



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI



Departament
de Geografia

FACULTAD DE TURISMO Y GEOGRAFÍA

GRADO EN Geografía y Ordenación del Territorio

TRABAJO DE FIN DE GRADO

TÍTULO: Determinación de zonas con potencial de aguas subterráneas basada en técnicas SIG y EMC: un estudio de caso de las cuencas internas de Cataluña (El Darò, Rieras del Montgrí Empúries, Rec Sirvent)

AUTORA: Ikram Essayah

TUTOR/A: María Yolanda Pérez Albert

Curso académico: 2019/2020

Convocatoria: Junio

Resumen

El presente estudio pretende determinar las zonas potenciales de aguas subterráneas, utilizando las técnicas de Evaluación Multicriterio basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) en tres cuencas hidrográficas representativas; El Darò, Riera del Montgrí Empúries, y Rec Sirvent. Se emplearon un total de once capas temáticas que representan los factores que controlan la recarga y el almacenamiento de las aguas subterráneas en el área de estudio y se agruparon en tres categorías. La primera, Condiciones topográficas, agrupa pendiente, curvatura general, rugosidad, Índice de Posición Topográfica (IPT) y el Índice Topográfico de Humedad (ITH). Las Condiciones del terreno se compone de geología, litología, usos y cubiertas del suelo, densidad de drenaje, densidad de lineamentos. Por último, la precipitación es factor único del tercer grupo, las condiciones ambientales. Las capas temáticas se integraron utilizando La Combinación Lineal Ponderada (WLC) en un entorno de SIG para generar un Mapa de Zonas Potenciales de Agua Subterránea (MZPAS). El MZPAS viene clasificado en cinco zonas de potencial de aguas subterráneas, “muy bajo”, “bajo”, “medio”, “moderado”, “alto” y cubren un 0.41%, 21.54%, 43.05%, 35%, y 0% respectivamente considerando toda el área de estudio en conjunto. Se realizó un Análisis de Sensibilidad (AS) utilizando el método de “uno a la vez” (*One at a Time*, OAT) para comprender las implicaciones y el impacto de los diferentes factores involucrados en SIG-EMC y AHP. Además, se validó el MZPAS comparándolo con la ubicación de 488 pozos de agua en el área de estudio y los resultados muestran una correlación positiva. Este estudio proporcionar una base sólida y alternativa para la planificación y gestión sostenible de las aguas subterráneas en las cuencas analizadas, también se puede utilizar como información primaria para los trabajos de campo que tienen como objetivo identificar la presencia de aguas subterráneas.

Palabras clave: potencial de aguas subterráneas. Hidrogeología. Recursos de agua. SIG mapeo. EMC. AHP. Cuencas Internas de Cataluña.

Resum

El present estudi pretén determinar les zones potencials d'aigües, utilitzant les tècniques d'Avaluació Multicriteri basades en Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG), i el Procés de Jerarquia Analítica (AHP) en tres conques hidrogràfiques representatives; el Darò, Riera del Montegrí Empúries, i Rec Sirvent. Es van emparar un total d'onze capes temàtiques que representen els factors que controlen la recàrrega i l'emmagatzamatge de les aigües subterrànies en l'àrea d'estudi i es van agrpar en tres categories. La primera, condicions topogràfiques, agrupa pendent, curvatura general, rugositat, Índex de Posició Topogràfica (IPT) i l'Índex Topogràfic de Humitat (ITH). Les condicions del terreny es compon de geologia, litologia, usos i cobertes del sol, densitat de drenatge, densitat de lineaments. Finalment, la precipitació és factor únic del tercer grup, les condicions ambientals. Les capes temàtiques es van integrar utilitzant La Combinació Lineal Ponderada (WLC) en un entorn de SIG per generar un Mapa de Zones Potencials d'Aigua Subterrània (MZPAS). El MZPAS ve classificat en cinc zones de potencial d'aigües subterrànies, "molt baix", "baix", "mitjà", "moderat", "alt" i cobreixen un 0.41%, 21.54%, 43.05%, 35%, i 0% respectivament considerant tota l'àrea d'estudi en conjunt. Es va realitzar un Anàlisi de Sensibilitat (AS) utilitzant el mètode de "un alhora" (One at a Time, OAT) per comprendre les implicacions i l'impacte dels diferents factors involucrats en SIG-EMC i AHP. A més, es va validar el MZPAS comparant-lo amb la ubicació de 488 pous d'aigua a l'àrea d'estudi i els resultats mostren una correlació positiva. Aquest estudi proporciona una base sòlida i alternativa per la planificació i gestió sostenible de les aigües subterrànies a les conques analitzades, també es pot utilitzar com a informació primària per els treballs de camp que tenen com a objectiu identificar la presència d'aigües subterrànies.

Paraules Claus potencial de agües subterránies. Hidrogeologia. Recursos d'aigua. SIG. EMC. AHP. Conques internes de Catalunya.

Abstract

the aim of the present study is to determine the groundwater potential zones, using the Multicriteria Assessment based on Geographic Information System (GIS), and Analytical Hierarchy Process (AHP) in three representative watersheds; El Darò, Riera del Montgrí Empúries, and Rec Sirvent. A total of eleven thematic layers representing the factors controlling groundwater recharge and storage in the study area were employed and grouped into three categories. The first, topographic conditions, groups slope, general curvature, roughness, Topographic Position Index (IPT) and the Topographic Wetness Index (TWI). Soil conditions are composed of geology, lithology, land use and land cover, drainage density, lineaments density. Finally, precipitation is a unique factor of the third group, environmental conditions. The thematic layers were integrated using Weighted Linear Combination (WLC) in a GIS environment to generate a Map of groundwater Potential Zone (MGPZ). The MGPZ is classified into five groundwater potential zones, “very low”, “low”, “medium”, “moderate”, “high” and covers 0.41%, 21.54%, 43.05%, 35%, and 0% respectively considering the whole study area. A sensitivity Analysis (SA) was performed using the One at a Time (OAT) method to understand the implications and impact of the different factors involved in GIS-MCA and AHP. In addition, MGPZ was validated against the location of 488 water wells in the study area and the result show a positive correlation. This study provides a solid and alternative basis for the planning and sustainable management of groundwater in the analyzed basins. It can be used as primary information for field work aimed at identifying the presence of groundwater as well.

Key words: groundwater potential zone. Hydrogeology. Water resources. GIS mapping. MCA. AHP. Internal basins of Catalonia.

