñas zonas del territorio situadas en el Monumento Natural presentan otras categorías como son la *Cfa* o la *Csb*. Según la clasificación de Thornthwaite la mayor parte del territorio tiene un clima del tipo *Húmedo/microtérmico* pero su capacidad de diferenciar tipos de clima es mayor que la de Köppen.
6. La vegetación del área de estudio es muy variada e interesante desde el punto de vista biogeográfico ya que se sitúa en la zona de transición entre los dominios eurosiberiano y mediterráneo. A ello hay que unir los factores topográficos, que determinan que la vegetación cambie drásticamente en pocos metros. El resultado es un mosaico de alto valor natural.
7. La vegetación potencial varía al ascender desde la serie *montana pirenaica del roble peloso*, hacia la *altimontana pirenaica central calcícola del pino albar* y, finalmente, la serie *montana pirenaica basófila y ombrófila del haya*.

8. La clasificación de usos de suelo de SIOSE es muy general. Por ejemplo, agrupa los bosques en tres grupos (coníferas, frondosas y mixto). La escasa resolución hace que el 88,5% del territorio se distribuya entre tan solo cinco clases SIOSE.
9. La clasificación del Mapa de Vegetación elaborado para el Mapa de Paisajes de las comarcas de Aragón es más detallada ya que la categoría *Bosques de coníferas* se distribuye en tres clases (*Pinares mediterráneos y submediterráneos*, *Abetales y pinares eurosiberianos* y *Repoplaciones poco integradas*); los *Bosques mixtos* se distribuyen en dos: *Pinares con frondosas marcescentes* y *Bosques mixtos de frondosas caducifolias*, y los *Bosques de frondosas* se diferencian en *Bosques de frondosas marcescentes* y *Bosques de frondosas perennifolias*. Esto proporciona un nivel de detalle cartográfico mucho mayor.
10. El tipo de vegetación predominante, con gran diferencia, son los pinares mediterráneos y submediterráneos, que ocupan un 33% del territorio, aunque se distribuyen fundamentalmente por el sector central y oriental de la zona de estudio y ocupando preferentemente las zonas más bajas. A mucha distancia se encuentran los pinares con quejigos, el pinar-abetal, las bojedas con erizón y los hayedos-abetales.
11. La tecnología LIDAR proporciona unas posibilidades enormes en el estudio de la vegetación. En este TFG se ha empleado para elaborar un Modelo Digital de Copas de todo el territorio del Paisaje Protegido del Monte Oroel y la Sierra de San Juan de la Peña. A partir del mismo se ha podido estudiar la estructura vertical de la vegetación y su variación en el espacio. El estrato predominante es el arbolado, que en conjunto supone el 42,45% del territorio. Este se diferencia en dos niveles, siendo mucho más abundante el arbolado bajo (34,62%) que el arbolado alto (7,92%). El segundo estrato más abundante es el matorral alto, con un 20,37%, seguido del arbustivo, que presenta el 17,96%. Un 11,44% está ocupado por suelo desnudo, pastizales y matorral pulvinular.

Conclusiones extraídas del análisis de las relaciones entre los diferentes factores del medio físico.

12. Sería interesante disponer de una red de estaciones meteorológicas dentro de la zona de estudio que pudiera proporcionar datos de mayor resolución ya que el Proyecto CLIMPY la tiene de 1000 metros.
13. El *Moisture Index* de SENTINEL tiene una magnífica capacidad de discriminación de las variables topográficas en el área estudiada, y puede correlacionarse con algunos de los cambios de vegetación. Es una herramienta que se debería explorar con mayor profundidad por su elevado potencial, máxime porque es de acceso libre. Se podría plantear para el futuro un estudio que investigara si hay correlación entre los valores del *Moisture Index* con datos climáticos tomados sobre el terreno con una red de estaciones meteorológicas perfectamente georeferenciadas. En el caso de que sí hubiera tal correlación, estaríamos en condiciones de hacer una estimación de esas variables a lo largo del territorio y, por lo tanto, relacionar las mismas con el relieve a la resolución de 5 metros.

14. En muchos casos las formaciones vegetales se correlacionan muy bien con las variables climáticas. Algunas tienen rangos intercuartílicos de distribución muy reducidos, lo cual les convierte en buenos indicadores bioclimáticos. Entre ellas se encuentran los hayedos-abetales que tienen exigencias de precipitaciones muy estrictas. El 50% se localizan entre los 1000 mm y los 1100 mm aproximadamente, lo que los convierte en un buen indicador de las precipitaciones. Los quejigales lo presentan muy pequeño en el caso de las temperaturas medias. Esto les convierte en un buen indicador térmico, ya que el 50% de estos bosques se sitúa entre los 10.9°C y los 11.2°C. Son con diferencia la formación vegetal más termófila de todas. Los pinares-abetales tienen un rango de las temperaturas máximas muy reducido y en su totalidad se sitúa por debajo de la mediana. También es destacable el escasísimo rango de los quejigales en las temperaturas mínimas, ya que se distribuye prácticamente en dos décimas de grado por encima y por debajo de los 5.5°C. Esto hace de ellos un perfecto indicador térmico de las temperaturas mínimas. Una situación similar, aunque no con tanta precisión, ocurre con los hayedos-abetales, que indicarían una temperatura mínima de entre 4.8°C y 5.1°C.
15. Se han analizado 19 variables bioclimáticas pero se ha observado que no aportan más información relevante que la que ya nos aportan las variables climáticas "tradicionales". Esto tal vez se deba a que estas variables están pensadas más para caracterizar grandes unidades biogeográficas y no para espacios tan reducidos como el que estudiamos en este TFG.
16. En el Paisaje Protegido se observa claramente cómo se van reemplazando las formaciones vegetales a medida que vamos ascendiendo en el territorio, dando lugar en algunas zonas a ejemplos claros de pisos de vegetación. La formación vegetal que ocupa las zonas más bajas son los pinares con quejigos. A partir de los 900 m este pinar de frondosas marcescentes convive con los encinares hasta llegar aproximadamente a los 1000 m. A partir de esta cota empezamos a encontrar bien desarrollados los quejigales, los pinares mediterráneos y submediterráneos, y los hayedos-abetales, de modo que, hasta casi los 1200 m, encontramos una combinación de cuatro tipos distintos de vegetación natural. A partir de los 1200 m solamente quedan bien desarrollados los hayedos-abetales y los pinares-abetales. A partir de los 1250 m estos últimos son los únicos bosques que ocupan áreas extensas del territorio. Las bojedas y erizionales ocupan una amplísima banda altitudinal pudiendo coexistir lateralmente con todos los tipos de bosques.
17. La existencia de estos pisos de vegetación es mucho más clara en el sector del Monte Oroel que en la zona de San Juan de la Peña, donde los cambios laterales de vegetación son mucho más frecuentes.
18. El efecto de la orientación es muy importante. Encontramos formaciones vegetales que tienen un rechazo muy grande a las orientaciones de umbría como son los quejigales, los encinares, y las bojedas y erizionales. En el extremo opuesto están las formaciones vegetales que presentan una clara aptitud por las laderas de umbría. Destaca especialmente el pinar-abetal. En este caso, su rechazo por la solana es tal que incluso es más frecuente en las orientaciones de levante y de poniente que en las orientaciones sur. La otra formación con esta afinidad son los hayedos-abetales.

19. La pendiente tiene un control importante como limitante del desarrollo de la vegetación ya que por encima de los 20º se reduce muchísimo su presencia. Sin embargo, dentro del rango en el que esta se puede desarrollar, las diferencias no son muy destacables. Sólo el hayedo-abetal parece tener preferencia por las laderas más empinadas. Por eso podemos decir que es una variable que no tiene una capacidad discriminatoria como la que tienen la altitud y la orientación.
20. La altitud no controla mucho la talla de la vegetación. A una misma altitud podemos encontrar lateralmente desde pastizales hasta arbolado alto. Sin embargo, a partir de los 1200 m, solamente abundan el *arbolado alto y matorral pulvinular/pastizal ralo/suelo desnudo*. La orientación sí influye mucho. A medida que aumenta la altura del estrato, la vegetación se hace más ombrófila. A la inversa, los estratos de menor porte (*matorral pulvinular/pastizal ralo/suelo desnudo, pastizal alto y matorral*) se desarrollan preferentemente por las laderas de solana. Las orientaciones *este* y *oeste* no parecen tener ninguna incidencia sobre el porte de la vegetación.
21. La elaboración de un Modelo Digital de Superficies a partir de los datos LIDAR nos ha permitido realizar visualizaciones 2D y 3D muy interesantes. Por ejemplo se han hecho perfiles fitotopográficos que ponen de manifiesto claramente las relaciones entre la altura de la vegetación y factores como la altitud, la orientación y la pendiente.
22. Es necesario actualizar la cartografía vegetal del Paisaje Protegido. Al compararla con la ortoimagen del PNOA se aprecian diferencias que, en algunos casos, son importantes. Para este análisis ha sido de gran ayuda el modelo tridimensional desarrollado en este TFG.

Conclusiones extraídas del análisis de las proyecciones climáticas futuras.

23. Los escenarios de cambio climático no suponen cambios muy notables en cuanto a las precipitaciones en la zona de estudio que, en cualquier caso, se verán disminuidas. Para finales de siglo, en el escenario RCP 4.5 habría una caída del 4,21% y, en el RCP 8.5, del 1,78%. Estos cambios, en principio, no tendrían unas consecuencias notables sobre la distribución de sus formaciones vegetales.
24. Las temperaturas máximas presentan diferencias mucho más importantes. Para el año 2030 prácticamente todo el territorio presentaría unos valores que actualmente sólo encontramos en las zonas más bajas. La situación se acentúa de manera drástica en los escenarios para el año 2090. Entonces, en el mejor de los casos, la mayor parte del territorio tendría medias por encima de los 17°C, cosa que en la actualidad solamente ocurre en la zona de los mallos. Las zonas más frías como el Monte Oroel y el Monte Cuculo presentarán temperaturas que actualmente sólo encontramos casi 1000 m por debajo. El escenario se vuelve catastrófico si consideramos el RCP 8.5. En ese caso nos encontraríamos con temperaturas máximas verdaderamente extremas para el ámbito geográfico en el que nos encontramos. En la zona de los mallos y en las partes más bajas del Paisaje Protegido la media de las máximas estaría sobre los 25°C.
25. En el caso de las temperaturas mínimas la sustitución térmica es todavía más evidente que en las máximas. Para dentro de tan solo 10 años el modelo prevé que todo el territorio se sitúe por encima de la mediana actual, independientemente del escenario de emisiones que consideremos. A finales de siglo todo el territorio tendrá temperaturas medias mínimas desconocidas en la actualidad.

26. Estos escenarios de temperaturas futuras tendrían grandes consecuencias en las formaciones vegetales. Para el año 2030 el pinar-abetal quedaría fuera de su rango actual, lo que nos hace pensar que puede sufrir graves consecuencias. Los hayedos-abetales y los pinares mediterráneos y submediterráneos también se verían posiblemente muy afectados ya que verán cómo la mitad de su territorio térmico desaparecerá en 2030.
27. En el caso del año 2090 la situación es alarmante ya que sólo hemos considerado el mejor de los escenarios. En esas condiciones quedarían fuera de rango cinco de las formaciones vegetales analizadas, entre ellas incluso el quejigar. El resto de las termófilas tampoco se encontrarán en condiciones óptimas, ya que menos del 25% de su distribución actual se localiza en condiciones que en el año 2090 serán las más frescas del territorio.
28. Esto tiene que suponer obligatoriamente unos cambios totales en la vegetación del territorio, ya que a semejantes cambios es muy difícil que las especies y las formaciones vegetales puedan adaptarse. Por ejemplo, en el caso del abetal, en 2030 sólo habrá en el Paisaje Protegido un píxel en el que pueda desarrollarse. Si la temperatura media de las máximas es un factor limitante y se cumple el escenario, el abetal desaparecerá prácticamente. En el caso del quejigar vemos que tan solo uno de los píxeles en los que hoy se desarrolla tendrá temperaturas mínimas dentro del rango actual. En cualquier caso, esto no asegura su supervivencia porque implicaría que estas formaciones vegetales tendrían que colonizar esos nuevos territorios, y eso implicaría entrar en competencia con otras.
29. Como conclusión final, parece evidente que los escenarios de cambio climático pueden producir amenazas muy serias a la vegetación actual de la zona de estudio. Sin embargo, nuestro modelo es muy básico. Se deberían estudiar más a fondo las relaciones y posibles consecuencias. En cualquier caso, como hemos visto, esta vegetación es muy rica y variada, de modo que habría que establecer medidas y estrategias para luchar contra esta amenaza.

VII.

Bibliografía

Agencia Estatal de Meteorología. (2011). *Atlas Climático Ibérico*. Recuperado de <https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Atlas-climatologico/Atlas.pdf>

Aragón. Decreto 174/2016, de 22 de noviembre, por el que . Boletín Oficial de Aragón, 1 de enero de 2012, núm. 232, pp. 31317 a 31325.

Balcells, E. (1983): Apuntes sobre el macizo de San Juan de la Peña. *Pirineos*, 120: 49-62. Recuperado de http://digital.csic.es/bitstream/10261/95100/1/Pirineos%20120%20-%20Balcells_macizo_SanJuandelaPena.pdf

Biogeografia.net. (s.f.). *Clasificación bioclimática Rivas Martínez (2004)*. <http://biogeografia.net/bioclima06h.html>

Chazarra, A. (2006): Clasificación climática de Thornthwaite para España obtenida mediante técnicas SIG. *Instituto Nacional de Meteorología*. Recuperado de <https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/5160/1/C1-trabajo%20A.%20Chazarra.pdf>

Climate-Data.org. (s.f.). *Clima Jaca (España)*. <https://es.climate-data.org/europe/espana/aragon/jaca-19600/>

CREUS,J., 1977. - El clima del Alto Aragón occidental. Tesis Doctoral, 420 p. Universidad de Pu'avarra. Pamplona.

Cuadrat, J.M y Pita, M. F. (2000): *Climatología*. Cátedra, Madrid, 489 pp.

Cuadrat, J. M., Serrano, R., Saz, M. A., Tejedor, E., Prohom, M., Cunillera, J., Esteban, P., Soubeyroux, J.M., y Deaux, N. (2013). Creación de una base de datos homogeneizada de temperaturas para los pirineos (1950-2010). *Geographicalia*, 63-64, 63-74.

ESA. (s.f.). *Sentinel-2 operations*. https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinel-2_operations

Gómez, D. (2004): Flora y vegetación de La Jacetania. En: *Comarca de La Jacetania* (Ona, J. L. y Sánchez, S. coord.). Diputación general de Aragón, Zaragoza, 173 pp.

Gran Enciclopedia Aragonesa. (2000). *Monasterio Bajo de San Juan de la Peña*. http://www.encyclopedia-aragonesa.com/voz.asp?voz_id=8913&voz_id_origen=2572

GRASS GIS. (s.f.). *Historical Notes*. <https://grass.osgeo.org/home/history/>

Martínez, S. (2019): *Humedad en los cultivos mediante teledetección: MOISTURE (NDMI)*. Cursosteledeteccion.com. <https://www.cursosteledeteccion.com/humedad-en-los-cultivos-mediante-teledeteccion-moisture-ndmi/>

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agencia Urbana. (s.f.). *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea: Presentación y objetivo.* <https://pnoa.ign.es>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.) -1-. *Empleo de la tecnología LiDAR para el seguimiento ecológico: aplicación piloto para la Red de Parques Nacionales y comparativa con los datos LiDAR del PNOA.* https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/plan-seguimiento-evaluacion/comparativa-lidar-monfrague-pnoa_tcm30-69071.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Mapa de Series de Vegetación.* https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/memoria_mapa_series_veg_descargas.aspx

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Red Natura 2000.* <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/red-natura-2000/>

Montserrat, P. (1971a): *La Jacetania y su vida vegetal*, Ed. Caja de Ahorros de Zaragoza, Aragón y Rioja, Zaragoza, 109 pp.

Noticias.juridicas.com. (s.f.). *Ley 6/1998, de 19 de mayo, de Espacios Naturales Protegidos de Aragón (Vigente hasta el 07 de Agosto de 2015).* http://noticias.juridicas.com/base_datos/CCAA/ar-l6-1998.t2.html#a12

OPCC-CTP.org. (2018). *El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación.* Recuperado de <https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/editor/opcc-resumen-es.pdf>

OPCC-CTP.org. (s.f.) -1-. *CLIMPY.* <https://www.opcc-ctp.org/es/climpy>

OPCC-CTP.org. (s.f.) -2-. *Presentación OPCC.* <https://www.opcc-ctp.org/es/contenido/presentacion-opcc>

Pedrocchi-Renault, C. (1987): *Fauna ornítica del Alto Aragón Occidental.* Instituto Pirenaico de Ecología, Jaca, 199 pp.

Pellicer, F. y Echeverría, M.T. (1989): *Formas de relieve del centro de la Depresión del Ebro.* Ed. Inst. Fernando el Católico, Zaragoza, 216 pp.

Pirineodigital.com. (2008). *Constituido el patronato del Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel.* <http://www.pirineodigital.com/2008/noticias/3-marzo/25/patronato-sanjuan.htm>

QGIS. (s.f.). *QGIS - El SIG Líder de Código Abierto para Escritorio.* <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>

Red Natural de Aragón. (s.f.). *Paisaje Protegido de San Juan de la Peña y Monte Oroel.* <http://www.rednaturaldearagon.com/paisaje-protegido/paisaje-protegido-de-san-juan-de-la-peña-y-monte-orael/>

Rodríguez, E. (2017): *Modelos climáticos. Proyecciones de extremos de precipitación. Datos actualmente disponibles en AEMET*. AEMET. https://www.miteco.gob.es/es/agua/formacion/gri-modelos-climaticos-proyecciones-extremos-precipitacion_tcm30-379107.pdf

Ruta Geológica Transpirenaica. (s.f.). *Ruta Geológica Transpirenaica (Aspe-Alto Aragón)*. <http://rgtp.geolval.fr/home.php>

Serrano, R. et al (Septiembre de 2017). Towards a new quality-controlled daily climate dataset for the Pyrenees, 1950-2015, EMS Annual Meeting: European Conference for Applied Meteorology and Climatology. Congreso llevado a cabo en Dublín, Irlanda.

SIOSE. (s.f.). *Acerca de SIOSE*. <https://www.siose.es>

Varios Autores. (2009): Memoria Técnica de Tipos de Paisaje de la Jacetania C01_D2. Dirección General de Ordenación del Territorio. Instituto Geográfico de Aragón.

Villar, L., (1982): Introducción bioclimática al Pirineo centro-occidental. *Geographicalia*, 13-16: 1-39.

Anexos

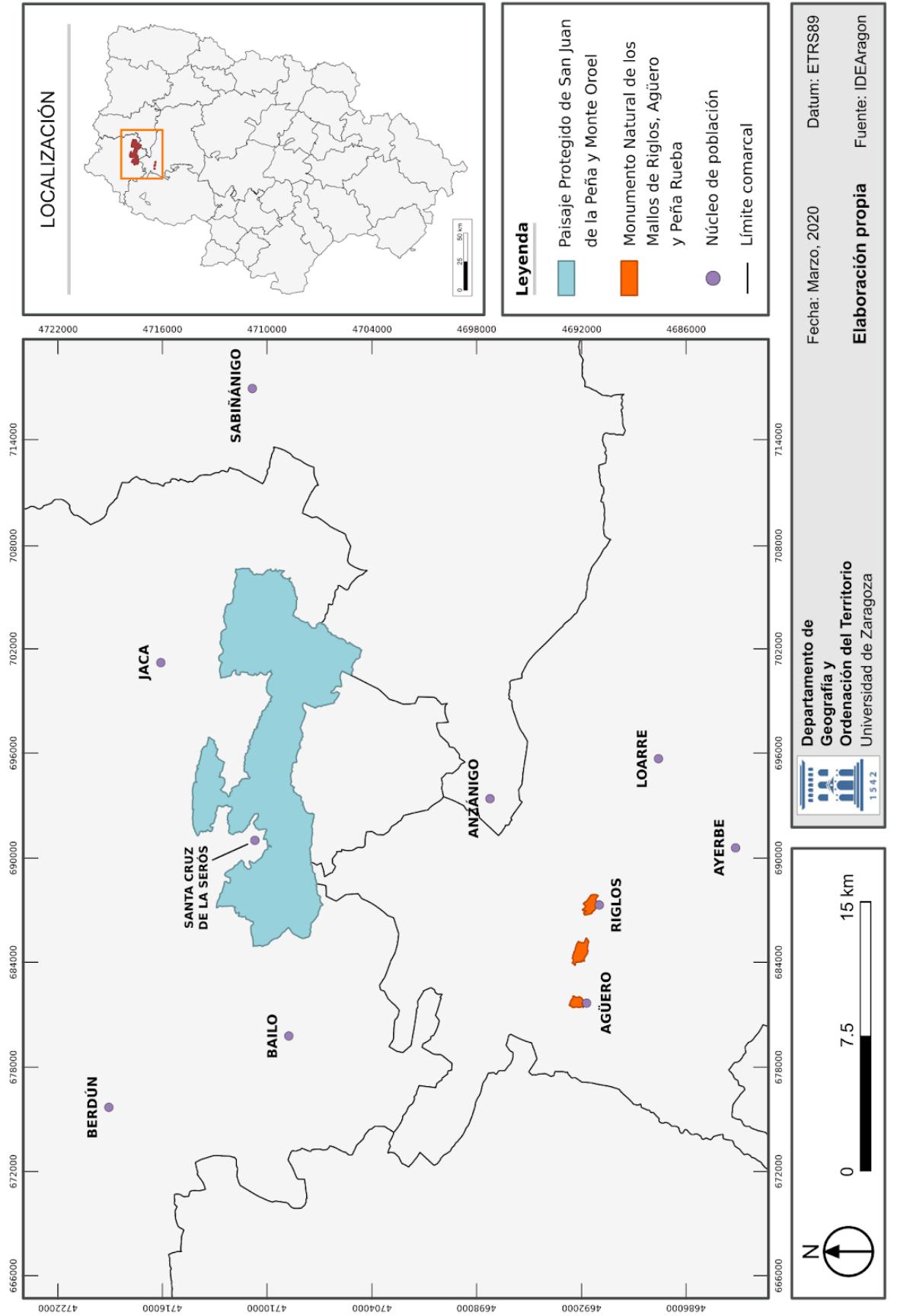
ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo I - Mapas del apartado 1
- Anexo II - Mapas del apartado 3.1.1
- Anexo III - Mapas del apartado 3.1.2
- Anexo IV - Mapas del apartado 3.1.3
- Anexo V - Mapas del apartado 3.1.4
- Anexo VI - Mapas del apartado 3.2.1
- Anexo VII - Mapas del apartado 3.2.2
- Anexo VIII - Mapas del apartado 3.2.3
- Anexo IX - Mapas del apartado 3.2.4
- Anexo X - Mapas del apartado 3.3.2
- Anexo XI - Mapas del apartado 3.3.3
- Anexo XII - Mapas del apartado 3.3.4
- Anexo XIII - Mapas del apartado 3.3.5
- Anexo XIV - Mapas del apartado 4.1
- Anexo XV - Mapas del apartado 4.3.2
- Anexo XVI - Mapas del apartado 5.1
- Anexo XVII - BCN25

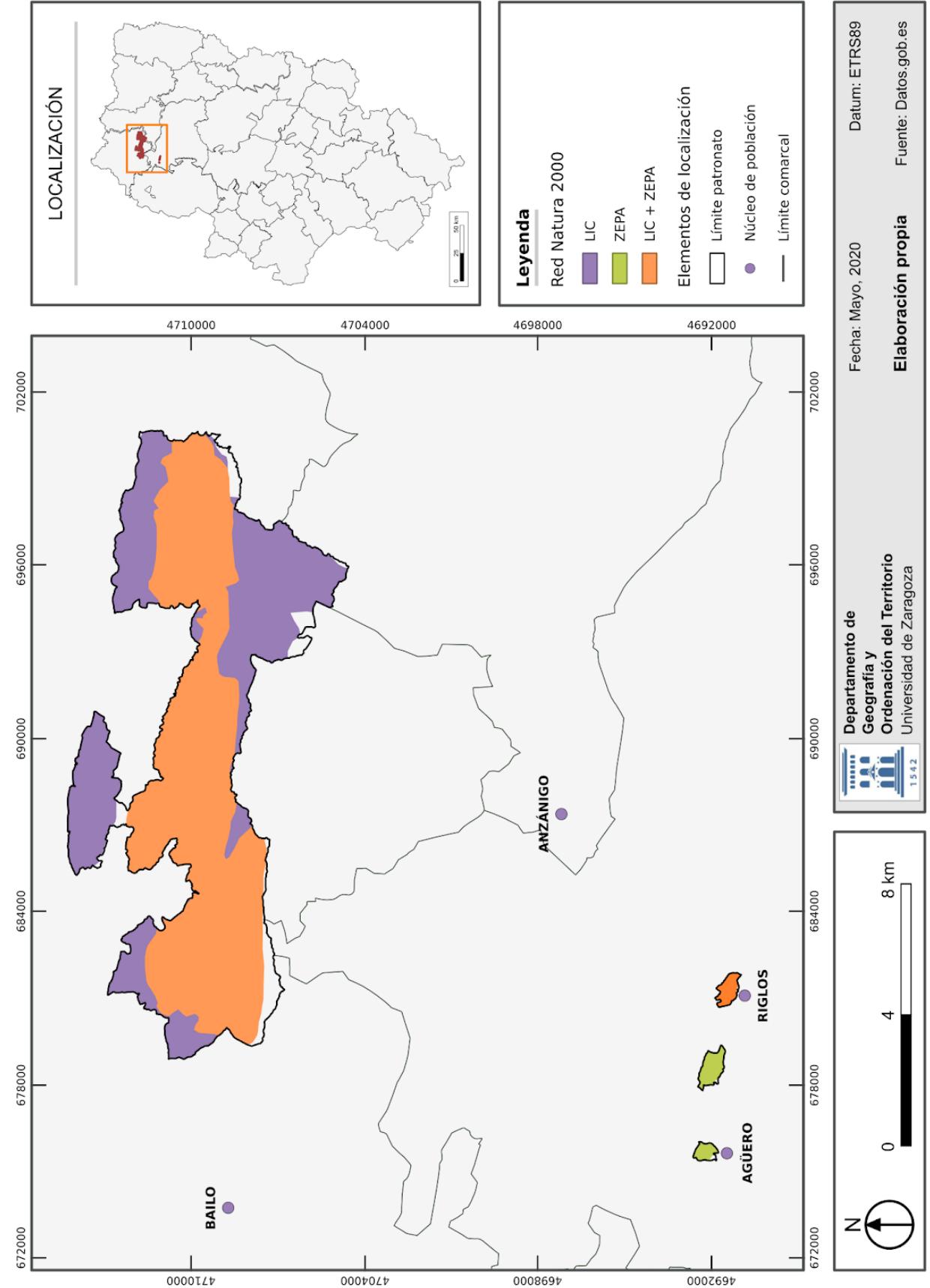
ANEXO I

MAPAS DEL APARTADO 1

LOCALIZACIÓN DEL PAISAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA



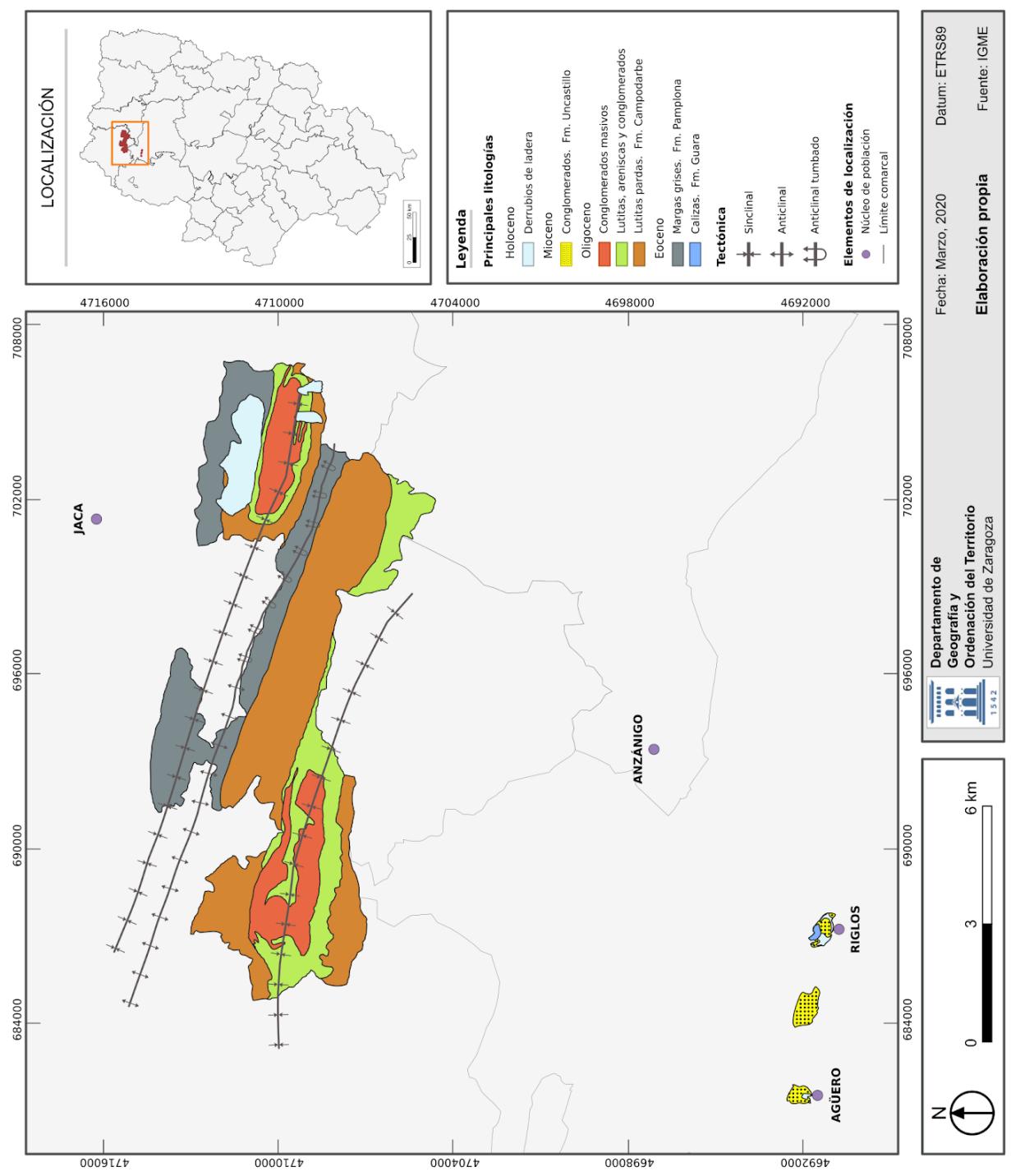
RED NATURA 2000 PRESENTE EN LA ZONA DE ESTUDIO



ANEXO II

MAPAS DEL APARTADO 3.1.1

**GEOLOGÍA DEL PAISAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL
Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA**



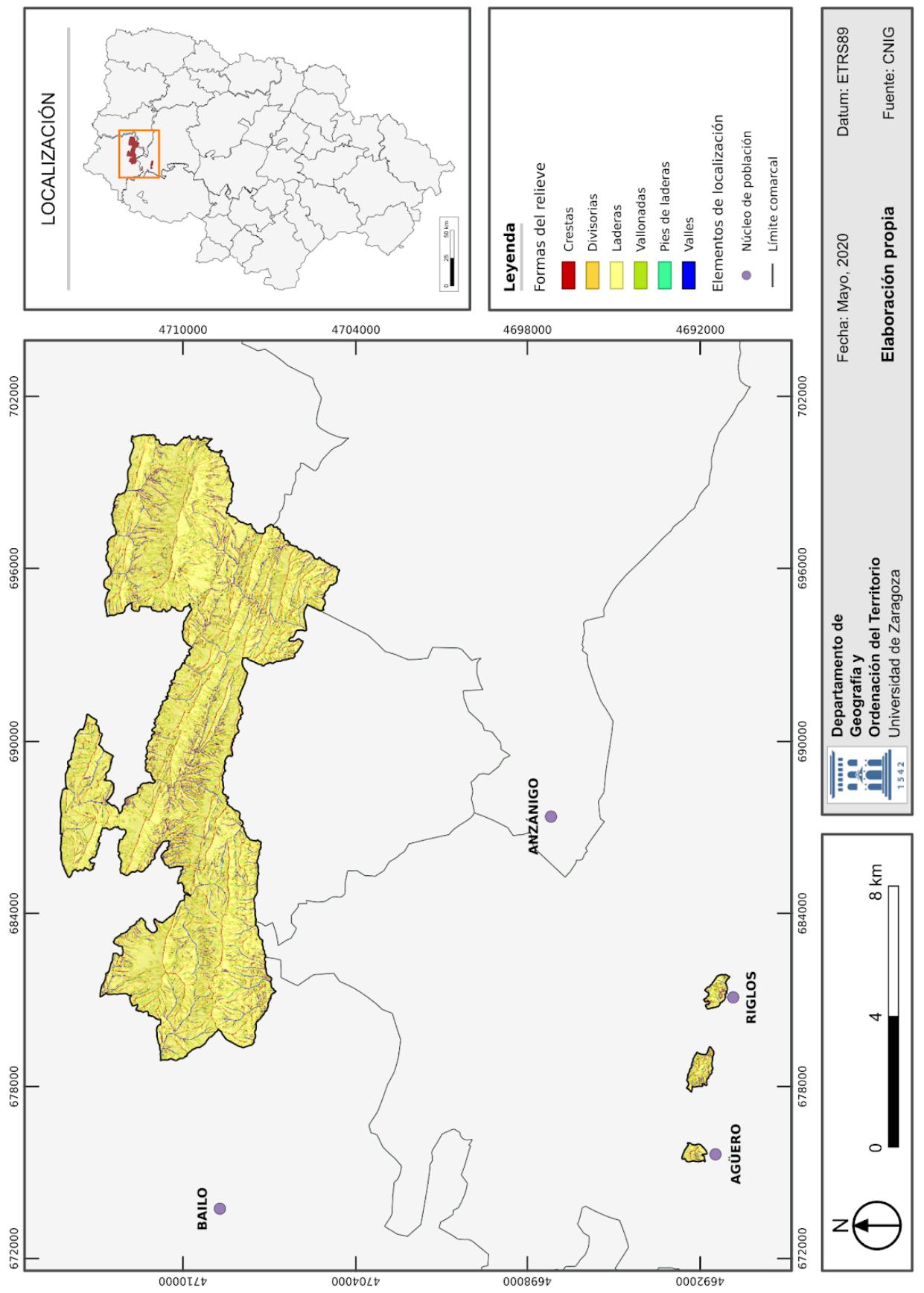
ANEXO III

MAPAS DEL APARTADO 3.1.2

ANEXO IV

MAPAS DEL APARTADO 3.1.3

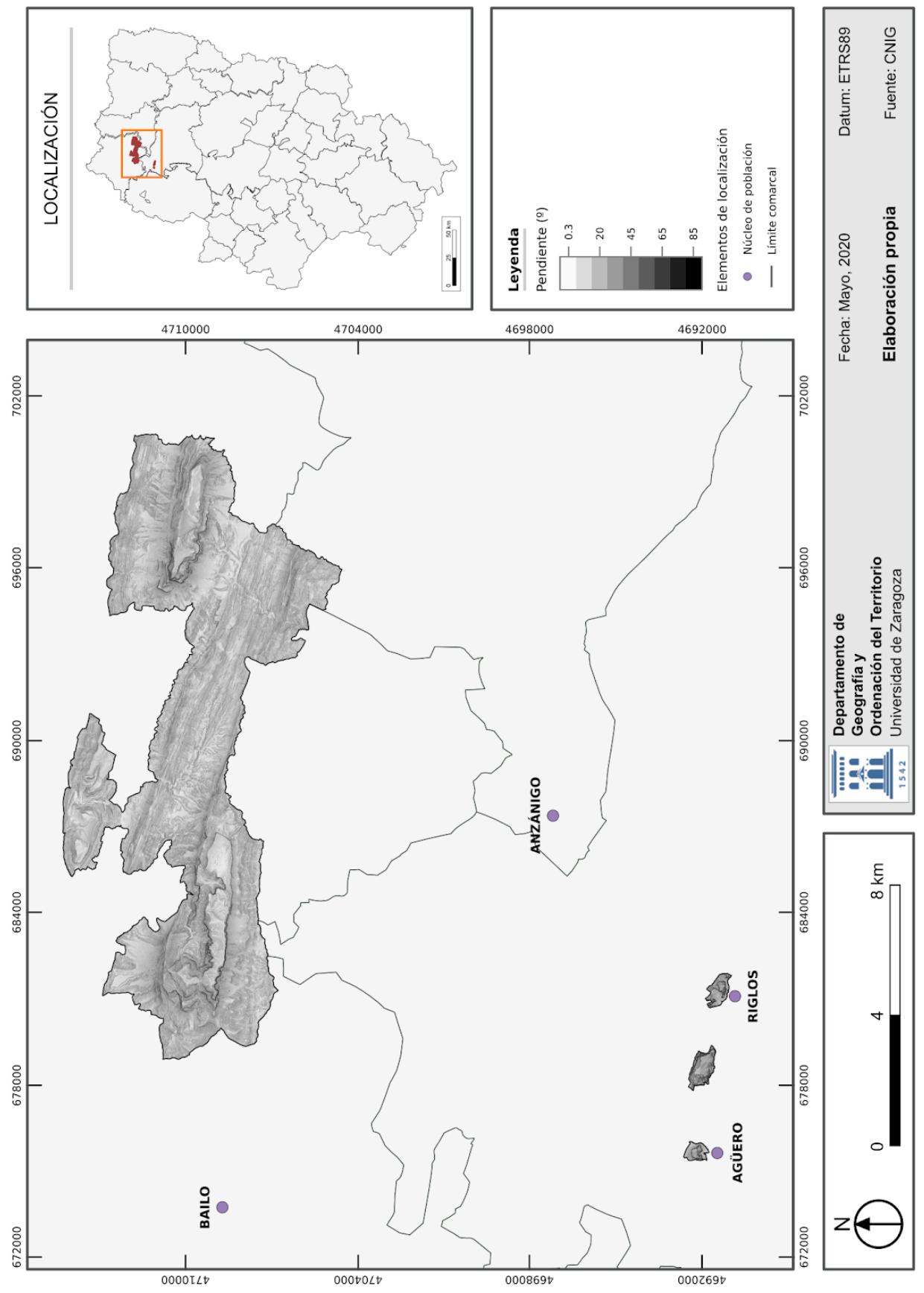
**GEOMORFOLOGÍA DEL PAÍSAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL
Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA**



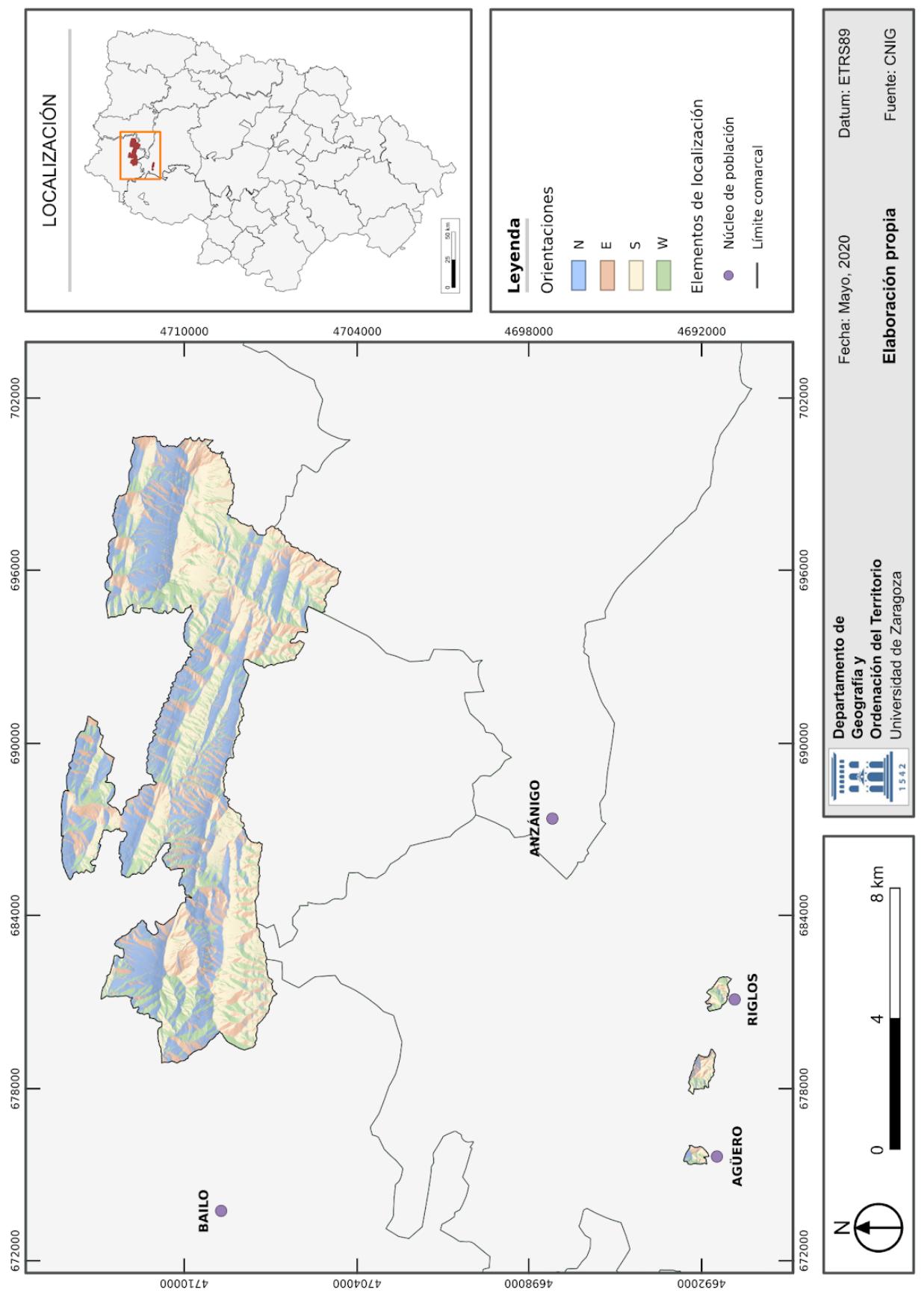
ANEXO V

MAPAS DEL APARTADO 3.1.4

PENDIENTES DEL PAISAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA



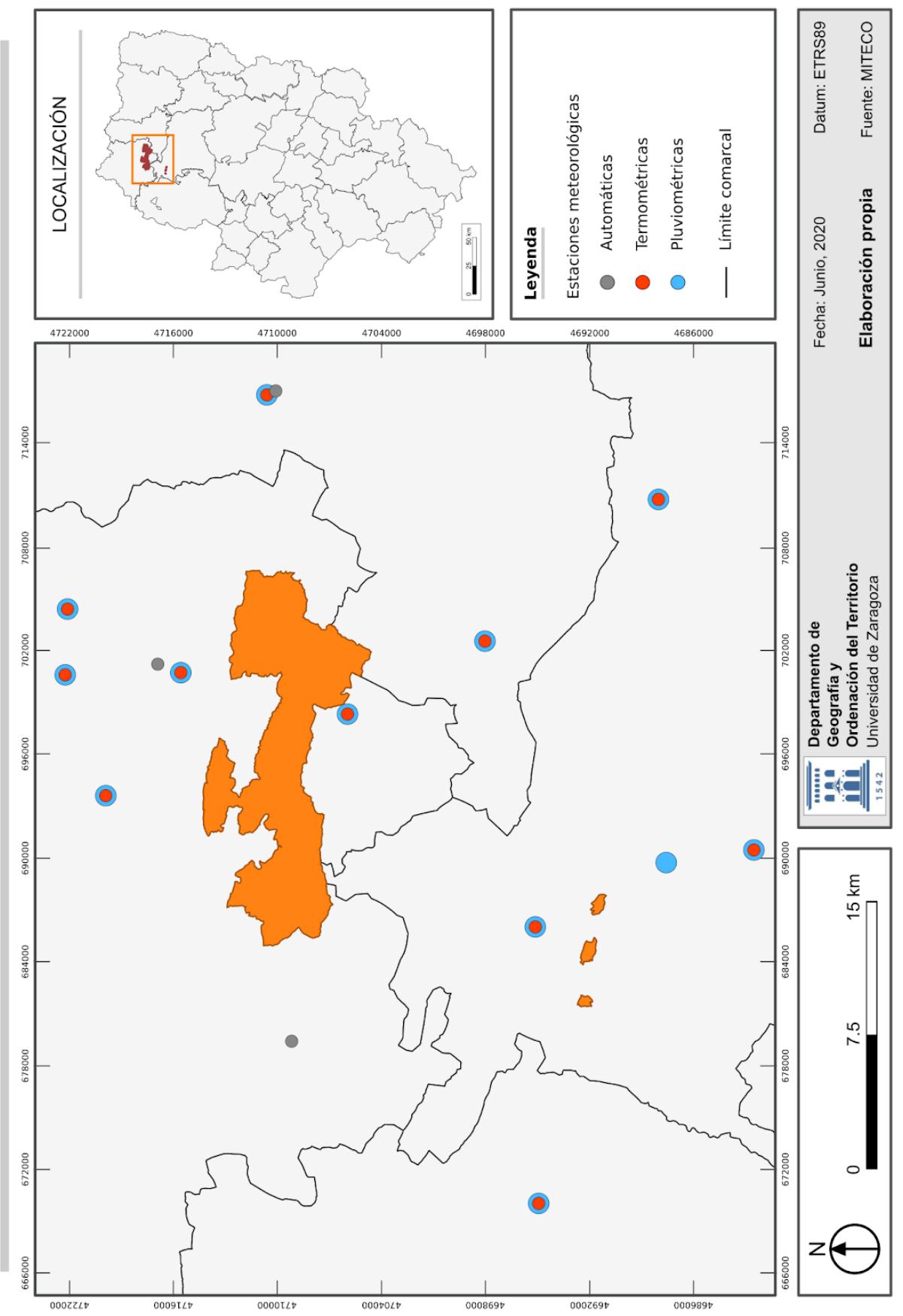
ORIENTACIONES EN EL PAÍSAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA



ANEXO VI

MAPAS DEL APARTADO 3.2.1

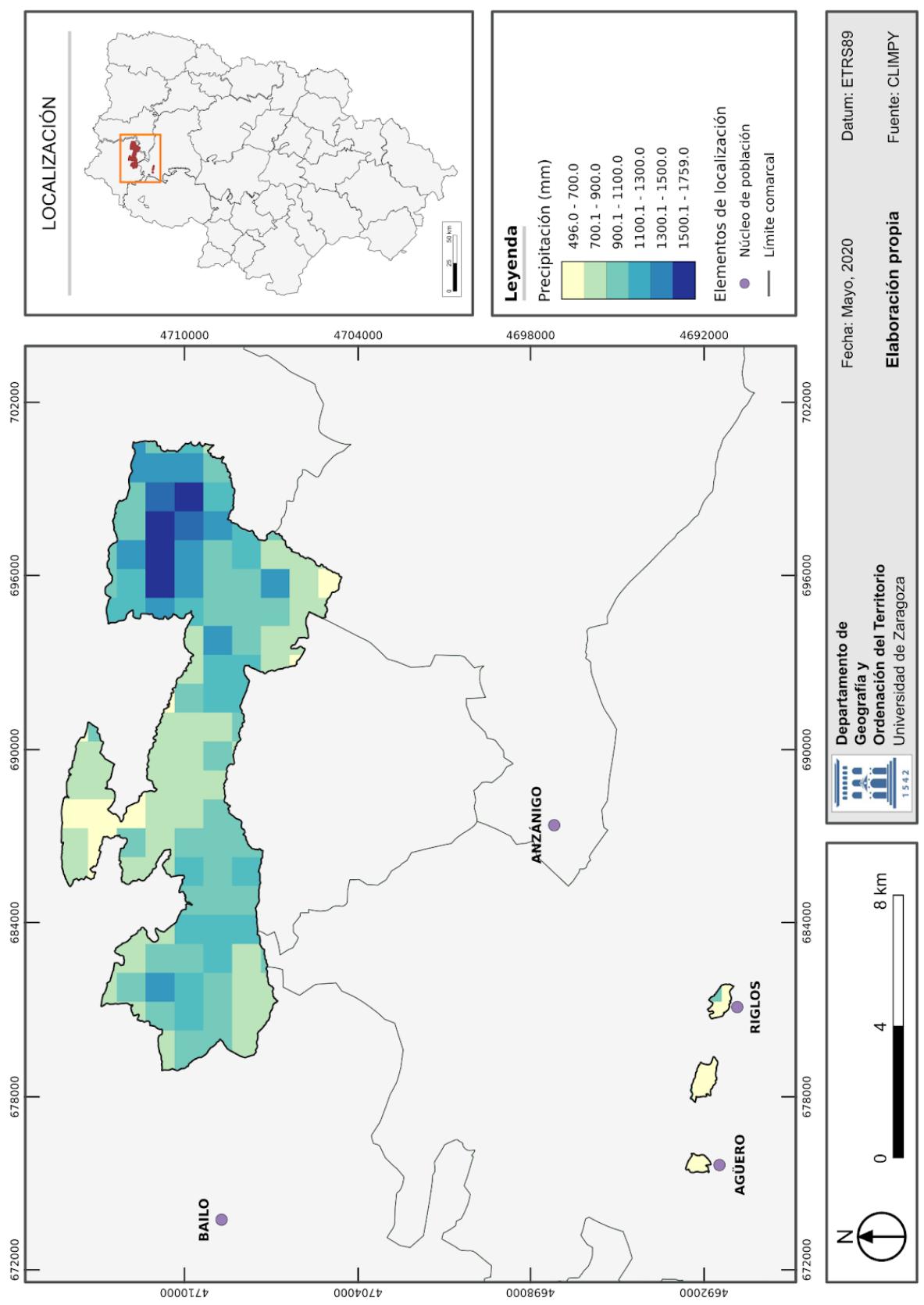
LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS PRÓXIMAS A LA ZONA DE ESTUDIO



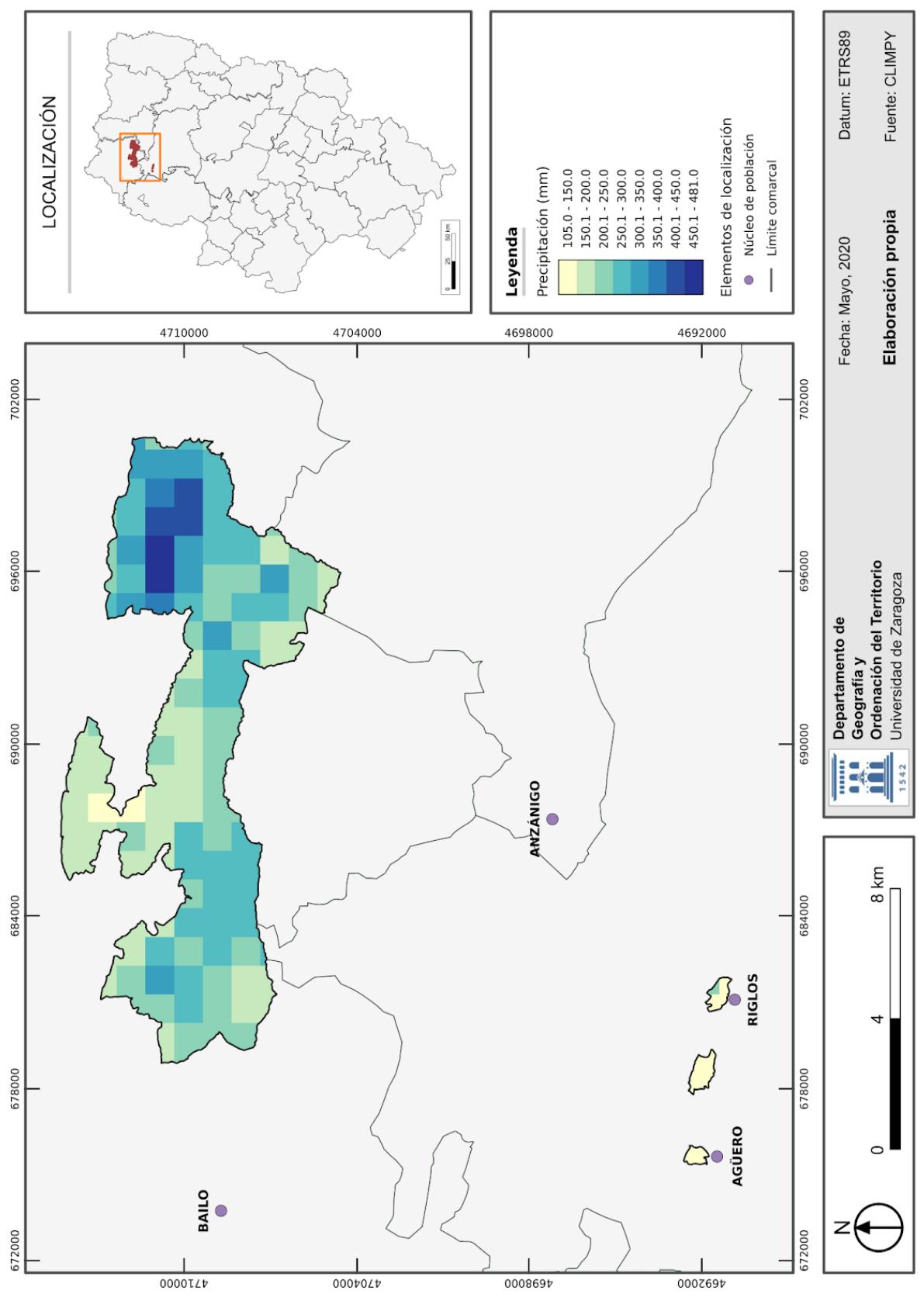
ANEXO VII

MAPAS DEL APARTADO 3.2.2

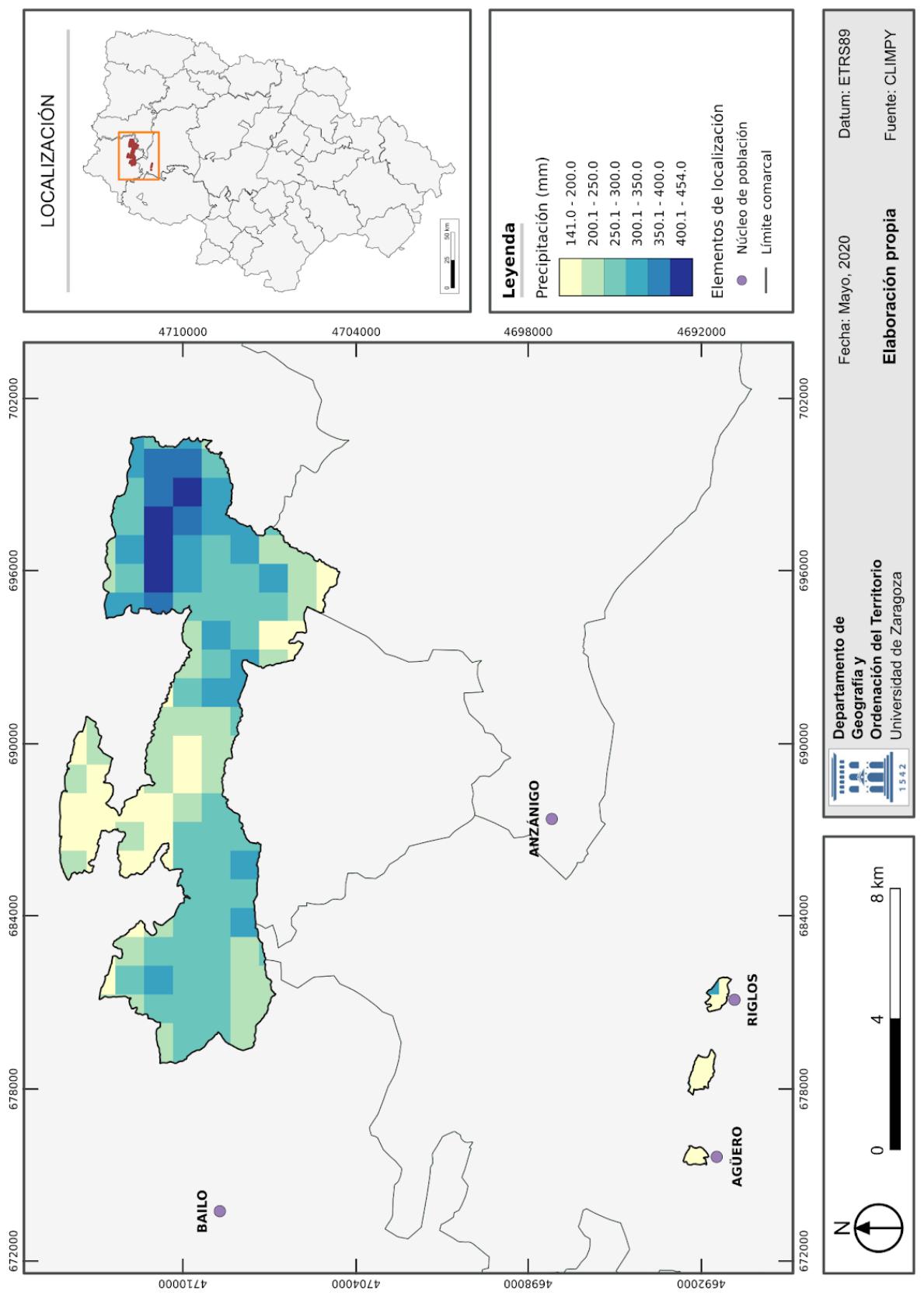
PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO



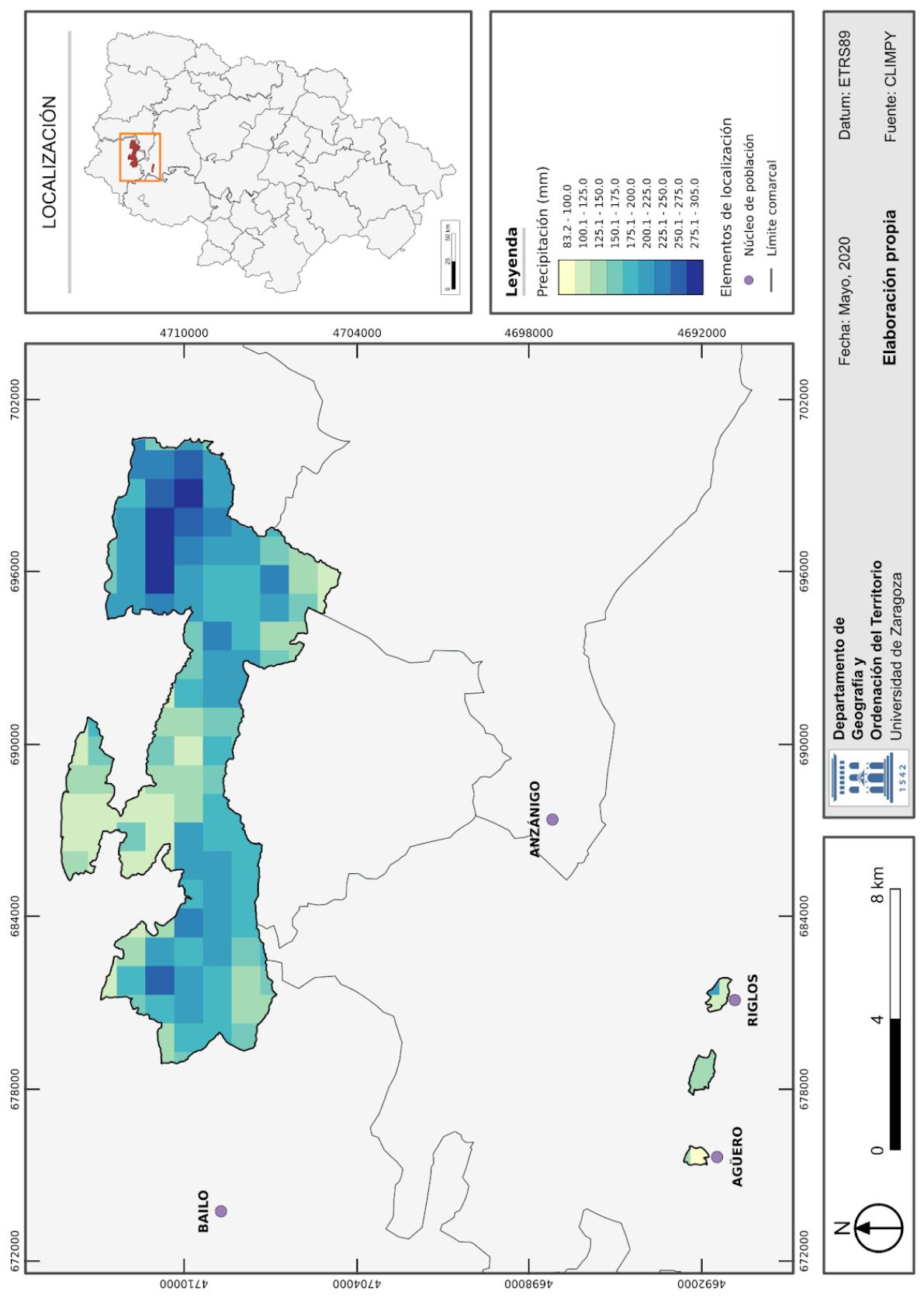
PRECIPITACIÓN MEDIA DE INVIERNO EN LA ZONA DE ESTUDIO



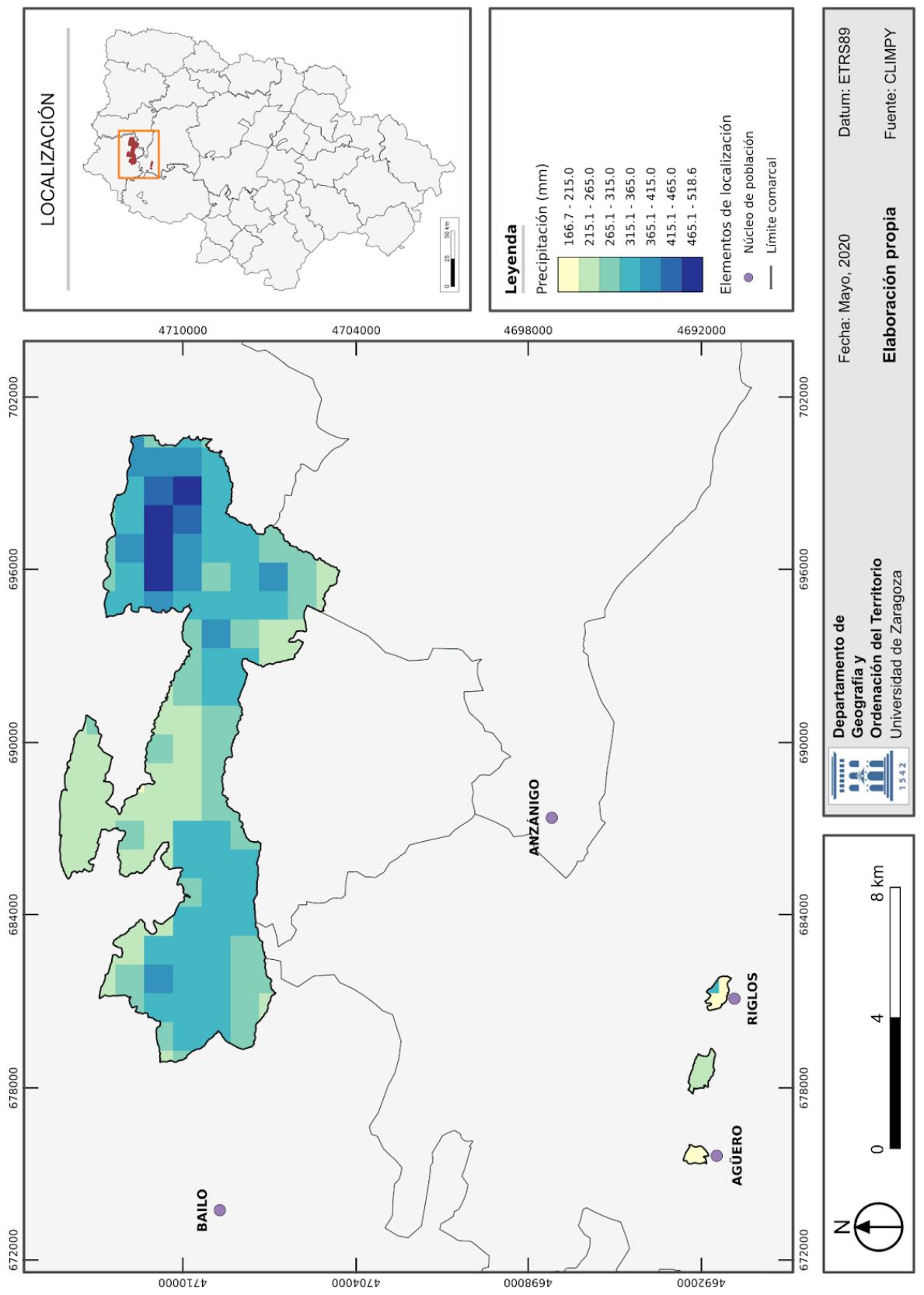
PRECIPITACIÓN MEDIA DE PRIMAVERA EN LA ZONA DE ESTUDIO



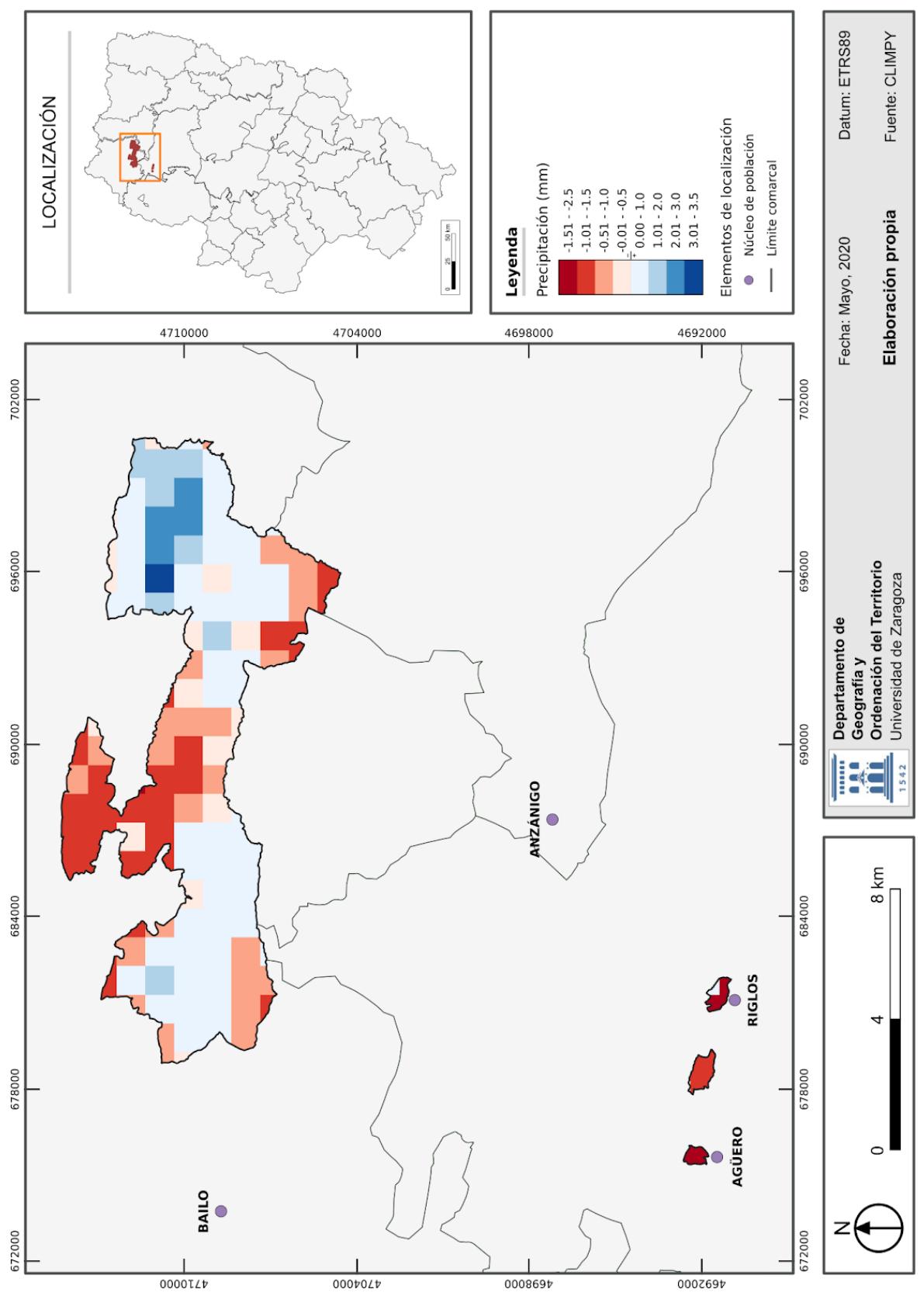
PRECIPITACIÓN MEDIA DE VERANO EN LA ZONA DE ESTUDIO



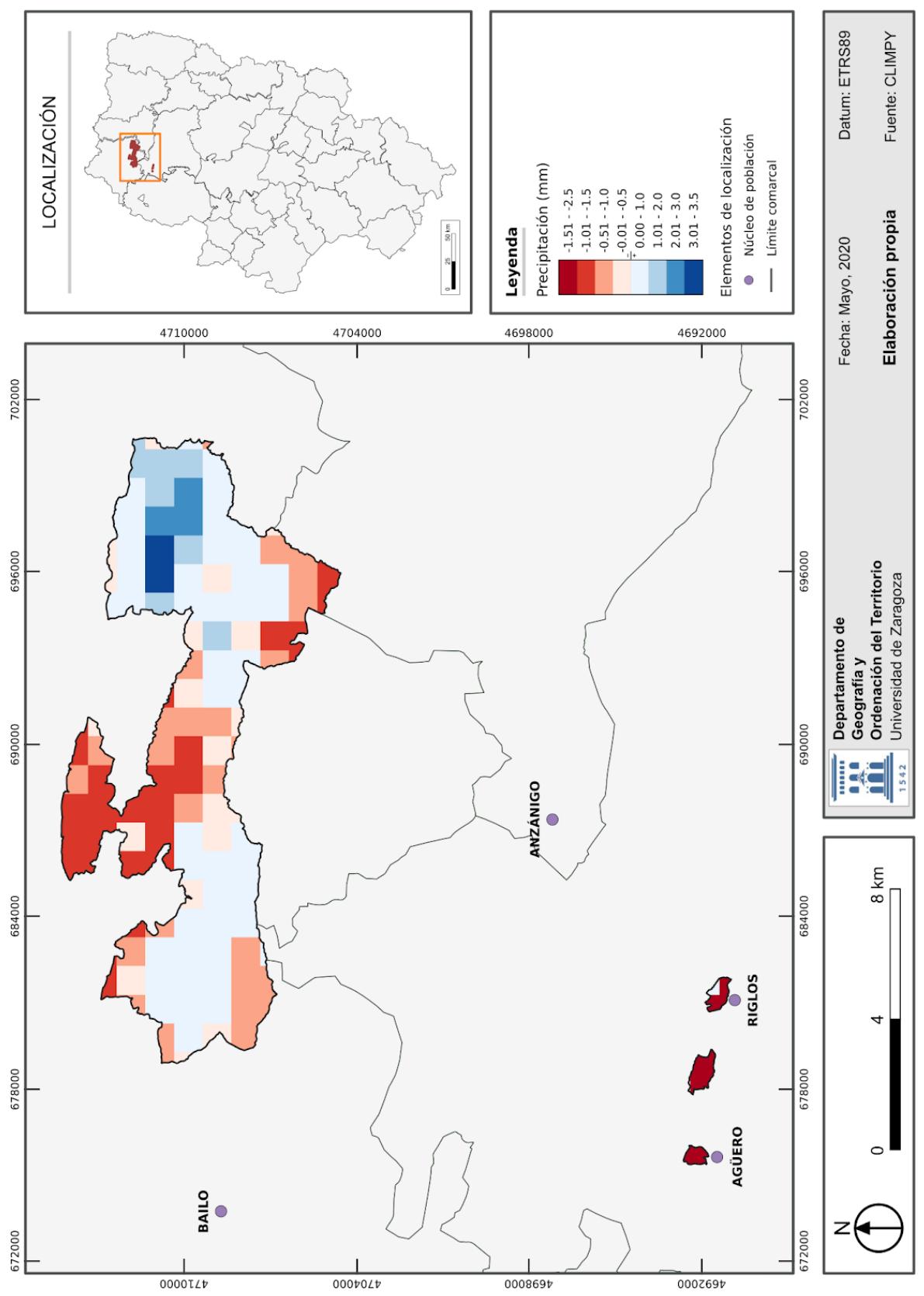
PRECIPITACIÓN MEDIA DE OTOÑO EN LA ZONA DE ESTUDIO



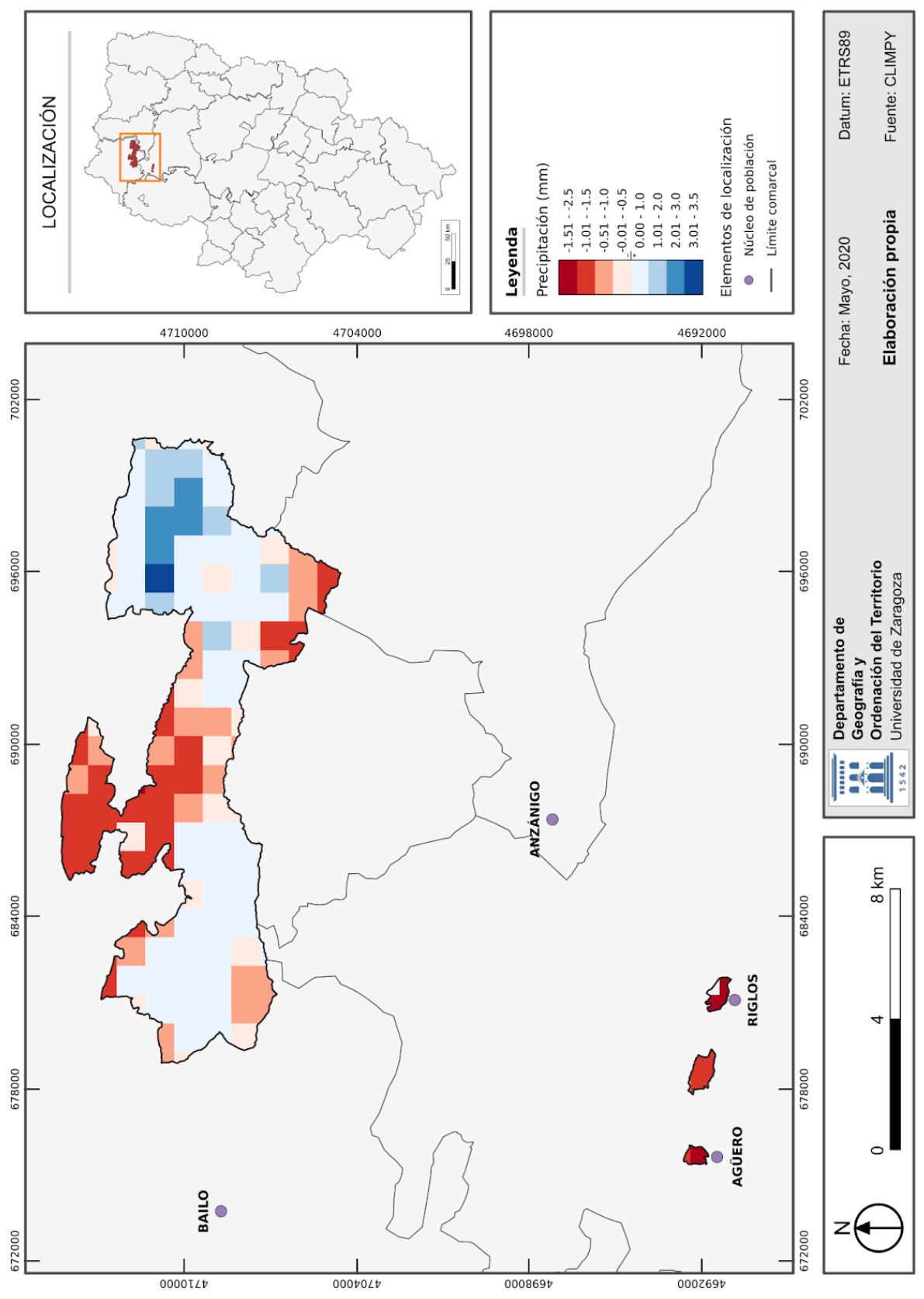
PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



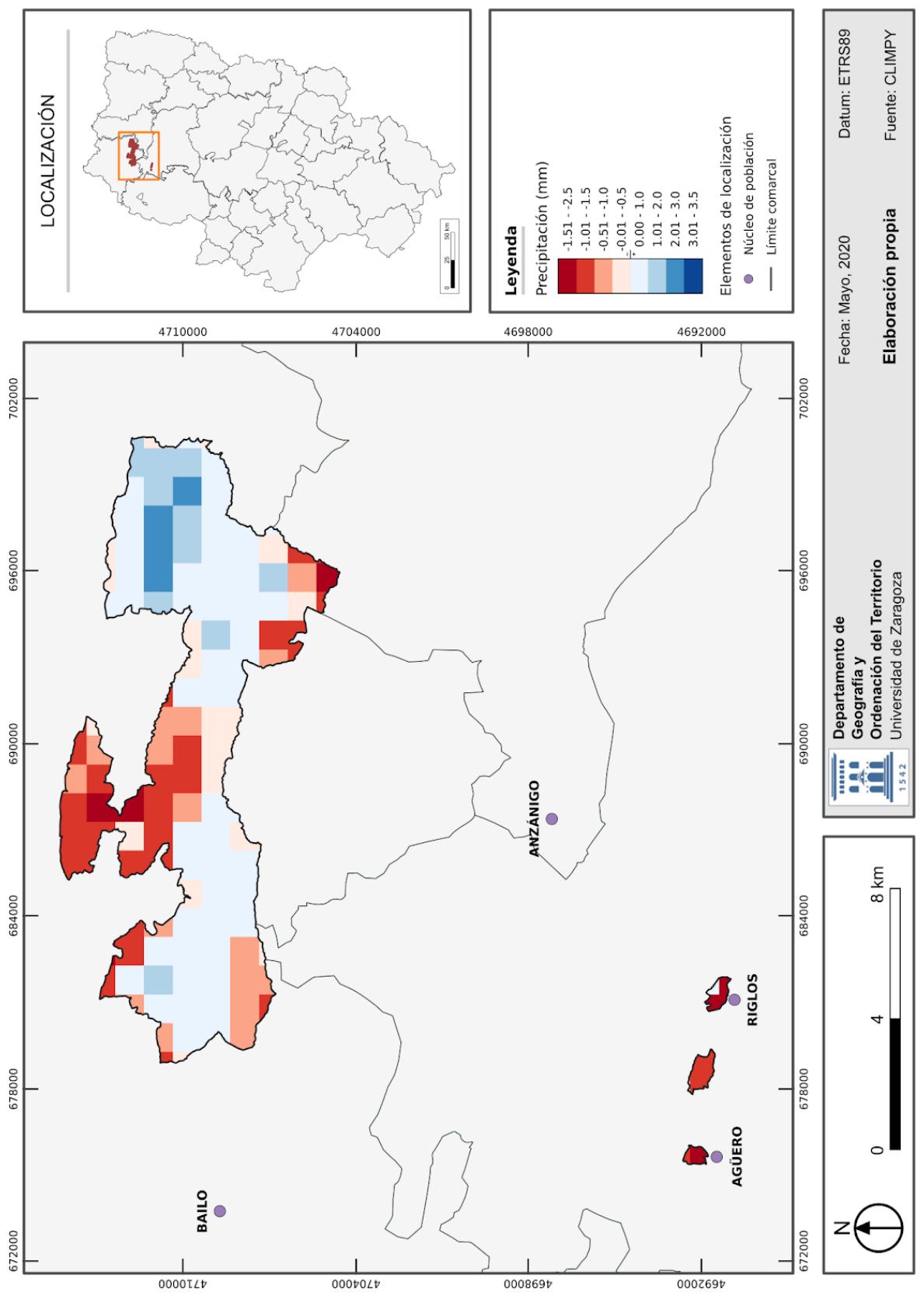
PRECIPITACIÓN MEDIA DE INVIERNO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



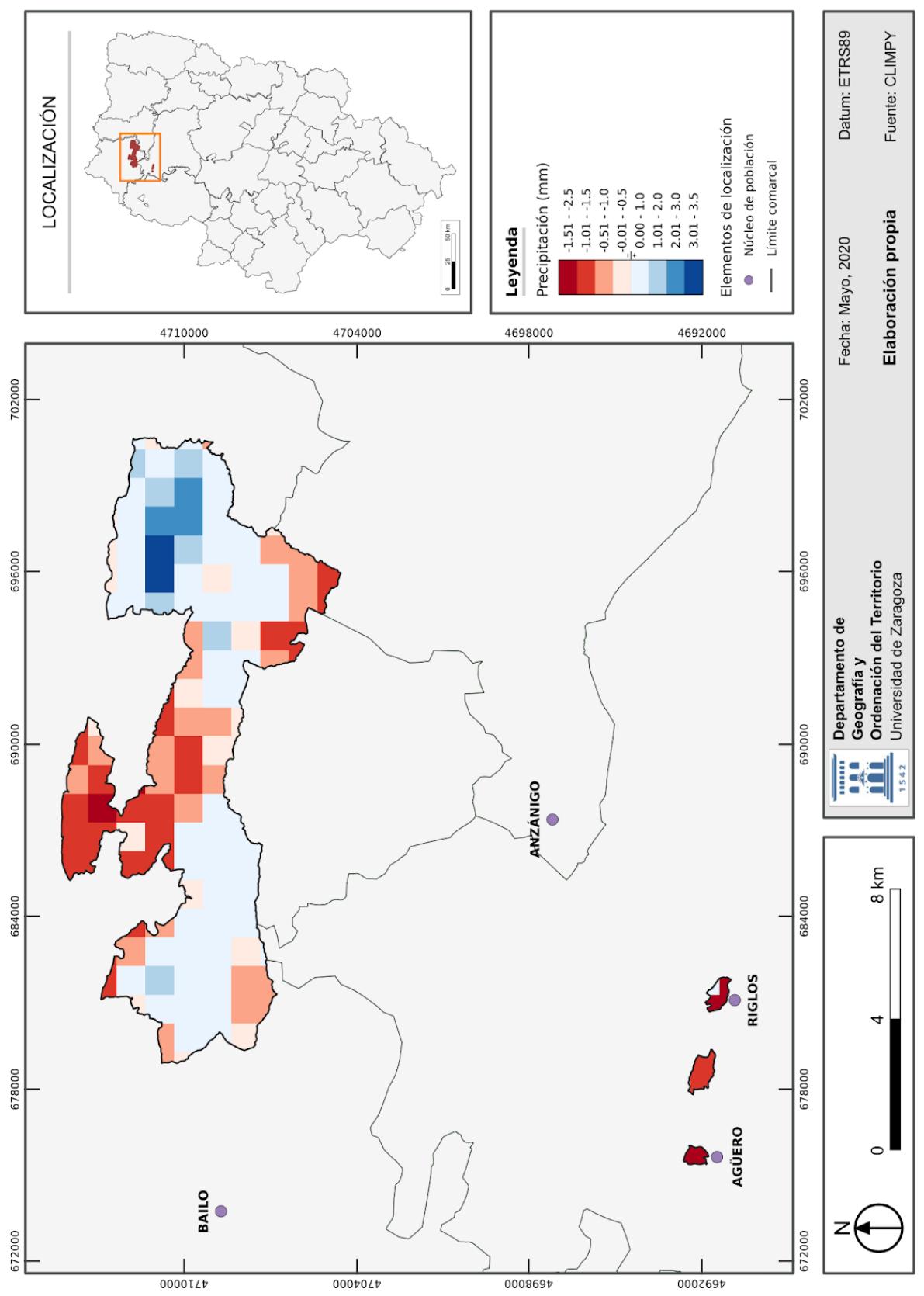
PRECIPITACIÓN MEDIA DE PRIMAVERA ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



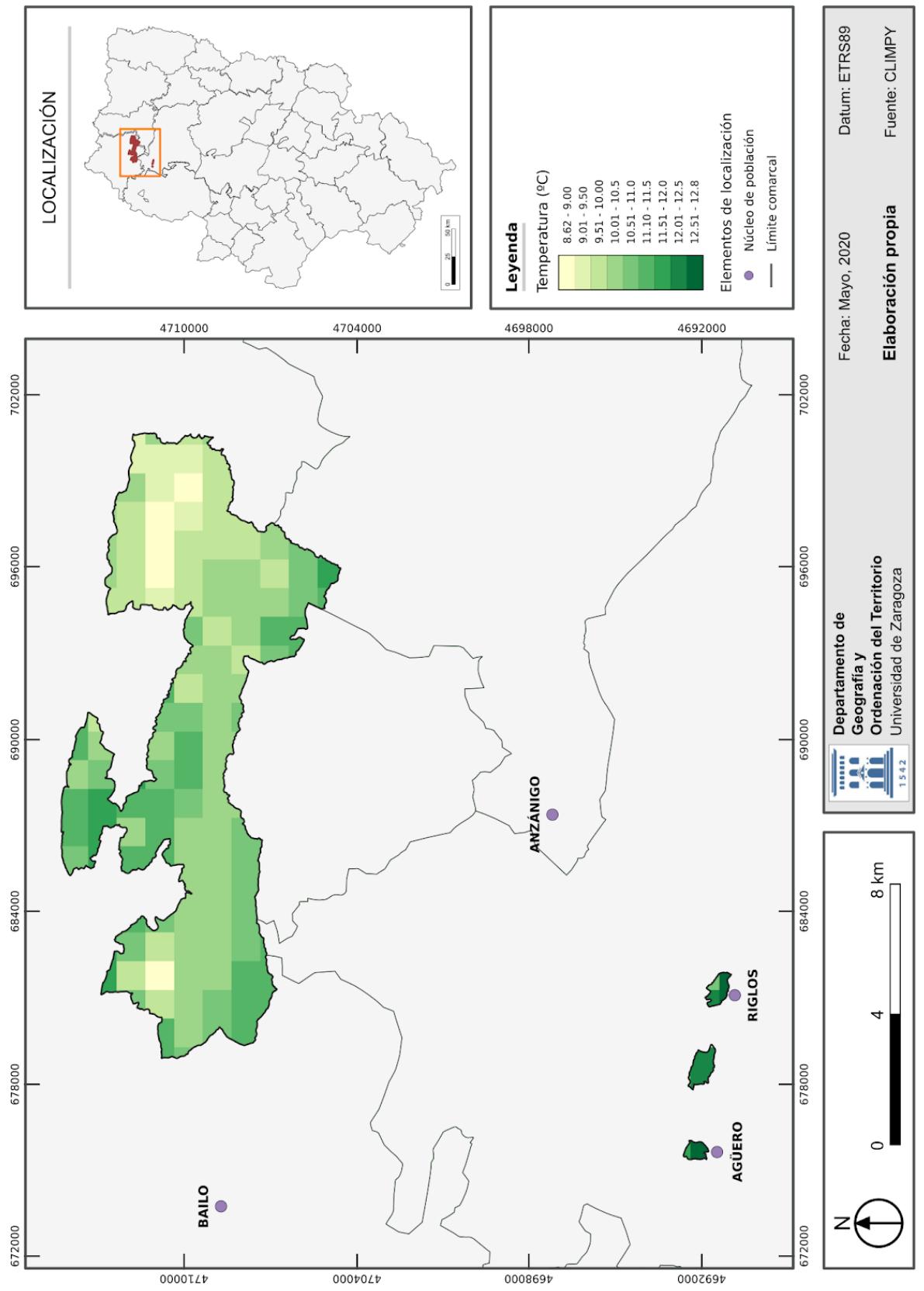
PRECIPITACIÓN MEDIA DE VERANO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



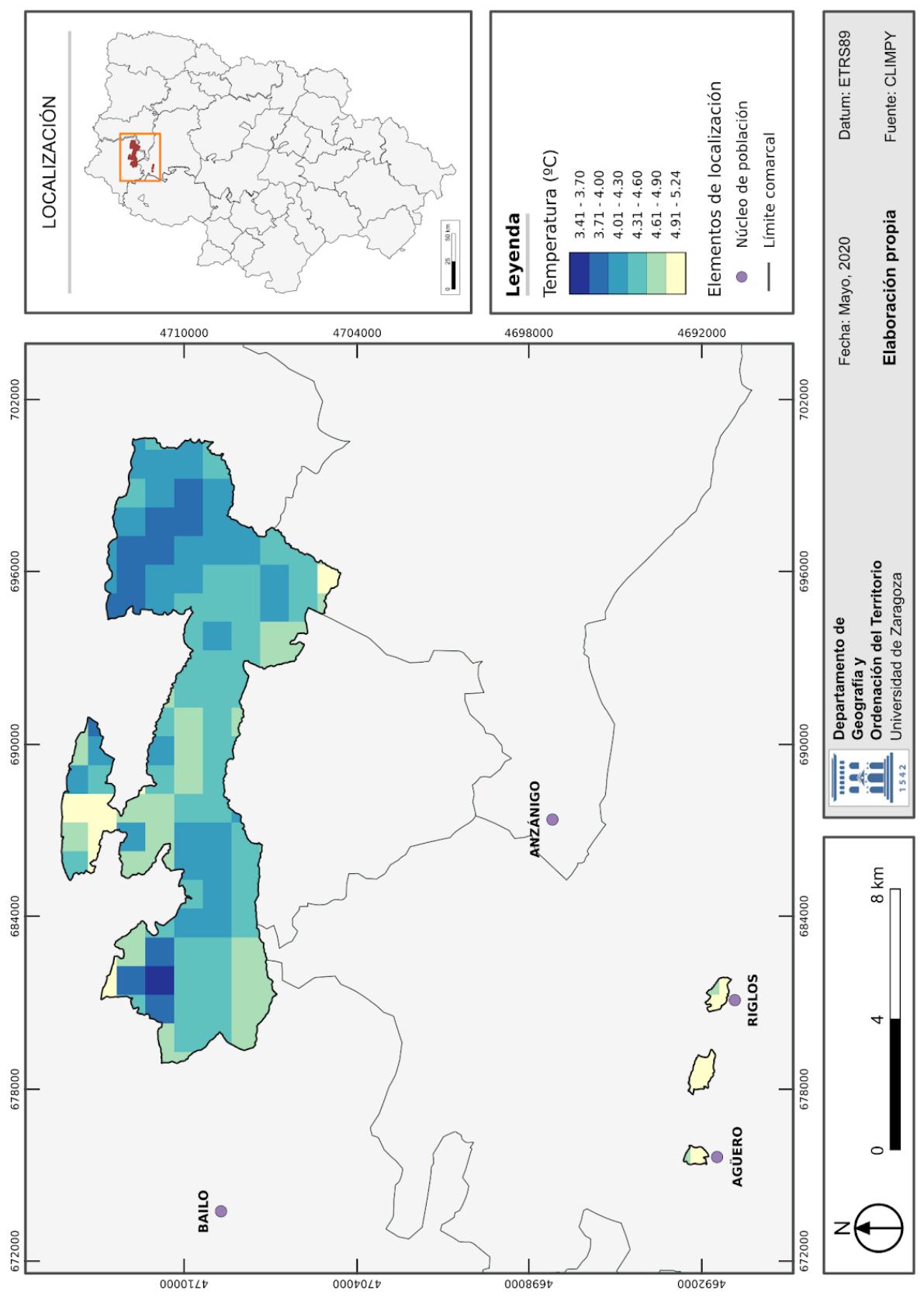
PRECIPITACIÓN MEDIA DE OTOÑO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



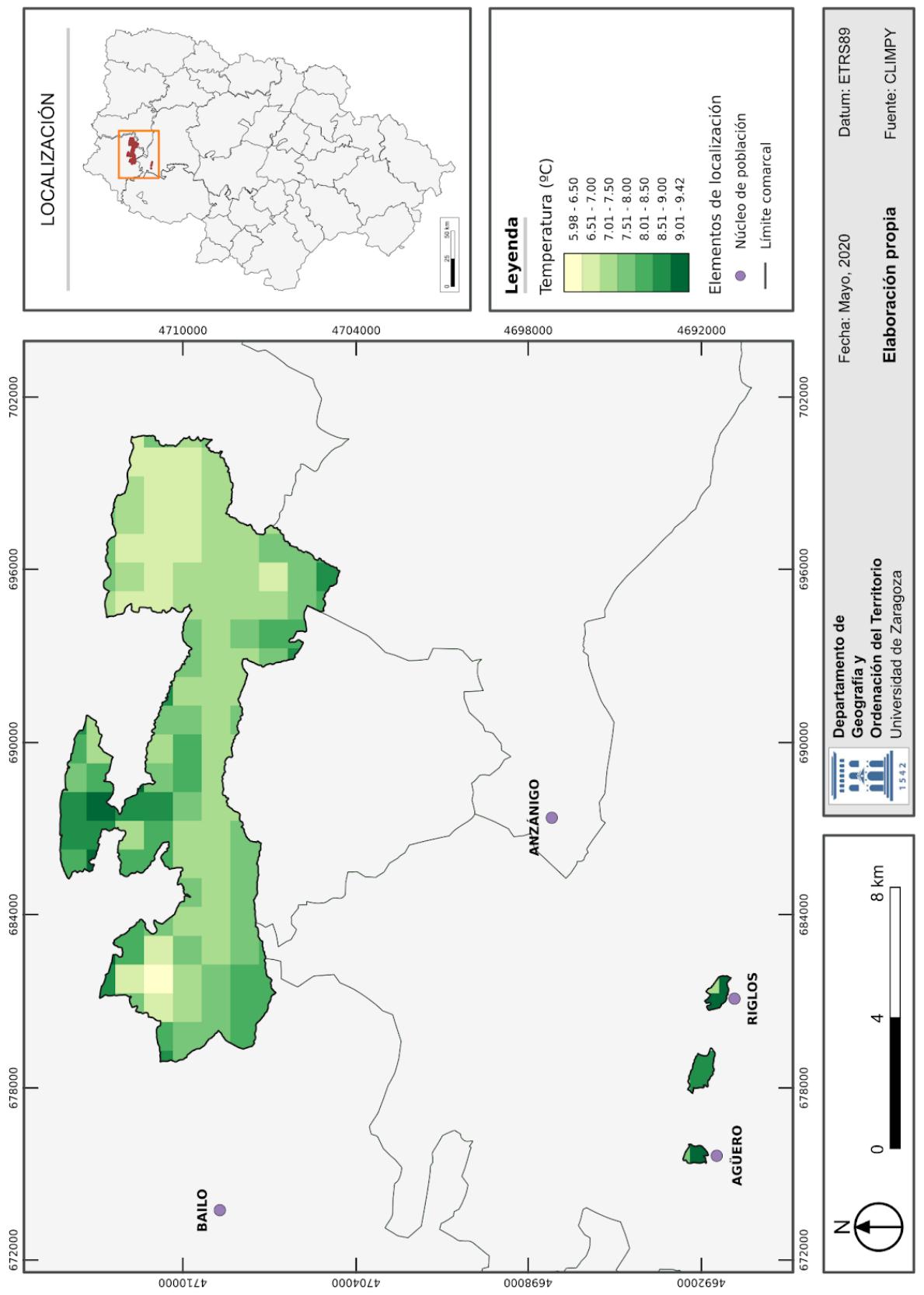
TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO



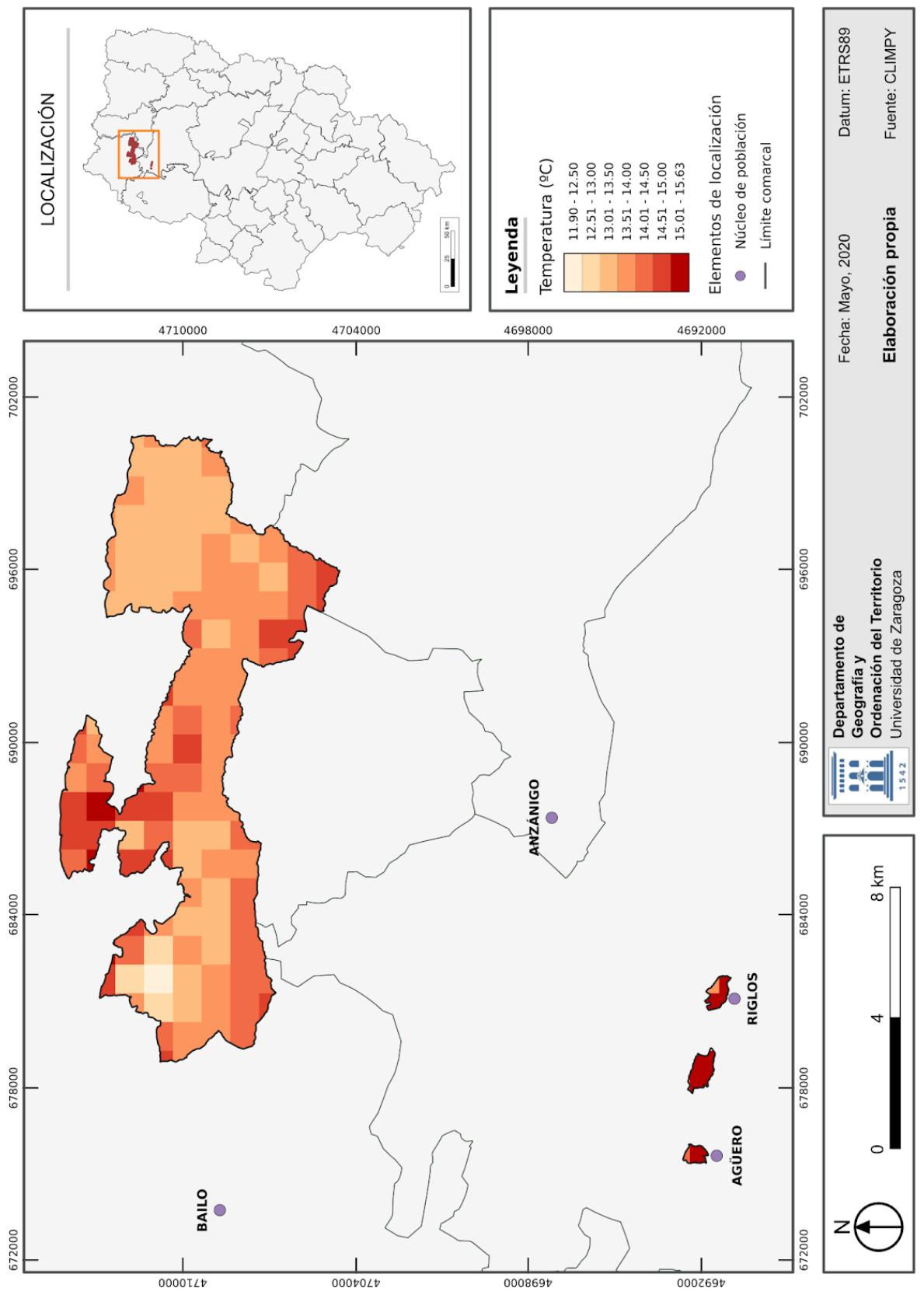
TEMPERATURA MEDIA DE INVIERNO EN LA ZONA DE ESTUDIO



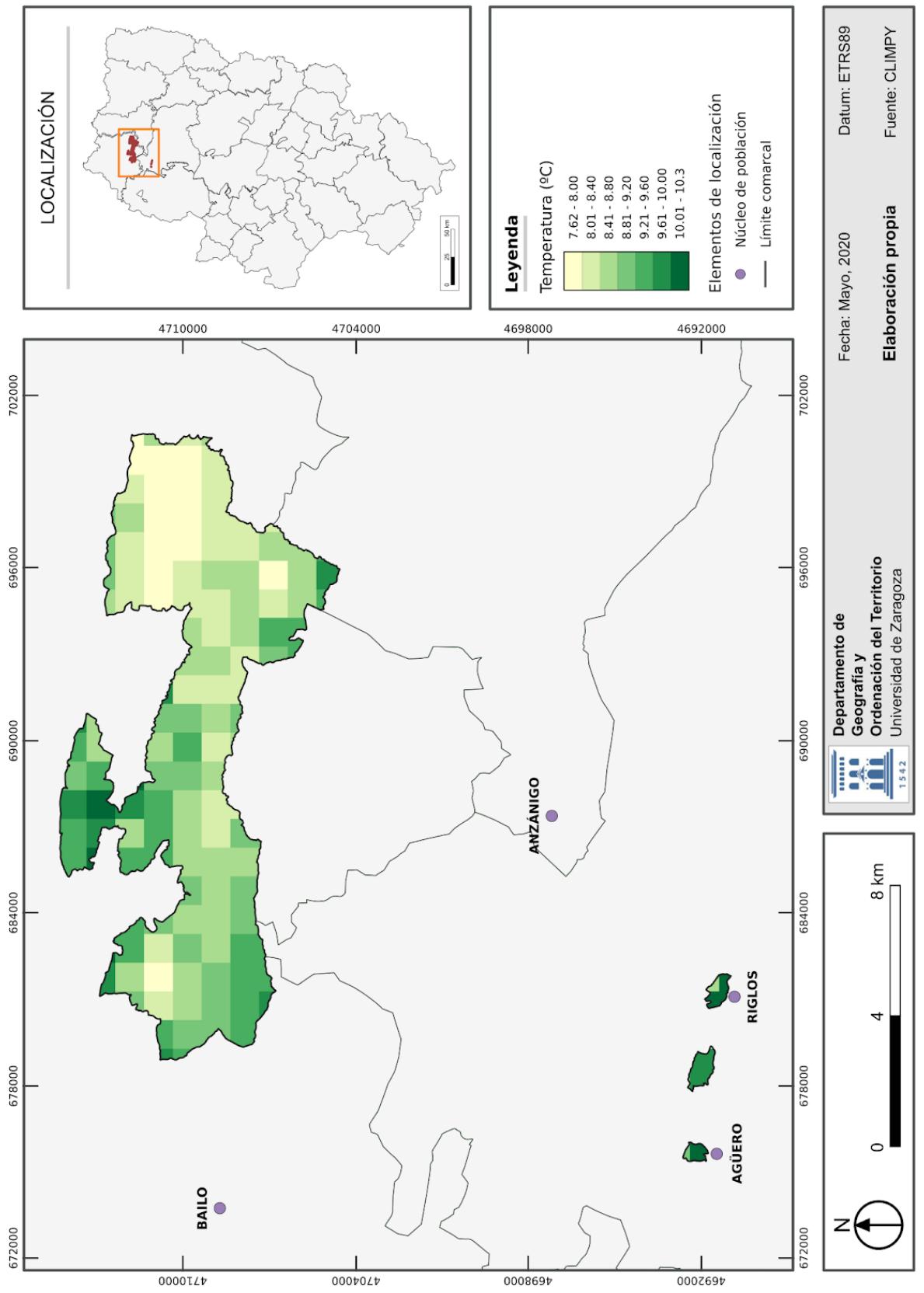
TEMPERATURA MEDIA DE PRIMAVERA EN LA ZONA DE ESTUDIO



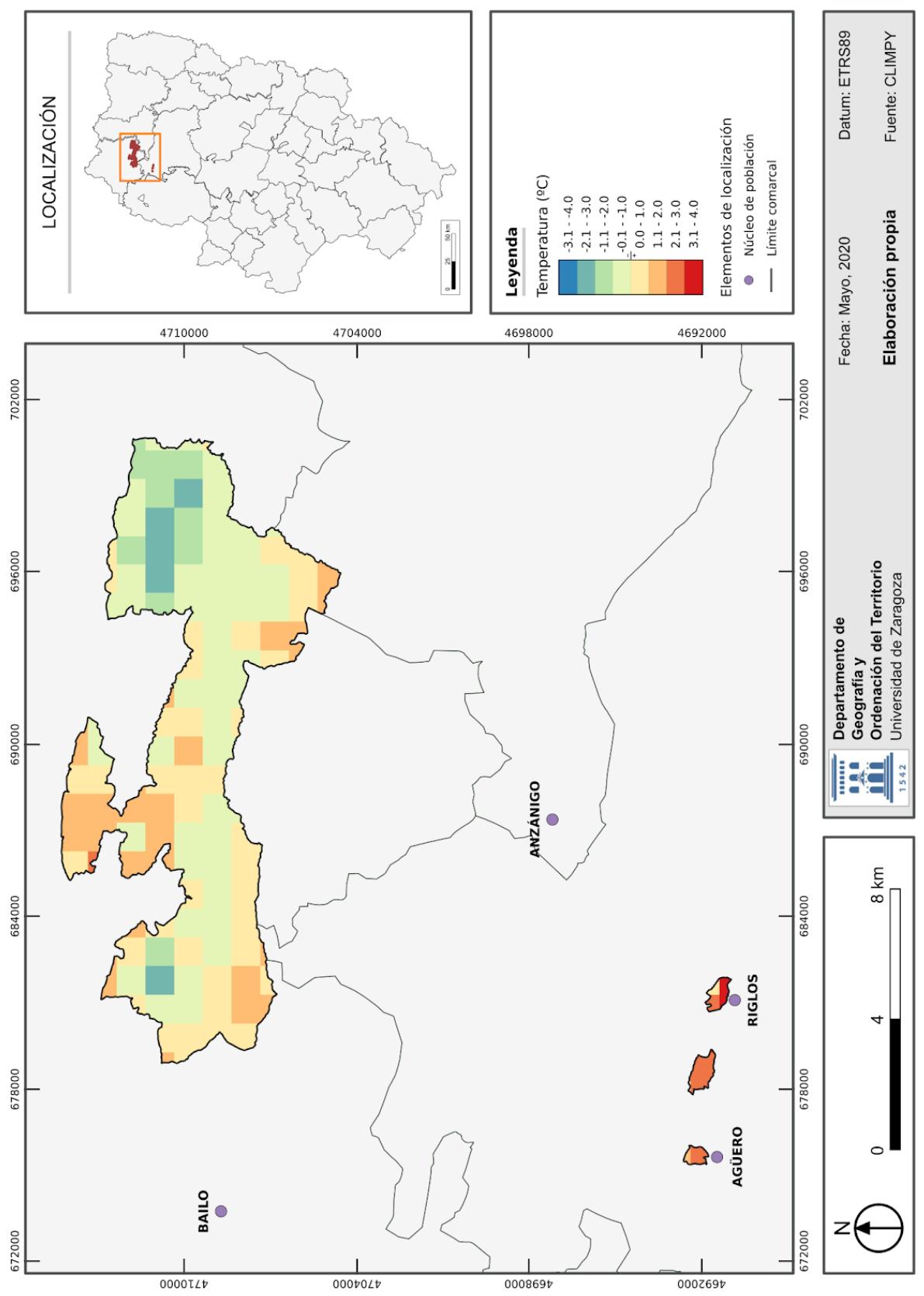
TEMPERATURA MEDIA DE VERANO EN LA ZONA DE ESTUDIO



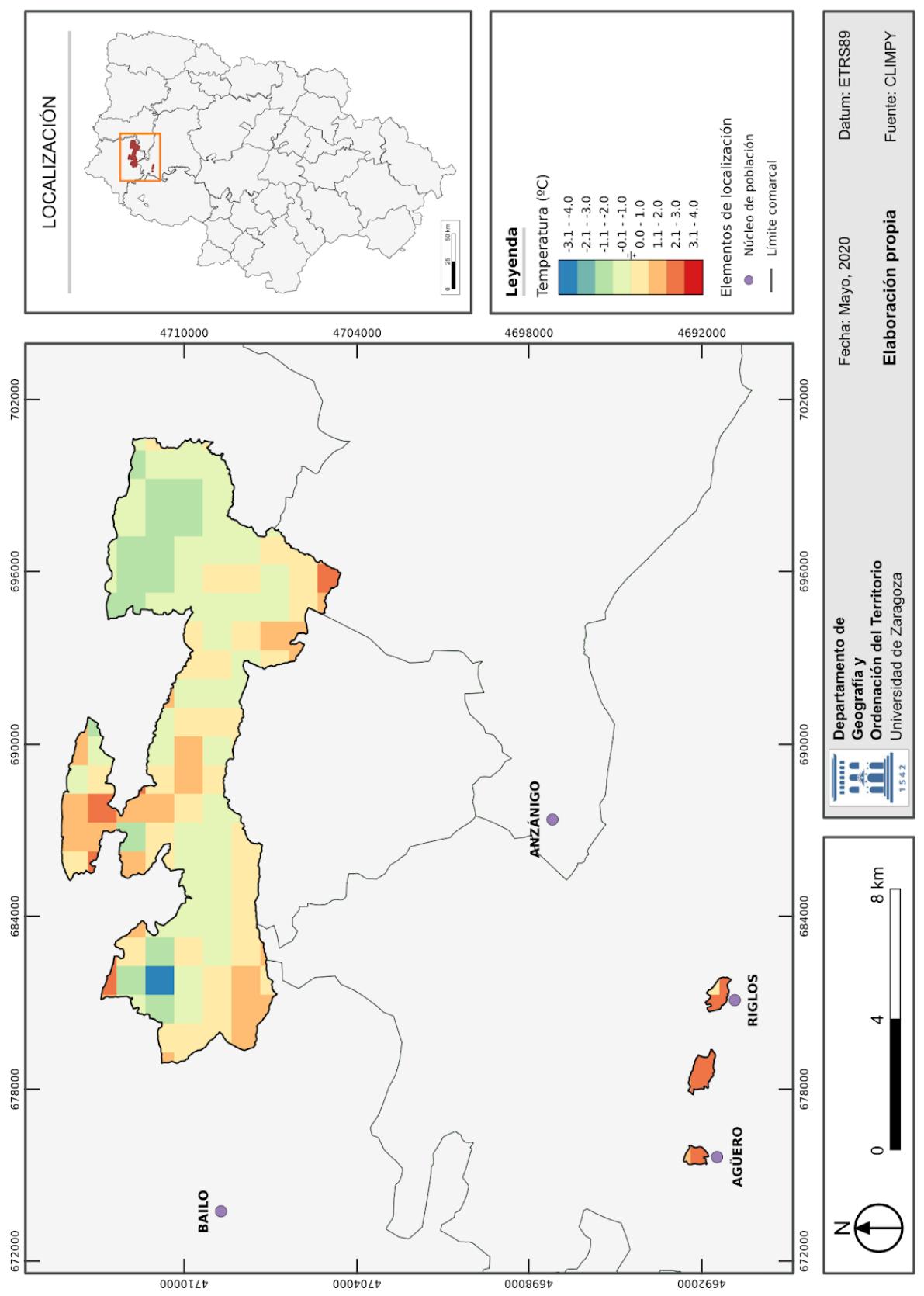
TEMPERATURA MEDIA DE OTOÑO EN LA ZONA DE ESTUDIO



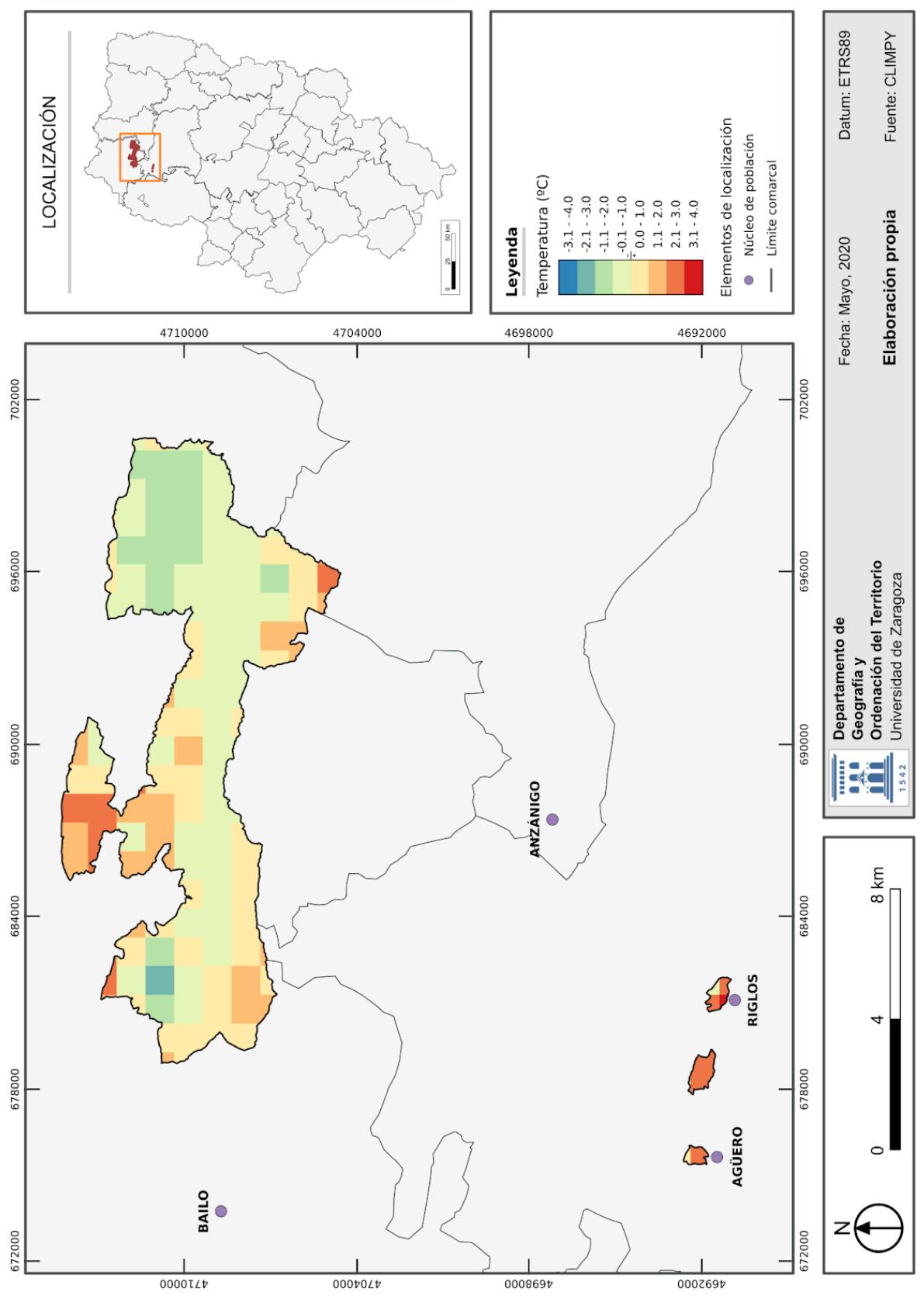
TEMPERATURA MEDIA ANUAL ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



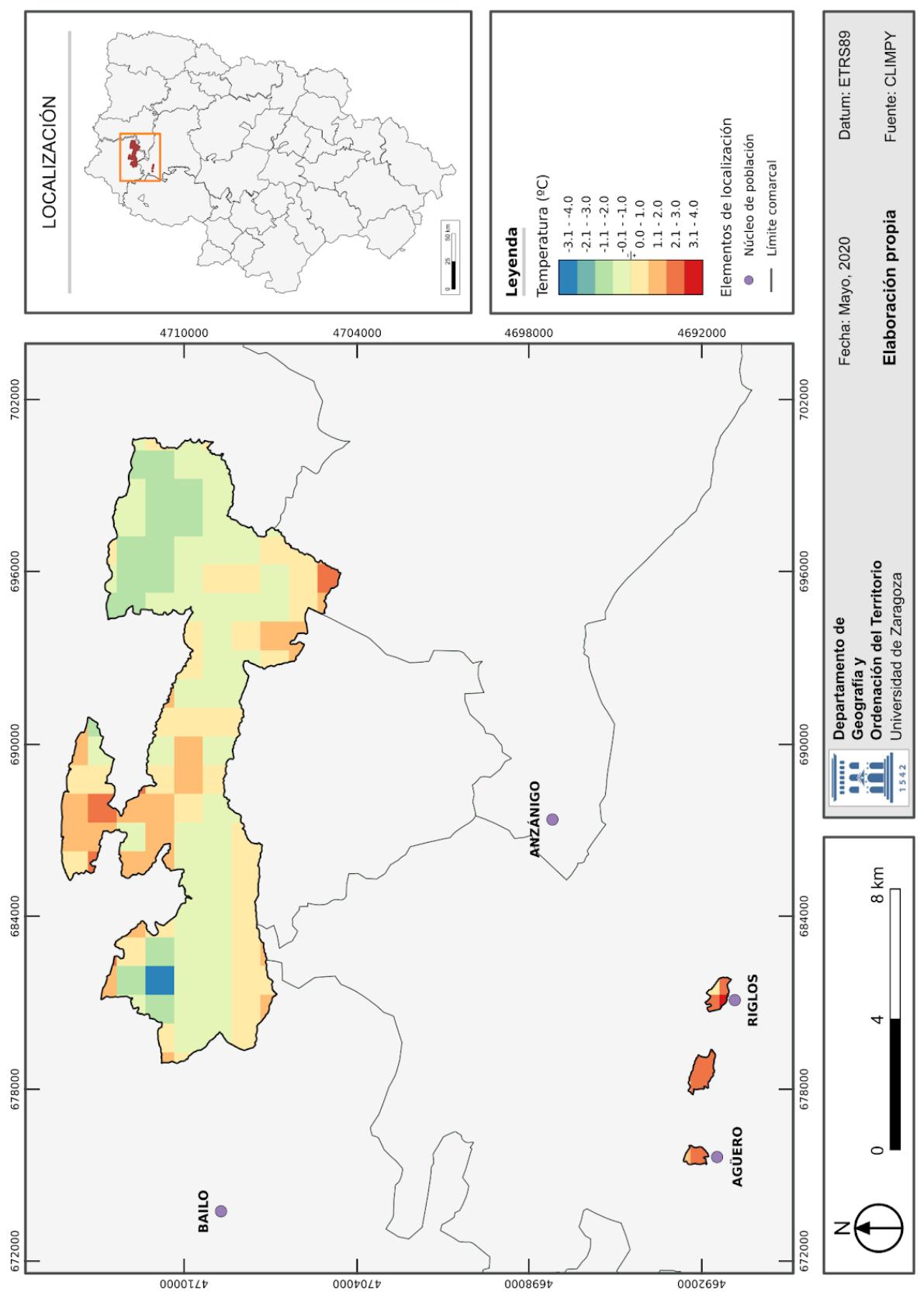
TEMPERATURA MEDIA DE INVIERNO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



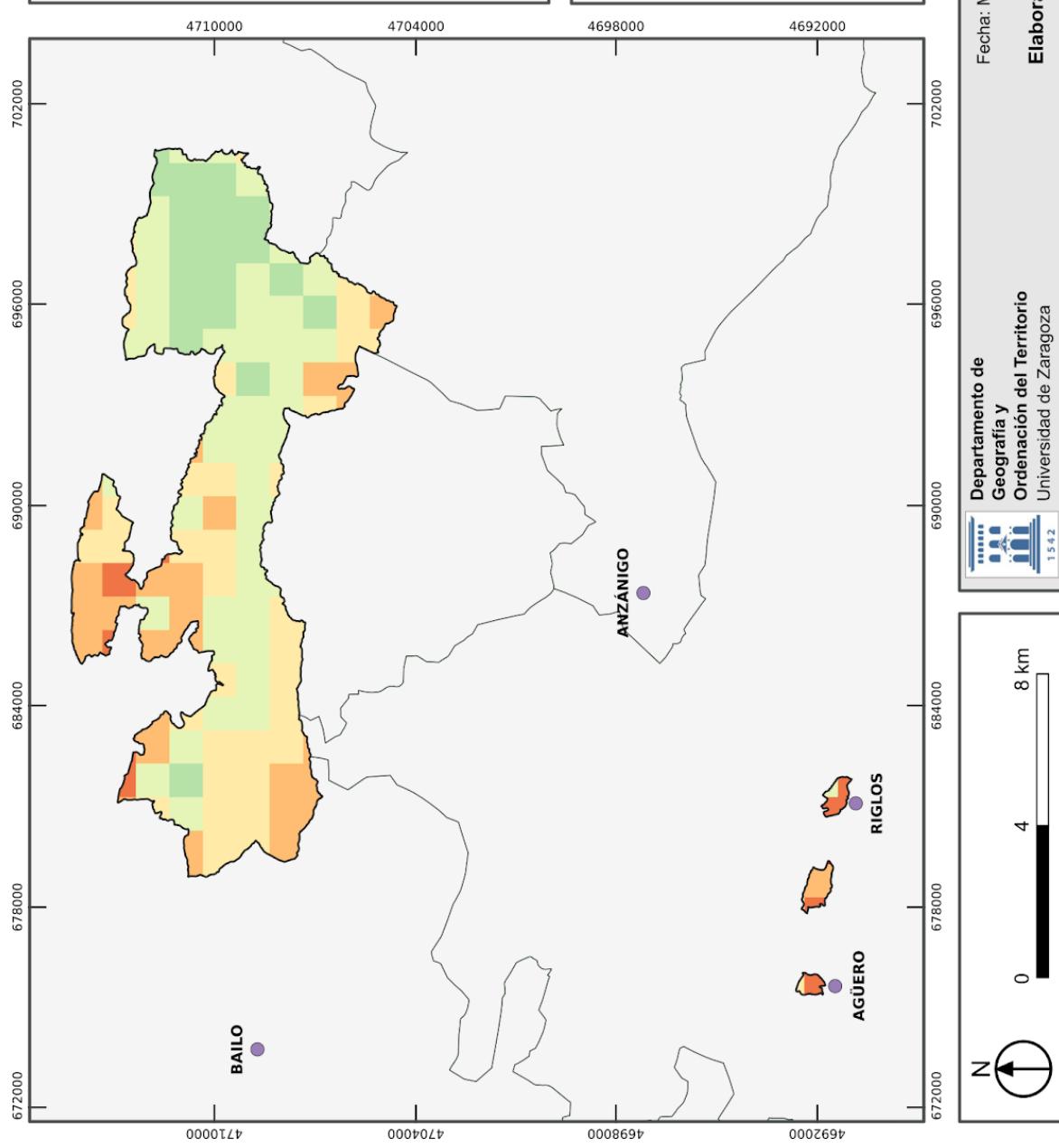
TEMPERATURA MEDIA DE PRIMAVERA ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



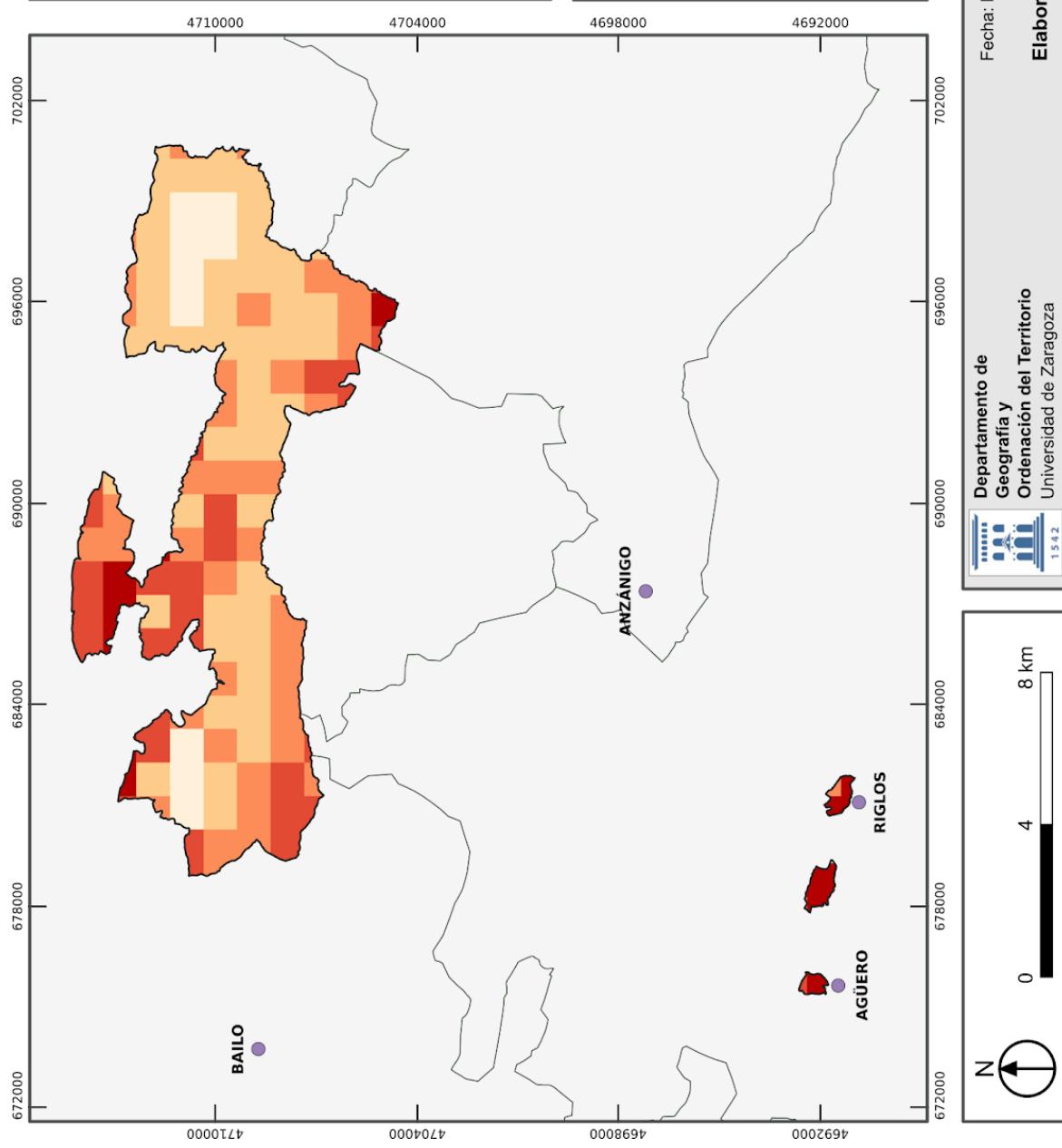
TEMPERATURA MEDIA DE VERANO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



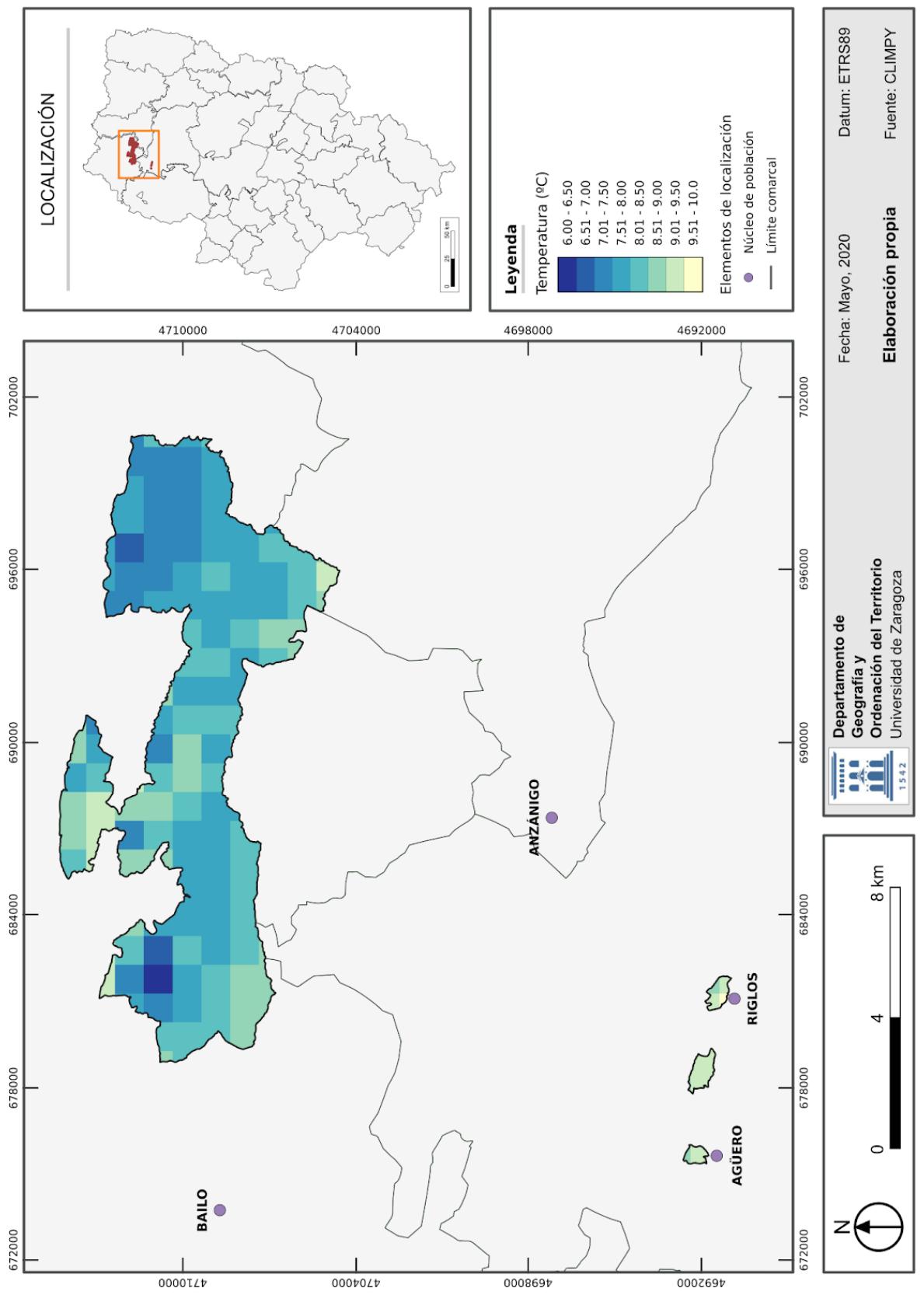
TEMPERATURA MEDIA DE OTOÑO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



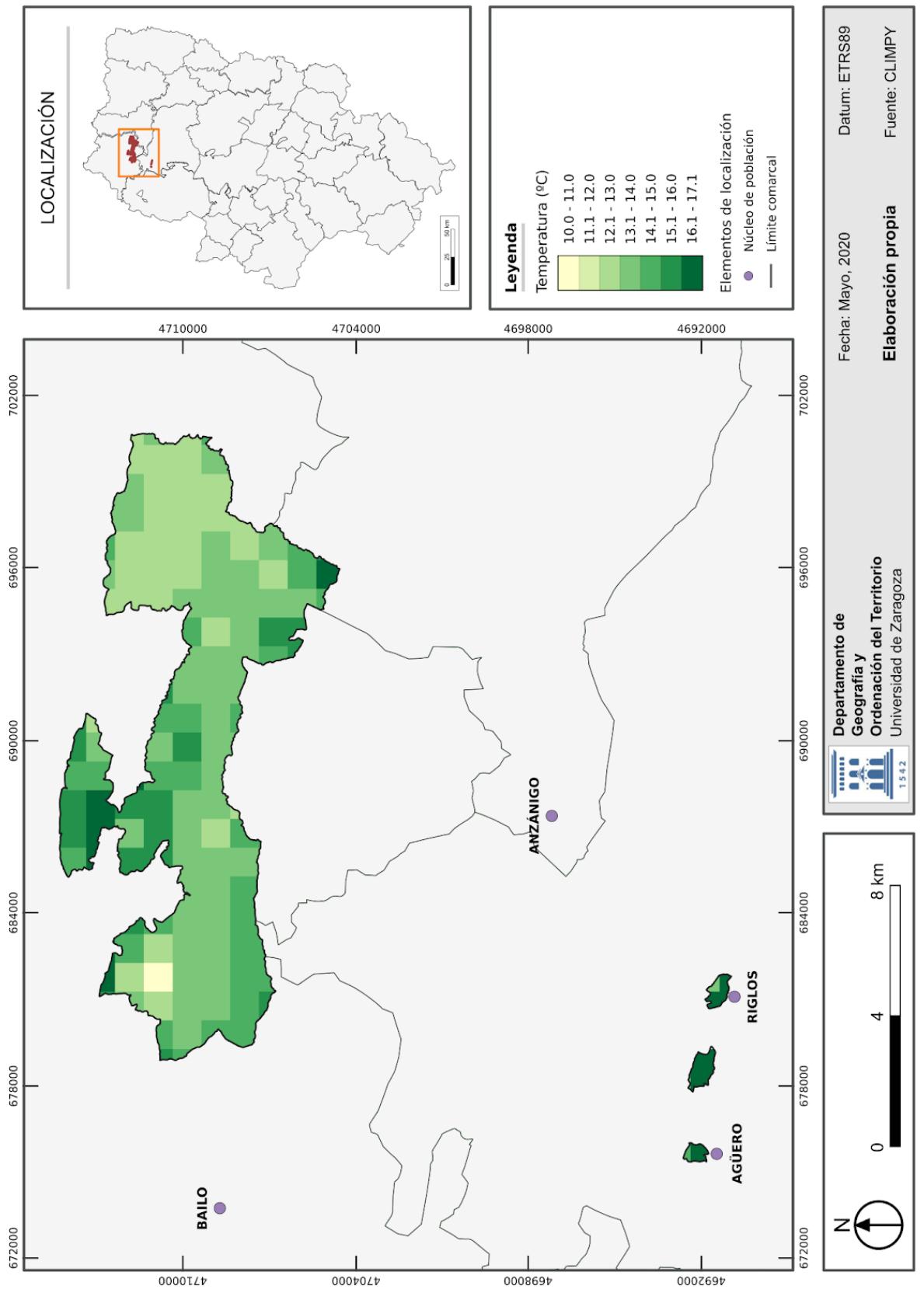
TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO



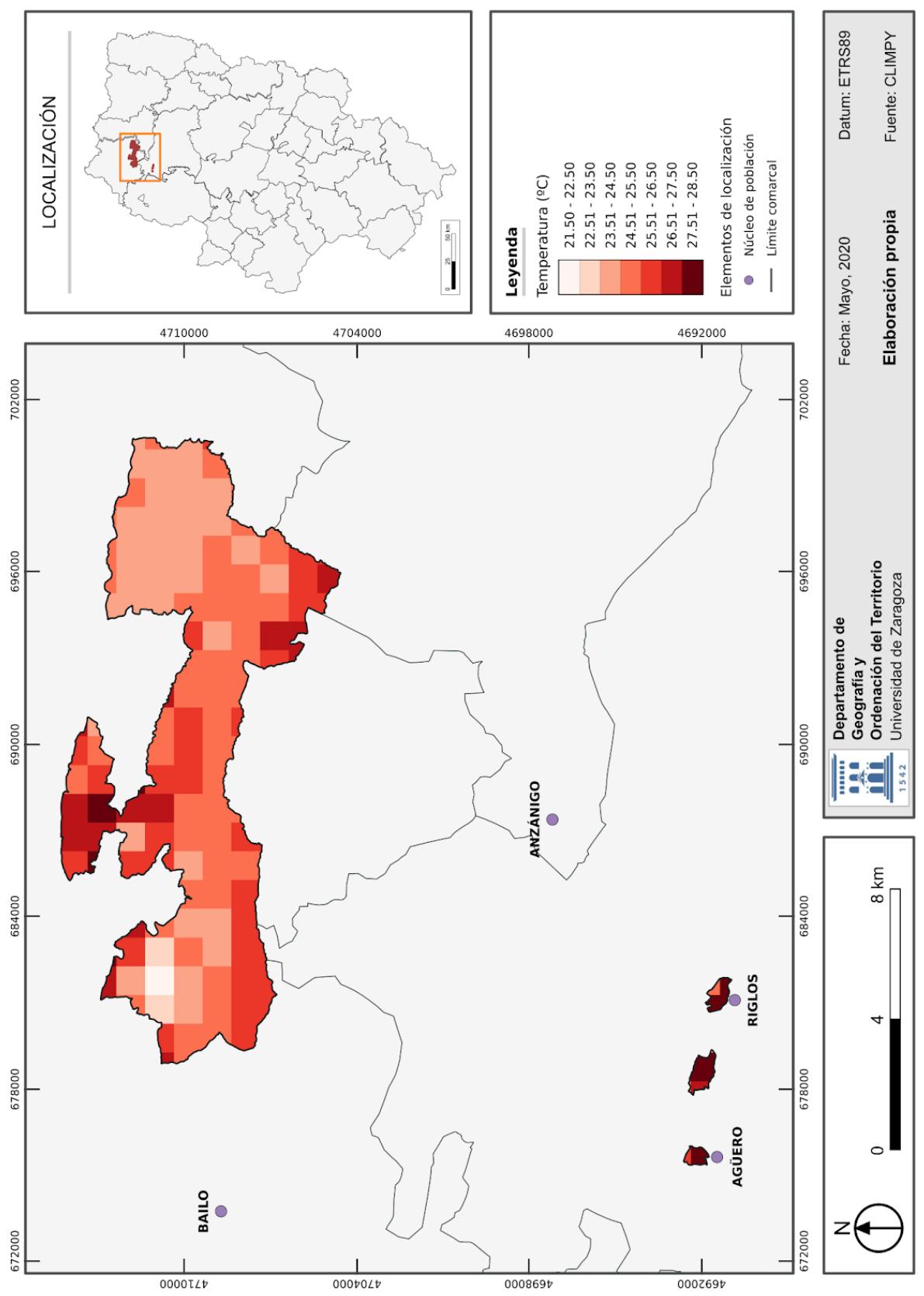
TEMPERATURA MÁXIMA DE INVIERNO EN LA ZONA DE ESTUDIO



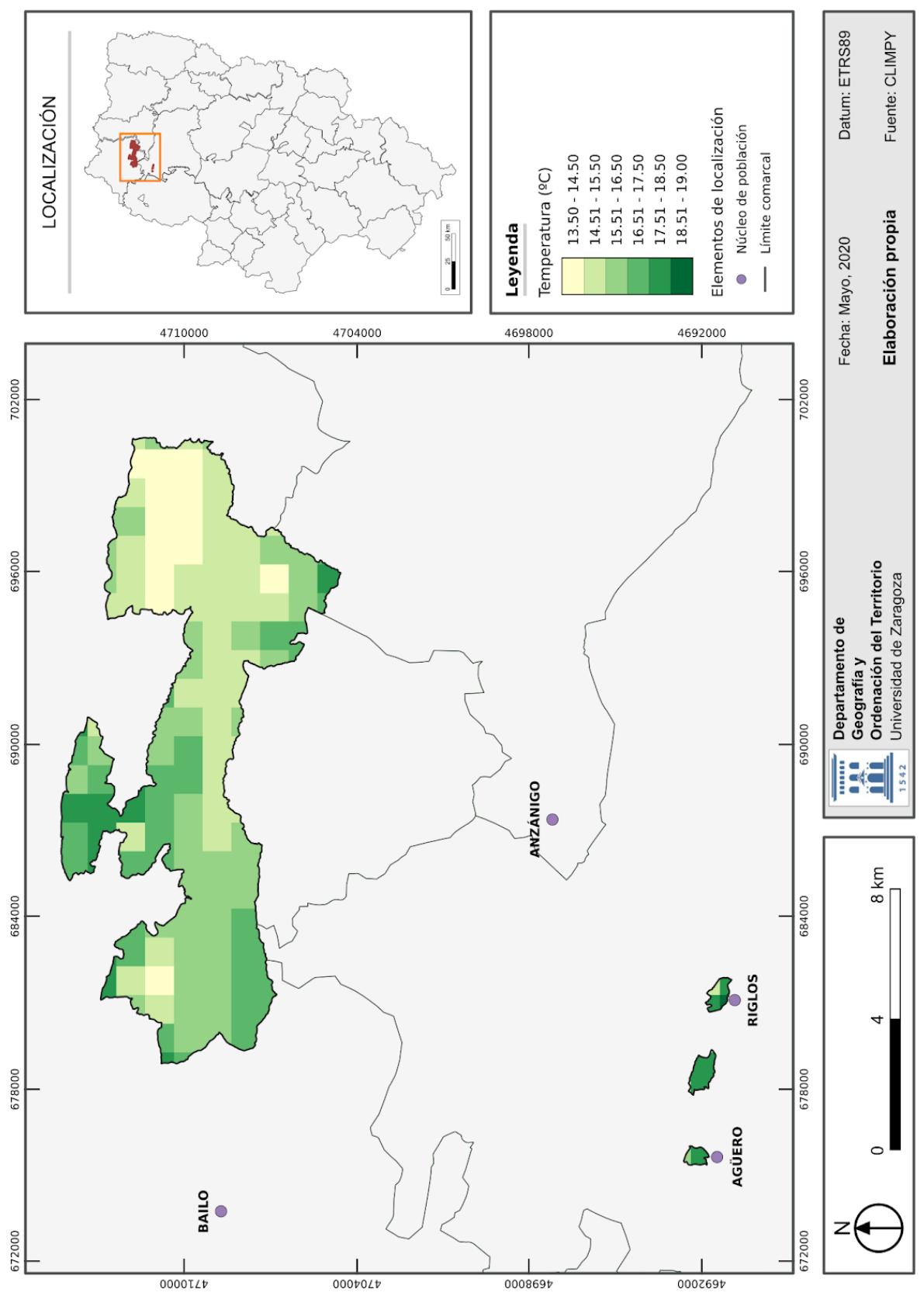
TEMPERATURA MÁXIMA DE PRIMAVERA EN LA ZONA DE ESTUDIO



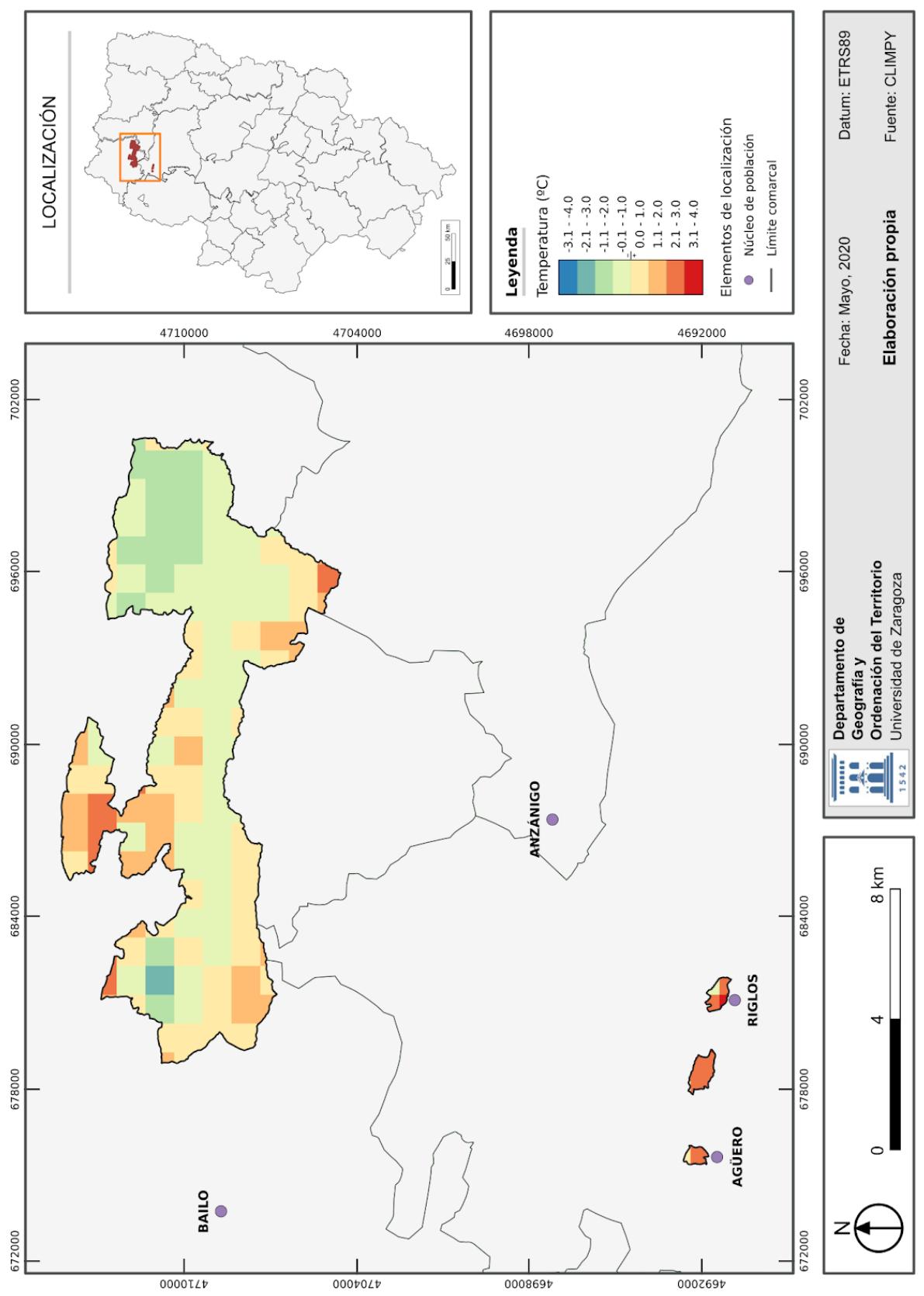
TEMPERATURA MÁXIMA DE VERANO EN LA ZONA DE ESTUDIO



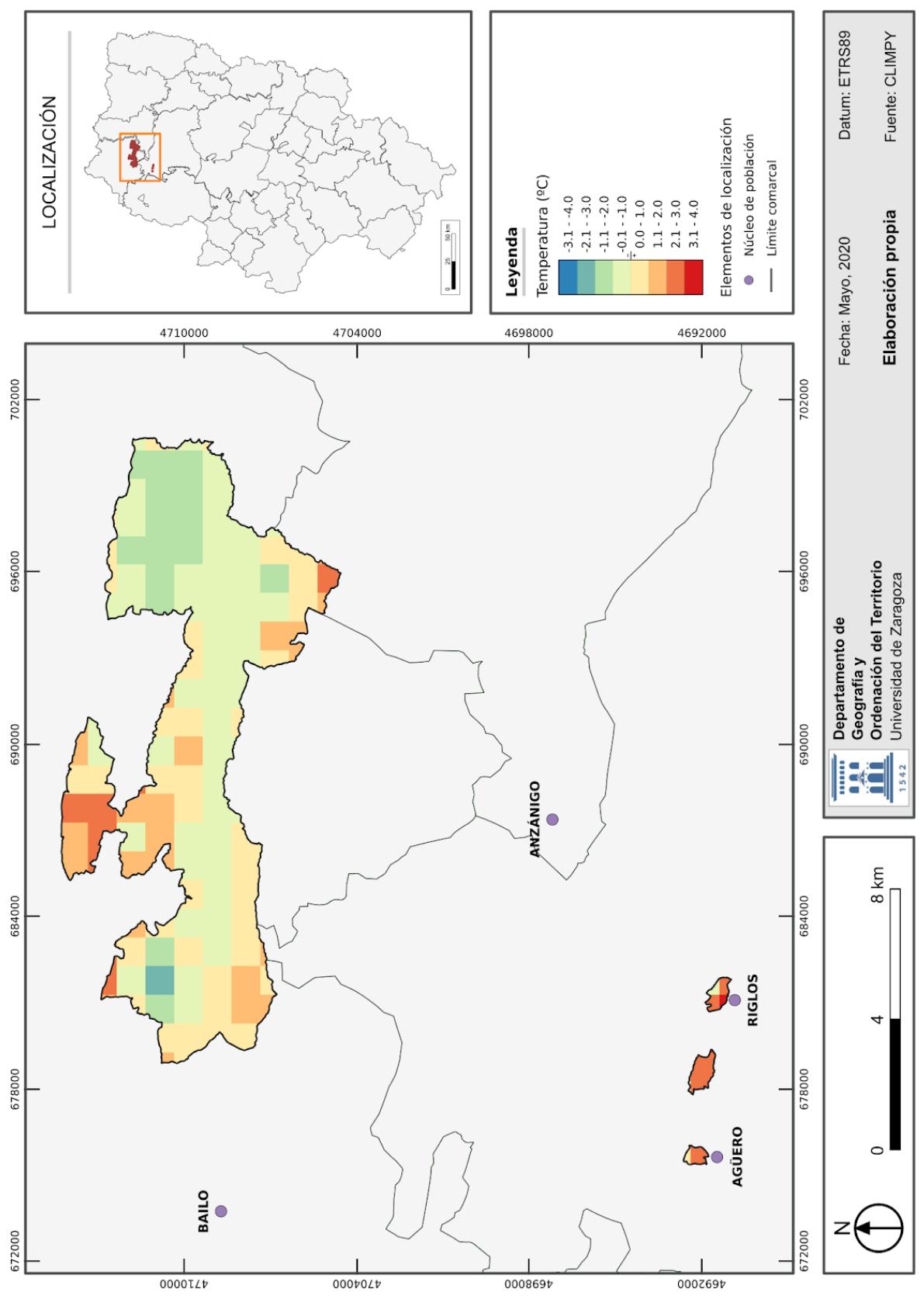
TEMPERATURA MÁXIMA DE OTOÑO EN LA ZONA DE ESTUDIO



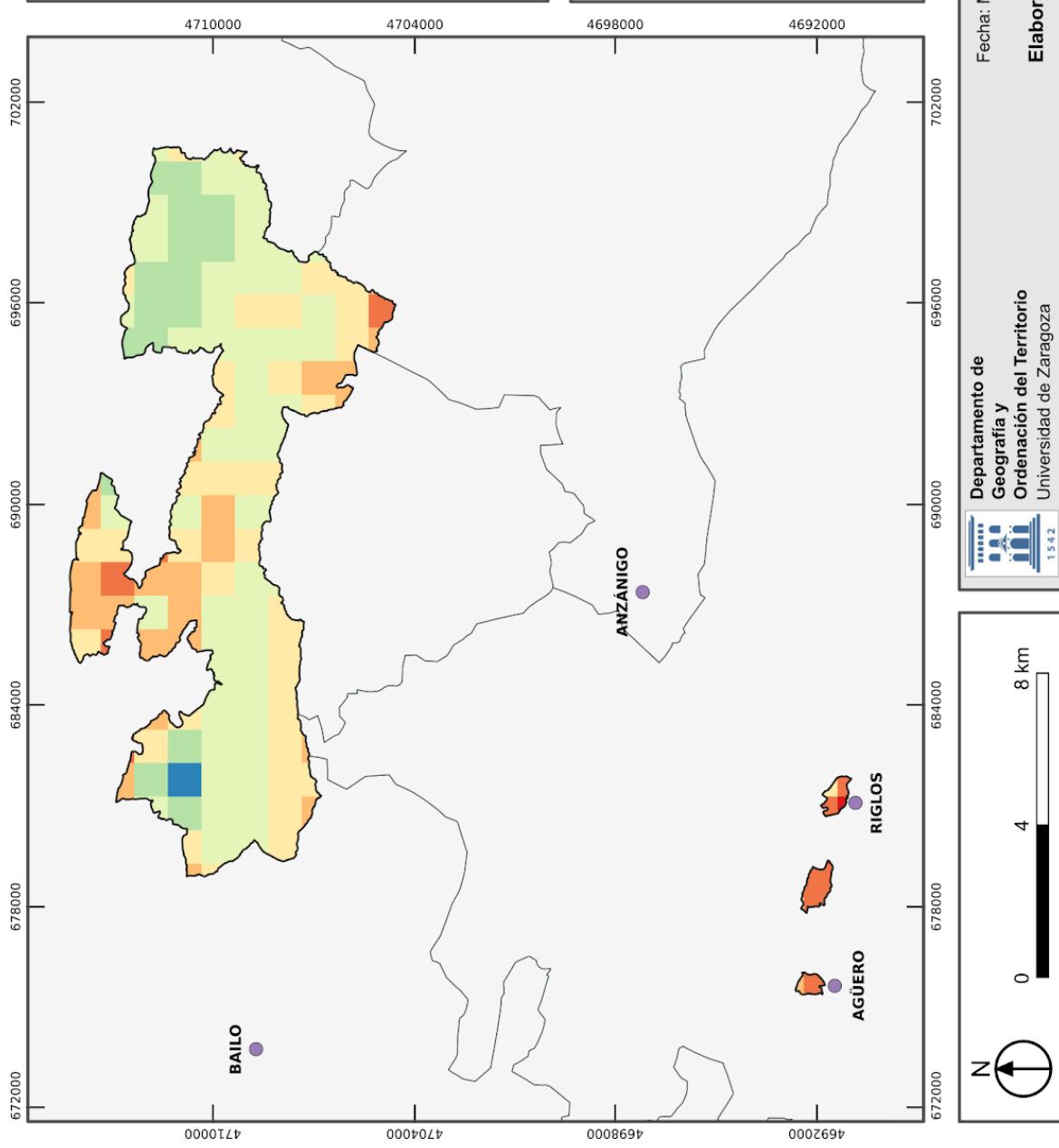
TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