Contenido

1.	Introducción.....	9
1.1	Motivación	9
1.2	Contexto	9
1.3	Objetivos	10
2.	Marco teórico y conceptual.....	11
2.1	Aguas subterráneas, situación actual y previsiones futuras	11
2.2	Usos de las técnicas SIG en el análisis, modelamiento y gestión de las aguas subterráneas	13
2.3	Factores que condicionan la presencia de aguas subterráneas	15
3.	Área de estudio	17
3.1	Cuenca del Río Darò	18
3.2	Cuenca de Rieres del Montgrí Empúries	19
3.3	Cuenca del Rec Sirvent.....	19
4.	Materiales y métodos	21
4.1	Fuentes de información.....	23
4.2	Homogenización de la información espacial	24
4.3	Selección de los factores que controlan la ocurrencia y la recarga de las aguas subterráneas	24
	Precipitación	25
	Geología	31
	Litología	33
	Usos y cubiertas del suelo	35
	Densidad de drenaje	37
	Densidad de lineamentos	39
	Pendiente.....	41
	Curvatura general	43
	Rugosidad.....	45
	Índice de Posición Topográfica (IPT)	47
	Índice Topográfico de Humedad (ITH)	49
4.4	Asignación y normalización de los valores	51
4.5	Ponderación. Cálculo de los pesos de cada factor	53
4.6	Combinación Lineal Ponderada (WLC)	56
4.7	Modelo de zonas con potencial de aguas subterráneas.....	57
4.8	Análisis de sensibilidad.....	59
4.9	Técnicas de validación	60
5.	Resultados	61

5.1 Mapa de Zonas con Potencial de Aguas Subterráneas (MZPAS).....	61
5.3 Análisis de sensibilidad.....	66
5.4 Verificación de las zonas con potencial de aguas subterráneas.....	67
6. Conclusiones.....	69
7. Bibliografía	71
8. Apéndices.....	83
8.1 Resumen de la información recibida del Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC)	83
8.2 Matriz de comparación por pares (Saaty) de 5 capas temáticas para calcular los pesos de las condiciones topográfica.	85
8.3 Matriz de comparación por pares (Saaty) de 5 capas temáticas para calcular los pesos de las condiciones del terreno.	86
8.4 Matriz de comparación por pares (Saaty) de 3 capas temáticas para calcular los pesos de las condiciones para generar el MZPAS.....	87
8.5 Uso del complemento “Easy AHP” Analytic Hierarchy Process Tool for QGIS... ..	88
8.6 Comparación de los mapas e histogramas. Resultado del Análisis de Sensibilidad, eliminando un factor a la vez	89
8.7 Caracterización del clima en el área de estudio	94

Tablas

<i>Tabla 1. Referencias revisadas para la selección de los factores utilizados en la delimitación de las aguas subterráneas.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2. Resumen y descripción de los datos integrados en este estudio</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3. Red de estaciones meteorológicas seleccionadas para el área de estudio.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 4. Errores de interpolación de la precipitación anual</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 5. Valores de normalización para las once capas temáticas utilizadas en la generación del mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 6. Escala de Saaty. Escala de calificación continua utilizada para la comparación por pares de los factores en la EMC.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 7. Matriz de comparación por pares (Saaty) de 5 capas temáticas para calcular los pesos de las condiciones topográficas.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 8. Matriz de comparación por pares (Saaty) de 5 capas temáticas para calcular los pesos de las condiciones del terreno</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 9. Matriz de comparación por pares (Saaty) de 3 capas temáticas para calcular los pesos del MZPAS.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 10. Vista de la tabla de comparación de los resultados en función de la localización de 488 puntos de agua.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 11. Resumen de los pesos asignados a cada factor y a cada categoría</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 12. Área expresada en Km² y %de las diferentes zonas de potencial de aguas subterráneas</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 13. Variación (%) en área expresada en km², de las diferentes categorías bajo la exclusión de cada factor</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 14. Resumen de la comprobación de la localización de 488 pozos en el MZPAS</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 15. Resumen de la comprobación de la localización de 29 fuentes de agua en el MZPAS</i>	<i>68</i>

Figuras

<i>Figura 1. Ubicación de las cuencas de estudio en el contexto del Mediterráneo occidental y Cataluña..</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento de la metodología aplicada en el estudio.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. A) Observaciones B) ADW, C) IDW, D) Ordinary kriging, E) Simply kriging, F) Universal kriging, G) Multilevel b-spline, H) Thin plate spline.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4. Precipitación anual en milímetros en el área de estudio creado con datos adquiridos del SMC aplicando el método de interpolación “Ordinary kriging “.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 5. A) Mapa de las principales unidades geológicas según su grado de permeabilidad en el área de estudio creado con los datos de ICGC “Mapa geológico 1:25.000”. B) Leyenda del mapa de las unidades geológicas.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 6. Mapa de las principales unidades litológicas en el área de estudio, creado con datos de ICGC “Mapa hidrogeológico 1:25.000”.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 7. Mapa de los usos y cubiertas del suelo en el área de estudio creado con los datos de DTES y (CREAF-UAB” Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña, 2017”.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 8. Mapa de densidad de drenaje creado con los datos de ACA “Cuencas, ríos y delimitaciones administrativas 1:50.000”.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 9. Mapa de densidad de lineamentos en el área de estudio creado con los datos de ICGC “Mapa geológico 1:25.000”.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 10. Mapa de Pendientes creado con los datos de ICGC “MDE”.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 11. Mapa de la curvatura general creado con los datos ICGC “MDE”.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 12. Mapa de rugosidad creado con los datos creado con los datos ICGC “MDE”.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 13. Mapa del Índice de Posición Topográfica (IPT) creado con los datos ICGC “MDE”.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 14. Mapa del Índice Topográfico de Humedad (ITH) creado con los datos ICGC “MDE”</i>	<i>50</i>
<i>Figura 15. Modelo cartográfico del proceso de la generación del mapa resultado de las zonas potenciales de aguas subterráneas.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 16. A) Mapa de las condiciones topográficas. B) Mapa de las condiciones del terreno.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 17. Mapa de las condiciones ambientales </i>	<i>62</i>
<i>Figura 18. Mapa de Zonas Potenciales de Agua Subterránea (MZPAS) </i>	<i>65</i>

1. Introducción

1.1 Motivación

La disponibilidad de los recursos hídricos en el desarrollo de las sociedades es esencial para la vida, además el planeta Tierra y su biosfera depende del agua para sostenerse. La distribución de los recursos hídricos es muy desigual tanto espacial como temporalmente, y su disponibilidad se encuentra amenazada por el cambio global que suma los impactos del cambio climático y las implicaciones derivadas de la explotación de los recursos naturales y los cambios en los usos del suelo. También presentan una significativa vulnerabilidad a largos periodos de sequía y al déficit ocasional que afecta el equilibrio de la oferta y la demanda del agua, sobre todo en la región mediterránea.

Teniendo en cuenta los términos cuantitativos, la relevancia de las aguas subterráneas como fuente de agua dulce y las dificultades que presenta su localización y monitoreo, motiva a explorar metodologías eficientes que puedan contribuir a una evaluación precisa de las aguas subterráneas para garantizar la seguridad, la explotación sostenible y una gestión eficaz de las mismas.