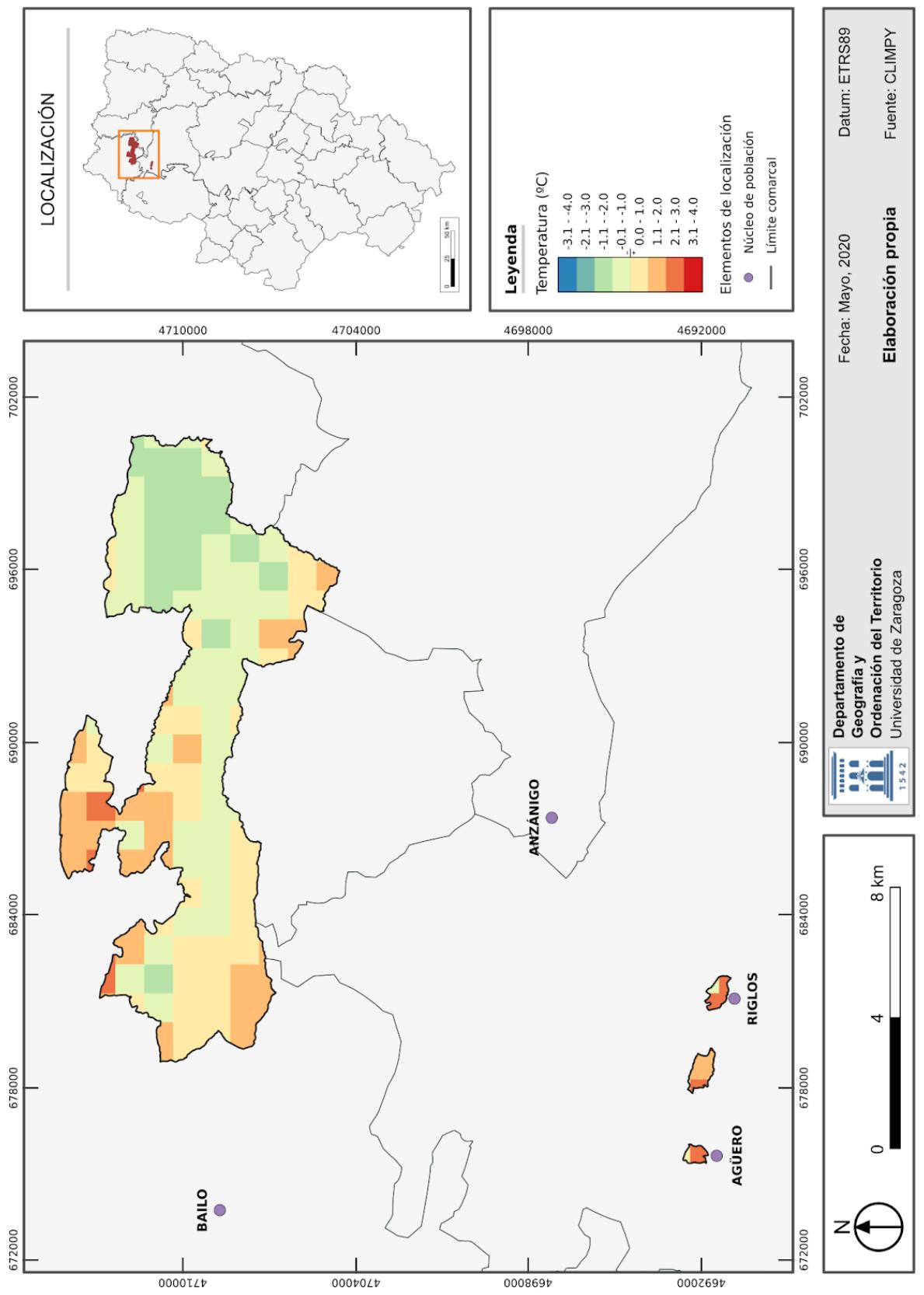
TEMPERATURA MÁXIMA DE PRIMAVERA ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



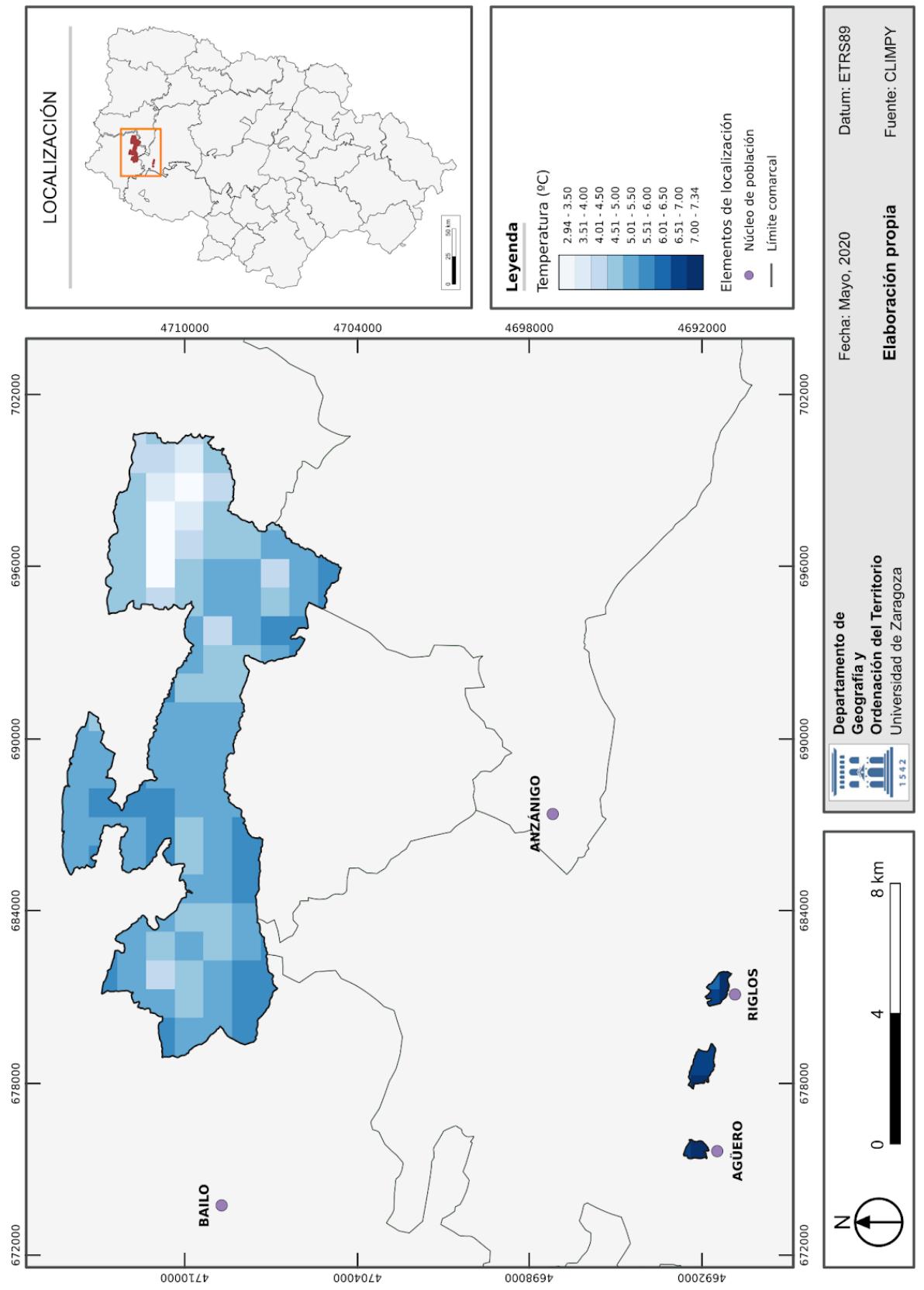
TEMPERATURA MÁXIMA DE VERANO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



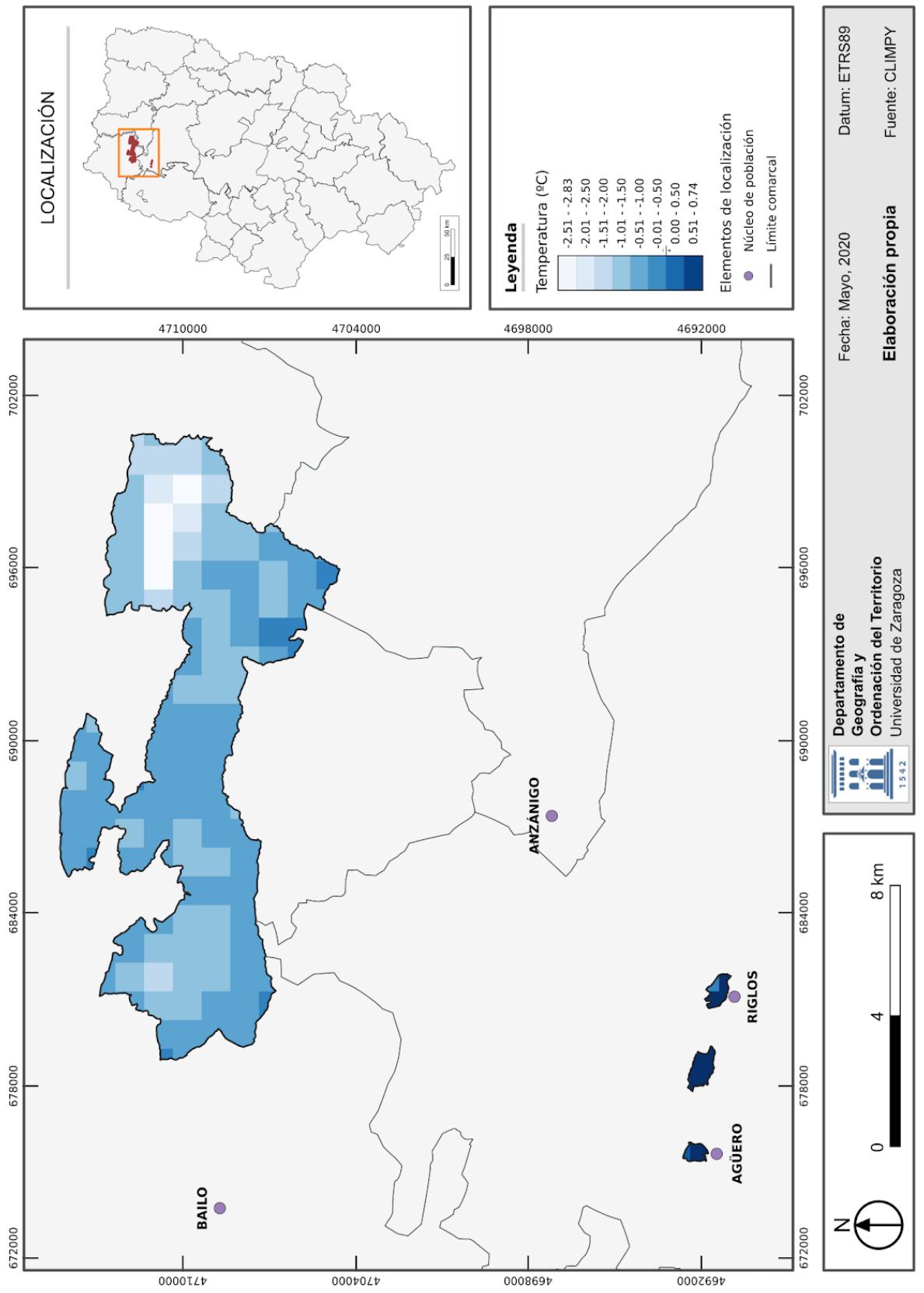
TEMPERATURA MÁXIMA DE OTOÑO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



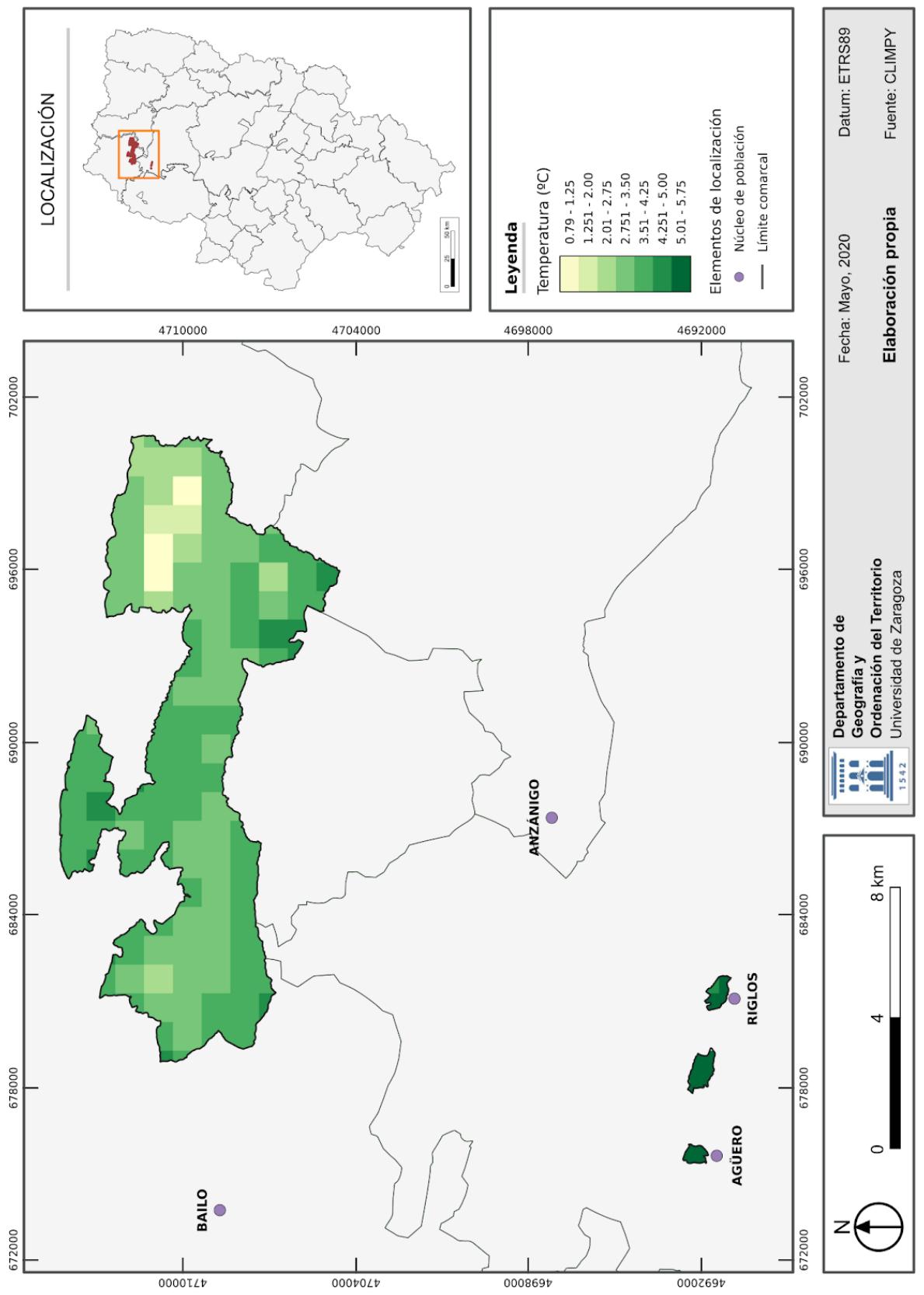
TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO



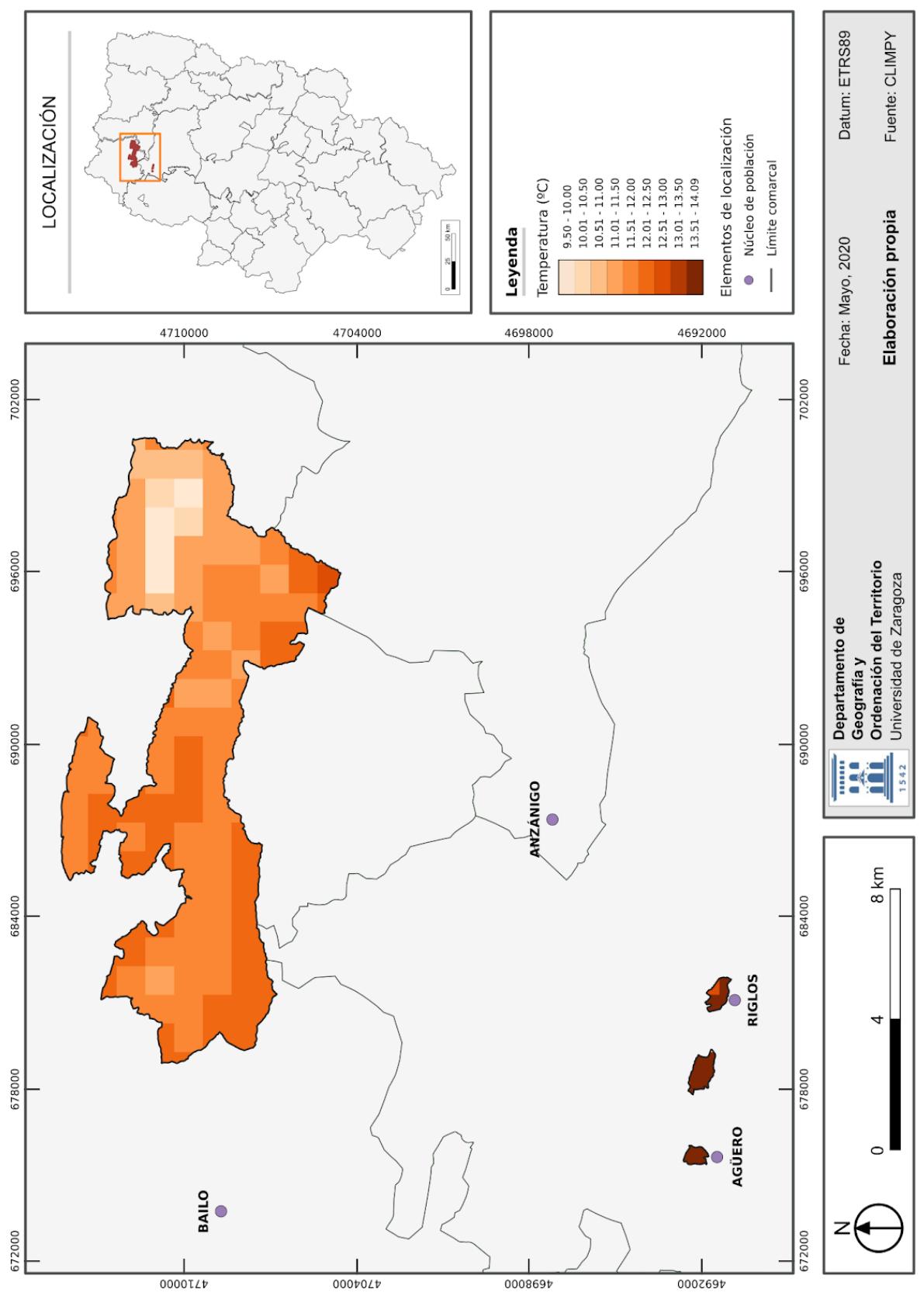
TEMPERATURA MÍNIMA DE INVIERNO EN LA ZONA DE ESTUDIO



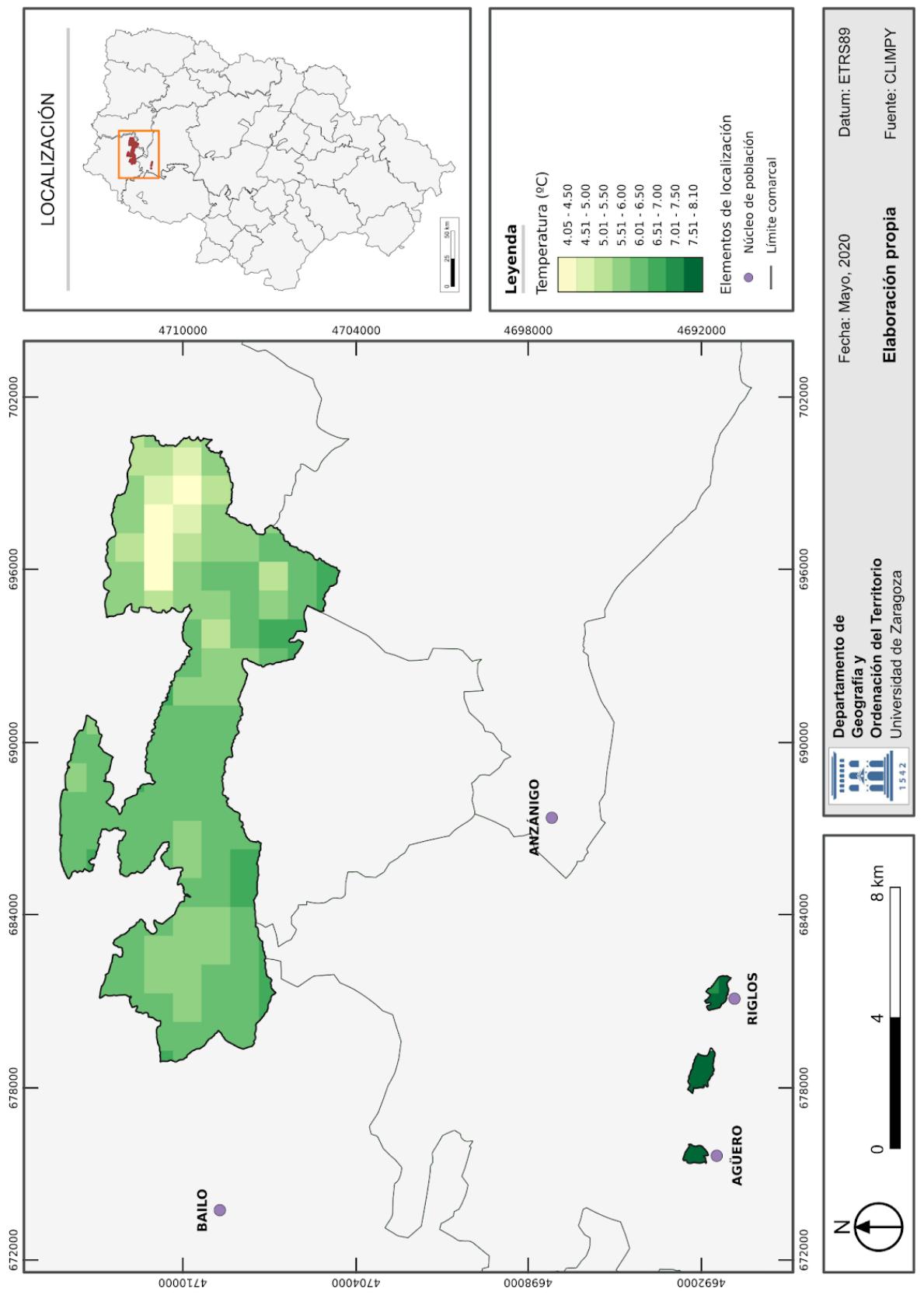
TEMPERATURA MÍNIMA DE PRIMAVERA EN LA ZONA DE ESTUDIO



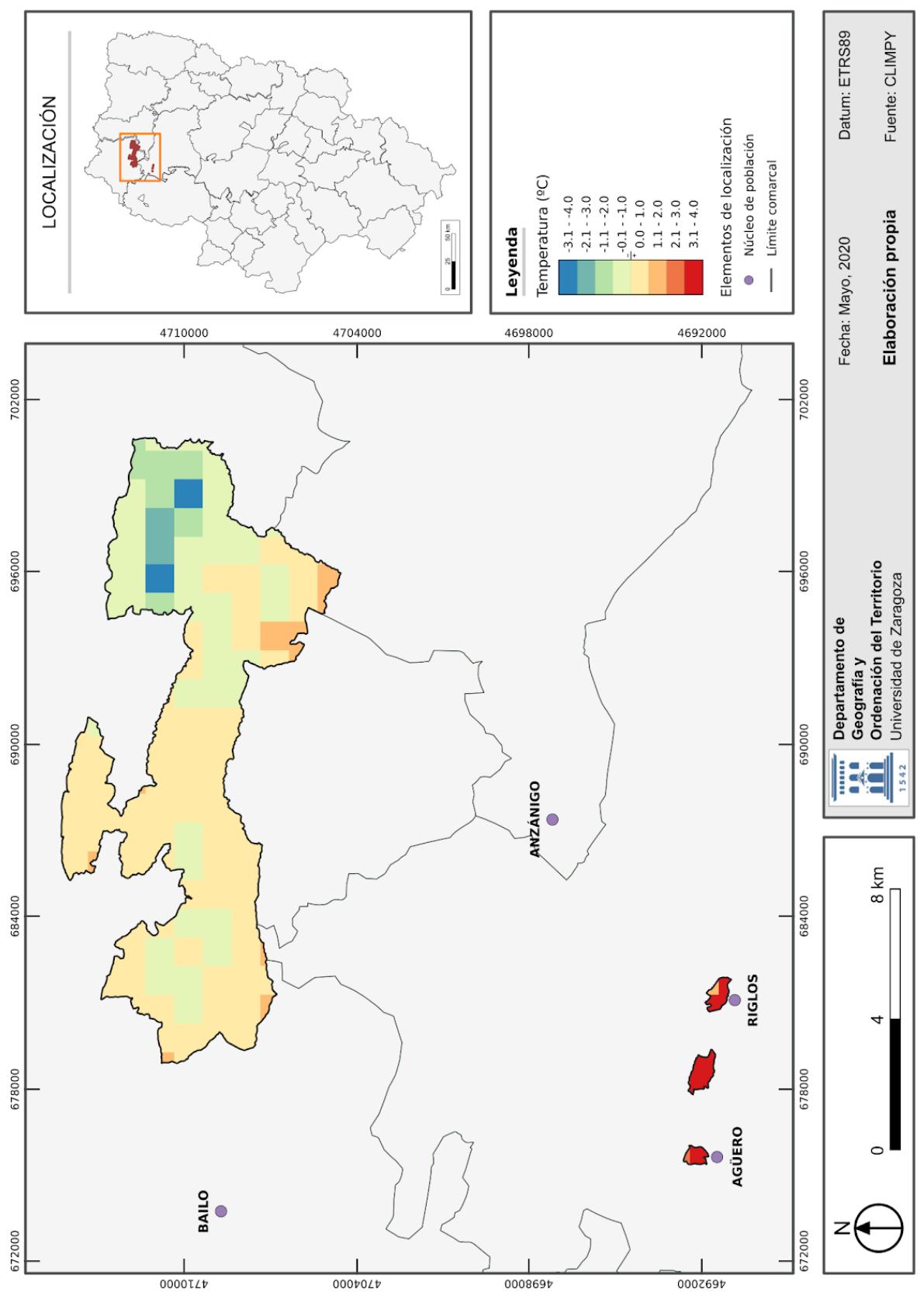
TEMPERATURA MÍNIMA DE VERANO EN LA ZONA DE ESTUDIO



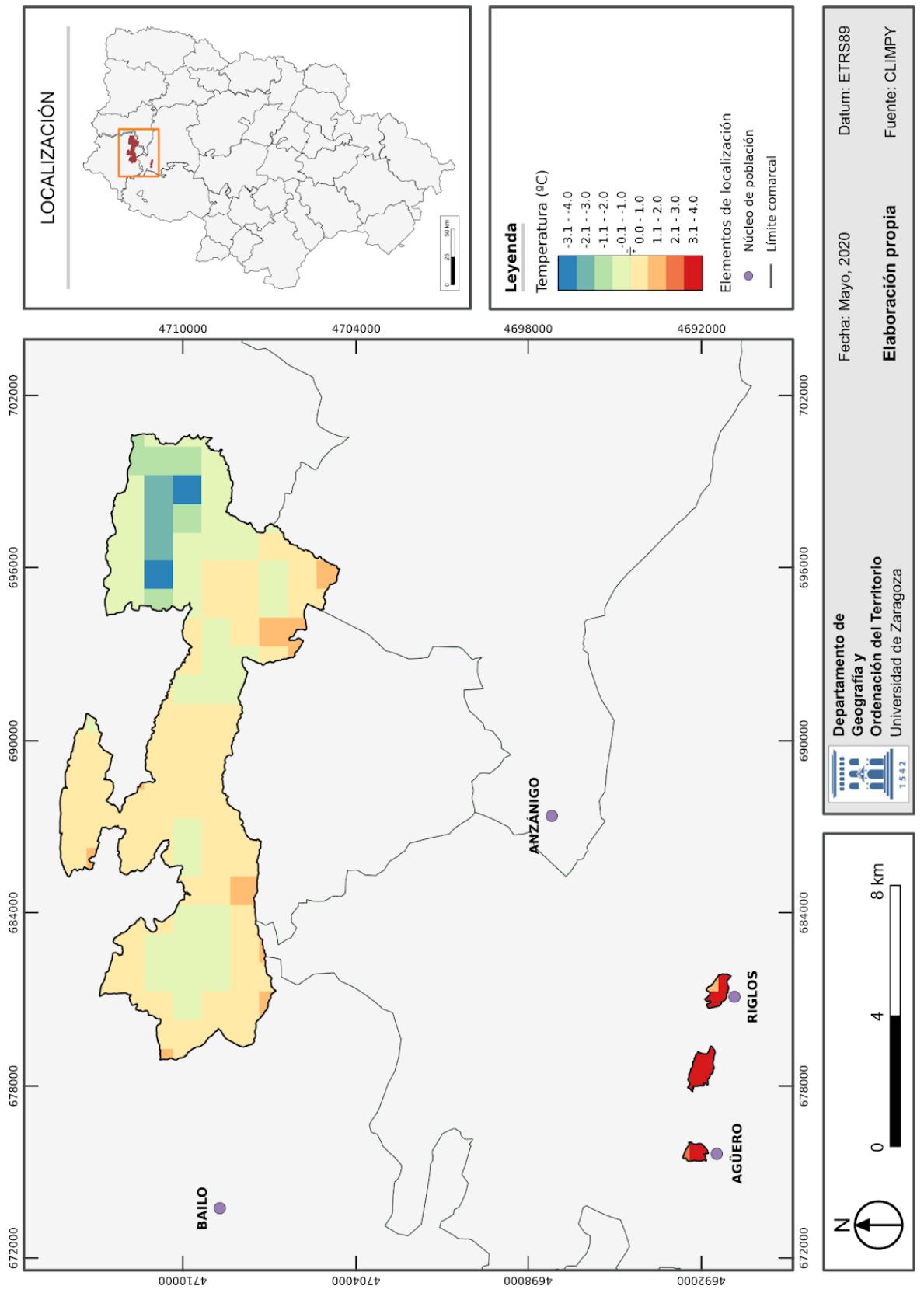
TEMPERATURA MÍNIMA DE OTOÑO EN LA ZONA DE ESTUDIO



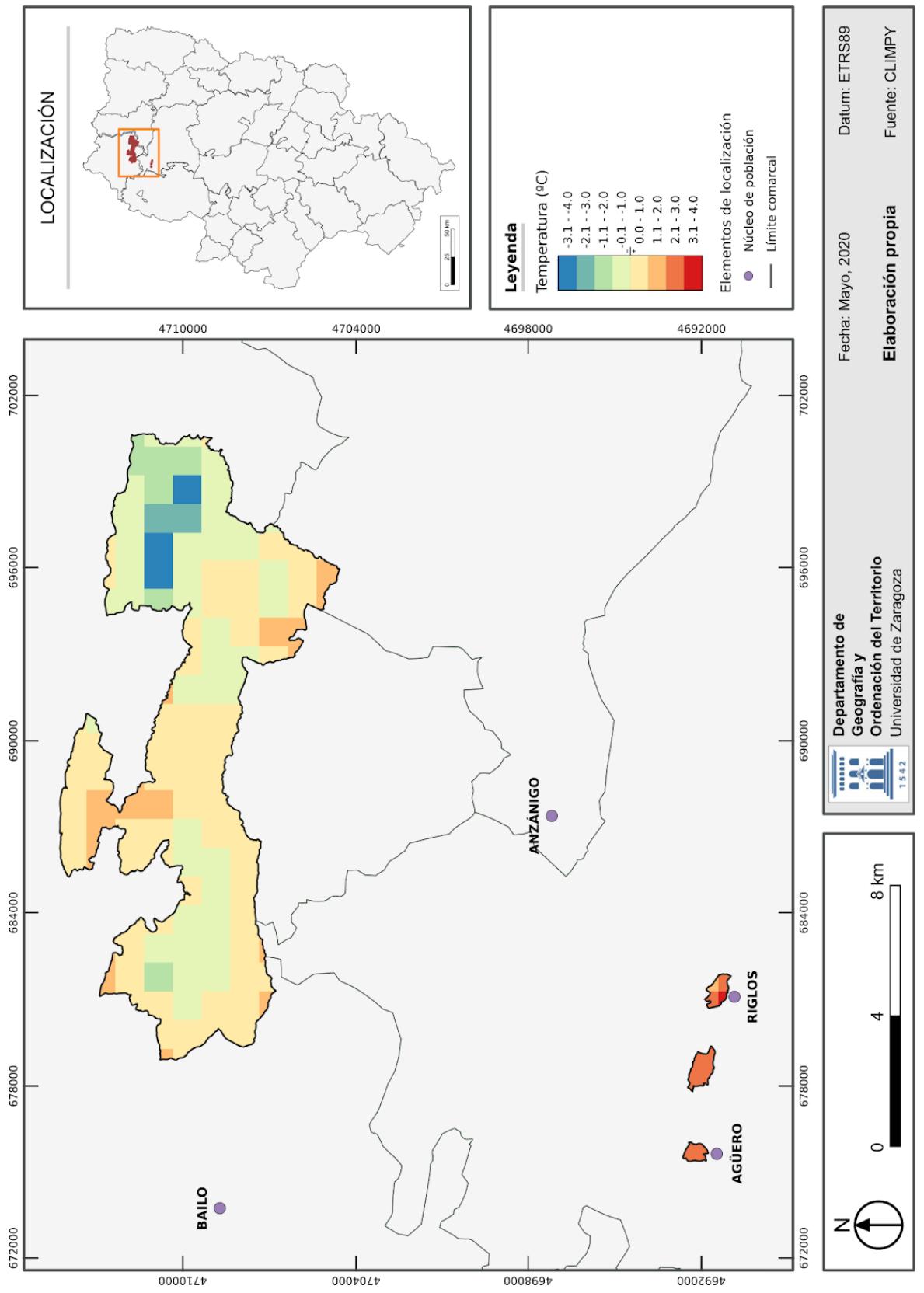
TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



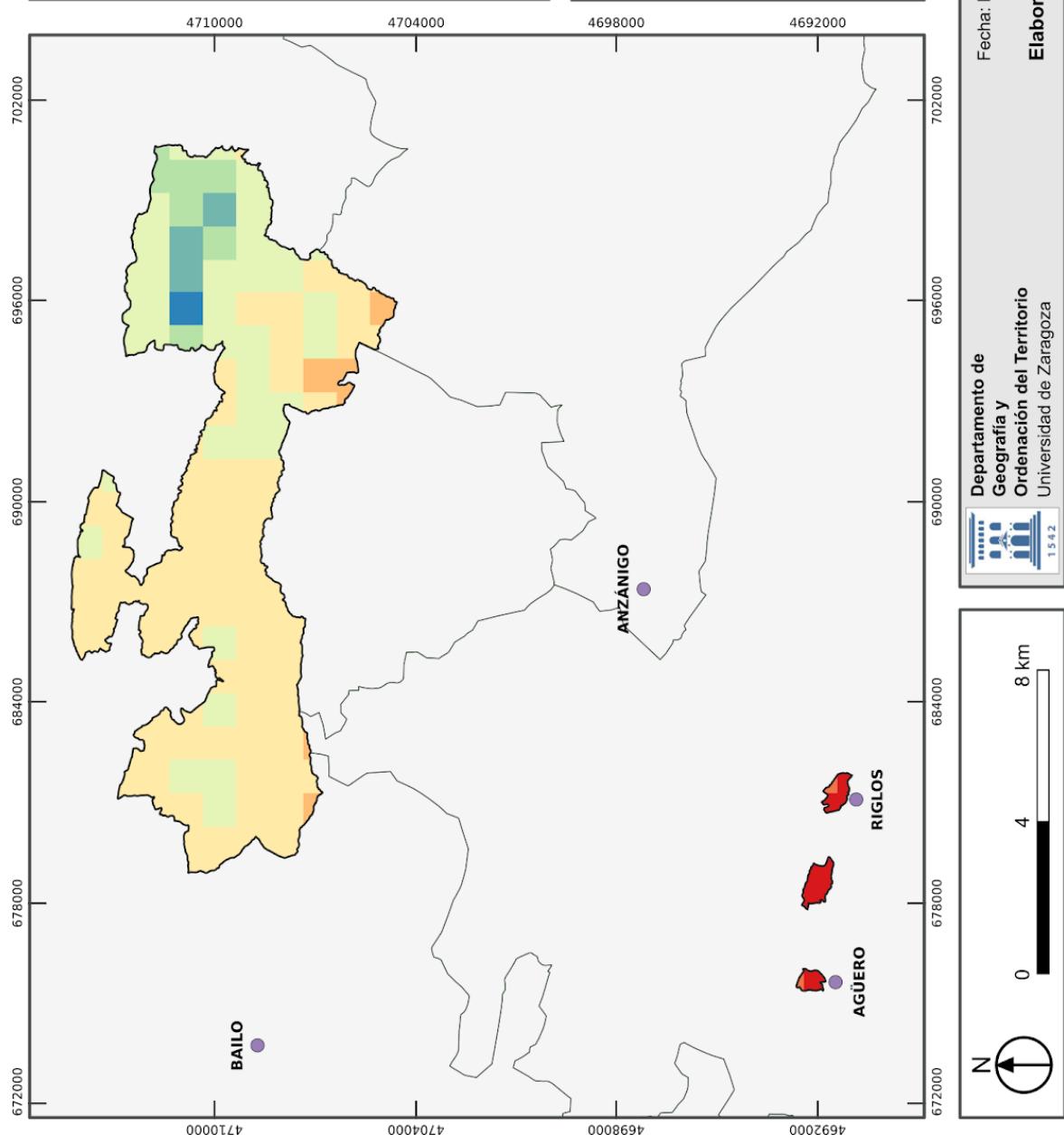
TEMPERATURA MÍNIMA DE INVIERNO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



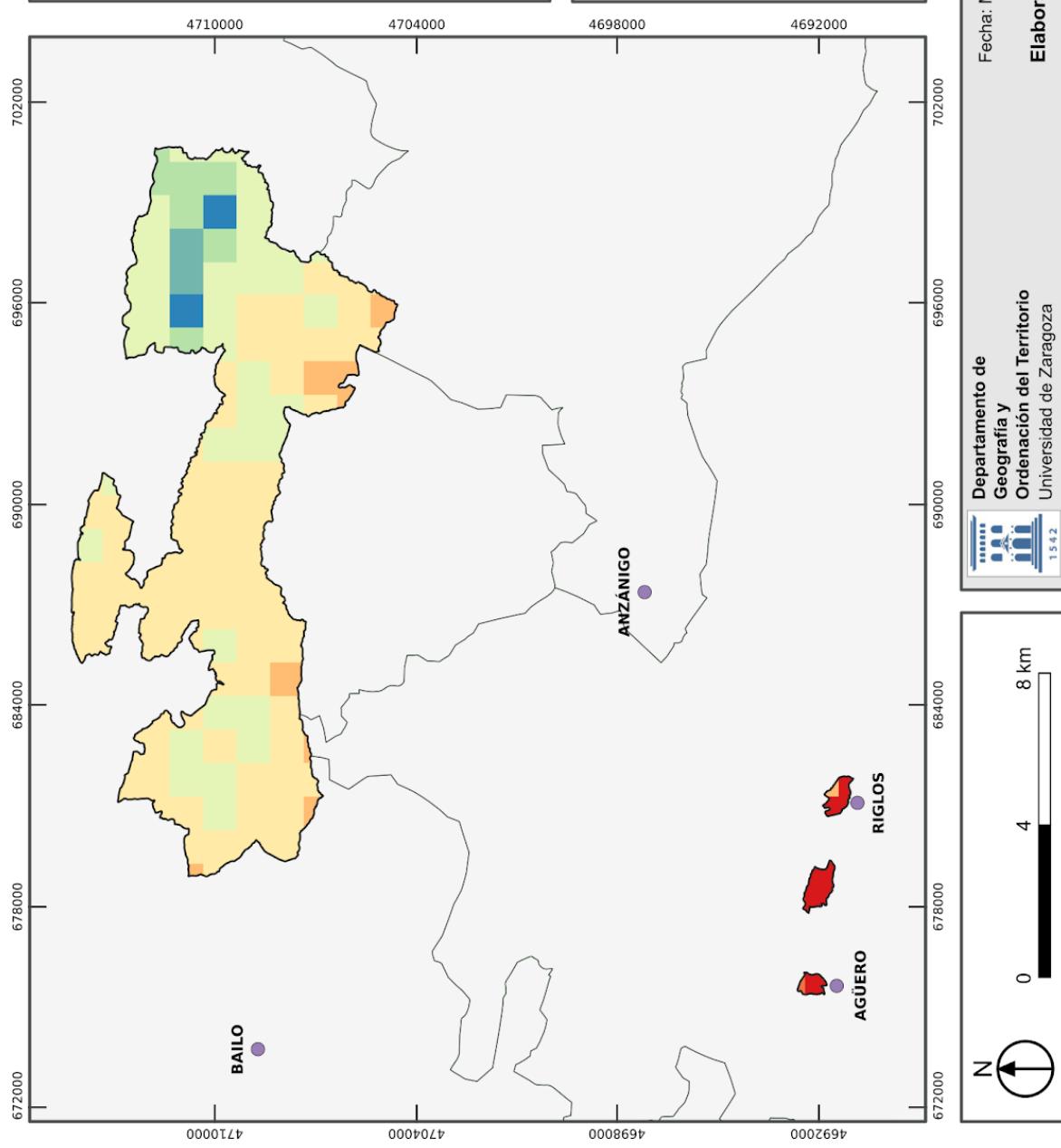
TEMPERATURA MÍNIMA DE PRIMAVERA ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



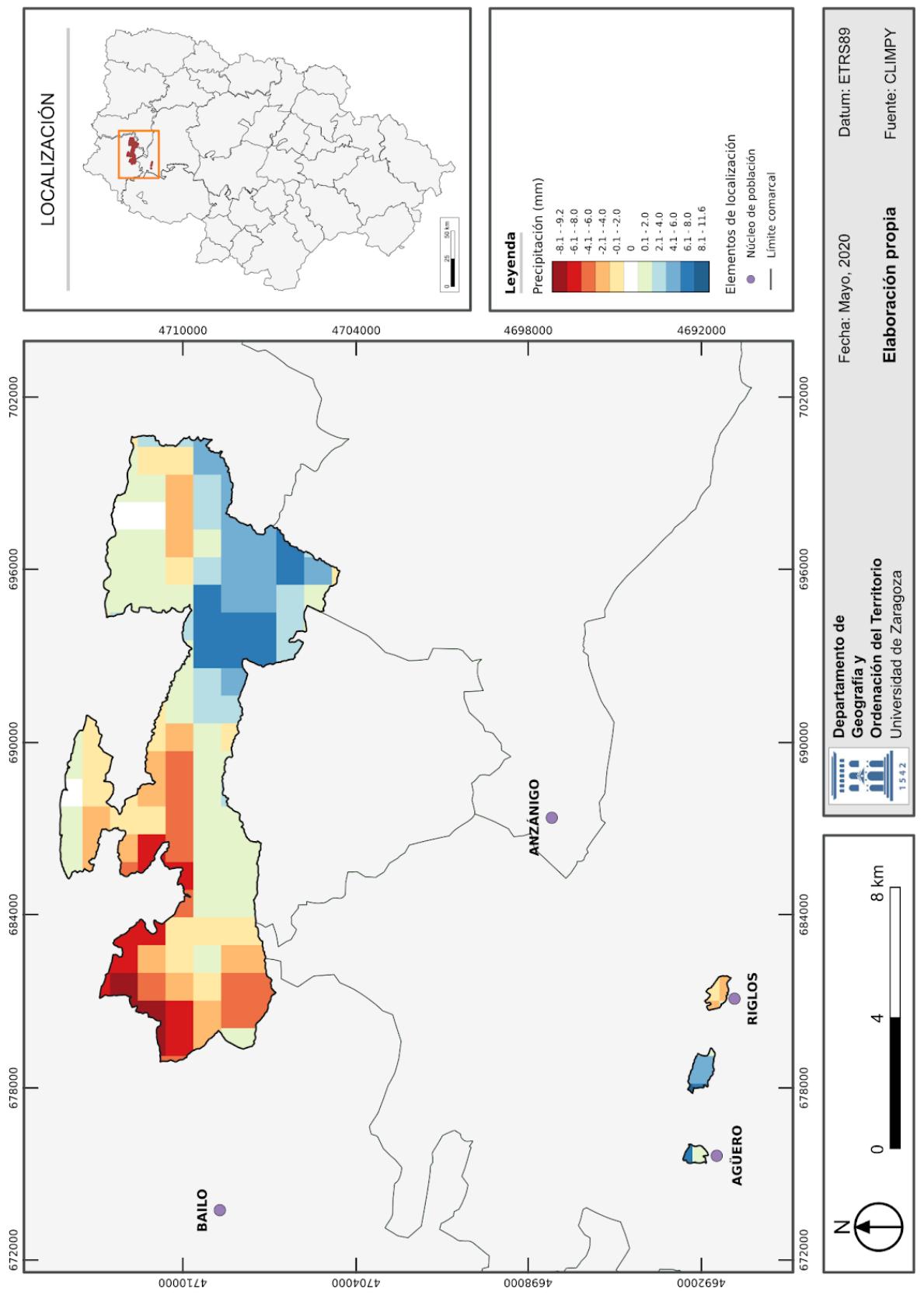
TEMPERATURA MÍNIMA DE VERANO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



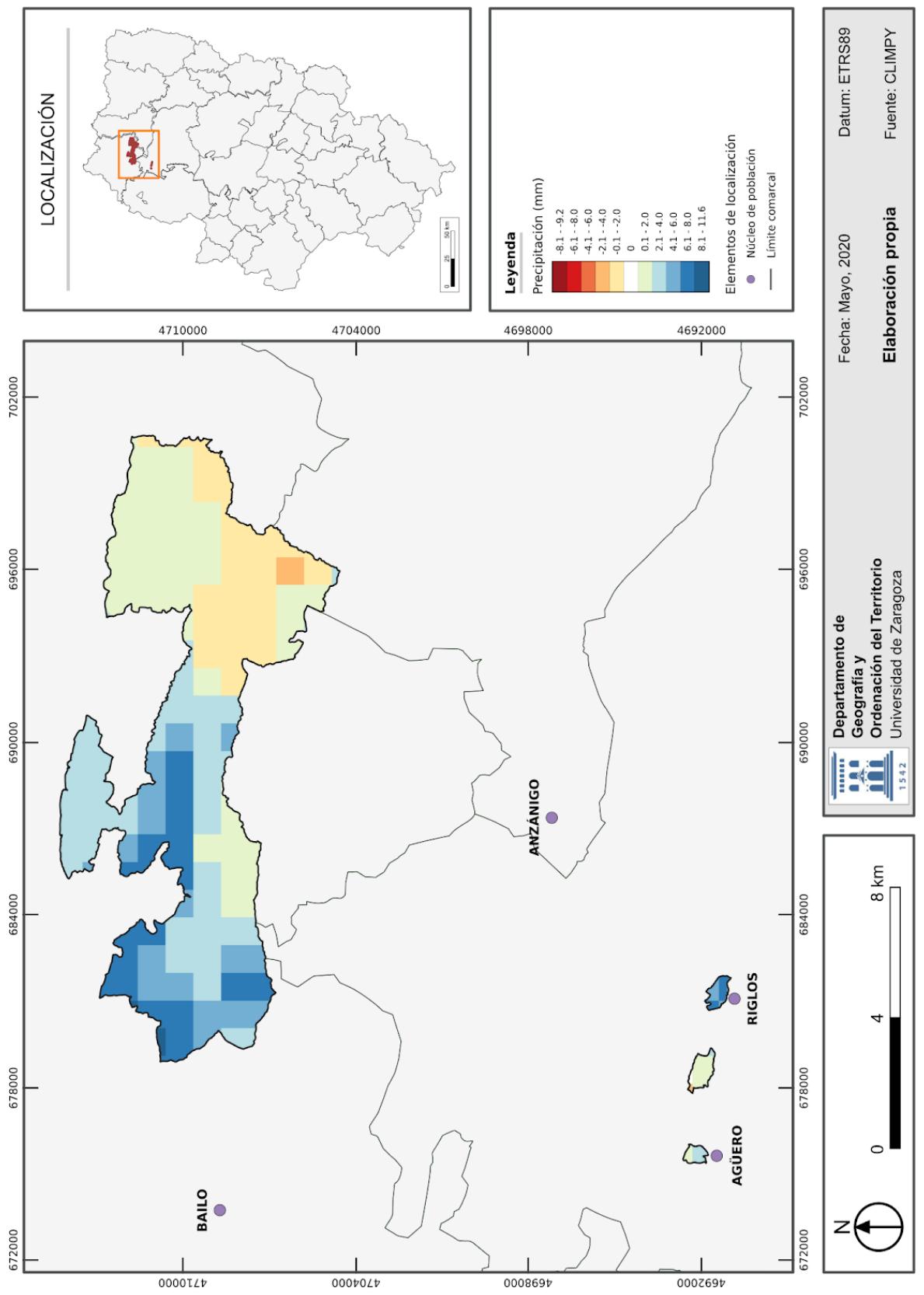
TEMPERATURA MÍNIMA DE OTOÑO ESTANDARIZADA EN LA ZONA DE ESTUDIO



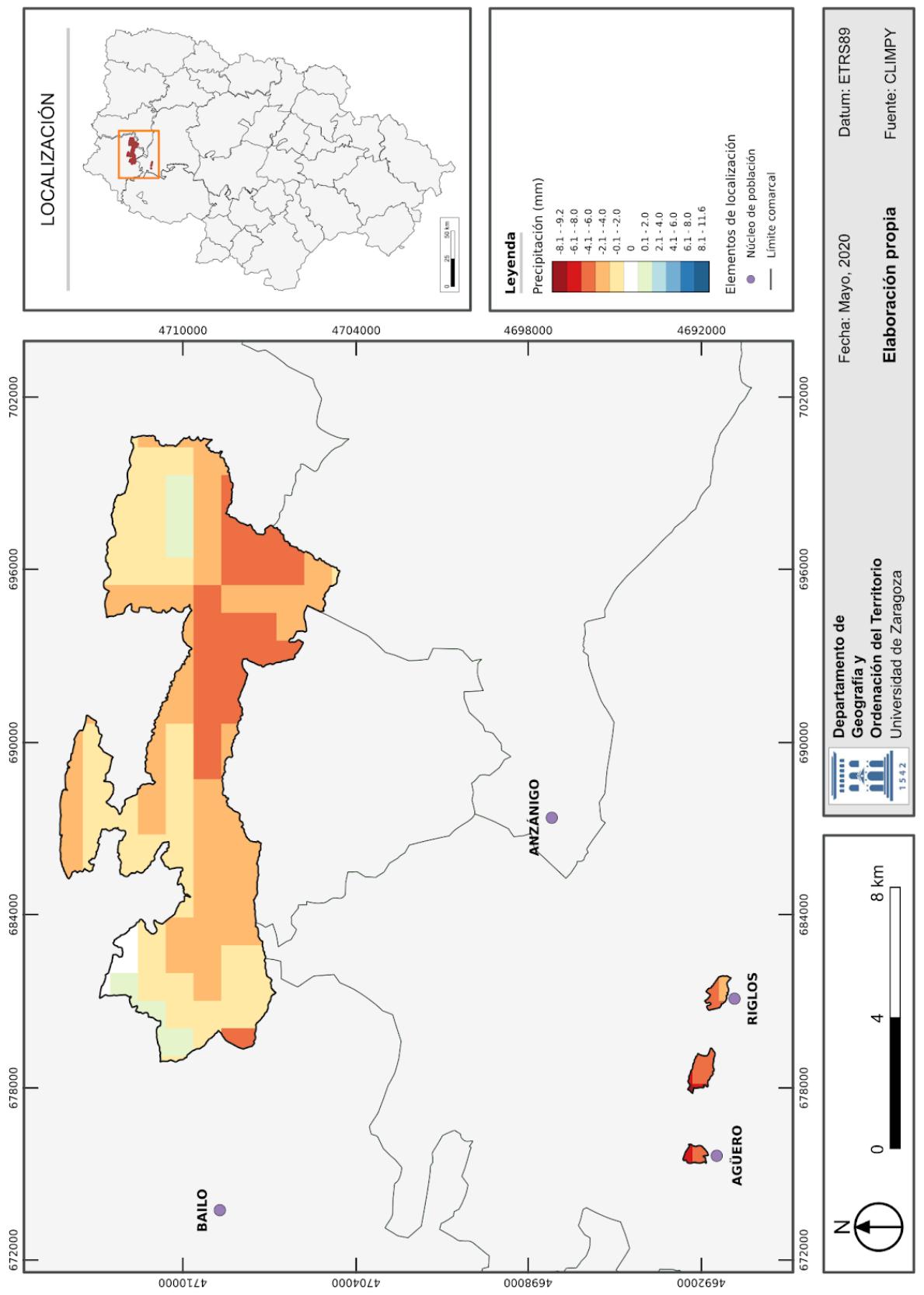
ANOMALÍA DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES (1981-1990) EN LA ZONA DE ESTUDIO



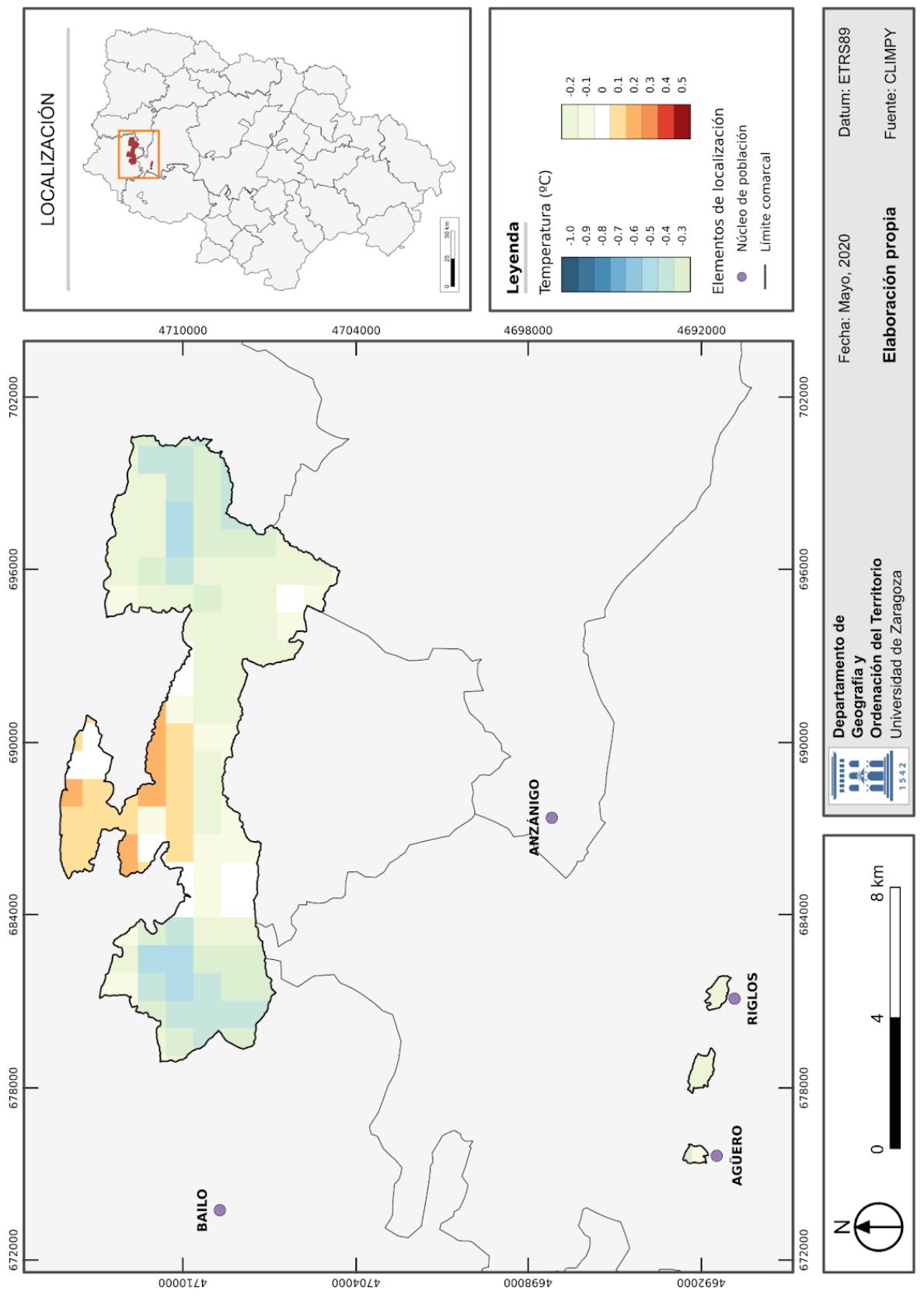
ANOMALÍA DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES (1991-2000) EN LA ZONA DE ESTUDIO



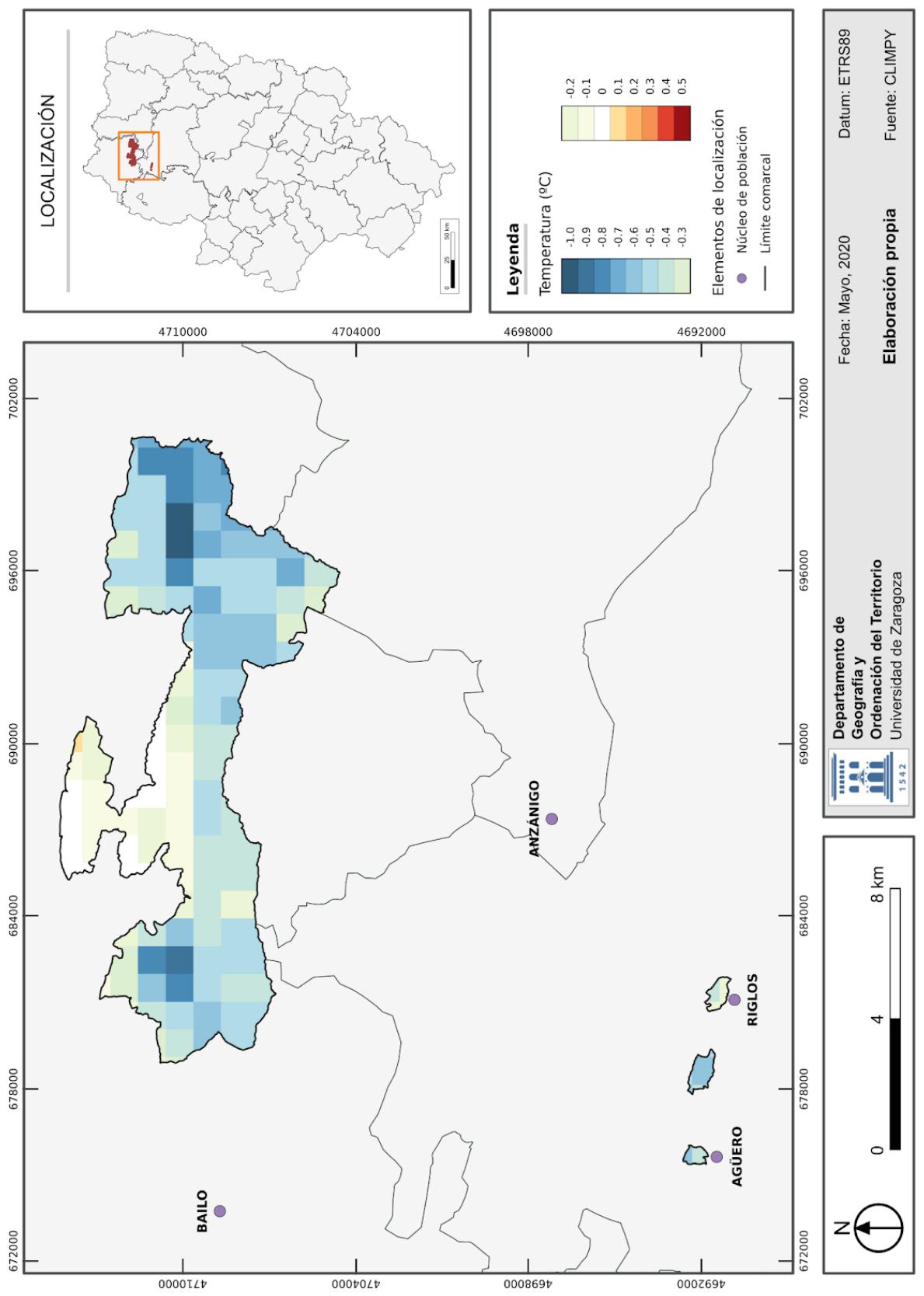
ANOMALÍA DE LAS PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES (2001-2010) EN LA ZONA DE ESTUDIO



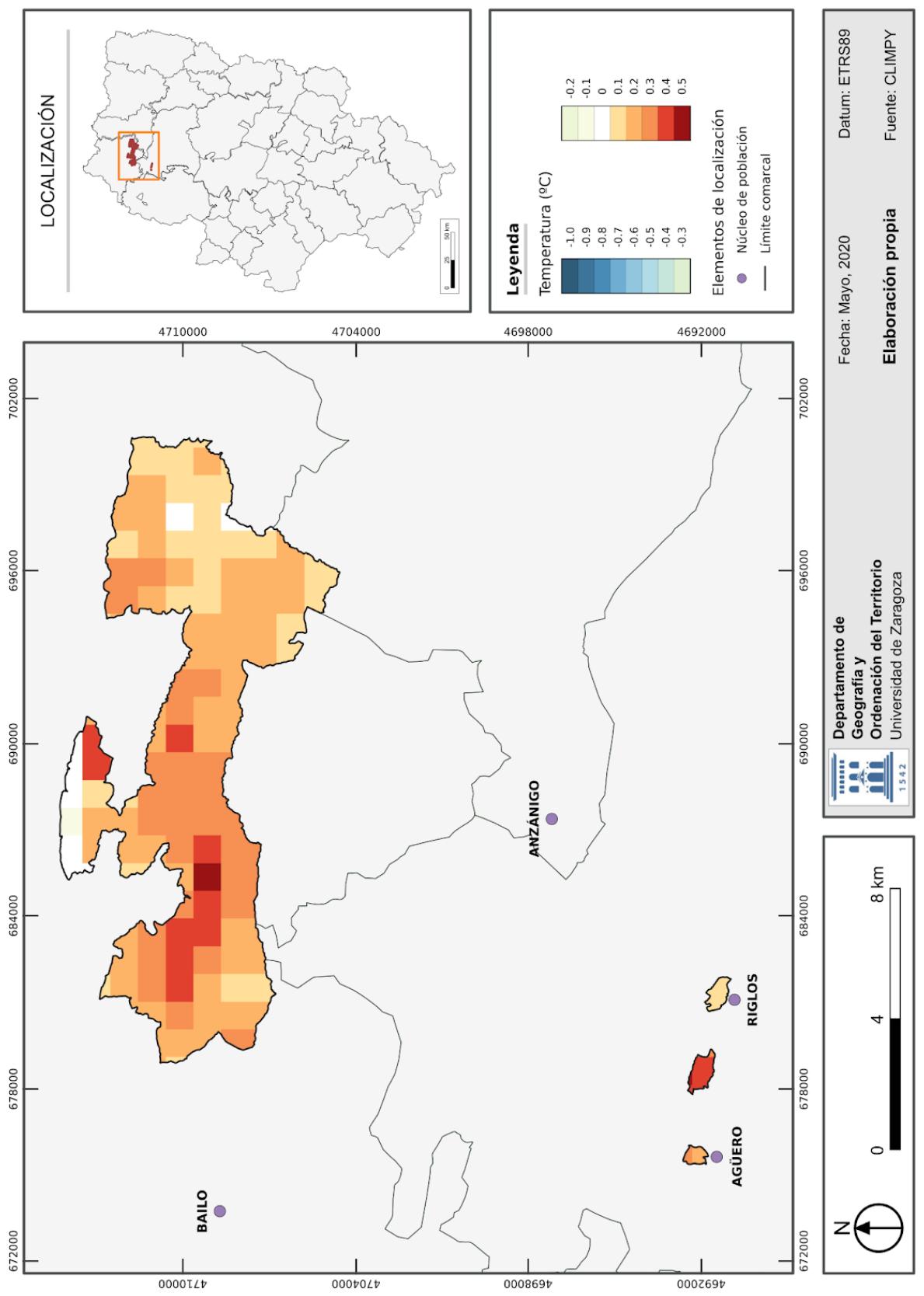
ANOMALÍA DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL (1981-1990) EN LA ZONA DE ESTUDIO



ANOMALÍA DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL (1991-2000) EN LA ZONA DE ESTUDIO



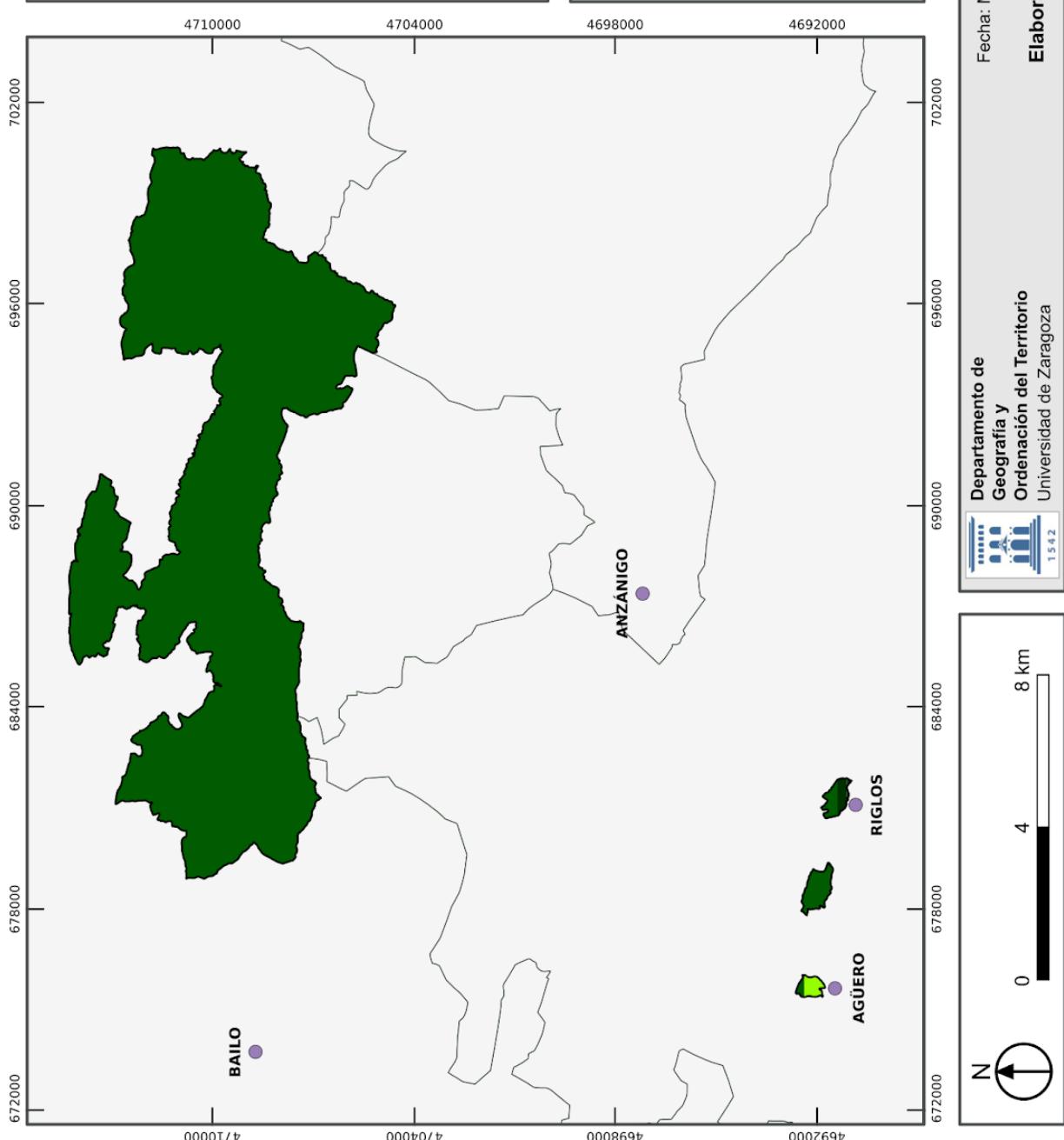
ANOMALÍA DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL (2001-2010) EN LA ZONA DE ESTUDIO



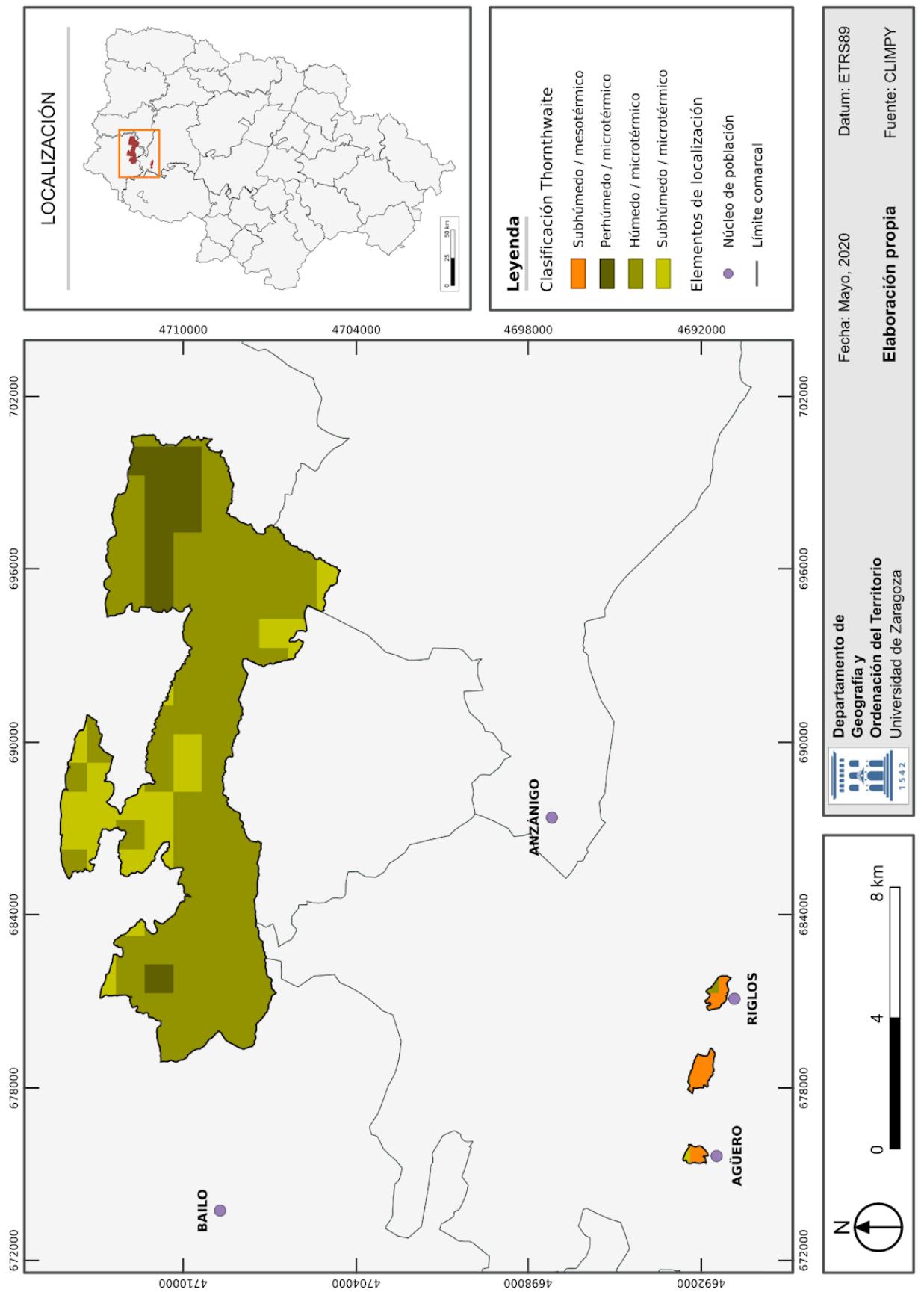
ANEXO VIII

MAPAS DEL APARTADO 3.2.3

CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN DEL PAÍSAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA



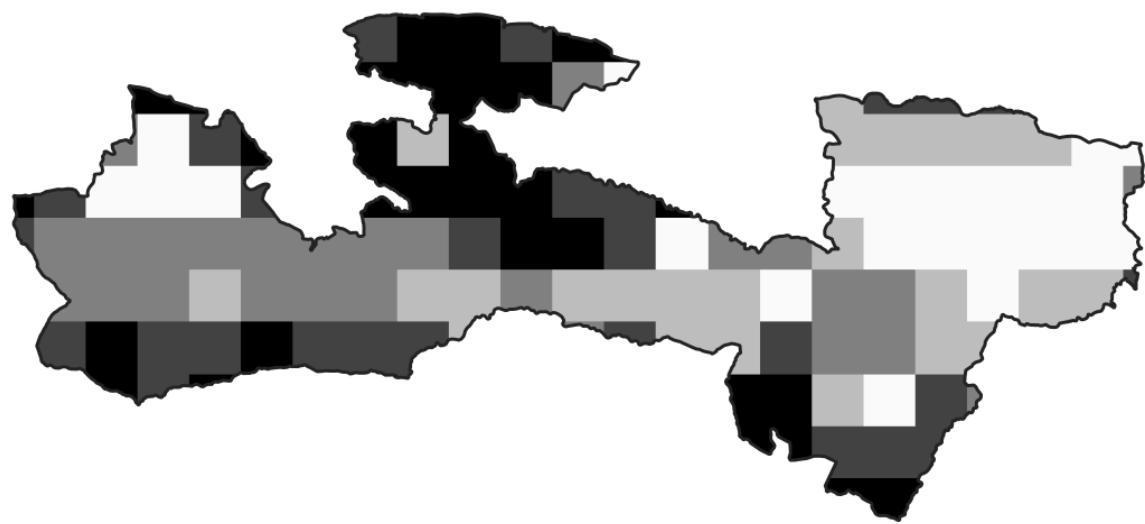
CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE THORNTHWAITE DEL PAÍSAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA



ANEXO IX

MAPAS DEL APARTADO 3.2.4

ESTACIONALIDAD DE LAS TEMPERATURAS EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

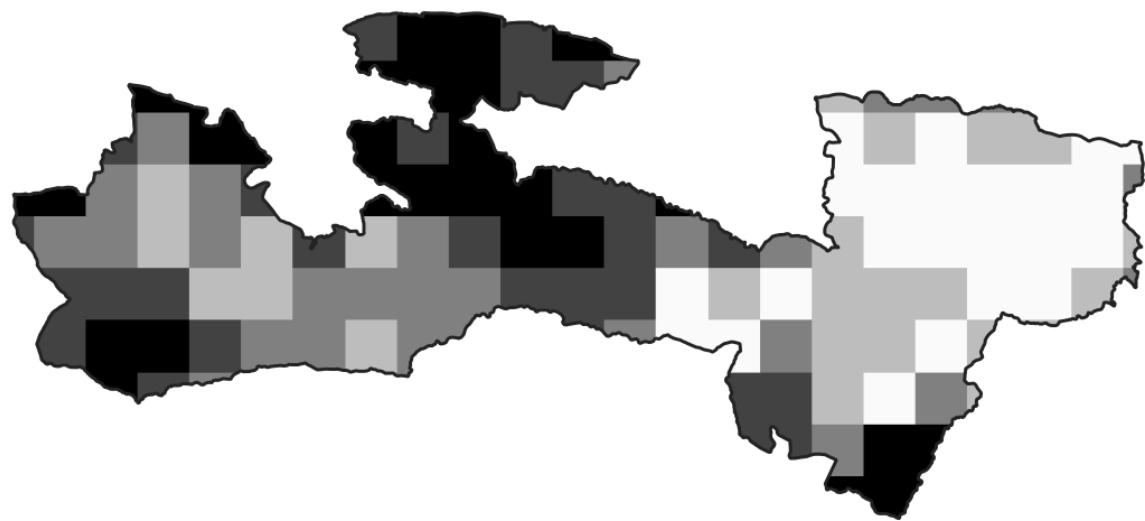
Temperatura (°C)

White	2.880 - 3.00
Light Gray	3.001 - 3.05
Medium Gray	3.051 - 3.08
Dark Gray	3.081 - 3.14
Black	3.141 - 3.53



0 2 4 km

ESTACIONALIDAD DE LAS PRECIPITACIONES EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

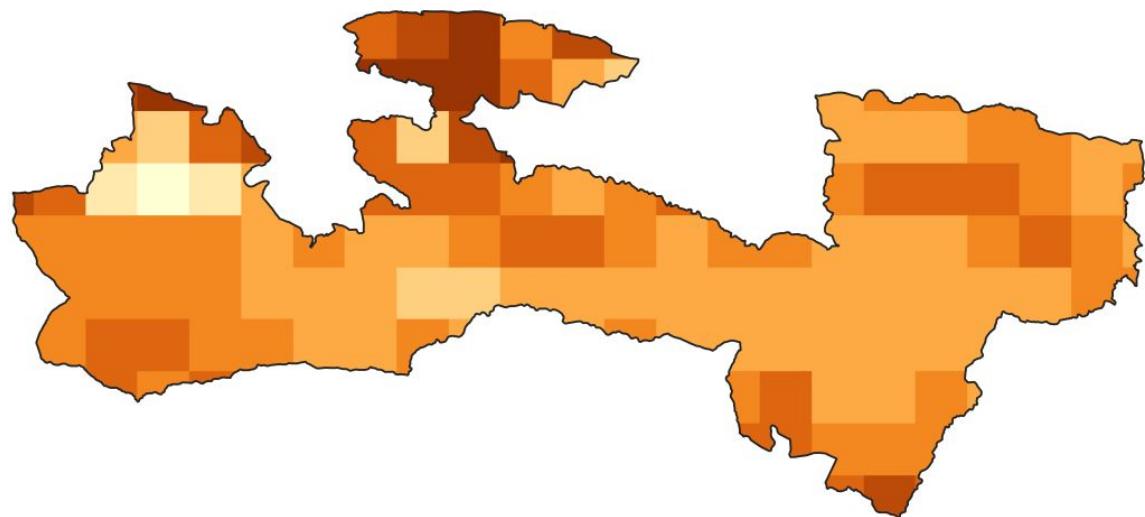
Precipitación (mm)

Lightest Gray	21.20 - 22.3
Light Gray	22.31 - 23.5
Medium Gray	23.51 - 25.1
Dark Gray	25.11 - 28.2
Black	28.21 - 32.7



0 2 4 km

AMPLITUD TÉRMICA MEDIA DIARIA EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

Temperatura (°C)

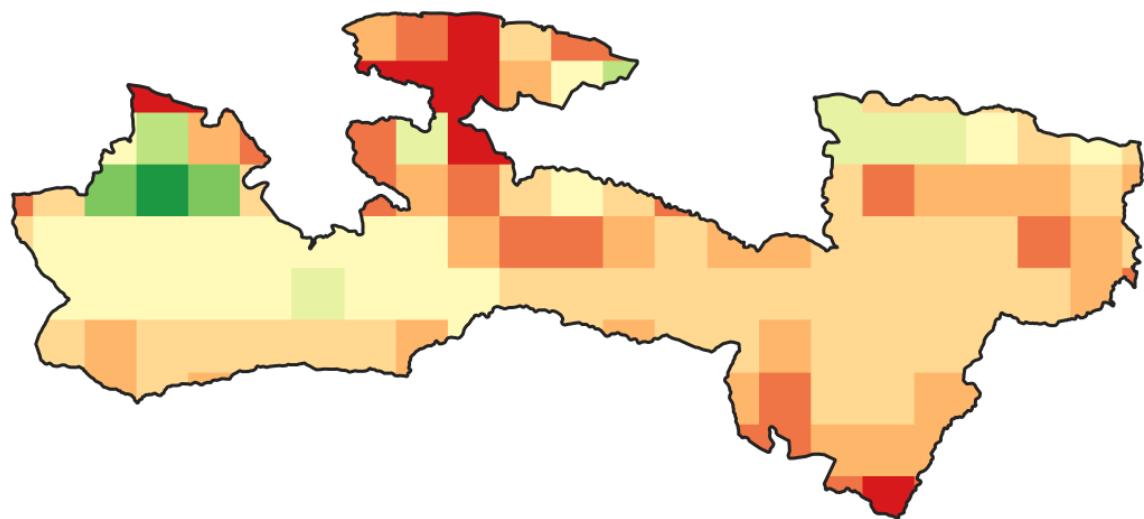
8.65 - 9.00
9.01 - 9.50
9.51 - 10.0
10.01 - 10.5
10.51 - 11.0
11.01 - 11.5
11.51 - 12.0
12.01 - 12.5



0 2 4 km



AMPLITUD TÉRMICA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

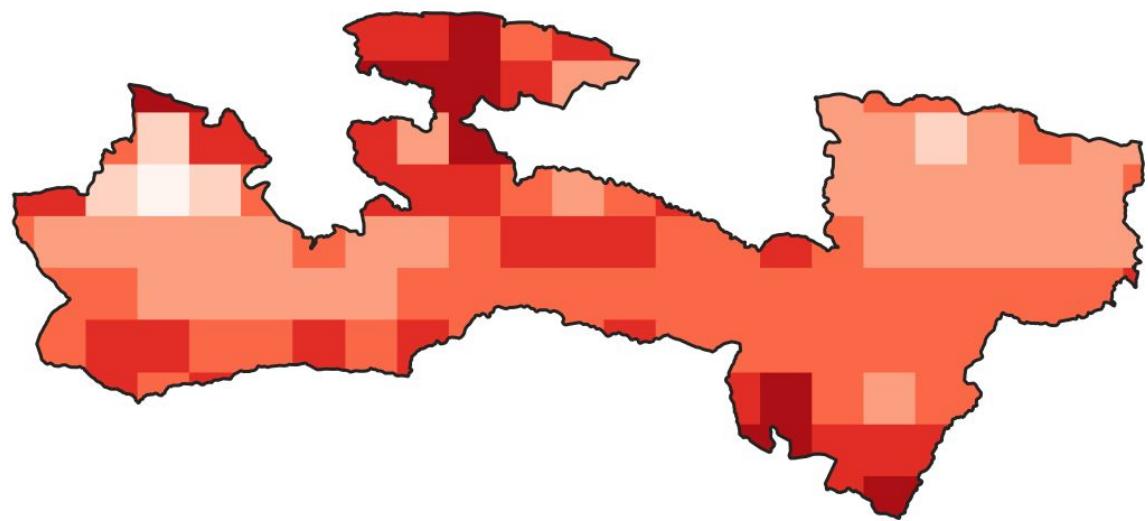
Temperatura (°C)

24.85 - 25.0
25.01 - 26.0
26.01 - 26.5
26.51 - 27.0
27.01 - 27.5
27.51 - 28.0
28.01 - 28.5
28.51 - 29.0
29.01 - 29.8



0 2 4 km

TEMPERATURA MÁXIMA DEL MES MÁS CÁLIDO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

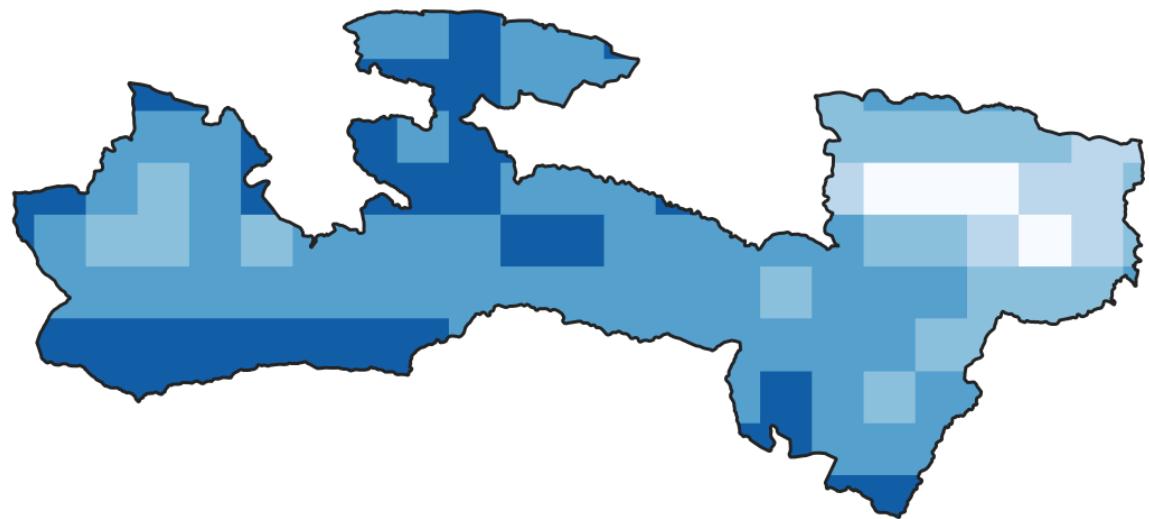
Temperatura (°C)

23.0 - 24.0
24.1 - 25.0
25.1 - 26.0
26.1 - 27.0
27.1 - 28.0
28.1 - 29.0
29.1 - 29.7



0 2 4 km

TEMPERATURA MÍNIMA DEL MES MÁS FRÍO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

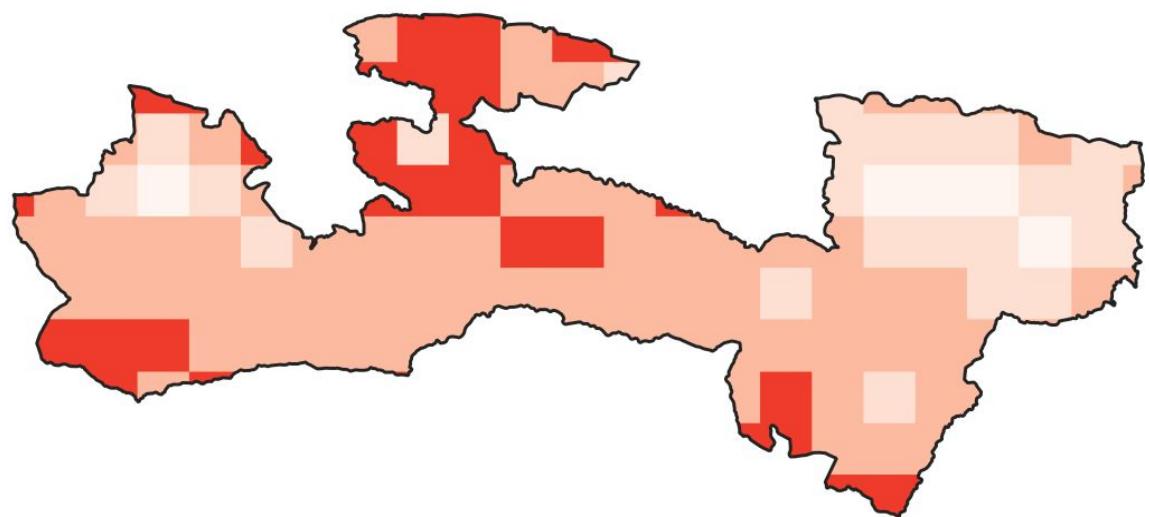
Temperatura (°C)

	-3.01 - -3.3
	-2.51 - -3.0
	-2.01 - -2.5
	-1.51 - -2.0
	-1.01 - -1.5
	-0.01 - -1.0
+	0.00 - 0.41



0 2 4 km

TEMPERATURA MEDIA DEL PERÍODO MÁS CÁLIDO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

Temperatura (°C)

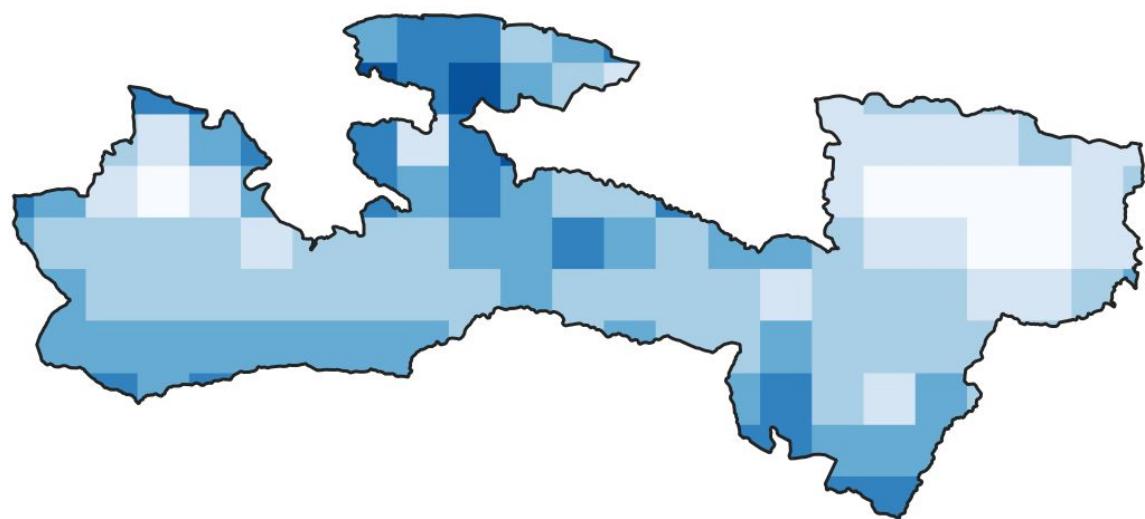
Light Orange	17.6 - 18.0
Light Orange	18.1 - 19.0
Light Orange	19.1 - 20.0
Dark Red	20.1 - 21.0
Dark Red	21.1 - 22.2