1.2 Contexto

La aplicación de los métodos tradicionales de procesamiento para la prospección de las aguas subterráneas es muy difícil y tienen un coste muy alto tanto de tiempo como de dinero, ya que se requiere de datos masivos y de mano de obra muy calificada. Un uso integrado de técnicas y métodos basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrece muchas ventajas atribuidas a su bajo coste de tiempo y dinero para evaluar y gestionar los recursos de las aguas subterráneas, debido a su capacidad de desarrollar información de diferentes capas temáticas e integrarlas con suficiente precisión en un corto periodo de tiempo. Esto hace que su aplicación sea indispensable para la gestión de las aguas subterráneas.

En este estudio se ha establecido una metodología para apoyar la determinación de zonas potenciales de aguas subterráneas mediante la combinación de técnicas de análisis

espacial basadas en SIG-EMC y el enfoque AHP, para modelar el agua subterránea utilizando datos primarios y accesibles. Abordando el problema desde una escala local, concretando el estudio en tres cuencas representativas de la franja litoral catalana. Los resultados de este trabajo pueden utilizarse para formular un plan eficiente de gestión de aguas subterráneas para un uso sostenible de los recursos hídricos.

1.3 Objetivos

En este estudio se pretende identificar las zonas potenciales de aguas subterráneas en las cuencas de; El Darò, Rieras del Montgrí Empúries y Rec Sirvent, basándose en las técnicas SIG y el enfoque EMC utilizando datos mínimos y accesibles y SIG de código abierto a partir de un Objetivo General (OG) que consiste en:

OG. Identificar las zonas con potencial presencia de aguas subterráneas, utilizando una combinación del enfoque EMC y técnicas SIG en las cuencas hidrográficas de: El Darò, Rieras del Montgrí, Empúries y Rec Sirvent (Cuencas Internas de Cataluña).

Este objetivo general se desglosa en cinco Objetivos Específicos (OE):

OE1. Diseñar un Modelo de EMC integrado en un SIG para elaborar un Mapa de Zonas Potenciales de Aguas Subterráneas (MZPAS).

OE2. Identificar los factores fundamentales que determinan la presencia de las aguas subterráneas en el área de estudio.

OE3. Determinar la importancia que tiene cada uno de los factores en relación con la determinación de las zonas de potencial presencia de agua subterránea (análisis de sensibilidad).

OE4. Diagnosticar el grado de satisfacción de los resultados mediante la superposición de estos con la existencia de pozos y fuentes de agua en el área de estudio extrayendo la información desde el “Mapa hidrogeológico 1:25.000” (ICGC).

OE5. Reflexionar sobre el potencial y las limitaciones del uso de los Sistemas de Información Geográfica en el mapeo de la potencialidad de las aguas subterráneas (mapeo hidrogeológico).

2. Marco teórico y conceptual

2.1 Aguas subterráneas, situación actual y previsiones futuras

La Agencia Catalana del Agua (ACA), define las aguas subterráneas como “Aquellas que se encuentran bajo la superficie y generalmente se acumula en acuíferos, que son formaciones geológicas donde se almacena y circula agua aprovechando la porosidad, la filtración y la fisuración de la roca. Cuando el volumen de agua que se almacena bajo tierra es considerable y claramente diferenciado, se denomina una masa de agua subterránea.” (ACA, 2012).

Las aguas subterráneas son un importante recurso, representando un 30.1% del total del agua dulce de la tierra, es la segunda fuente más importante después del agua retenida en los casquetes polares y los glaciares que suponen un 68.7% del total de agua dulce (Uitto, 2001). Las aguas subterráneas, en términos cuantitativos son mucho más relevantes que las aguas superficiales, pero la variable de la inaccesibilidad hace de este recurso más difícil su localización, monitoreo y evaluación, tanto en términos cuantitativos como cualitativos (EC, 2008).

Las aguas subterráneas son esencialmente un recurso local, su disponibilidad varía en el espacio y tiempo (Young et al, 2015), sobre todo bajo las presiones causadas por el consumo de agua en un continuo aumento de la población desde que se considera esencial para el desarrollo y el suministro de agua potable, tanto en las áreas urbanas como rurales, así como para la agricultura, destinado principalmente para el riego y para la industria y otras actividades socioeconómicas (Van der Gun, 2012). En las áreas rurales y municipios pequeños localizados a una distancia considerable de grandes aglomeraciones urbanas, la dependencia de las aguas subterráneas es altamente significativa (Vrba & Verhagen 2011).

Cataluña presenta situaciones hidrológicas muy diversas en diferentes partes de su territorio, tanto en cuanto a la disponibilidad de agua como a la distribución de la demanda, sea en cantidad, presión o en las formas de abastecimiento y gestión. Con

énfasis en el estado cuantitativo de las aguas subterráneas en el distrito de cuenca fluvial de Cataluña, las extracciones de agua subterráneas representan la principal salida de agua no natural de los acuíferos para las actividades antrópicas, causando importantes desequilibrios, por la explotación de las aguas subterráneas como fuente de abastecimiento de las actividades socioeconómicas, destinadas a diversos usos, principalmente, al abastecimiento de las redes urbanas, los usos industriales, agrícolas y ganaderas (ACA, 2012).

Según los datos de los recursos subterráneos disponibles tanto para el año normal como seco, así como las extracciones y balance de aguas subterráneas correspondiente a los resultados de la evaluación de las 37 masas de agua subterránea, definidas en el Plan de Gestión del Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña (PGDCFC), llevados a cabo durante el periodo de control 2007-2012, para el conjunto del Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña (DCFC), cuenta con un recurso subterráneo total de 1093.6 hm³/año disponible en un año normal. De esta cantidad el 14.7% se destina al abastecimiento urbano, 5.9% a los usos industriales, 15.9% a los usos agrícolas, 0.9% para usos ganaderas y el 62.6% como balance positivo. Esto supone un buen estado cuantitativo de las masas subterráneas, dado que los recursos son superiores a las extracciones por término medio.

En cuanto a los recursos en un año seco, el recurso subterráneo disponible suma un total de 708.7 hm³/año, del cual 22.7% se destina al abastecimiento urbano, 9.1% a usos industriales, 24.5% a usos agrícolas, 1.3% a usos ganaderas y un 42.3% como balance positivo, con una diferencia de 20.3% de balance entre un año normal y seco, dado que se cuenta con menos recursos y las extracciones se intensifican en el año seco expuestos a una reducción notable. Aunque el conjunto del DCFC, presenta relativamente un buen estado cuantitativo, entre las diferentes masas subterráneas existe una gran disparidad ya que algunas son prácticamente inexplotadas y muchas otras cuentan con problemas de disponibilidad. A cara de futuro, no existe ninguna proyección sobre el balance hídrico de las masas de agua subterránea en régimen de explotación para el DCFC. La Agencia Catalana del Agua se limita a realizar un seguimiento de la evolución de los consumos y los impactos del cambio climático sobre las dinámicas de infiltración y recarga con fines de observación de la evolución de los balances hídricos a nivel de las masas de agua subterráneas.