0 2 4 km

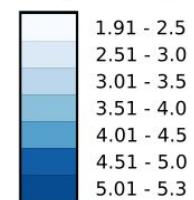


TEMPERATURA MEDIA DEL PERÍODO MÁS FRÍO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

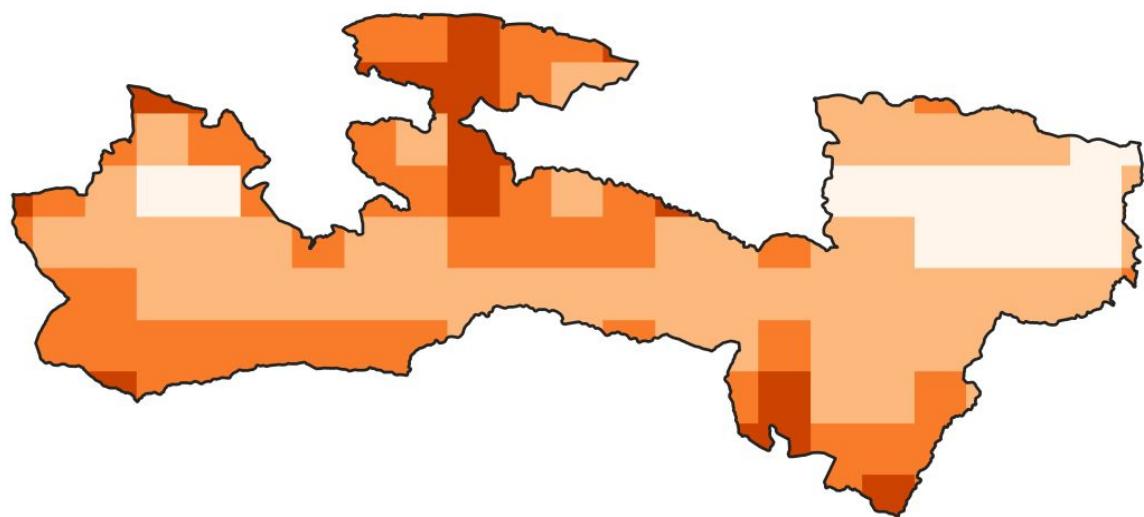
Temperatura (°C)



0 2 4 km



TEMPERATURA MEDIA DEL PERÍODO MÁS SECO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

Temperatura (°C)

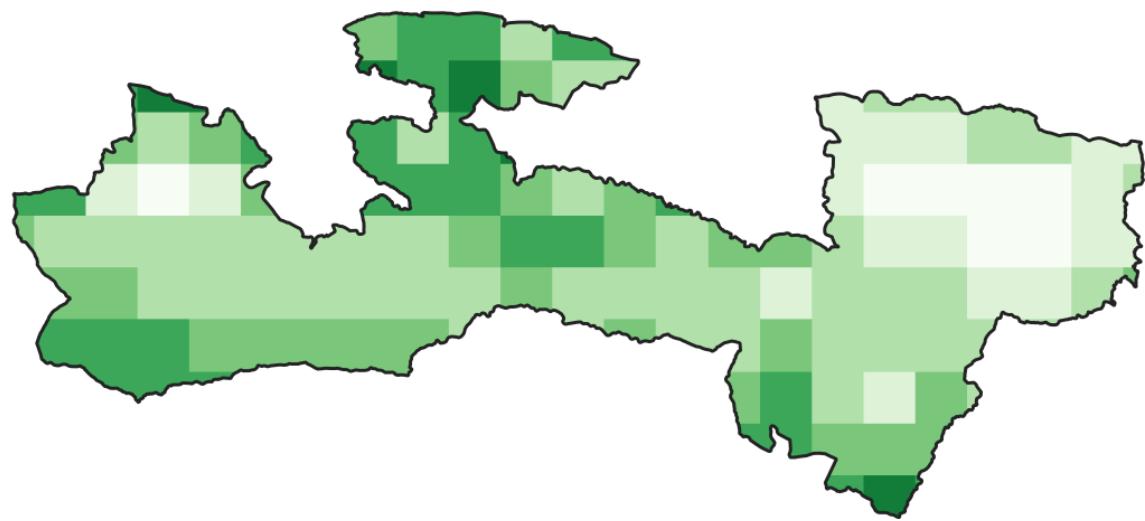
11.0 - 12.0
12.1 - 13.0
13.1 - 14.0
14.1 - 15.0
15.1 - 15.8



0 2 4 km



TEMPERATURA MEDIA DEL PERÍODO MÁS HÚMEDO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

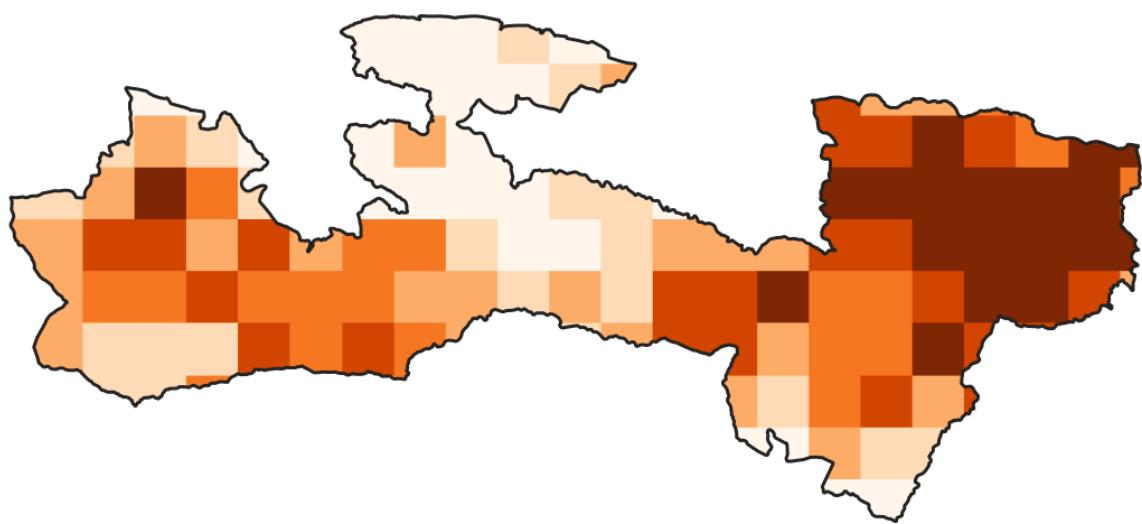
Temperatura (°C)

4.43 - 5.00
5.01 - 5.50
5.51 - 6.00
6.01 - 6.50
6.51 - 7.00
7.01 - 7.50
7.51 - 7.99



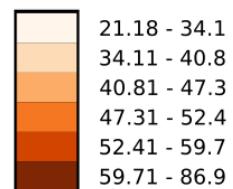
0 2 4 km

PRECIPITACIÓN DEL MES MÁS SECO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

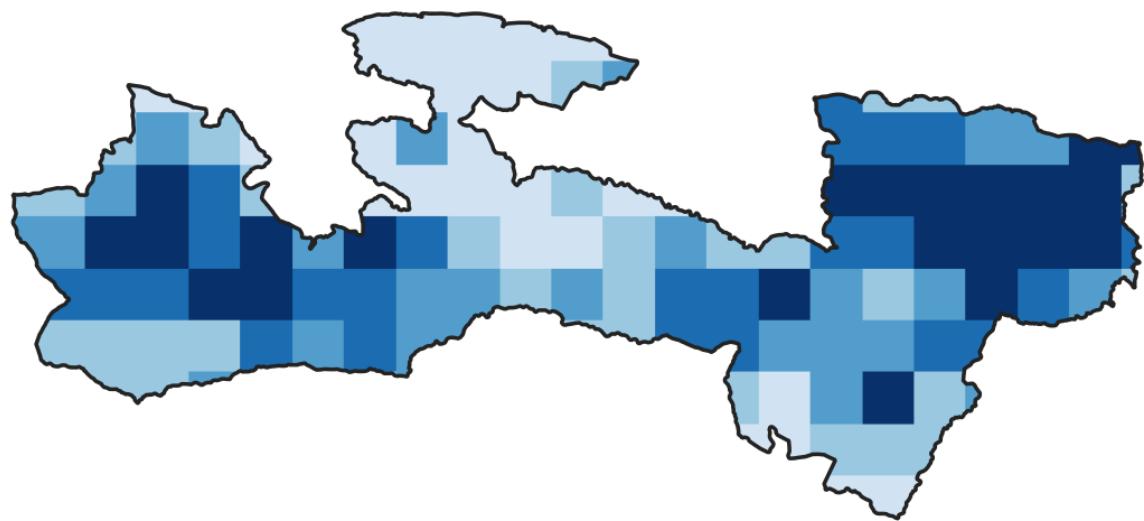
Precipitación (mm)



0 2 4 km

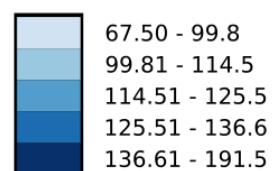


PRECIPITACIÓN DEL MES MÁS HÚMEDO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

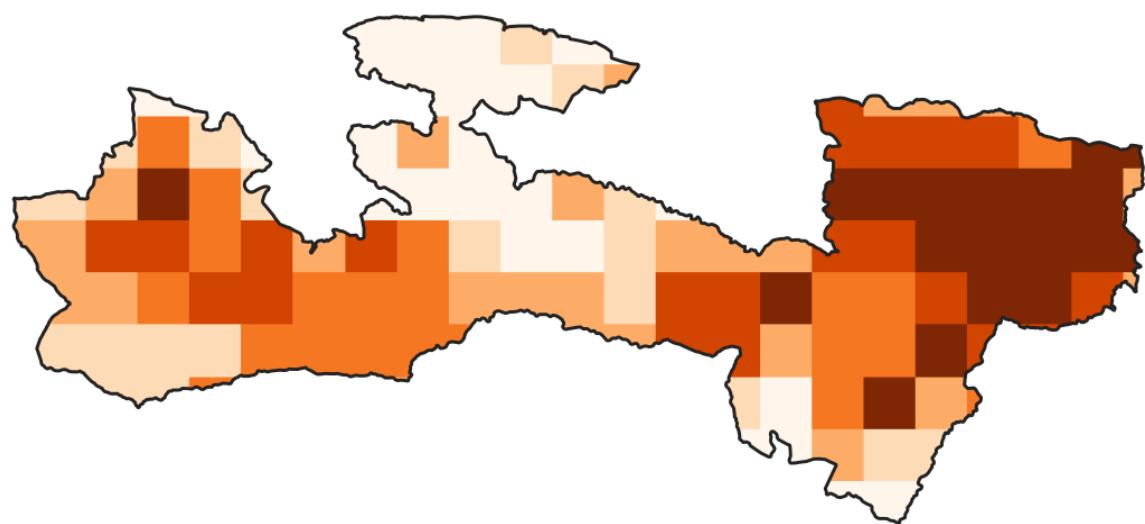
Precipitación (mm)



0 2 4 km

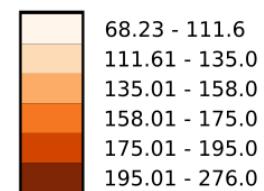


PRECIPITACIÓN DEL PERÍODO MÁS SECO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

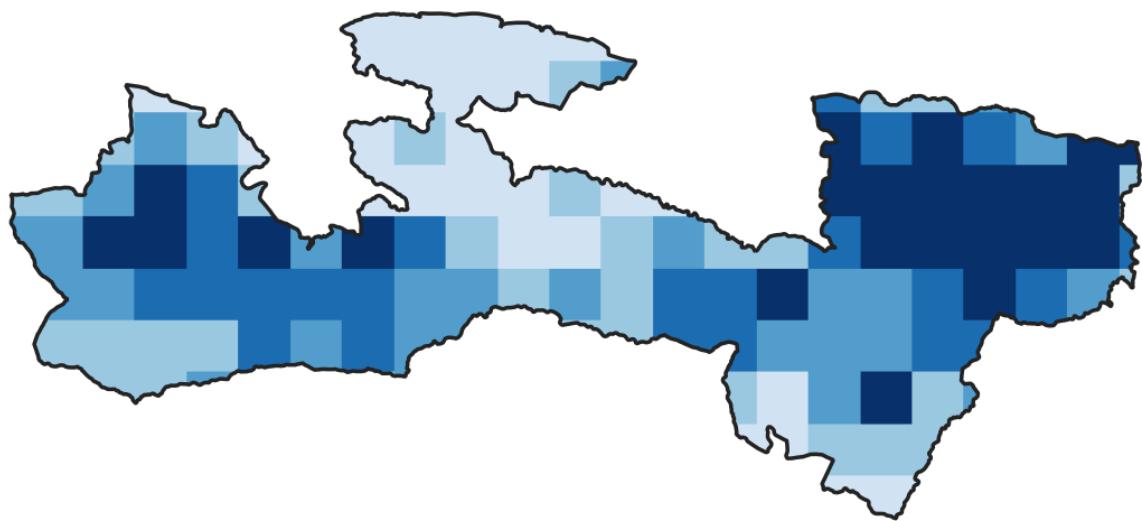
Precipitación (mm)



0 2 4 km

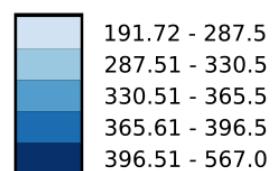


PRECIPITACIÓN DEL PERÍODO MÁS HÚMEDO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

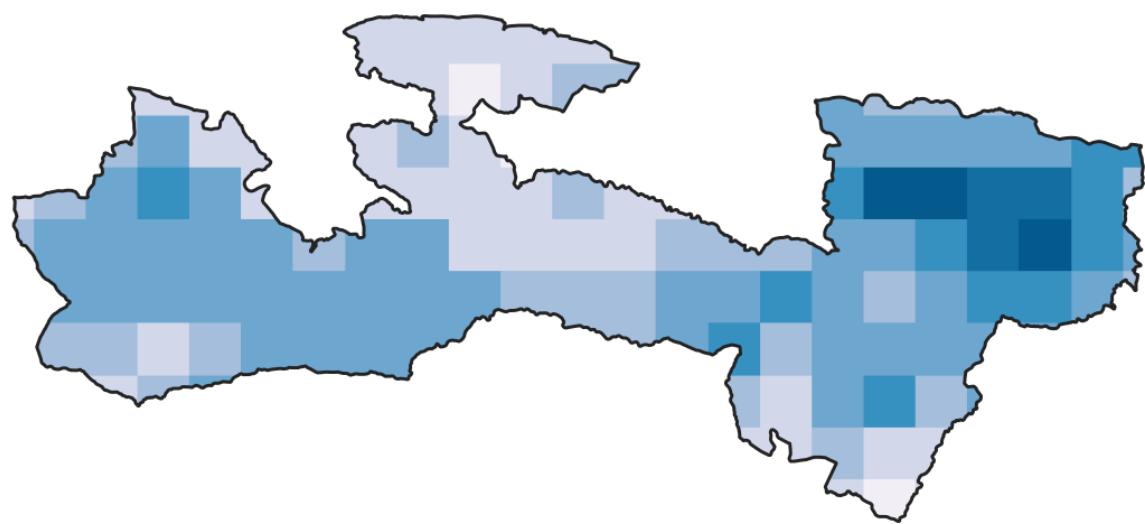
Precipitación (mm)



0 2 4 km



PRECIPITACIÓN DEL PERÍODO MÁS CÁLIDO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

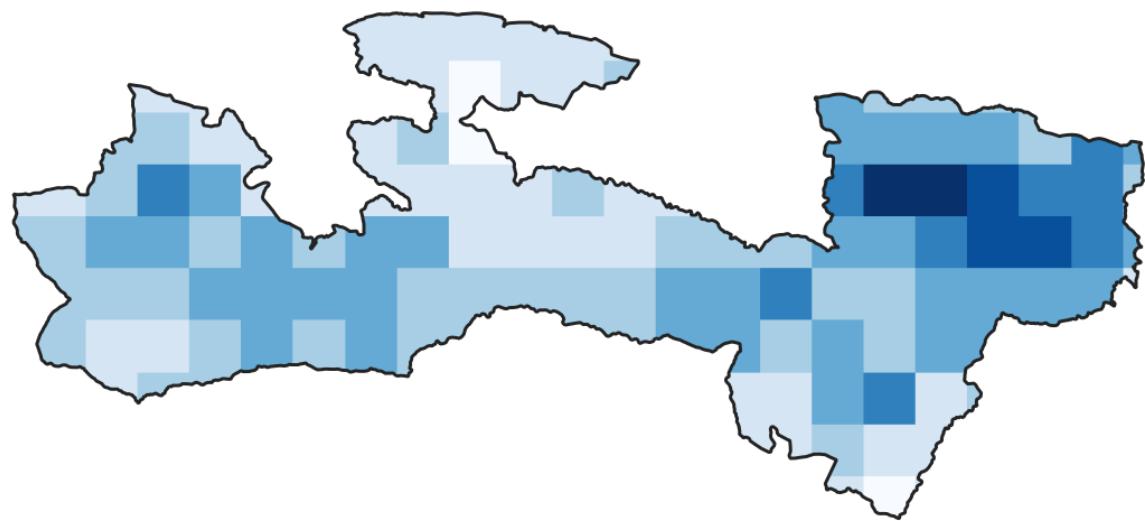
Precipitación (mm)

134.0 - 180
180.1 - 220
220.1 - 270
270.1 - 320
320.1 - 370
370.1 - 420
420.1 - 447



0 2 4 km

PRECIPITACIÓN DEL PERÍODO MÁS FRÍO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Leyenda

Precipitación (mm)

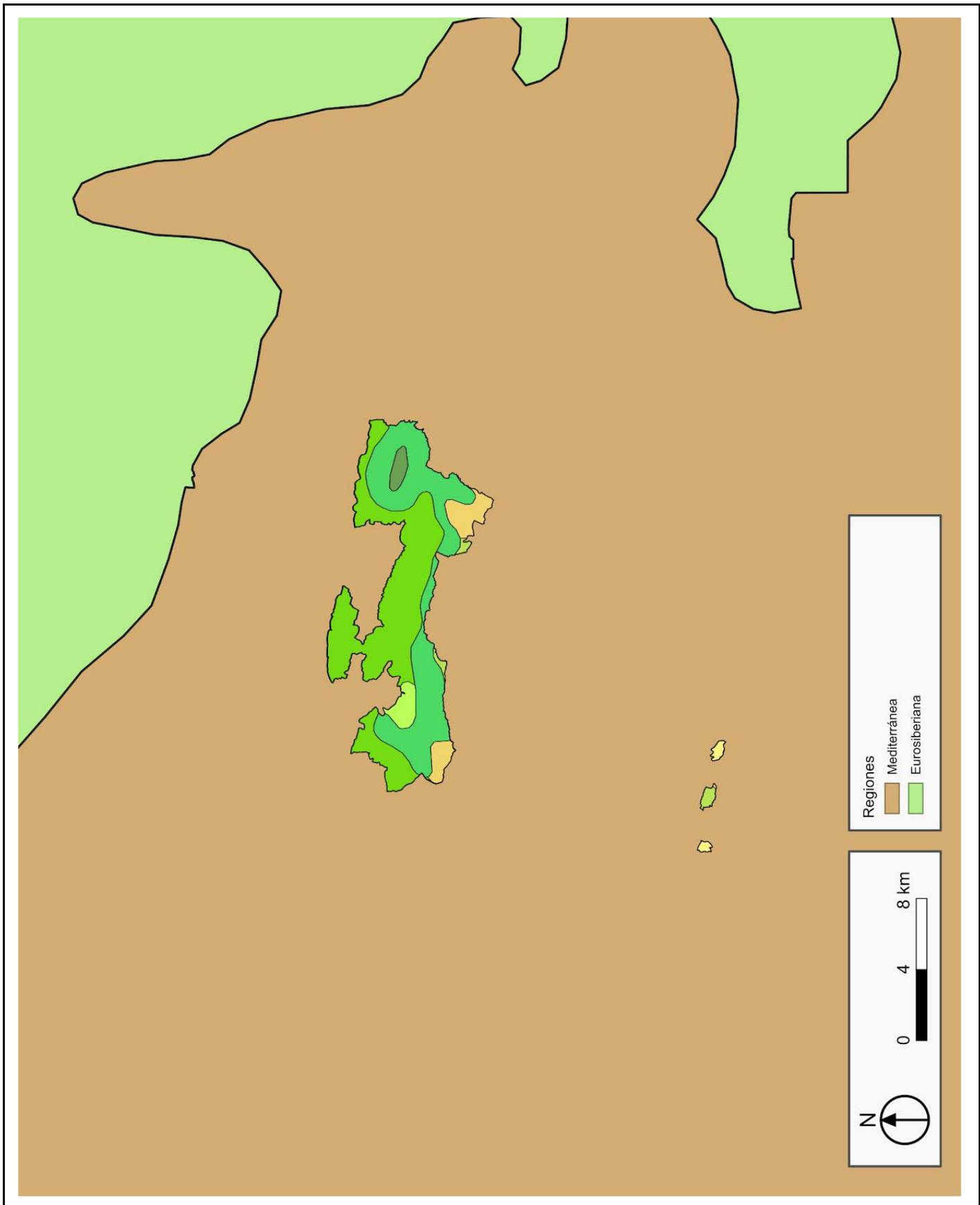
153.0 - 200
200.1 - 250
250.1 - 300
300.1 - 350
350.1 - 400
400.1 - 450
450.1 - 477



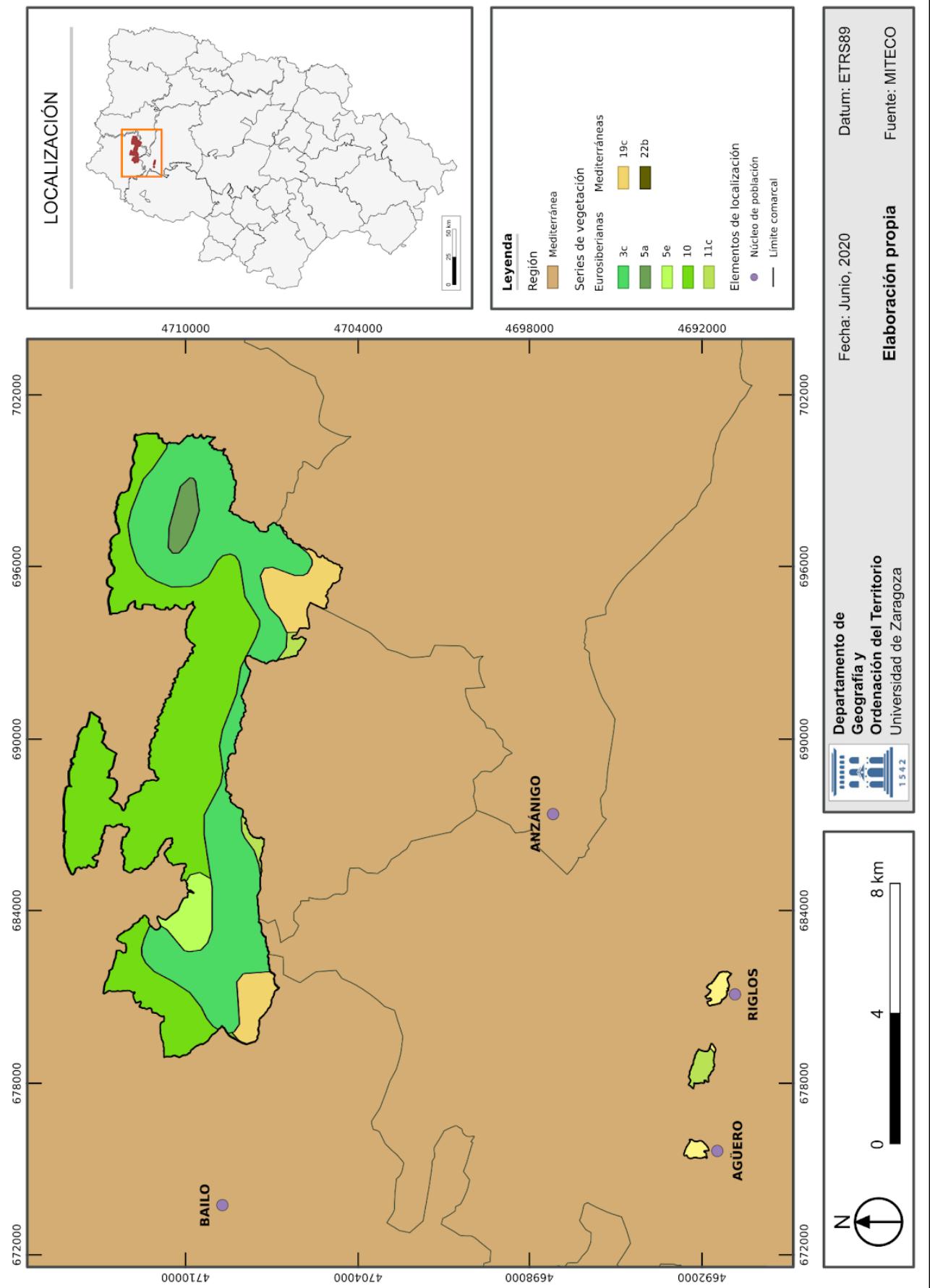
0 2 4 km

ANEXO X

MAPAS DEL APARTADO 3.3.2



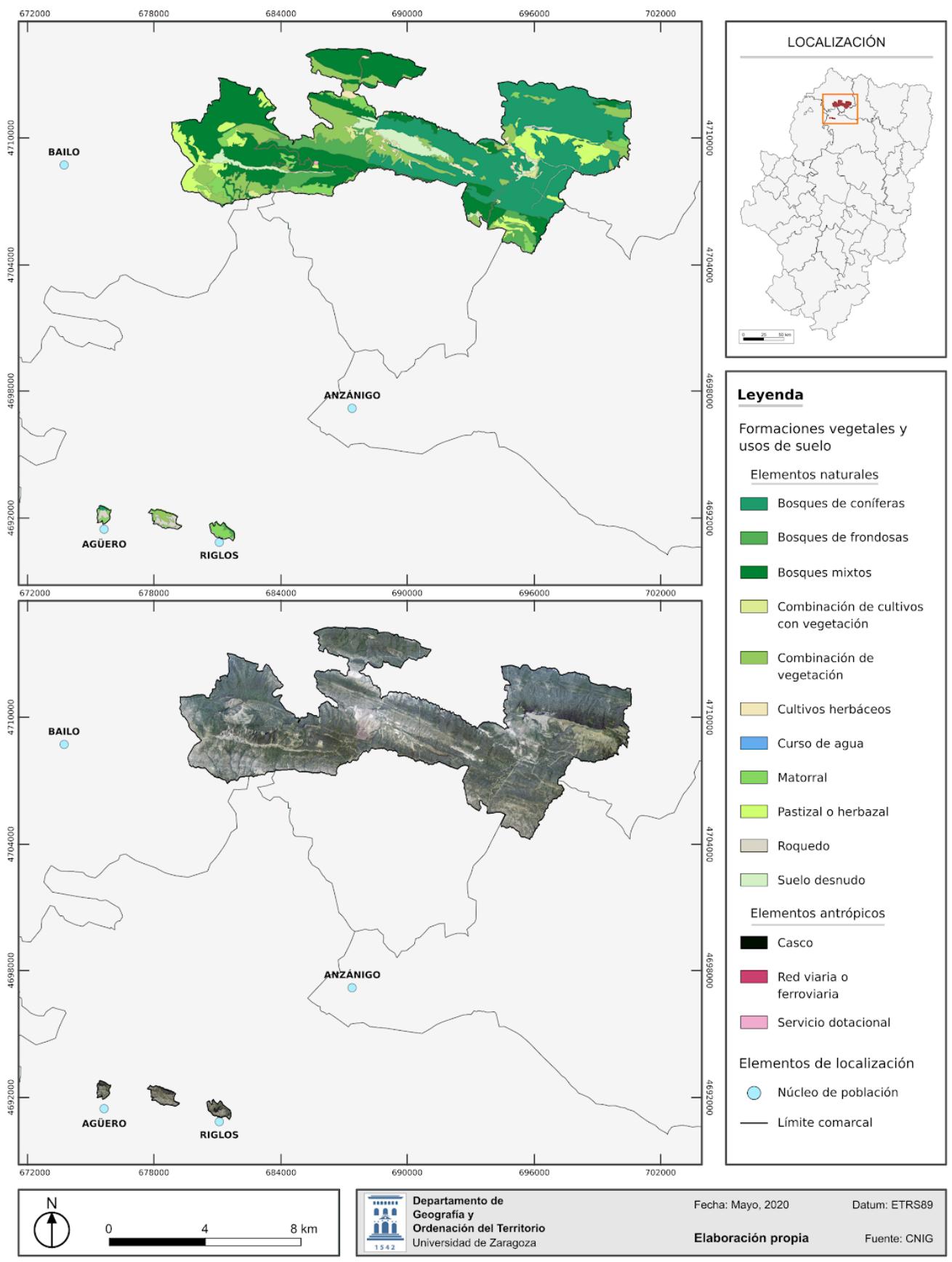
SERIES DE VEGETACIÓN (RIVAS MARTÍNEZ, 1987) EN LA ZONA DE ESTUDIO



ANEXO XI

MAPAS DEL APARTADO 3.3.3

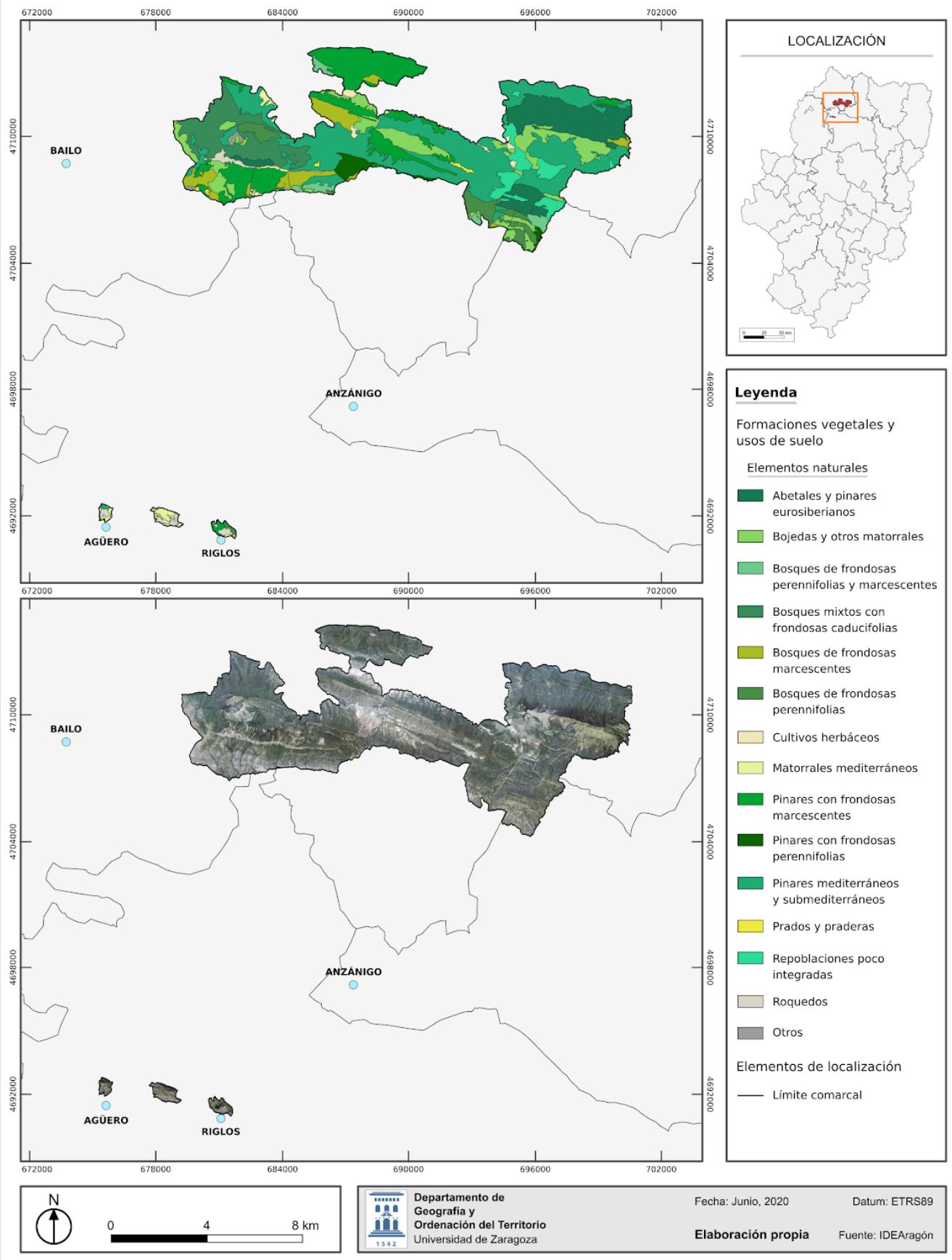
FORMACIONES VEGETALES Y USOS DE SUELO SEGÚN SIOSE DEL PAISAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA



ANEXO XII

MAPAS DEL APARTADO 3.3.4

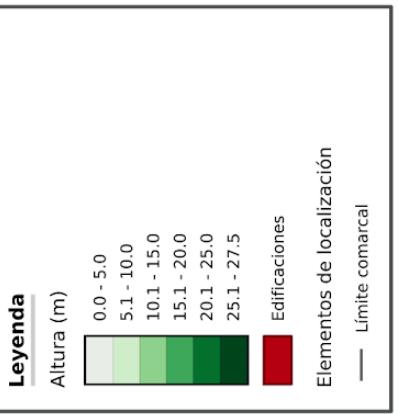
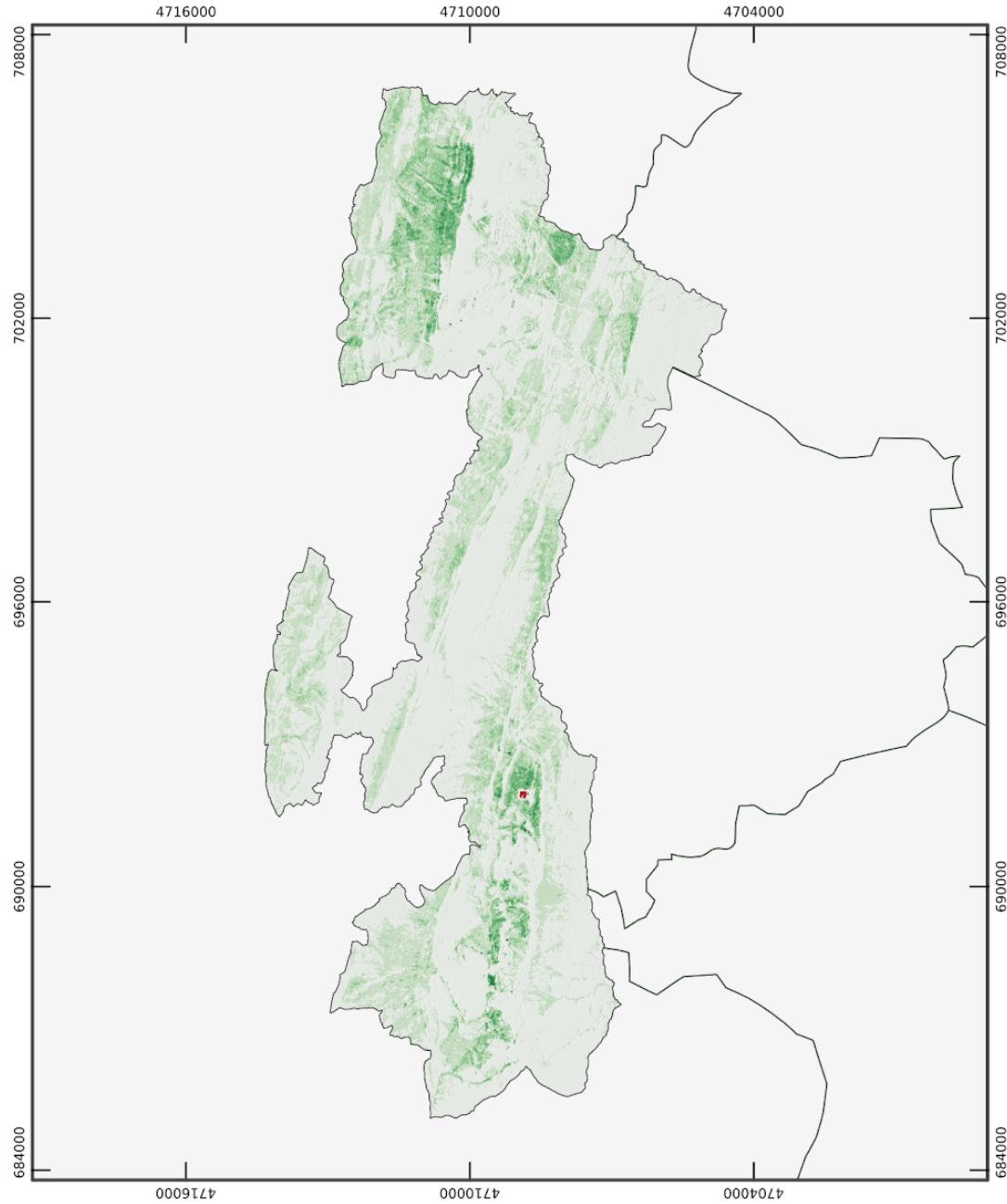
FORMACIONES VEGETALES Y USOS DE SUELO SEGÚN EL MAPA DE PAISAJES DEL PAISAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA



ANEXO XIII

MAPAS DEL APARTADO 3.3.5

ALTURA DE LA VEGETACIÓN PRESENTE EN EL PAISAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL



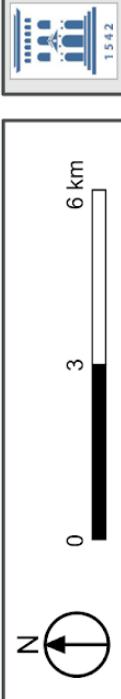
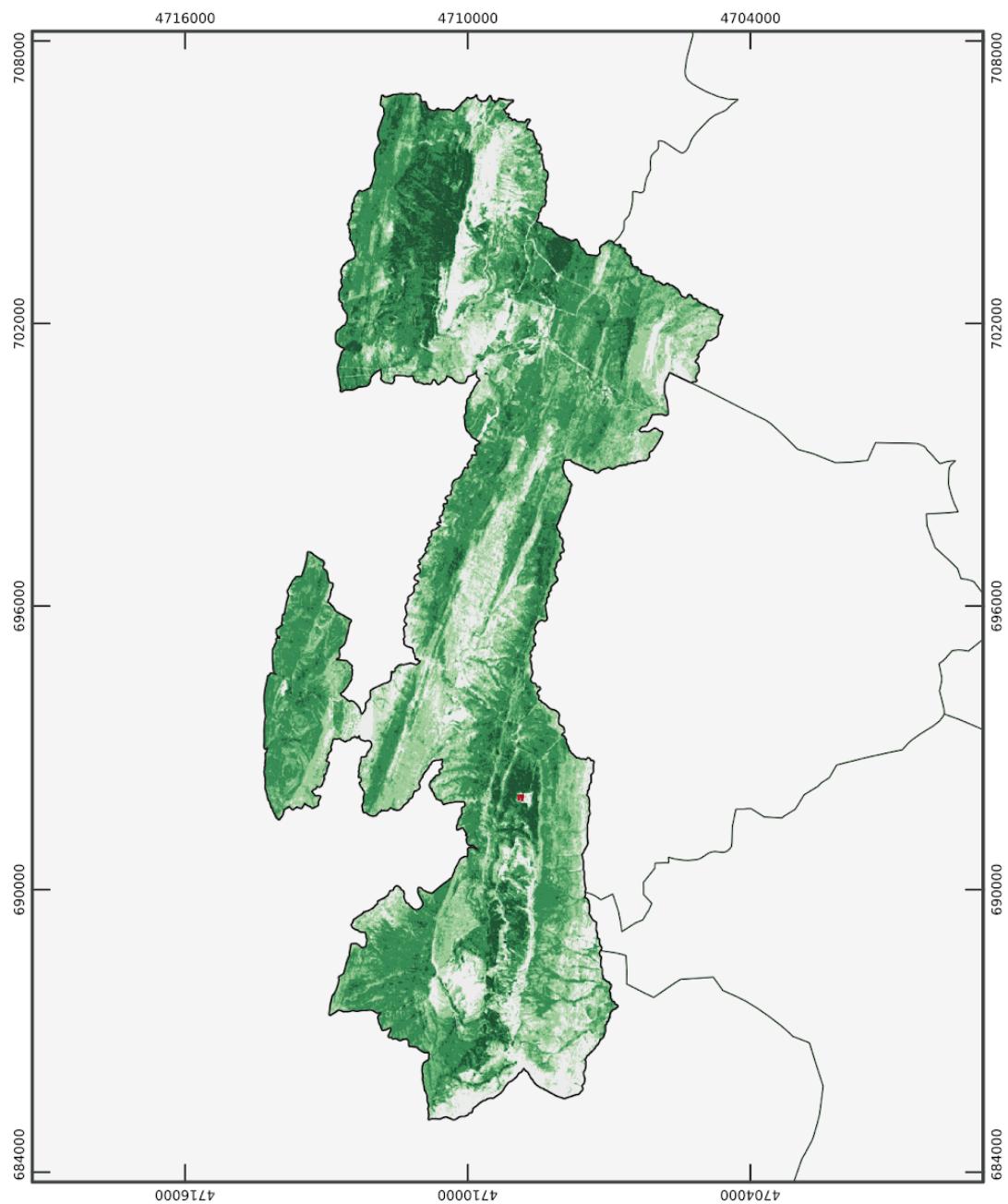
Datum: ETRS89
Fuente: CNIG

Fecha: Junio, 2020
Elaboración propia

Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad de Zaragoza
15.42

6 km
3
0
N

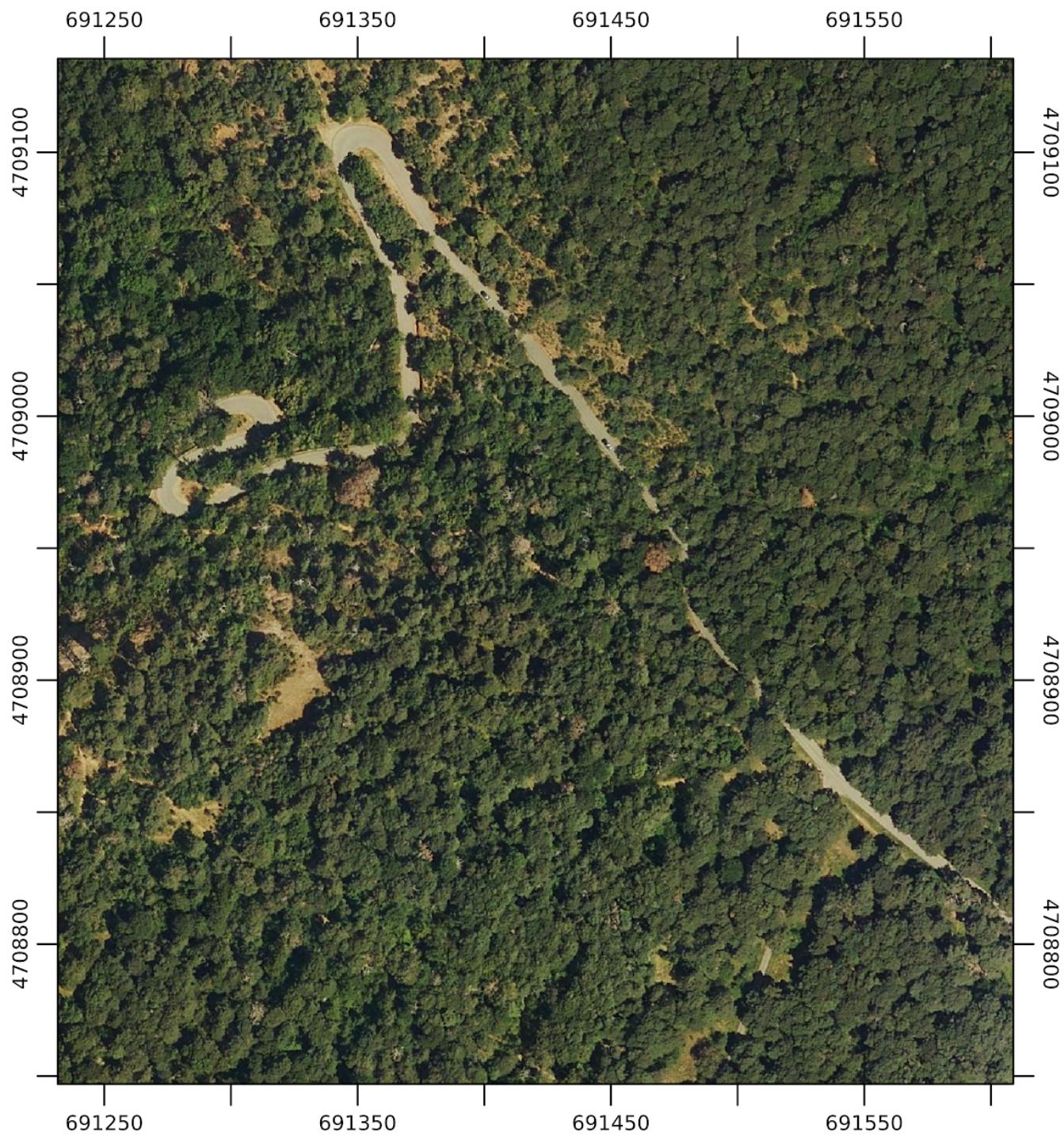
ESTRATOS DE VEGETACIÓN PRESENTES EN EL PAISAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL



Fecha: Junio, 2020
Elaboración propia
Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio
Universidad de Zaragoza
1542

Datum: ETRS89
Fuente: CNIG

ORTOFOTO PNOA ACTUAL DE UN SECTOR DEL PAISAJE
PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL



Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad de Zaragoza
1542

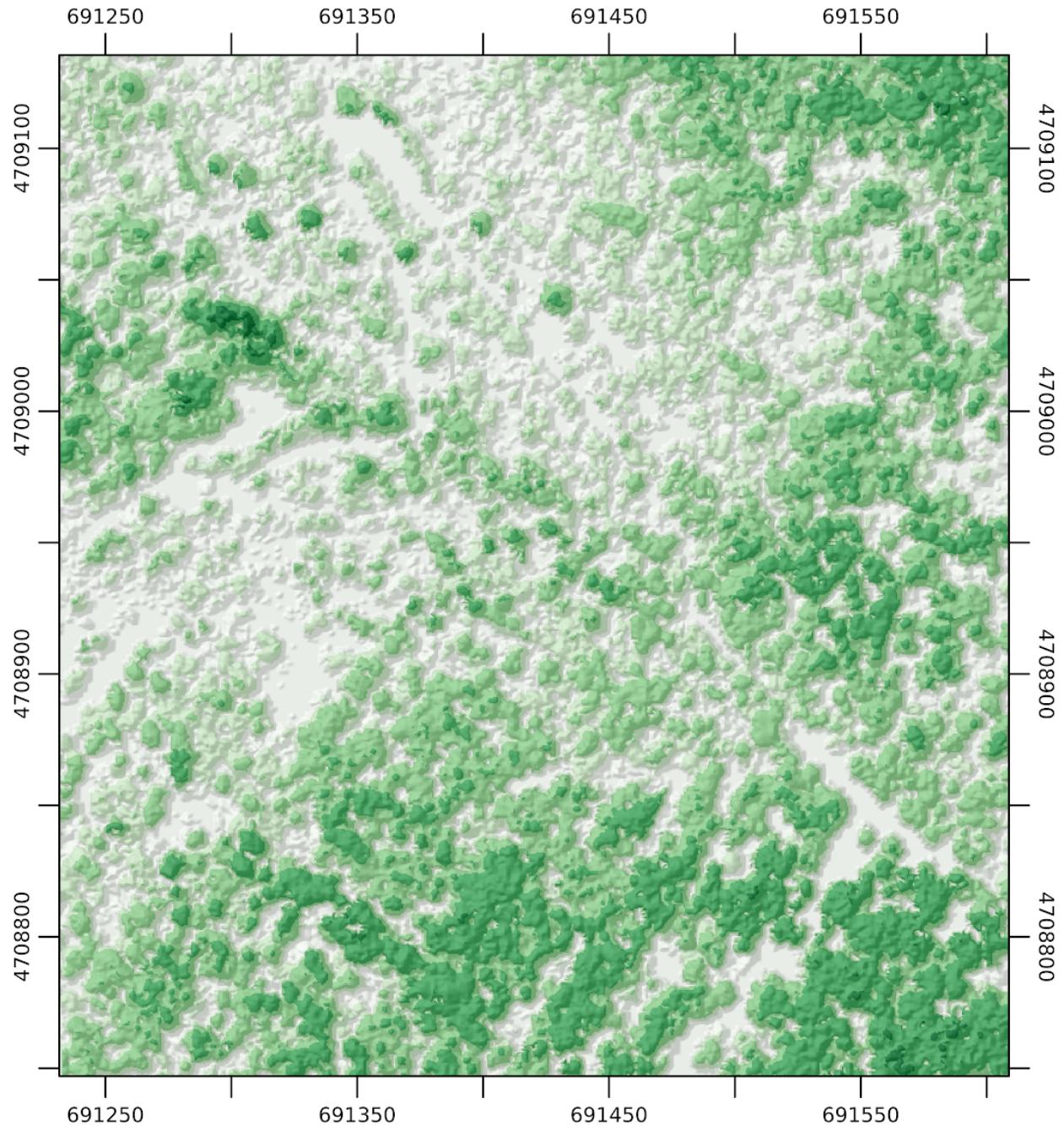
Fecha: Junio, 2020

Datum: ETRS89

Elaboración propia

Fuente: CNIG

MODELO DIGITAL DE COPAS DEL SECTOR



Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad de Zaragoza

Fecha: Junio, 2020

Datum: ETRS89

Elaboración propia

Fuente: CNIG

Leyenda

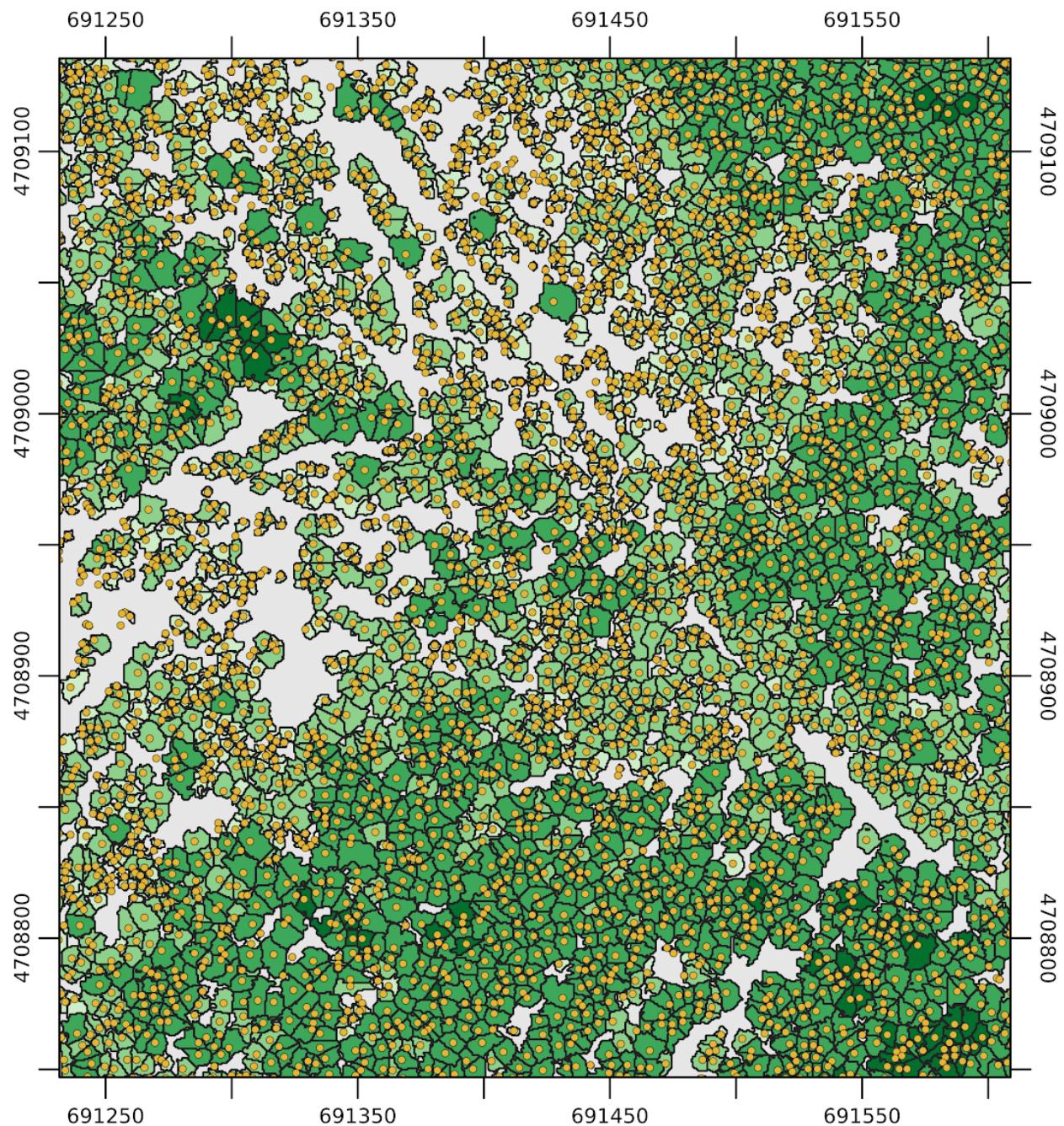
Altura (m)

0.0 - 5.0
5.1 - 10.0
10.1 - 15.0
15.1 - 20.0
20.1 - 25.0



0 40 80 m

MODELO VECTORIAL DE COPAS Y CIMAS DEL SECTOR



Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad de Zaragoza

Fecha: Junio, 2020

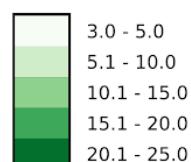
Datum: ETRS89

Elaboración propia

Fuente: CNIG

Leyenda

Altura copas (m)

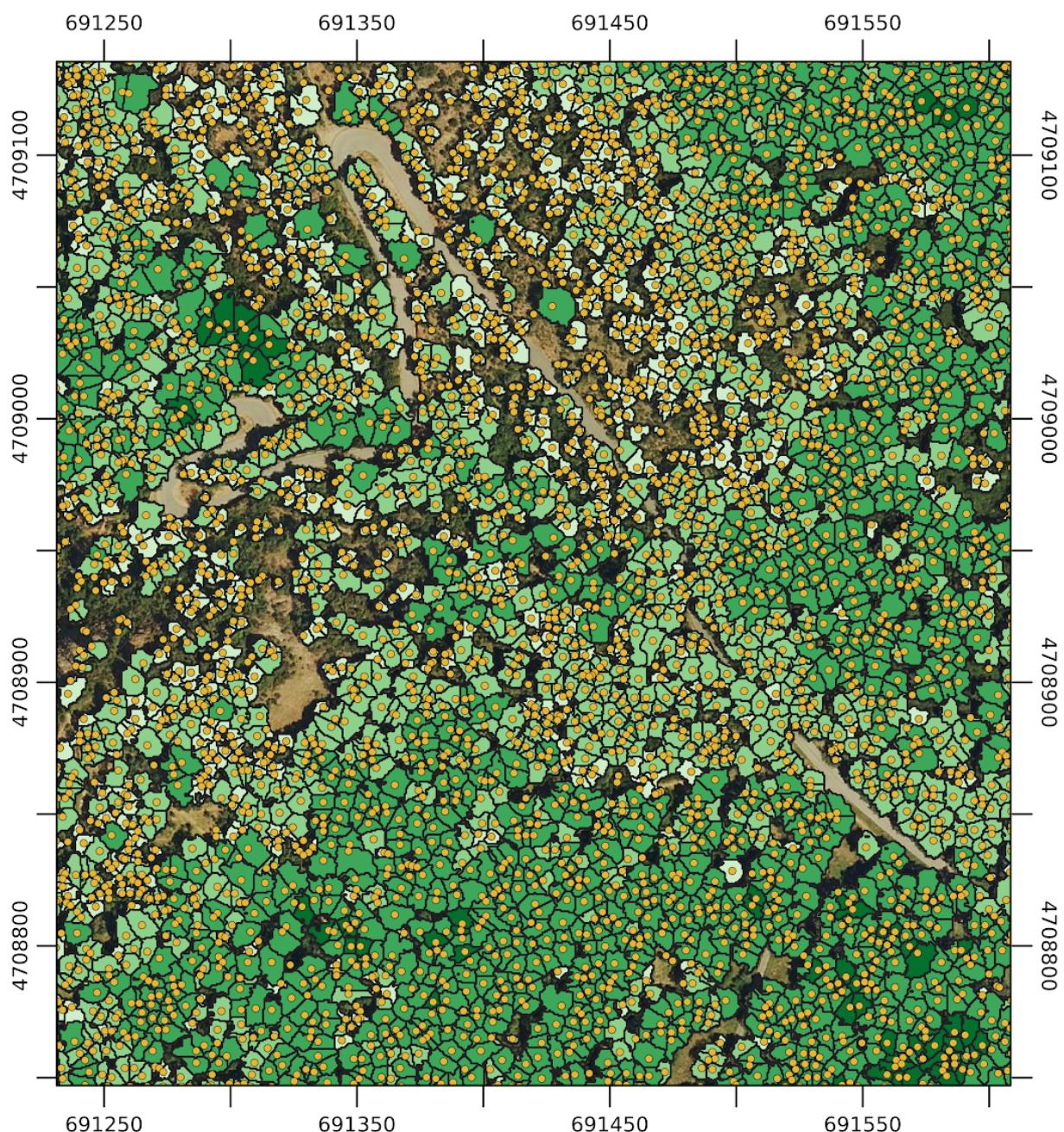


Cimas



0 40 80 m

**SUPERPOSICIÓN DEL MODELO VECTORIAL DE COPAS
Y CIMAS SOBRE LA ORTOFOTO DEL SECTOR**



Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad de Zaragoza
1542

Fecha: Junio, 2020

Datum: ETRS89

Elaboración propia

Fuente: CNIG

Leyenda

Altura copas (m)
3.0 - 5.0
5.1 - 10.0
10.1 - 15.0
15.1 - 20.0
20.1 - 25.0

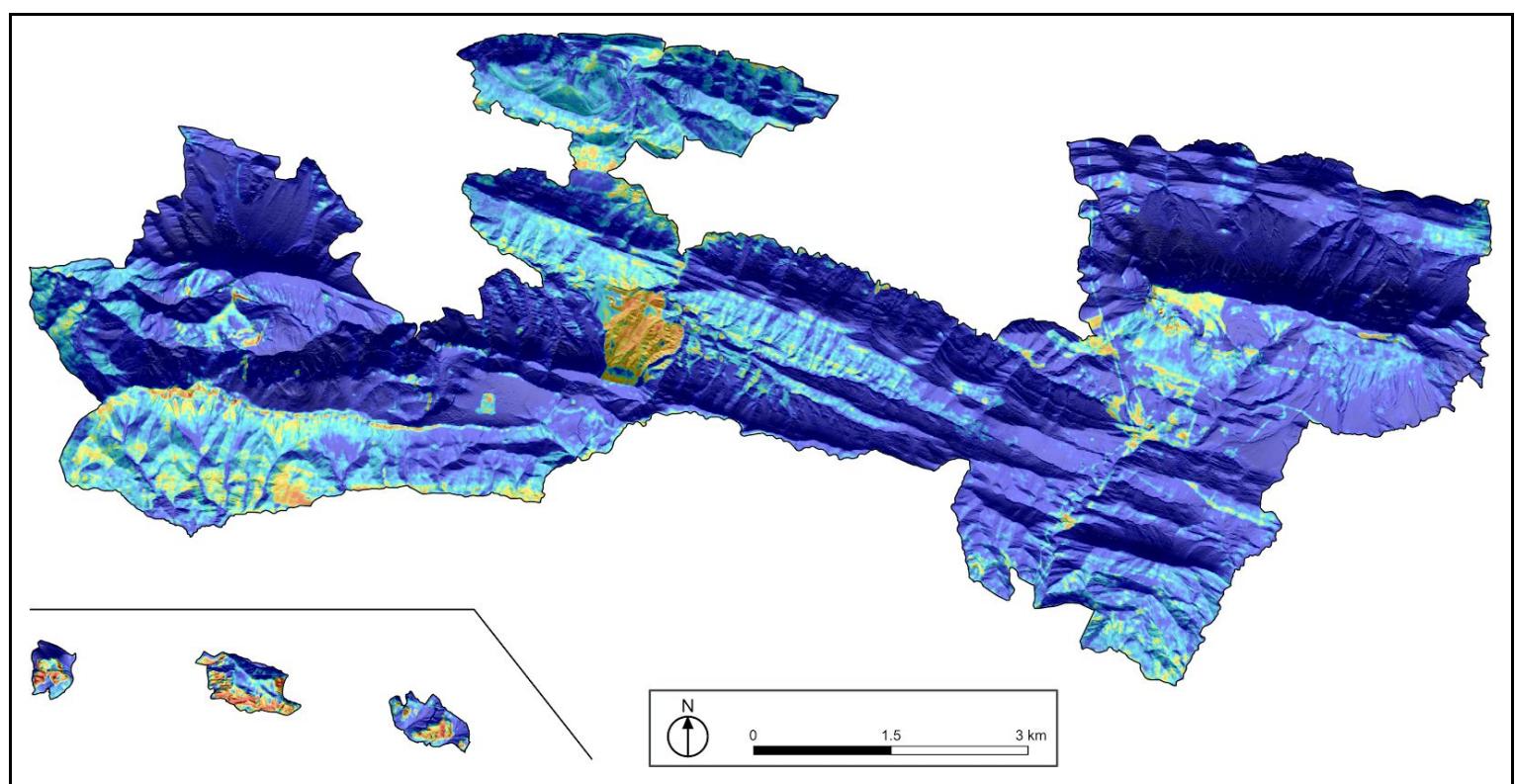
Cimas



0 40 80 m

ANEXO XIV

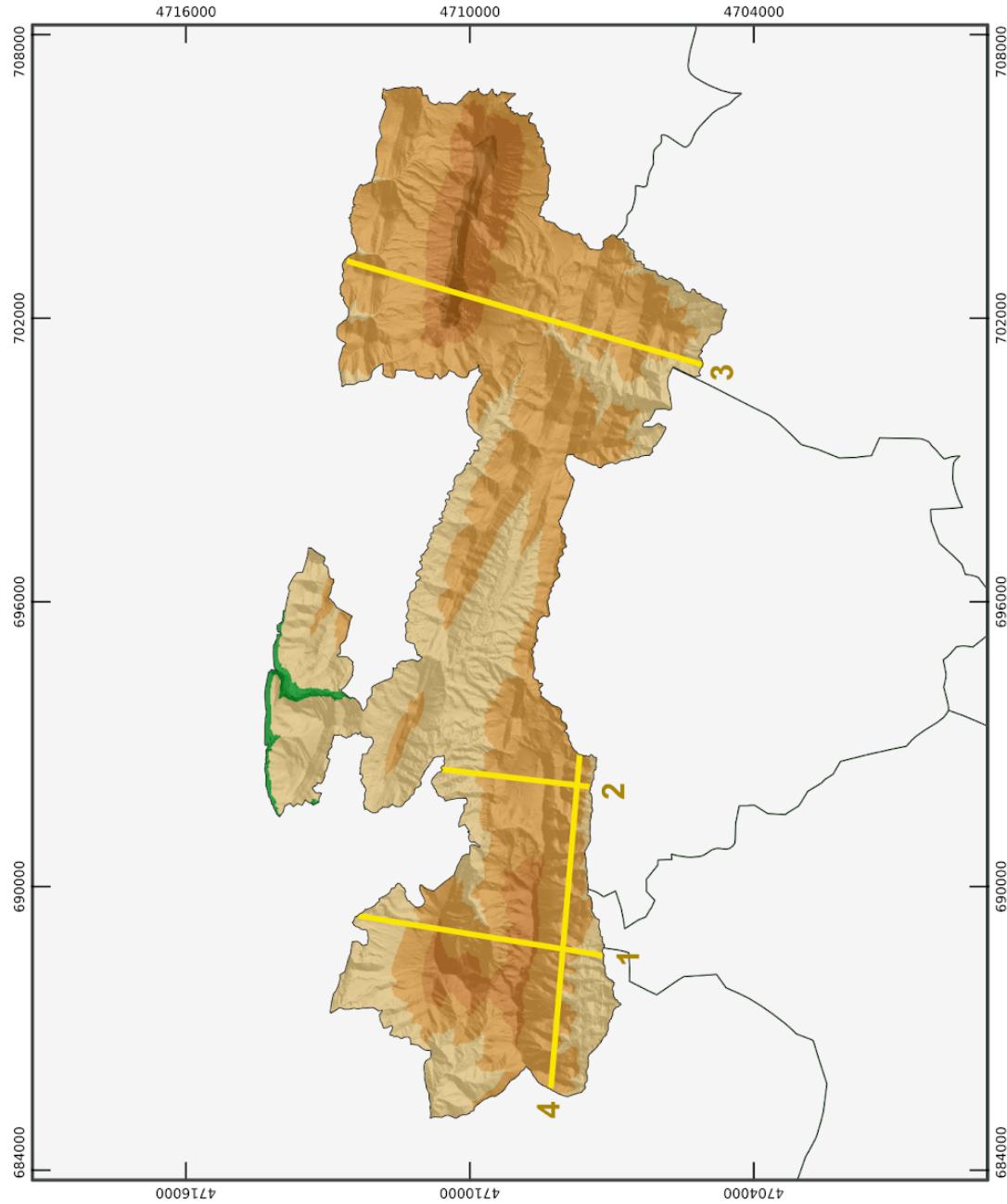
MAPAS DEL APARTADO 4.1



ANEXO XV

MAPAS DEL APARTADO 4.3.2

LOCALIZACIÓN DE LOS CORTES FITOTOPOGRAFICOS REALIZADOS EN EL PAISAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL



Datum: ETRS89
Fuente: CNIG

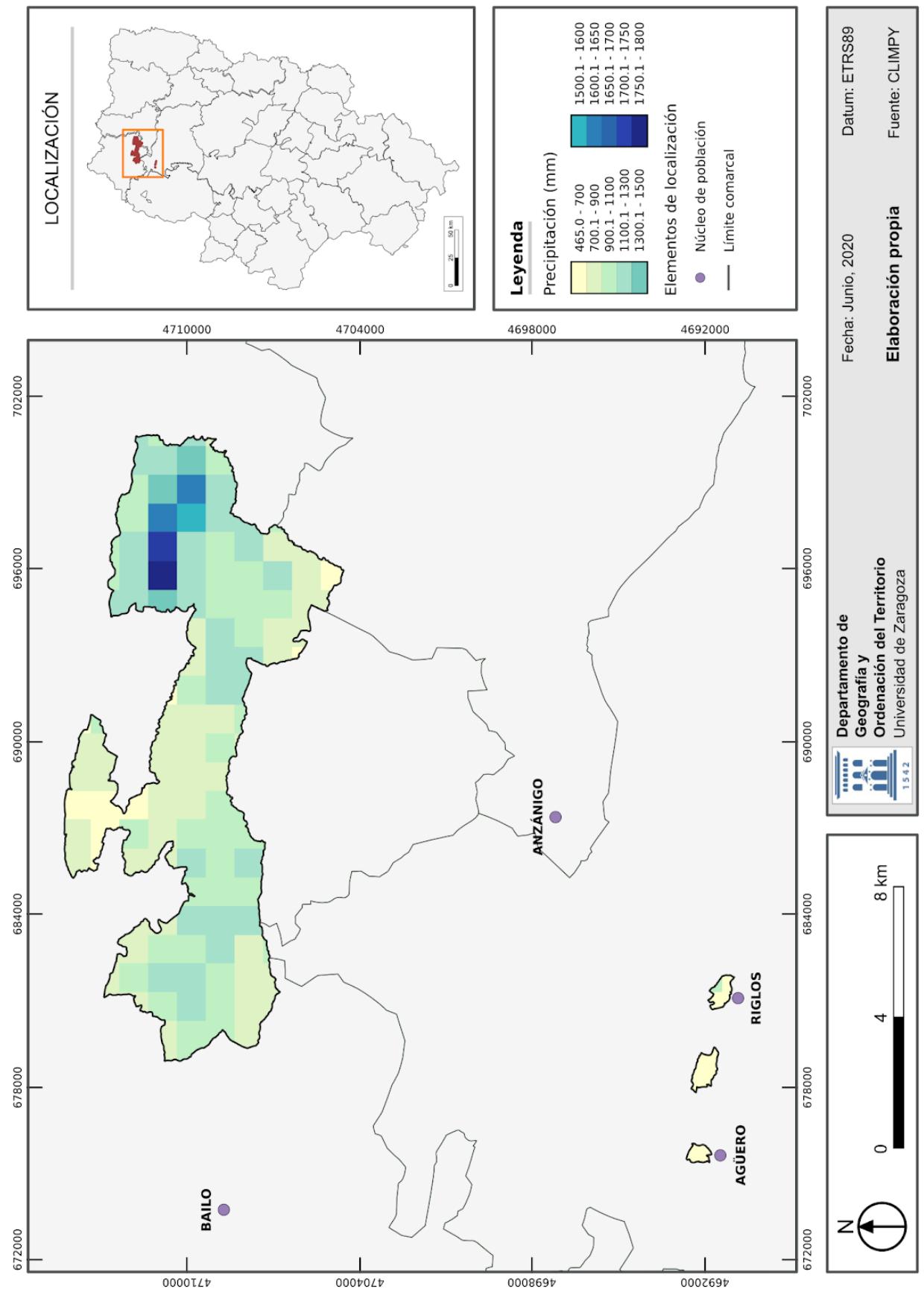
Fecha: Junio, 2020
Elaboración propia

Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad de Zaragoza
15.42

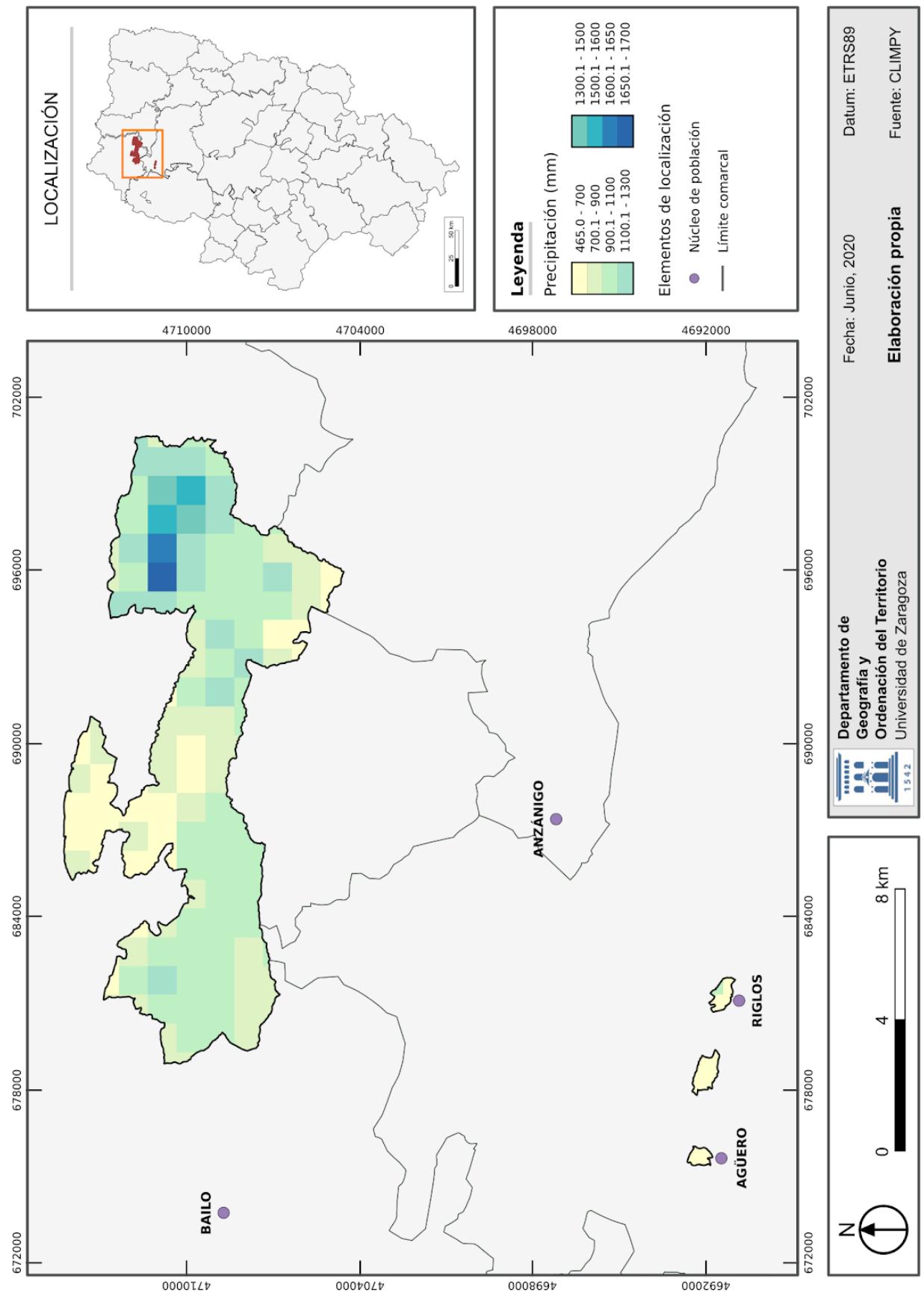
ANEXO XVI

MAPAS DEL APARTADO 5.1

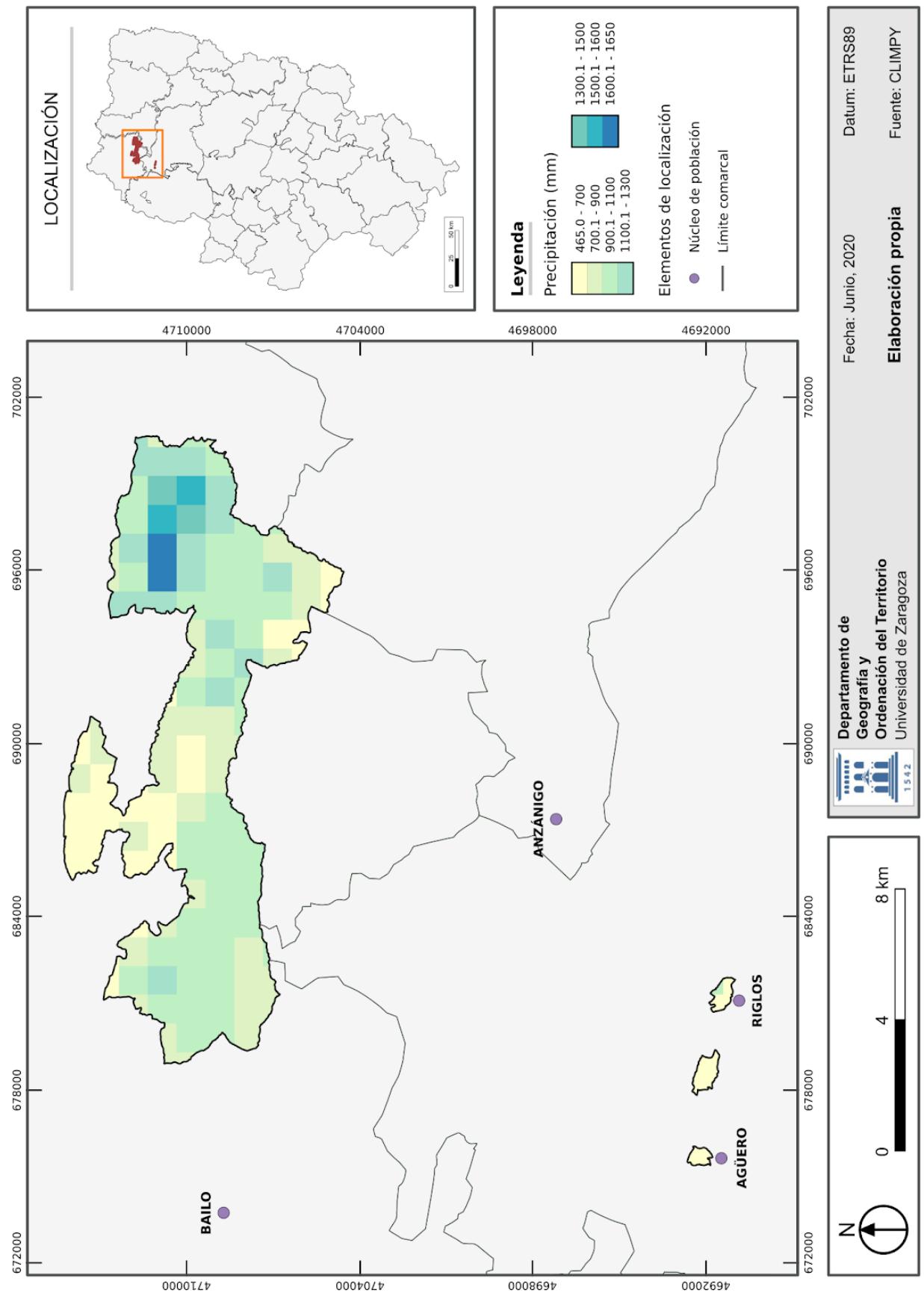
PRECIPITACIÓN ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (PERÍODO 1950-2015)



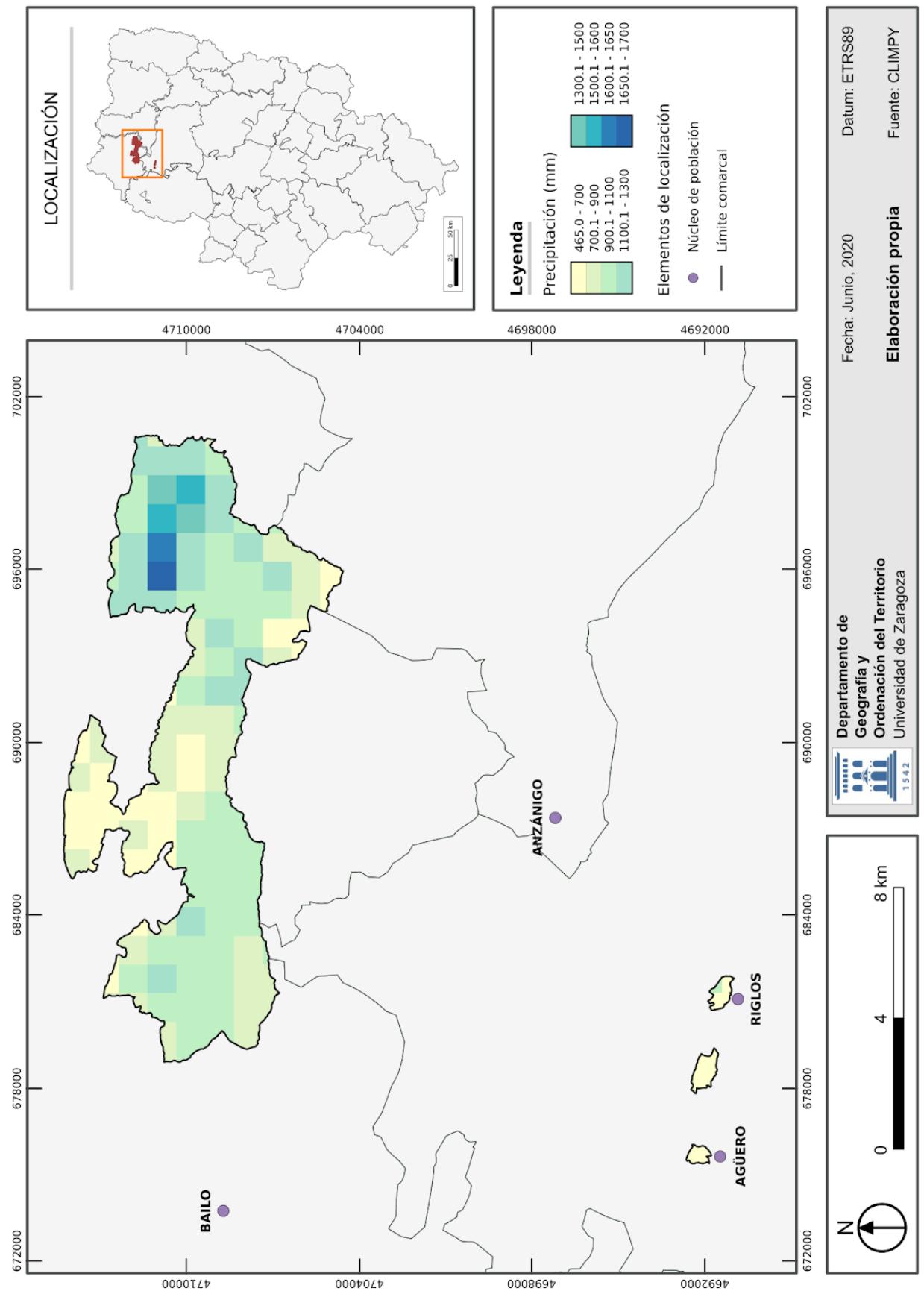
PRECIPITACIÓN ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2030, RCP 4.5)



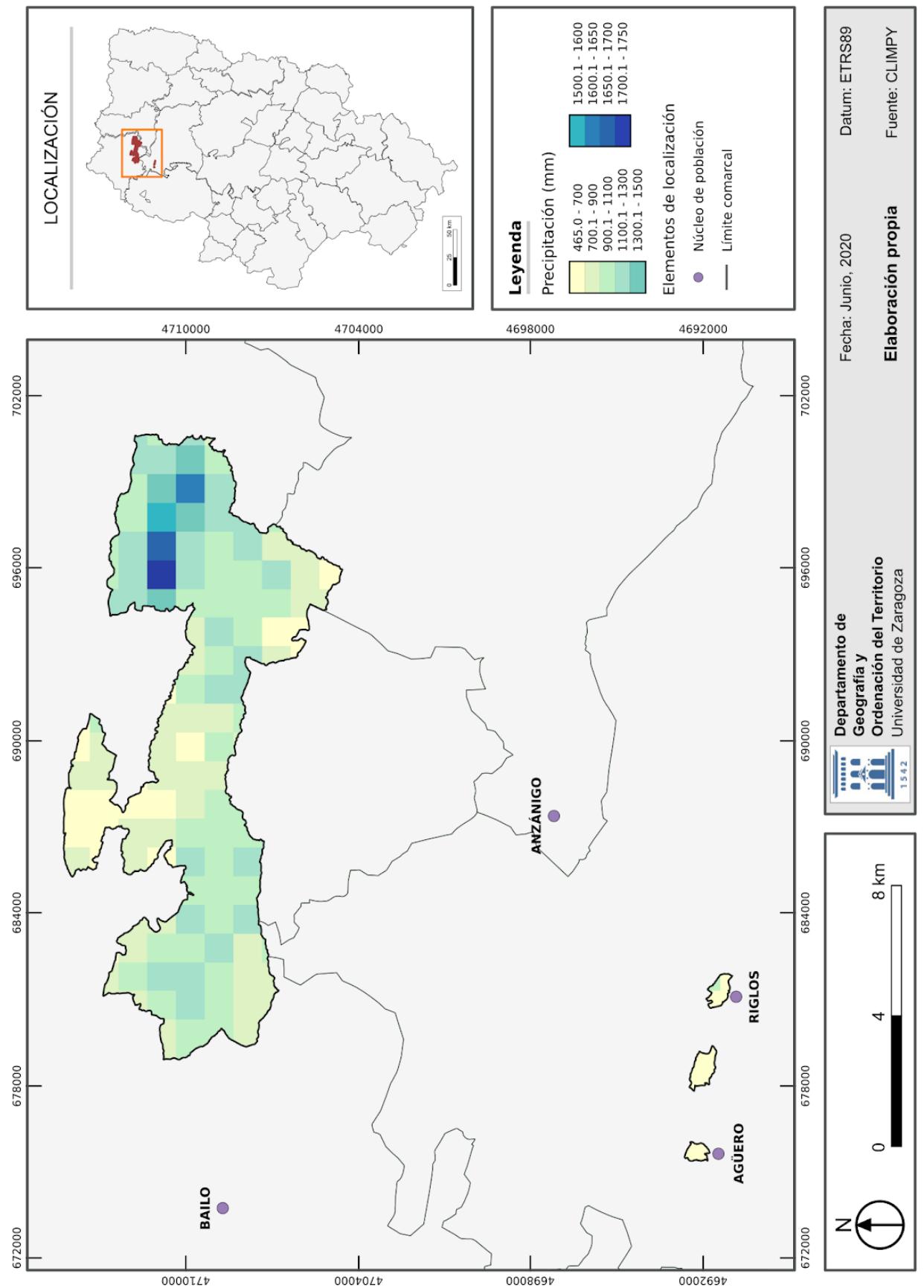
PRECIPITACIÓN ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2030, RCP 8.5)



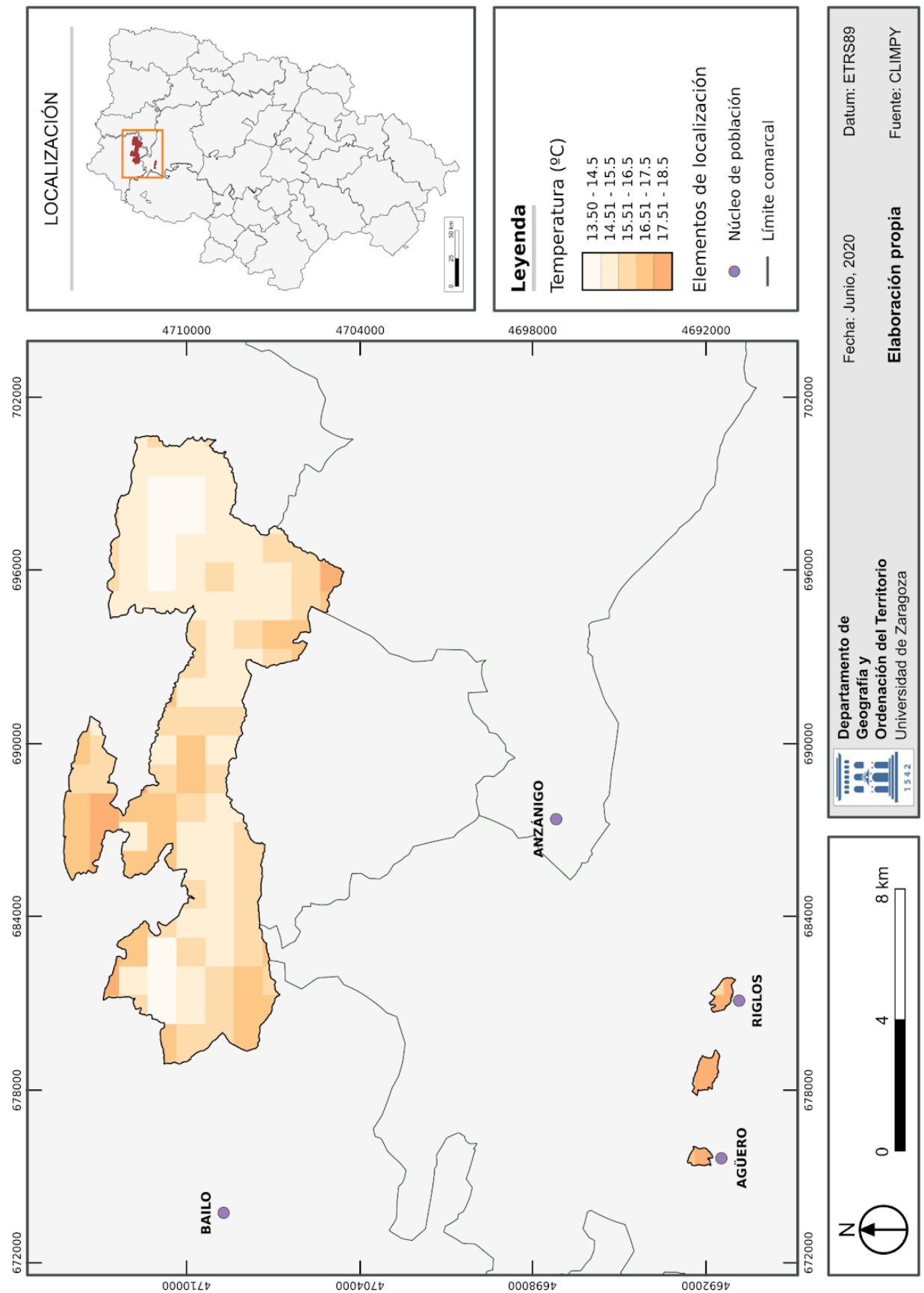
PRECIPITACIÓN ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2090, RCP 4.5)



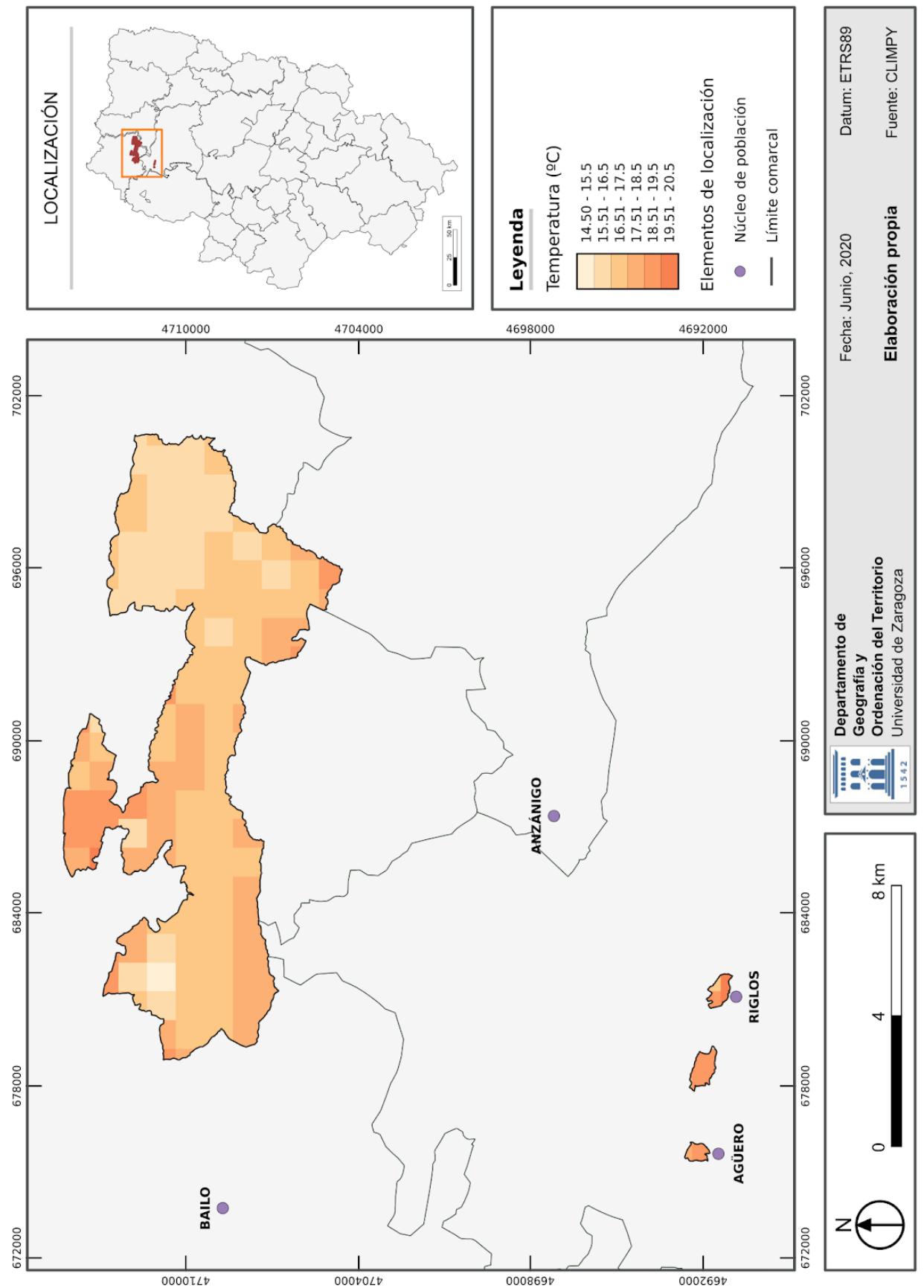
TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2090, RCP 8.5)



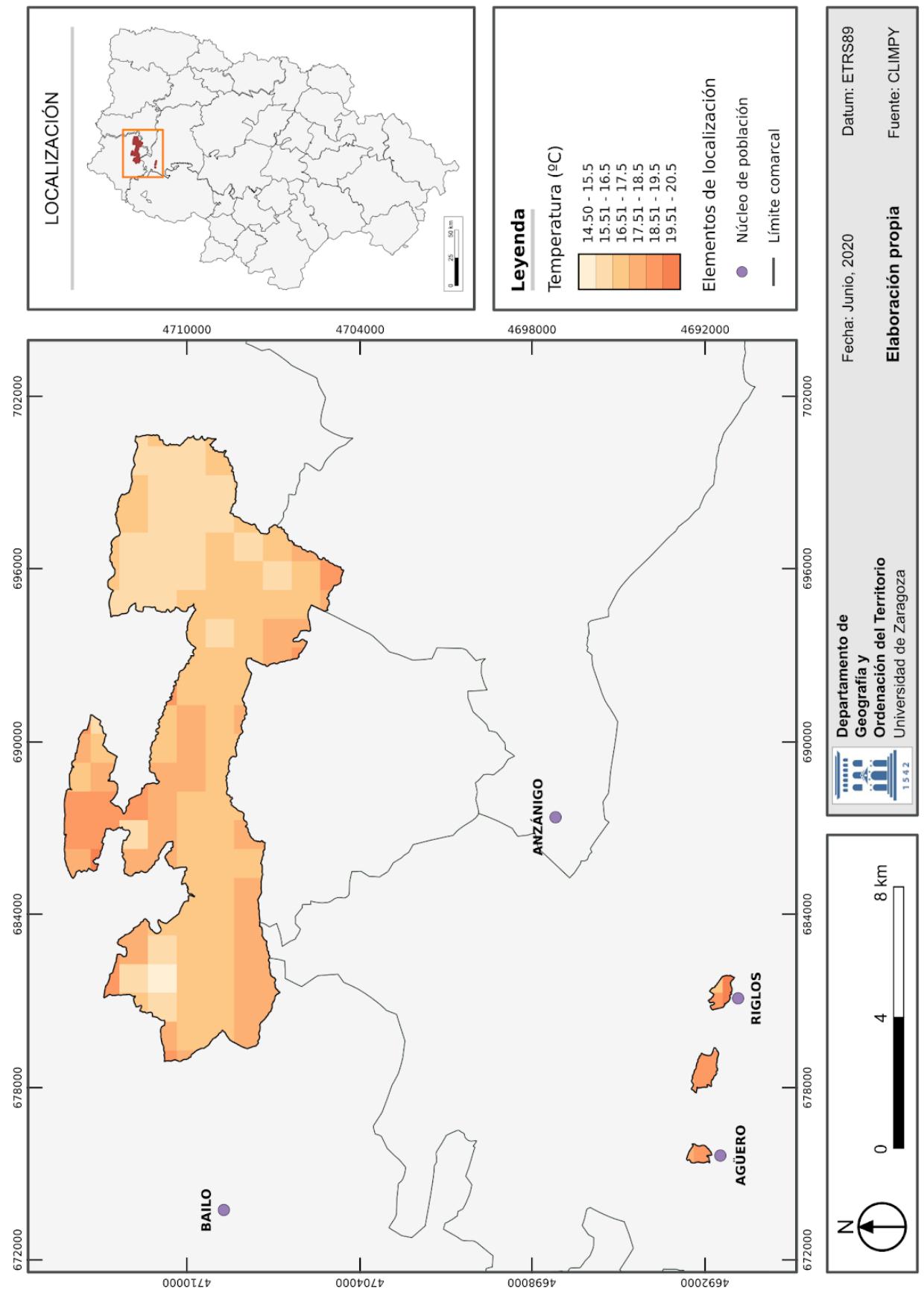
TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (PERÍODO 1950-2015)