En el contexto del cambio global, aumentan las presiones y la vulnerabilidad de los recursos hídricos, que conllevan una variación en la recarga de los acuíferos y la reserva del agua, resultando en una disminución de la cantidad de agua disponible que comprende los procesos ecológicos y las necesidades humanas (Mas-Pla, 2009). Para el futuro se prevé una escasez importante de agua dulce sobre todo en las áreas que se caracterizan por poca precipitación, población con alta densidad, actividades agrícolas e industriales intensivas. Estas zonas están abocadas a enfrentar problemas de sostenibilidad agravados por los impactos del cambio global sobre la disponibilidad y gestión del agua (Pla & Pascual, 2012). Para garantizar la seguridad de agua en el futuro, especialmente en las áreas áridas y semiáridas, es esencial una evaluación precisa de los recursos disponibles tanto cuantitativamente como cualitativamente.

2.2 Usos de las técnicas SIG en el análisis, modelamiento y gestión de las aguas subterráneas

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en una herramienta insustituible en el análisis y gestión de problemáticas del territorio, donde los aspectos espaciales son cruciales. En los últimos años ha experimentado un auge muy importante, en muchas ocasiones combinados con los sistemas de procesamiento de datos de teledetección, así como múltiples técnicas de mapeo, de aplicación extendida en varias ciencias con diversos enfoques.

Los SIG tienen el potencial de representar las características del territorio de forma georreferenciada, y establecer las relaciones espaciales de los sistemas, lo que permite tener una visión de los problemas de los recursos hídricos (Mckinney & Cai, 2002). También se utilizan los SIG para fines analíticos predictivos en la solución de problemas complejos de planificación y gestión de recursos hídricos, integrando modelos matemáticos tradicionales (Walsh, 1993) y Sistemas de Soporte de Decisiones (DSS) (Keenan & Jankowski, 2019) o utilizar exclusivamente la herramienta SIG en el modelado de los recursos hídricos.

La utilidad de uso de los SIG en el modelado de las aguas subterráneas para una gestión eficaz, evaluando el estado cuantitativo y cualitativo, está demostrada, a pesar de que tradicionalmente su uso ha sido evaluado utilizando modelos numéricos y analíticos. Estos modelos normalmente son adecuados para acuíferos mayores y en su aplicación a acuíferos menores, presentan limitaciones debido al requerimiento de datos extensos y detallados sobre el agua subterránea (Jani, 2012).

La gestión e investigación de las aguas subterráneas y los estudios hidrogeológicos son complejos y dependen de la disponibilidad de un gran volumen de datos de alta calidad que necesitan ser gestionados, almacenados, analizados, además del diseño de modelos conceptuales y de su representación (Goru, 2001). Como ejemplo se necesita la información sobre geología, hidrología, geomorfología, suelo, clima, usos y cubiertas del suelo, topografía; toda esta información se tiene que analizar y combinar (Arshad & Zulfiqar, 2012) por lo que ello hace de los SIG una herramienta potente para el estudio de las aguas subterráneas.

El conocimiento de las zonas potenciales de recarga de las aguas subterráneas es fundamental para acotar las posibilidades de explotación sostenible de las mismas y los SIG disponen de un conjunto de herramientas que proporcionan la capacidad de exploración, conservación y evaluación de los recursos de aguas subterráneas.

En la combinación de las técnicas SIG-EMC y el enfoque AHP, se toma ventaja de (1) la capacidad de SIG de adquisición, almacenamiento, recuperación, manipulación y análisis de datos (Malczewski et al, 2003); (2) la capacidad de la EMC para combinar datos geográficos y establecer preferencias de acuerdo con reglas de decisión específicas (Ghayoumian et al, 2007); (3) la utilidad de AHP en problemas de decisión espacial con un gran número de criterios, que permite una combinación de prioridades jerarquizadas (Borouhaki & Malczewski, 2008). Esa combinación es un método robusto para problemas de decisión espacial y adecuado para la aplicación en la determinación de prospección del agua subterránea (Kallali et al, 2007).

2.3 Factores que condicionan la presencia de aguas subterráneas

Dentro del ciclo hidrológico, las aguas subterráneas son el componente más difícil de cuantificar, dado que es complicado calcular la infiltración del agua en el suelo y a partir de ella, la recarga de las aguas subterráneas, dado que la ocurrencia, movimiento y almacenamiento de las aguas subterráneas dependen de un gran número de factores, como el clima, la formación geológica (litología, estructura y permeabilidad de los acuíferos), la geomorfología, la textura del suelo, los usos y cubiertas del suelo, las características topográficas, la intensidad de drenaje y lineamentos y su interconexión con la red hidrológica, etc. Por eso la evaluación de los factores que controlan la recarga de estas es sumamente importante.

Diversos estudios existentes han aplicado las técnicas SIG para la evaluación de las zonas potenciales de aguas subterráneas obteniendo unos resultados satisfactorios, implementando un abanico muy amplio de factores (Adiat et al, 2012; Afonso et al, 2019; Agarwal et al, 2016; Ajay Kumar et al, 2020; Arulbalaji et al, 2019; Aryanto et al, 2018; Bera, 2018; Bera & Ahmad, 2016; Çelik, 2019; Chaudhary et al, 2018 ; Das et al, 2019 ; Das, 2017; Fagbohun, 2018; Ganesh et al, 2018; Gnanachandrasamy et al, 2018; Höglund, 2018; Ibrahim & Ahmed, 2016; Ifediegwu et al, 2019; Jahan et al, 2019; Jasrotia et al, 2016; Kamila et al, 2018; Karami et al, 2016; Macas et al, 2018; Machireddy, 2019; Magesh et al, 2012 ; Mogaji & Lim, 2017; Mohammadi-Behzad et al, 2019; Mokadem et al, 2018; Mondal, 2012; Nair et al, 2017; Nampak et al, 2014; Nasir et al, 2018; Pani et al, 2016; Patra et al, 2018; Pinto et al, 2017; Rajasekhar et al, 2019; Rehman et al, 2019; Sahoo et al, 2017; Senanayake et al, 2016; Shaban et al, 2006; Shantharam et al, 2018; Singh et al, 2018; Singha et al, 2019; Souissi et al, 2018; Srinivasa Rao et al, 2003; Tiwari et al, 2019). Sin embargo, la selección de los factores es desigual entre los estudios (tabla. 1), pero mantienen algunos en común y son utilizados por un número significativo de estudios.

Entre los factores utilizados para la identificación de las zonas potenciales de las aguas subterráneas, los seleccionados ampliamente en las referencias bibliográficas revisadas vienen a ser: la densidad de drenaje aplicado por un 89% de los estudios, pendiente (87%),

usos y cubiertas del suelo (80%), densidad de lineamentos (74%), geología (70%), suelo (67%), precipitación (65%), geomorfología (59%), litología (30%). Otros factores son seleccionados en menor medida como las aguas superficiales, Modelo Digital de Elevaciones (MDE), capa freática, Índice Topográfico de Humedad (ITH), Índice de Posición Topográfica (IPT), Índice de disección, rugosidad, curvatura, rendimiento de los pozos perforados, dominación del Karst, orientación, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), grado de recarga de las aguas subterráneas, zona no saturada, zona de meteorización, acuíferos y nivel de aguas subterráneas.

Tabla 1. Referencias revisadas para la selección de los factores utilizados en la delimitación de las aguas subterráneas

Referencias revisadas	US	S	G	GM	LIT	DD	DL	PTT	P	AS	DEM	CF	ITH	IPT	ID	R	C	RPP	DK	A	NDVI	GR	ZNS	ZM	AQ	NAS
Adiat et al. (2012)					X	X	X	X	X																	
Afonso et al. (2019)	X		X				X	X	X																	
Agarwal et al. (2016)	X	X	X	X		X		X				X														
Ajay Kumar et al. (2020)	X	X	X	X		X	X	X	X														X			X
Arulbalaji et al. (2019)	X	X	X	X		X	X	X	X				X	X			X	X								
Aryanto et al. (2018)	X	X			X	X	X	X	X																	
Bera, S. (2018)	X	X	X	X		X	X	X	X			X														
Bera, S., & Ahmad, M. (2016)	X	X	X	X		X			X																	
Çelik, R. (2019)	X	X	X	X		X	X	X	X																	
Chaudhary et al. (2018)	X		X	X		X			X																	
Das et al. (2019)	X	X	X				X	X	X			X						X	X	X						
Das, S. (2017)	X	X	X	X			X	X	X																	
Fagbohun, B. J. (2018)	X	X			X	X	X	X	X																	
Ganesh et al. (2018)	X		X	X		X	X		X																	
Gnanachandrasamy et al. (2018)		X	X	X		X	X	X	X																	
Höglund, N. B. (2018)	X	X			X	X	X	X	X																	
Ibrahim, K., & Ahmed, S. A. (2016)	X	X	X	X		X	X	X	X																	
Ifediegwu et al. (2019)	X	X	X	X		X	X	X	X																	
Jahan et al. (2019)	X			X	X	X	X	X	X																	
Jasrotia et al. (2016)	X	X	X	X		X	X		X																	
Kamila et al. (2018)	X	X	X	X		X			X																	
Karami et al. (2016)					X	X	X	X	X																	
Macas et al. (2018)			X			X	X	X	X													X				
Machireddy, S. R. (2019)	X		X	X		X	X	X	X			X											X			
Magesh et al. (2012)	X	X			X	X	X	X	X																	
Mogaji, K. A., & Lim, H. S. (2017)					X	X	X	X	X	X	X							X								
Mohammadi-Behzad et al. (2019)					X	X	X	X	X																	
Mokadem et al. (2018)					X	X			X		X															
Mondal, S. (2012)	X	X	X	X	X	X			X														X			
Nair et al. (2017)	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X		X									
Nampak et al. (2014)	X	X	X			X			X									X					X			
Nasir et al. (2018)	X	X	X			X	X	X	X																	
Pani et al. (2016)	X	X	X	X		X	X		X																	
Patra et al. (2018)	X	X	X	X		X		X	X		X	X										X	X			
Pinto et al. (2017)	X	X	X			X	X	X	X																	
Rajasekhar et al. (2019)	X	X	X	X		X			X			X											X			
Rehman et al. (2019)	X		X						X		X	X														
Sahoo et al. (2017)	X	X	X	X		X		X	X		X	X										X	X			
Senanayake et al. (2016)	X	X	X	X		X	X	X	X																	
Shaban et al. (2006)	X				X	X	X												X							
Shantharam et al. (2018)																										
Singh et al. (2018)	X	X	X			X		X	X	X																
Singha et al. (2019)	X	X		X		X	X	X	X																	X
Souissi et al. (2018)	X	X		X	X	X	X	X	X																	
Srinivasa Rao et al. (2003)			X	X		X	X		X			X												X		
Tiwari et al. (2019)	X	X	X	X		X	X	X	X			X														
Total referencias	46	37	31	32	27	14	41	34	30	40	2	5	11	2	2	1	1	2	3	2	1	5	3	1	1	1
	80%	67%	70%	59%	30%	89%	74%	65%	87%	4%	11%	24%	4%	4%	2%	2%	4%	7%	4%	2%	11%	7%	2%	2%	2%	

US= Uso del suelo, S= Suelo, G=Geología, GM= Geomorfología, LIT= Litología, DD= Densidad de drenaje, DL= Densidad de lineamentos, PTT= Precipitación, P= Pendiente, AS= Aguas superficiales, DEM, CF= Capa freática, ITH= Índice topográfico de humedad, IPT= Índice de posición topográfica, ID= Índice de disección, R= Rugosidad, C= Curvatura, RPP= Rendimiento de los pozos perforados, DK= Dominación del Karst, ASP= Aspecto, NDVI, GR= Grado de recarga, ZNS= Zona no saturada, ZM= zona de meteorización, AQ= acuíferos, NAS= Nivel de aguas subterráneas.

3. Área de estudio

El caso de estudio corresponde a las cuencas hidrográficas del río Darò, las Rieres del Montgrí Empúries y Rec Sirvent, situadas en el noroeste de Cataluña (NE España), que cubren un área total de 563,78 Km². Se sitúan concretamente en el sur y el norte de las comarcas Alt Empordà y Baix Empordà, respectivamente. Comprenden buena parte de la Costa Brava, destino turístico que vive de las playas, parques naturales, humedales y los recursos paisajísticos de la zona, en gran medida. Aun así, no se caracteriza por ser una zona masificada de población. Según los datos extraídos del Mapa de los Usos y Cubiertas del Suelo de Cataluña (MUCSC) 2017, un 55,08% de la cubierta y los usos del suelo está destinado principalmente a la agricultura (cultivos herbáceos, frutales, viñedos y arrozales), de los cuales 24,77% son cultivos de regadío, una cifra importante puesto que implica un consumo significativo de recursos hídricos. Seguido de bosque, un 28,88% aproximadamente, y, por último, las áreas urbanas, que solo ocupan un 6,76% (incluidas las zonas urbanas, urbanizaciones, zonas industriales y comerciales) (Figura 1).

En la llanura costera del Alt Empordà, es donde se localiza un gran número de acuíferos naturales, que sirven de reserva para el consumo agrícola, urbano y, aún que, en menor medida, industrial. Desafortunadamente, por su proximidad al mar y por el uso de sustancias dañinas en los cultivos, estas masas de agua presentan importantes contaminaciones salinas y de plaguicidas. Otro de los motivos de la mala calidad que presentan de forma genérica los acuíferos de estas tres cuencas es la presencia natural de nitratos y amonio.

Las cuencas se caracterizan por una topografía llana que acontece en el extremo meridional, y también por la abundancia de canales artificiales para el cultivo y el uso doméstico e industrial. La elevación varía entre -1 a 616 metros sobre el nivel del mar.