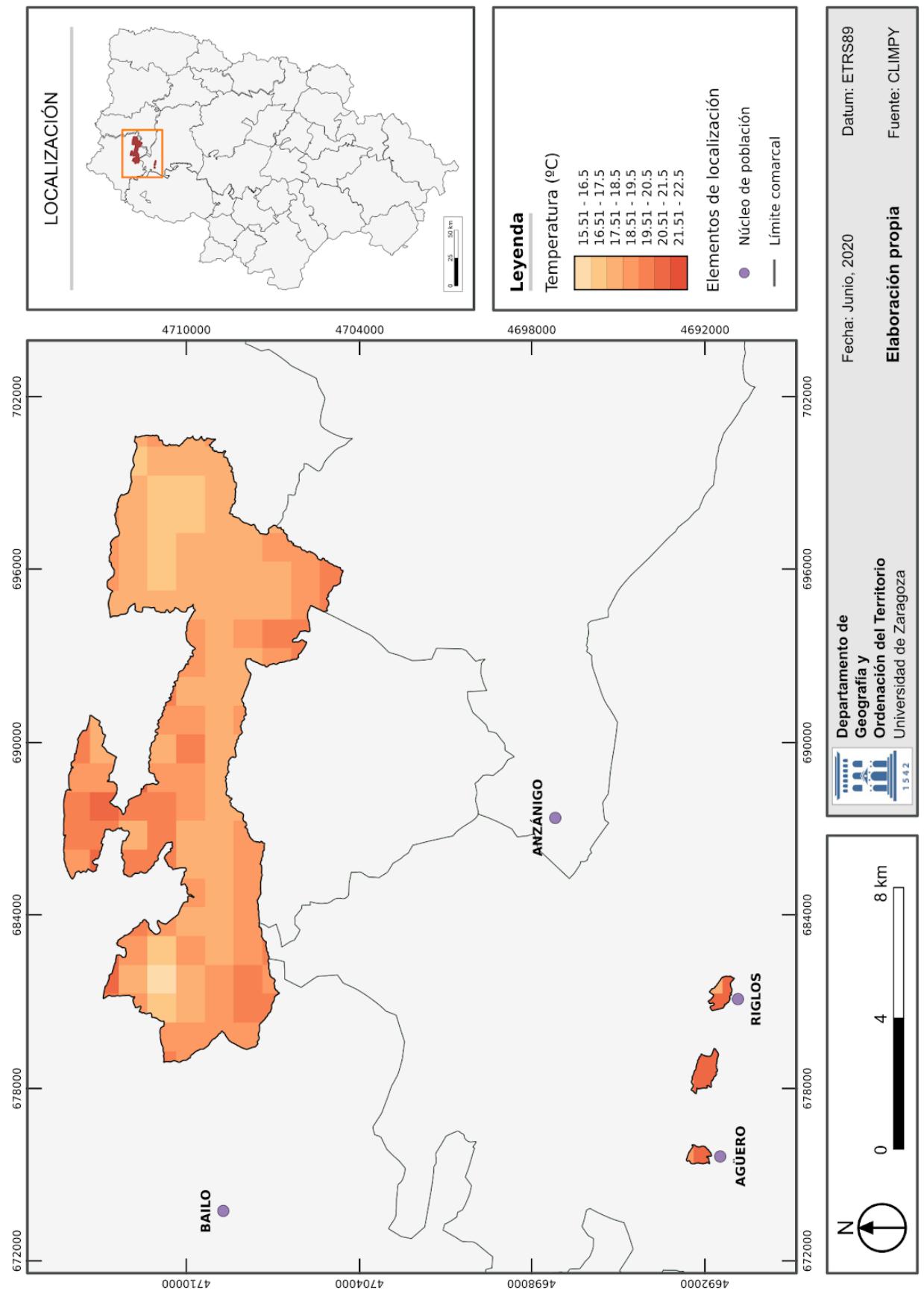
TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2030, RCP 4.5)



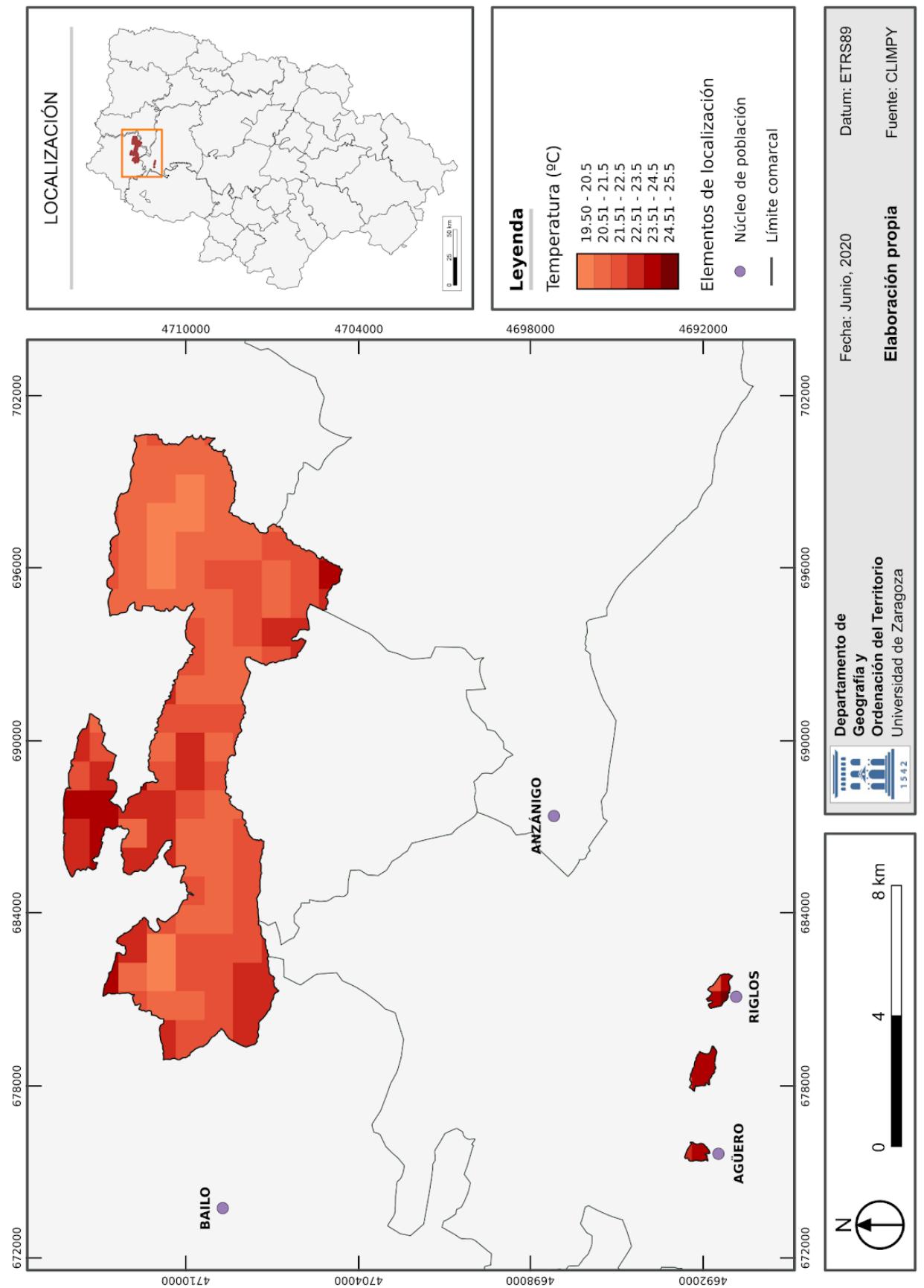
TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2030, RCP 8.5)



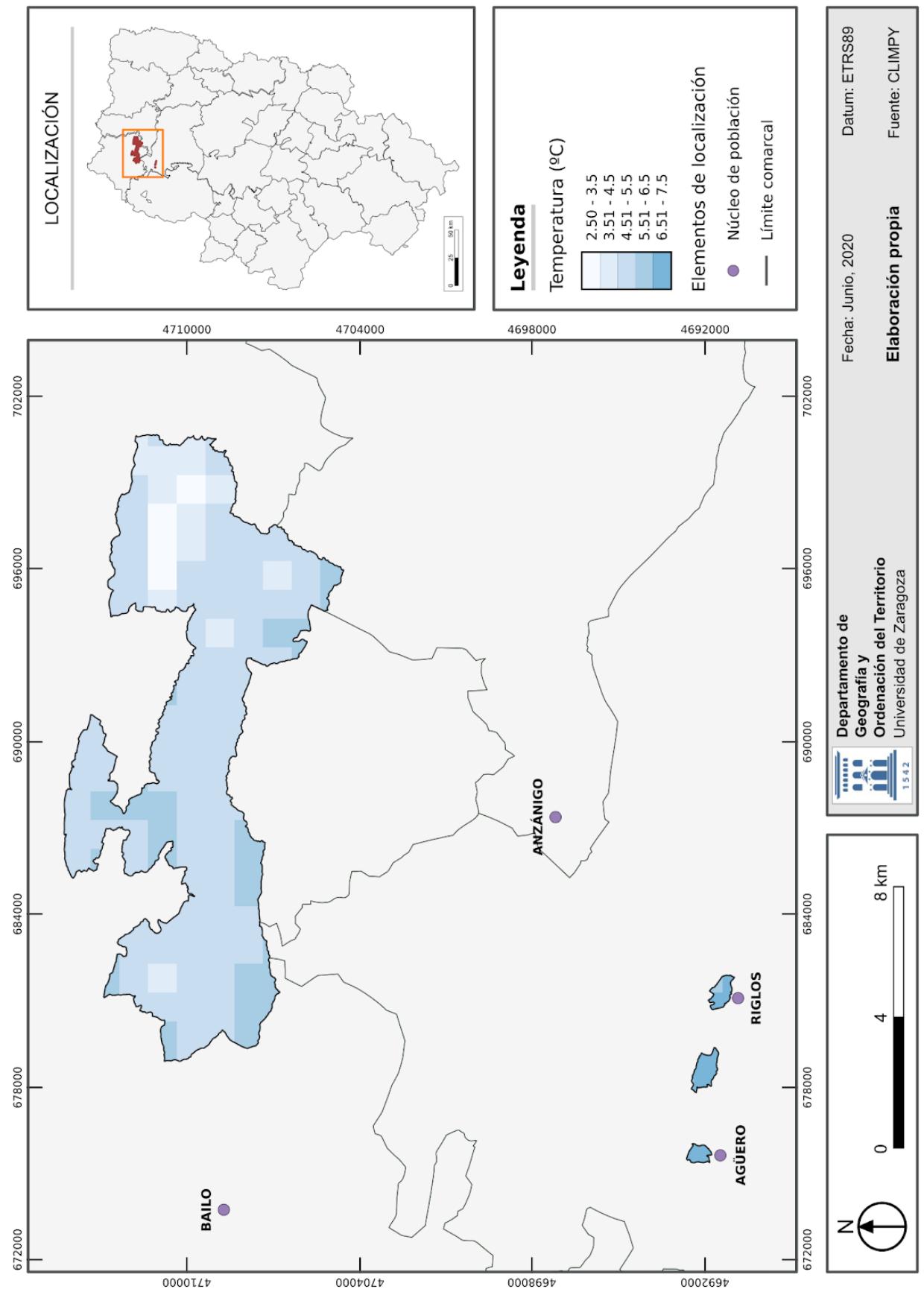
TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2090, RCP 4.5)



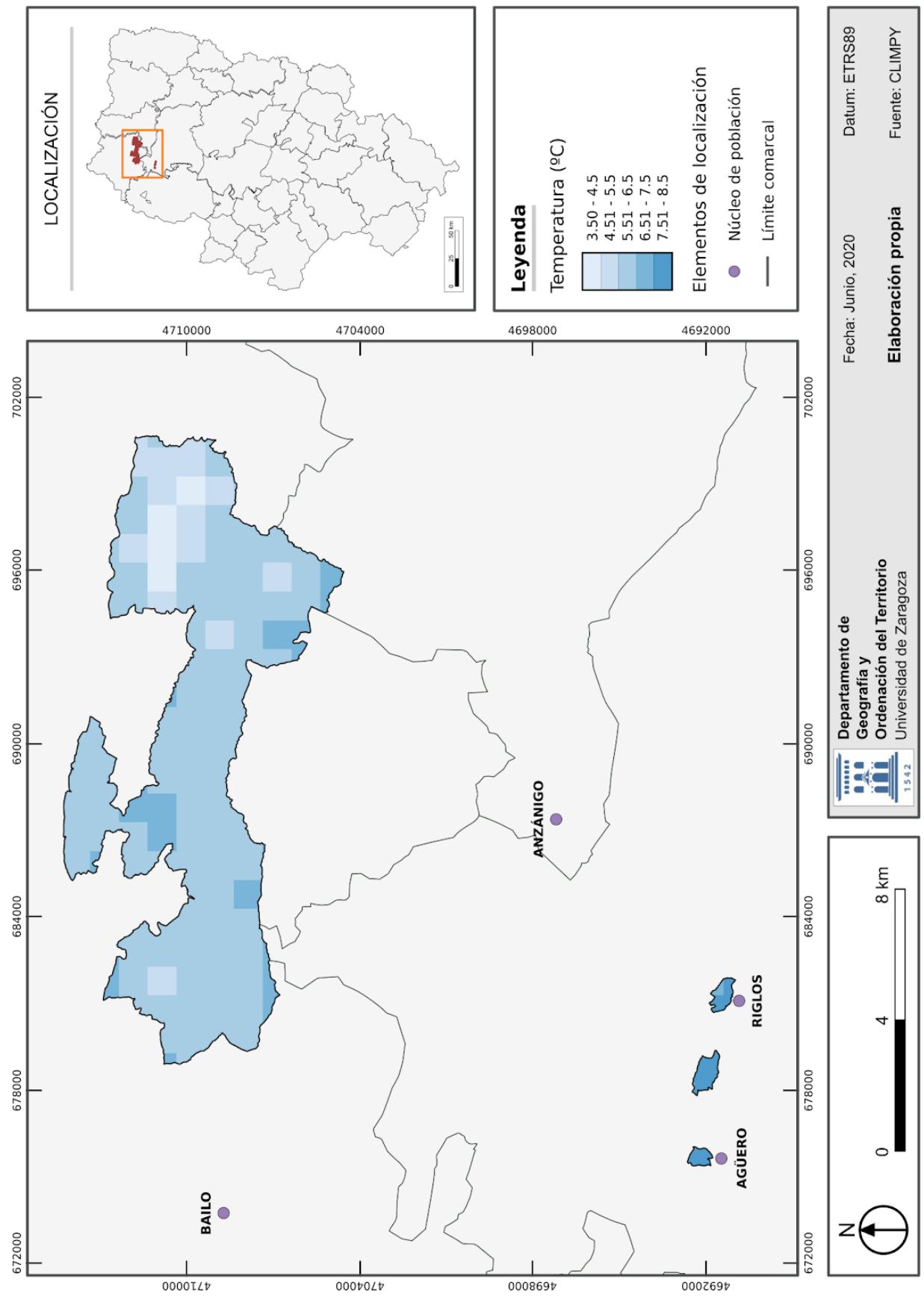
TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2090, RCP 8.5)



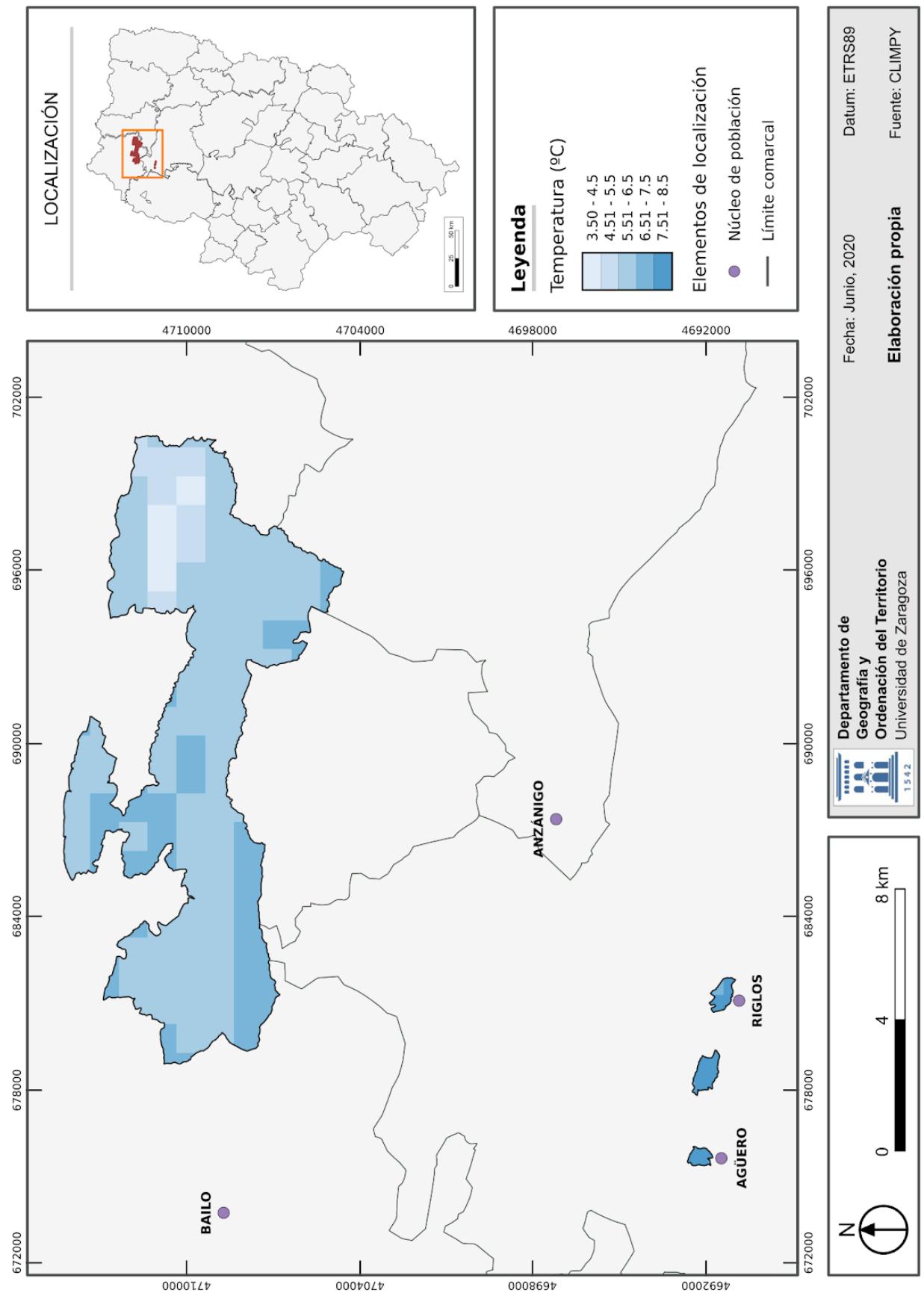
TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (PERÍODO 1950-2015)



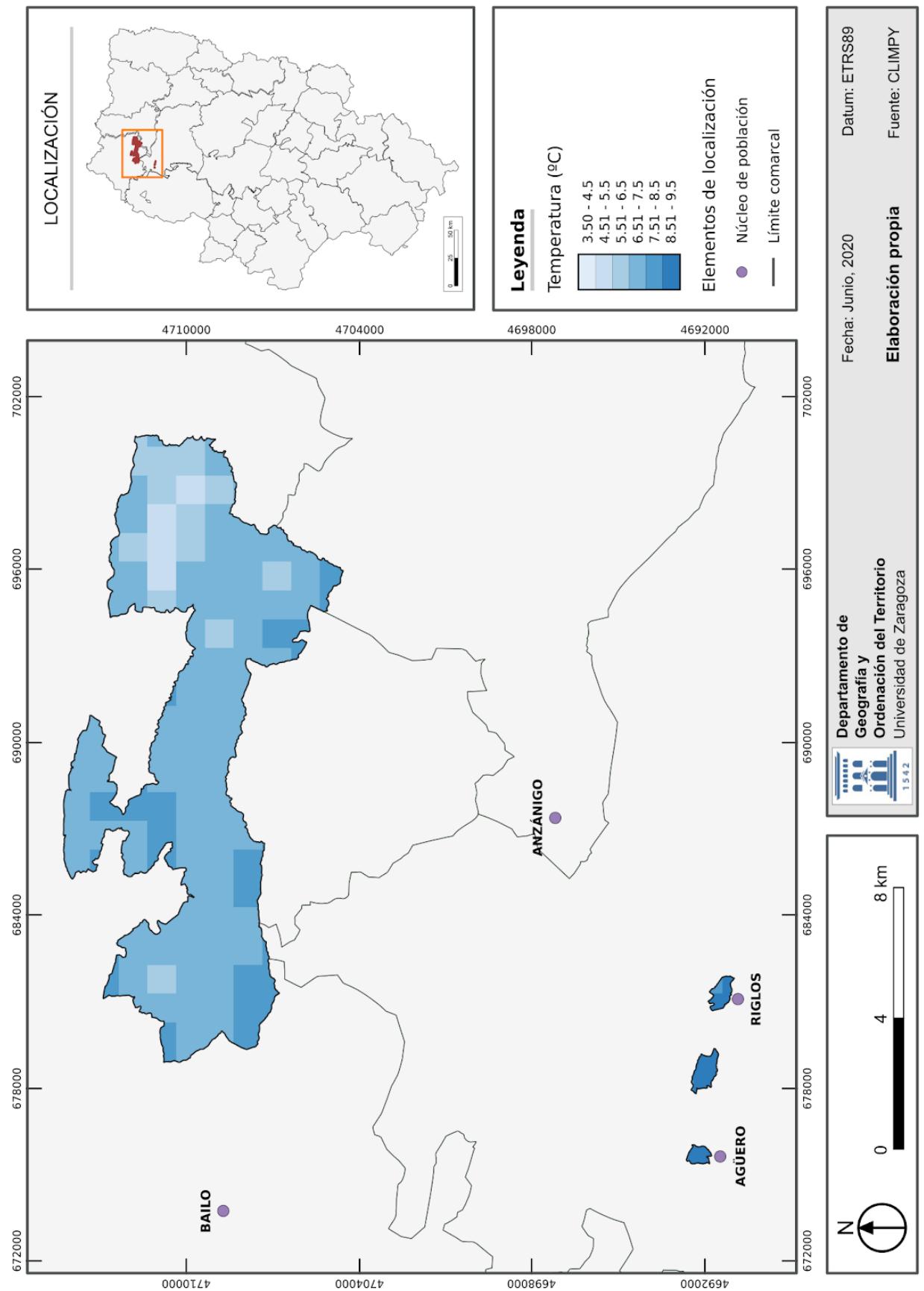
TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2030, RCP 4.5)



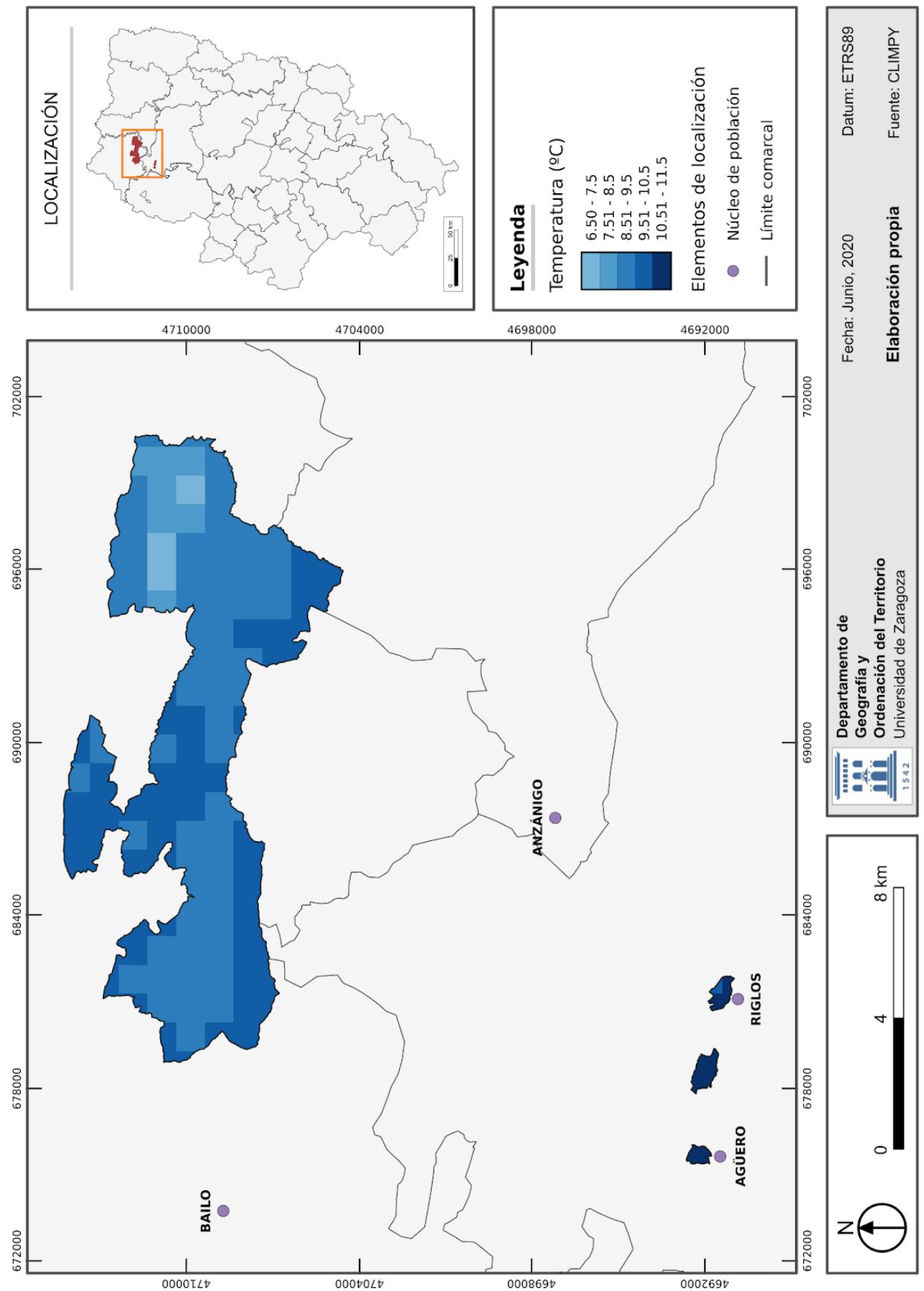
TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2030, RCP 8.5)



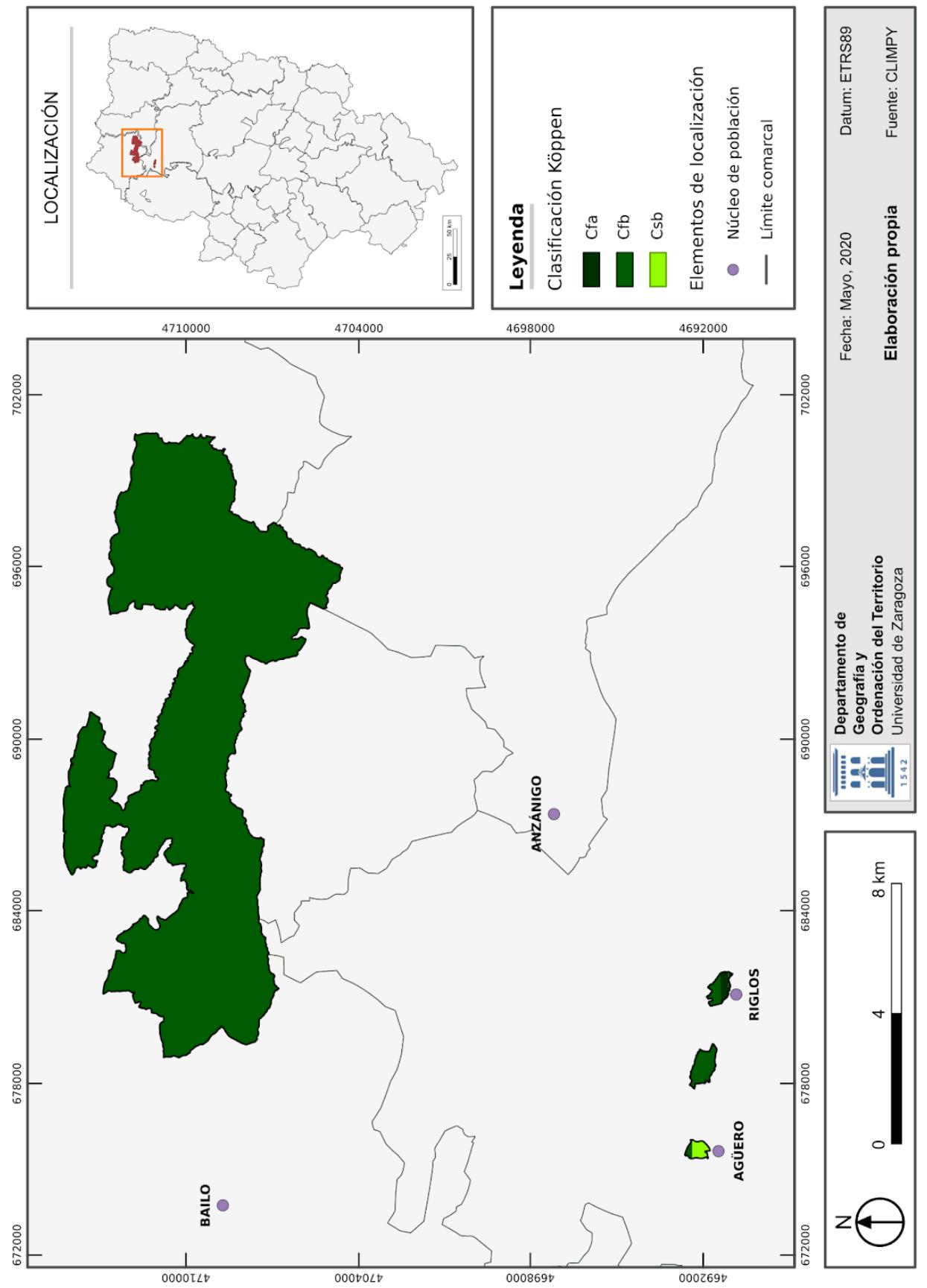
TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2090, RCP 4.5)



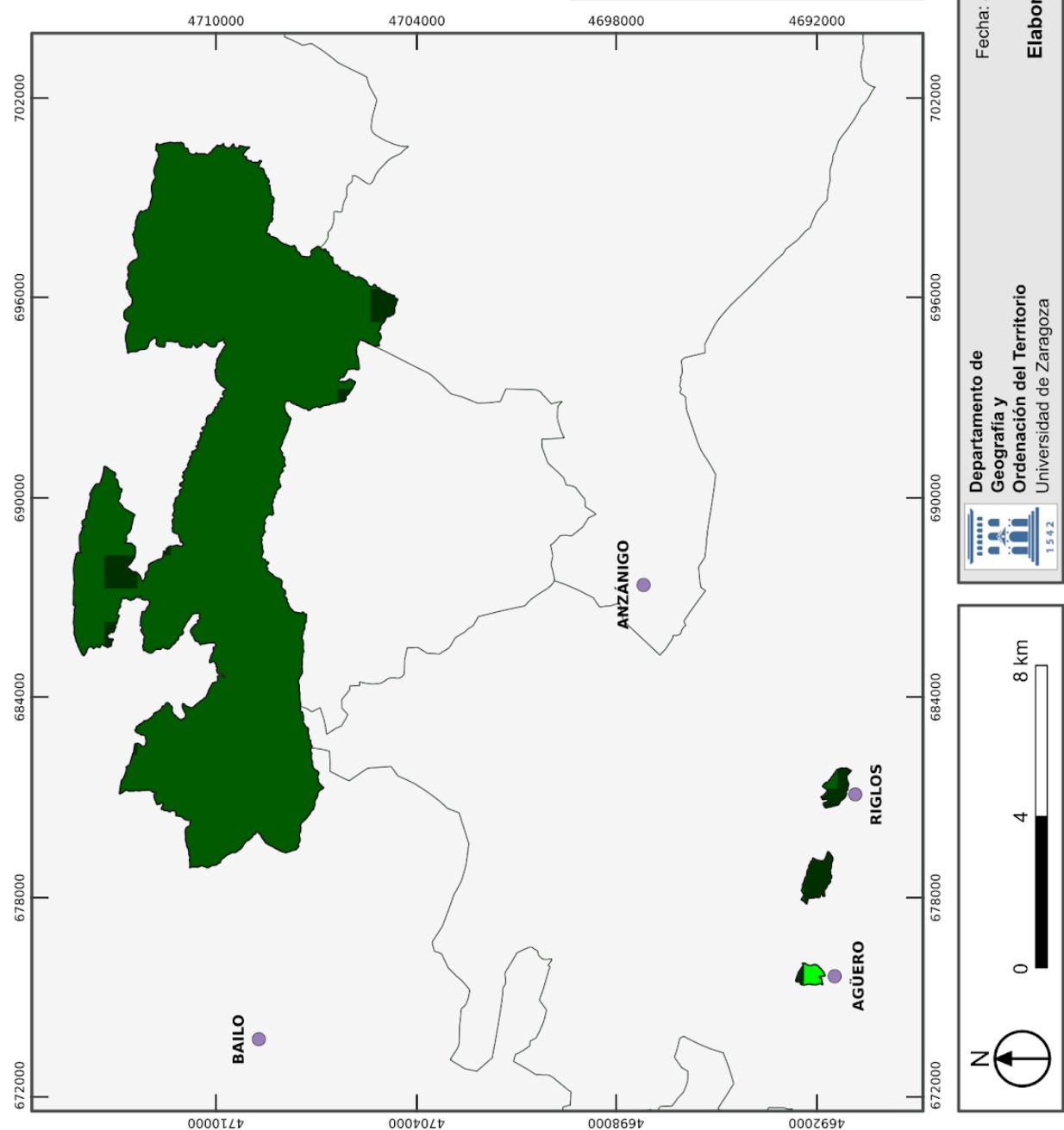
TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2090, RCP 8.5)



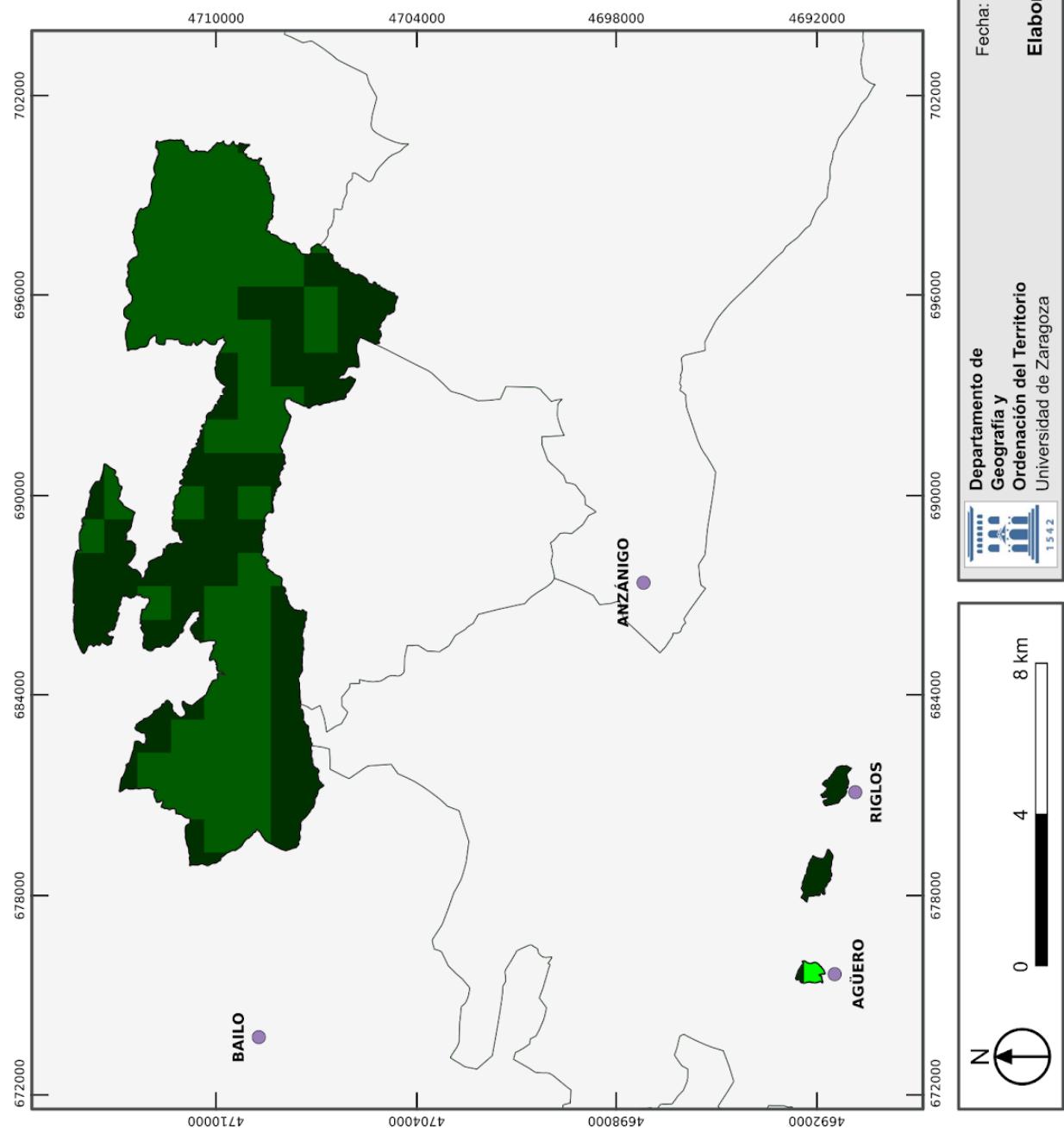
**CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN DEL PAÍSAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA
Y MONTE OROEL Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA**



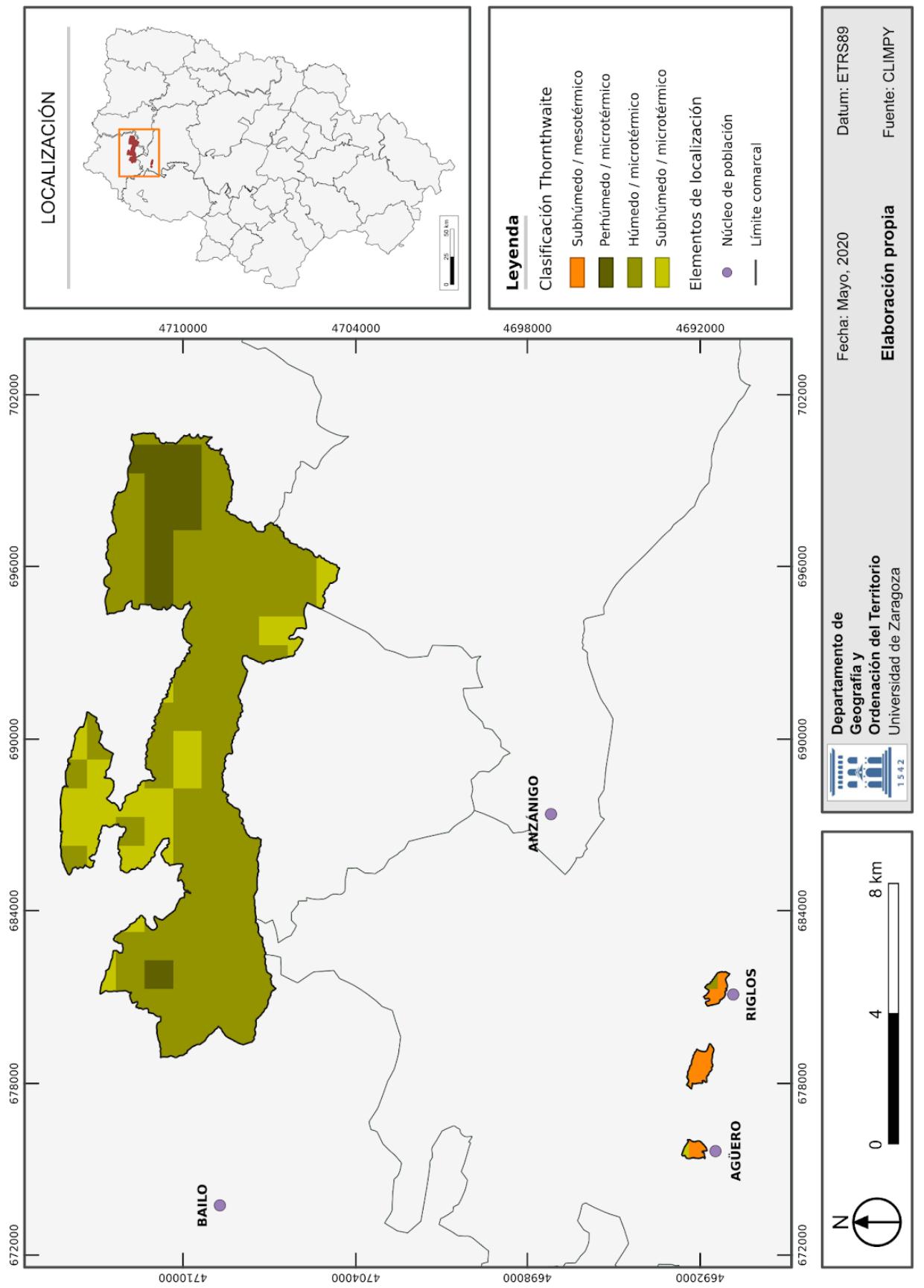
CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE THORNTHWAITE DE LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2030, RCP 8.5)



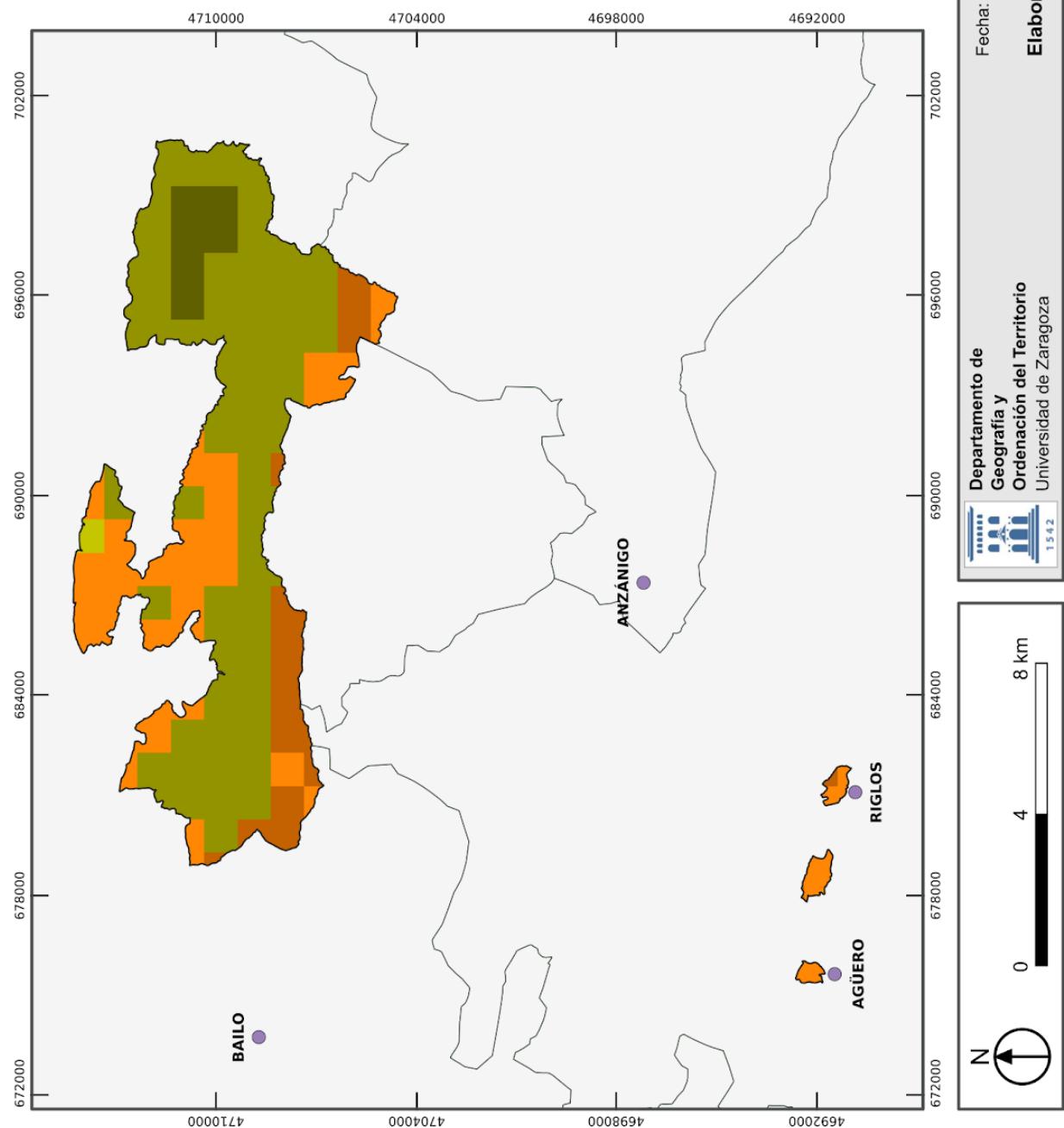
CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE THORNTHWAITE DE LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2090, RCP 4.5)



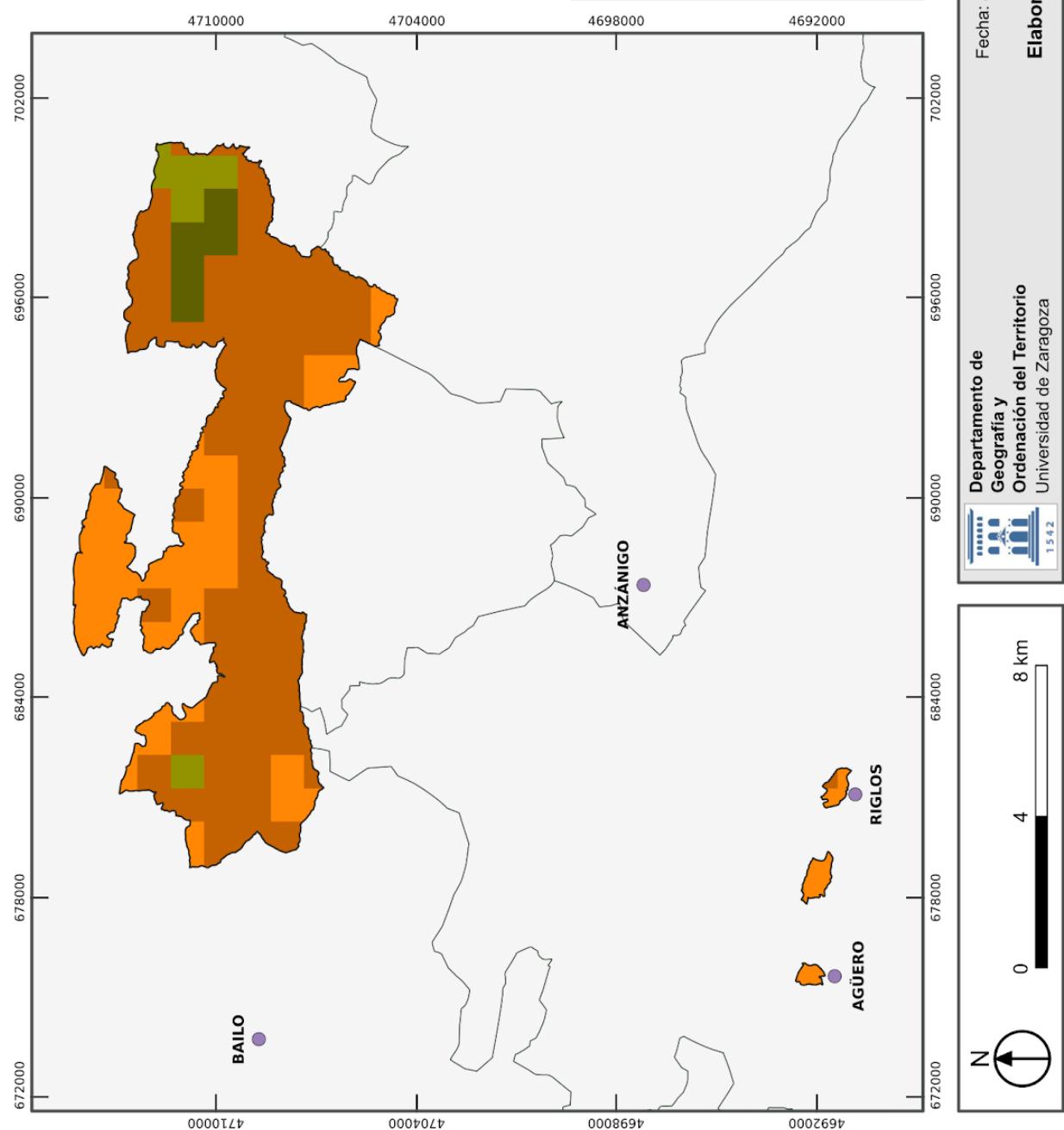
CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE THORNTHWAITE DEL PAISAJE PROTEGIDO DE SAN JUAN DE LA PEÑA Y MONTE OROEL Y DEL MONUMENTO NATURAL DE LOS MALLOS DE RIGLOS, AGÜERO Y PEÑA RUEBA



CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE THORNTHWAITE DE LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2030, RCP 8.5)



CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE THORNTHWAITE DE LA ZONA DE ESTUDIO (AÑO 2090, RCP 4.5)



ANEXO XVII

BCN25