El clima es mediterráneo, con verano seco y otoño lluvioso. La precipitación media anual es entre 540.5 y 620.8 mm, con un máximo entre 192.6 y 242.7 mm en otoño, y un valor mínimo entre 89.7 y 98.1 mm en verano. La precipitación está fuertemente relacionada con los cambios estacionales, la mayor concentración se muestra en el periodo de octubre

a abril. El verano es un periodo seco y la precipitación de extrema variabilidad ocurre mayormente en otoño. La temperatura media anual para el periodo de referencia es entre 9 y 12.8 °C con diferencias inapreciables entre las diferentes ubicaciones en el área de estudio ([Apéndice 8.7](#); Normales climáticas para el periodo de referencia 2007 – 2016).

El hecho de que los materiales que recubren los acuíferos sean granulados y porosos (neógenos, cuaternarios, calcáreas y gres, principalmente), permite una fácil filtración del agua de la lluvia y del agua fluvial. A continuación, se especifican algunos datos de cada una de las cuencas por separado, para ampliar el estudio y poder analizar con más detalle las características de cada una. Toda la información incluida para caracterizar las cuencas de estudio fue extraída de los documentos de los distintos documentos IMRESS 2013 (informe de presiones e impactos en cada masa de agua) disponibles en <http://aca.gencat.cat/es/plans-i-programes/pla-de-gestio/1r-cicle-de-planificacio-2009-2015/document-impres/>

3.1 Cuenca del Río Darò

La cuenca del río Darò ocupa la zona central de la comarca del Baix Empordà. Con una superficie total de 321,52 Km² y 29,99 hab/Km² según datos del IDESCAT 2019, es la mayor en extensión y la menos poblada. En ella se encuentra el río Darò, que le da nombre. A finales del siglo XX se construyó un canal artificial para desviar el cauce del río Darò hacia el río Ter, a unos 6 kilómetros de la desembocadura de este. La cuenca se caracteriza por una amplia red de ríos y torrentes de tipo mediterráneo con caudal variable y un gran número de rieras declaradas como masas de agua muy modificadas. El estado ecológico y químico de estas es bastante malo, según los datos de ACA.

Como aguas de transición, se encuentran los humedales del Baix Empordà-Basses d'en Coll i el del Baix Empordà-Bassa del Frare Ramon. Las aguas costeras tienen una composición media del sustrato arenoso, con una pendiente profunda, y una influencia continental moderada-elevada. Referente a las zonas húmedas y aguas costeras, hay poca información para poder determinar su estado. No obstante, los resultados disponibles

muestran un estado general de degradación, ya que solo un 15% de las masas evaluadas alcanzan un buen estado químico.

3.2 Cuenca de Rieras del Montgrí Empúries

La cuenca de Rieras del Montgrí Empúries se encuentra dividida entre las comarcas del Alt Empordà y el Baix Empordà, ocupando una extensión de 139.46 Km², y con 36.24 hab/Km² según datos del IDESCAT 2019. Es la zona donde hay una mayor extensión en playas, parques naturales y humedales, gracias a la gran red de ríos (aún de bajo caudal), rieras, riegos y arroyos, que en las demás cuencas. Los más importantes son el Parc Natural del Montgrí y los Aiguamolls del Baix Empordà. Como aguas de transición, se encuentran los Aiguamolls del Baix Empordà-el Ter Vell.

La costa es bastante rocosa y con una pendiente pronunciada, aún que hay algunas pocas de tipo arenoso y con un desnivel más moderado. Referente a su agua, esta masa es la que tiene mejores resultados en valores de los elementos de calidad, respecto a las otras cuencas. En cuanto a los acuíferos, son de formaciones calcáreas y dolomitas, por lo que presenta una doble porosidad, fisuración y karstificación. Esto representa una alta filtración del agua en el suelo y subsuelo.

3.3 Cuenca del Rec Sirvent

La cuenca del Rec Sirvent cubre unos 102,8 Km², se sitúa en el centro-sud de la comarca del Alt Empordà, con la cifra más alta de las tres respecto a la población, con 50,66 hab/Km² según datos del IDESCAT 2019. En ella se encuentra el Rec Sirvent, el que da nombre a la cuenca, de unos 5km de largo, que converge junto con otros tramos de riegos en el río Fluvià. Este desemboca entre las playas de Can Comas y la de Sant Pere Pescador, junto al Camping Náutico Almata.

Por el material arenoso y poroso de la costa y la poca elevación respecto al nivel del mar de una zona bastante amplia, esta cuenca presenta gran cantidad de humedales, reconocidos como Parque Natural. En general, presentan un estado químico bastante malo

y una ecología muy perjudicada por una alta presencia de macroinvertebrados. Las masas de agua subterráneas de la cuenca son de tipo aluvial, de las cuales dependen ecosistemas terrestres. De hecho, el Parque Natural dels Aiguamolls de l'Alt Empordà es a su vez un PEIN (Pla d'Espais d'Interès Natural) y forma parte del Convenio Ramsar (tratado internacional que tiene como objetivo la conservación y el uso racional de los humedales). Referente a los ríos de la zona, son de montaña mediterránea, de tipo torrente litoral. Estos presentan riesgos de intrusión salina, y por su ubicación costera, son vulnerables a los nitratos de origen orgánico.

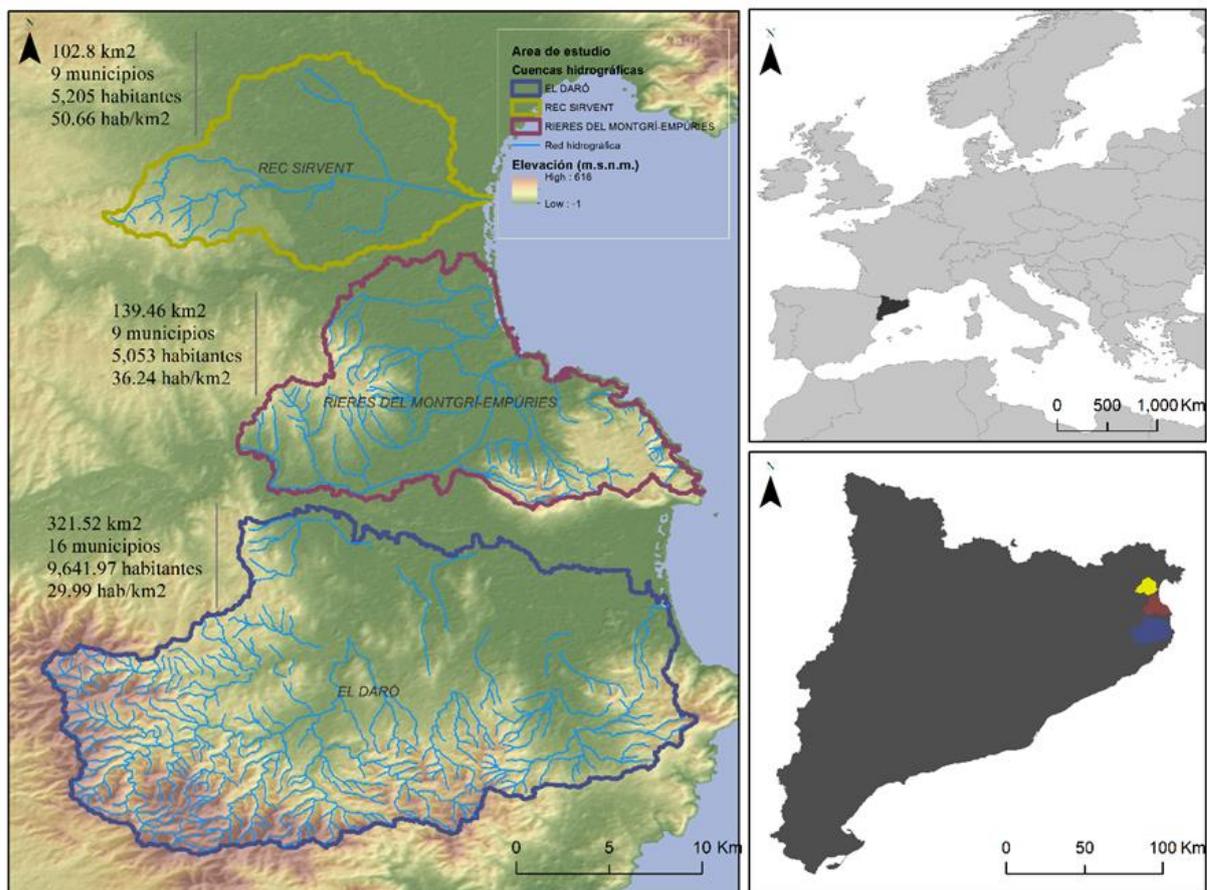


Figura 1. Ubicación de las cuencas de estudio en el contexto del Mediterráneo occidental y Cataluña.

4. Materiales y métodos

En este trabajo se aplican técnicas de Evaluación Multicriterio basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para determinar las zonas potenciales de agua subterránea en las cuencas hidrográficas del Darò, Riera del Montgrí Empúries, y Rec Sirvent, este procedimiento implica un análisis de una serie de factores identificados en base de una revisión bibliográfica que se presenta en [el apartado 2.2](#) y agrupados en tres categorías con la finalidad de organizar los múltiples criterios, teniendo en cuenta las características del área de estudio presentada en [el apartado 3](#). Se seleccionaron un total de once capas temáticas que representan los factores en el área de estudio; precipitación (condiciones ambientales), geología, litología, usos y cubiertas del suelo, densidad de drenaje, densidad de lineamentos (condiciones del terreno), pendiente, curvatura general, rugosidad, Índice de Posición Topográfica (IPT), y el Índice Topográfico de Humedad (ITH) (Condiciones topográficas).

Todas las capas temáticas se recopilaron desde las bases cartográficas de varias autoridades, procediendo a su descarga, análisis y procesamiento. El procesamiento de los datos empleados en las técnicas SIG se llevó a cabo utilizando el software QGIS 3.12.1, QGIS 2.18.3 y SAGA-GIS 4.1.0. Un resumen del material utilizado en este estudio se expone en [el apartado 4.1](#). dado que los datos presentan diferentes características, como puede ser diferente modelo, formato, escala, y/o proyección, se ha procedido a la homogenización de la información espacial detallada en [el apartado 4.2](#), y en [el apartado 4.3](#) se especifican los factores seleccionados en término de su definición, influencia y control en la ocurrencia y recarga de las aguas subterráneas, y el procedimiento de la preparación de la capa temática correspondiente.

Los factores se estandarizaron reduciendo las diferentes unidades de las capas temáticas a un intervalo de valores común [1-5], mediante la clasificación de intervalos iguales ([Apartado 4.4](#)), y se calcularon los pesos de cada factor, según el impacto de cada uno sobre el potencial de agua subterránea. Las ponderaciones de cada factor se asignan de acuerdo con la escala de Saaty (1-9) de valores de importancia relativa ([Apartado 4.5](#)).

Una vez obtenidos los pesos de cada factor, se procede a la agregación de las capas temáticas utilizando el método de Combinación Lineal Ponderada (WLC) (Apartado 4.6) para obtener el Mapa final de las Zonas Potenciales de Agua Subterránea (MZPAS).

En el apartado 4.7 se presenta el modelo desarrollado para la generación de este mapa y, dado que implica un grado de subjetividad, se ha llevado a cabo una evaluación del grado de consistencia de los resultados, realizando una Análisis de Sensibilidad (AS) presentado en el apartado 4.8. Además, se realizó una validación comparando los resultados con los pozos y fuentes de agua existentes en el área de estudio para verificar la coincidencia con las zonas determinadas con el modelo propuesto incluido en el apartado 4.9. A continuación, se ilustra el diagrama de flujo de la metodología aplicada (Figura. 2).

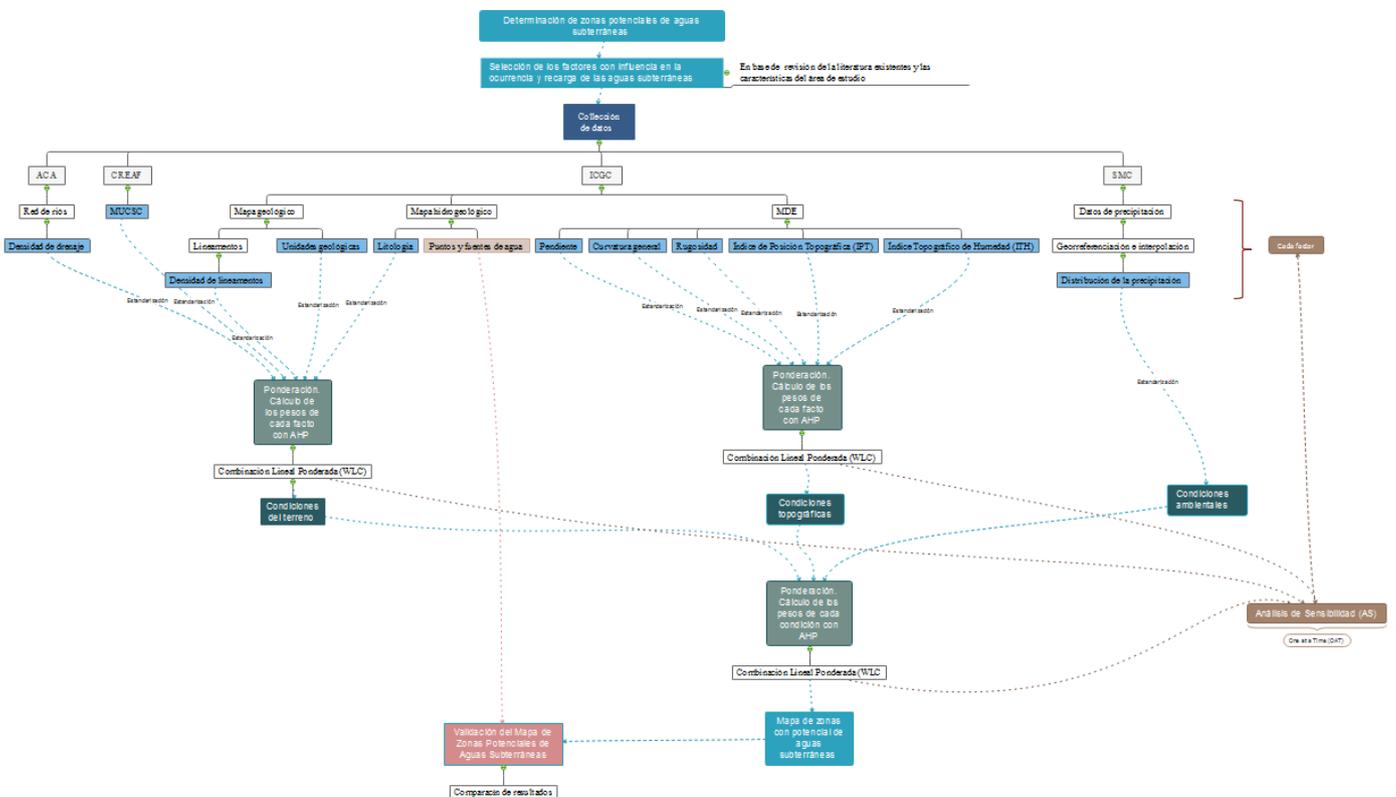


Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento de la metodología aplicada en el estudio.

4.1 Fuentes de información

Las fuentes de información para la preparación de las capas temáticas, que representan los factores seleccionados con influencia en la ocurrencia y la recarga de las aguas subterráneas, integrados en la EMC (Evaluación Multicriterio) así como las capas utilizadas para la información complementaria y la caracterización del área de estudio son principalmente: el Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC), Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC), el Departamento de Territorio y Sostenibilidad (DTES), y la Agencia Catalana del Agua (ACA). En la tabla 2 se ilustra la descripción de los materiales obtenidos de las diferentes fuentes de información.

Tabla 2. Resumen y descripción de los datos integrados en este estudio

Datos	Autoridad	Descripción	Modelo	Formato	Escala/Resolución	Proyección	Hojas
Observaciones meteorológicas	SMC	Datos de precipitación		txt/Excel			
Mapa geológico	ICGC	Unidades geológicas, fallas y placas (Lineamentos)	Vector	shp	1:25.000	UTM-31N con Datum ETRS89	77-21, 77-22, 77-23, 77-24, 77-25, 77-26, 78-21, 78-22, 78-23, 78-24,
Mapa hidrogeológico	ICGC	Litología, puntos de agua y fuentes	Vector	shp	1:25.000	UTM-31N con Datum ETRS89	78-25, 78-26, 79-24, 79-25, 79-26,
MDE	ICGC	MDE	Ráster	mmz	30m	UTM-31N con Datum ED50	
Acuíferos de Cataluña	ACA	Cartografía de acuíferos de Cataluña, 2013	Vector	shp	1:50.000	UTM-31N con Datum ETRS89	
Caracterización de las masas de agua	ACA	Aguas subterráneas	Vector	shp	1:50.000	UTM-31N con Datum ETRS89	
Cuencas, ríos y delimitaciones administrativas	ACA	Cuencas hidrográficas, red hidrográfica, y delimitaciones administrativas	Vector	shp	1:50.000	UTM-31N con Datum ETRS89	
Mapa de cubiertas del suelo de Cataluña	DTES (CREAF-UAB)	Usos y cubiertas del suelo, 2017	Ráster	Geo.TIFF	30m	UTM-31N con Datum ETRS89	

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Homogenización de la información espacial

En el caso de las bases que están distribuidas en varias hojas, se ha procedido a la descarga de las hojas que cubren toda el área de estudio y crear mosaicos de estas, también se rasterizan las bases descargadas en formato vectorial. Las capas temáticas obtenidas tienen diferentes características y, con la intención de que representen la misma extensión de área, el mismo tamaño de celda y la misma proyección, se ha procedido a su homogenización, haciéndolas coincidir con la extensión del área de estudio (xmin 491190.0000, ymin 4636860.0000, xmax 517740.0000, ymax 4680390.0000), otorgándoles una resolución espacial de 30m, y el sistema de proyección (UTM-31N con Datum ETRS89). Para este fin se utiliza el módulo “Resampling” en SAGA-GIS.

4.3 Selección de los factores que controlan la ocurrencia y la recarga de las aguas subterráneas

Las zonas con potencial de aguas subterráneas en un área varían en función de una serie de factores que influyen en la ocurrencia y afectan la recarga de las aguas subterráneas. La identificación de los factores es clave, puesto que la calidad de los resultados depende de la bondad de la selección. En este trabajo los factores se identificaron y se seleccionaron en base de una revisión exhaustiva de un número considerable de referencias bibliográficas, con el objetivo de determinar los factores más empleados junto a un estudio detallado de las características del área de estudio.

Con la finalidad de organizar los múltiples factores involucrados en el modelo desarrollado en este trabajo, se propone una agrupación en tres categorías; condiciones ambientales, condiciones topográficas y condiciones del terreno.

Condiciones ambientales. Corresponde a la precipitación, considerada como la fuente principal de agua para la recarga de agua subterránea.

Condiciones topográficas. Afectan a los patrones de la distribución y la velocidad de la escorrentía superficial y subterránea alimentándose por la lluvia, condicionando la

acumulación y el tiempo de permanencia del agua en el suelo para dar lugar a una infiltración favorable. Los factores que integran las condiciones topográficas son: Pendiente, curvatura general, rugosidad, Índice de Posición Topográfica (IPT), y el Índice Topográfico de Humedad (ITH).

Condiciones del terreno. controlan la transmisión y retención de agua en el suelo y subsuelo. Los factores que integran las condiciones del terreno son: geología, litología, usos y cubiertas del suelo, densidad de drenaje, y densidad de lineamientos.

A continuación, se detallan los factores seleccionados y se expone cómo influyen y controlan la ocurrencia y la recarga de las aguas subterráneas, así como el método utilizado para la creación de la capa temática y su preparación para ser posteriormente integrada en la EMC.

Precipitación

La precipitación es un componente clave en el ciclo hidrológico (NOAA, 2019; USGS, 2020) y es la principal fuente de agua que controla la recarga natural de las aguas subterráneas (Duvert et al, 2015). Los patrones de ocurrencia y distribución espacio temporal de la precipitación determinan la cantidad de agua disponible para infiltrarse en el suelo y el subsuelo, así como para convertirse en escorrentía subterránea (Kotchono et al, 2019). Por eso, generalmente la posible existencia de zonas con aguas subterráneas es alta, si la cantidad de precipitación caída en el área es importante y es baja si la precipitación es reducida (Cai et al, 2016; Thomas et al, 2016).

Con el objetivo de generar la capa de precipitación anual acumulada integrada en la superposición ponderada, se han seleccionado datos de precipitación para un periodo de 30 años (1989 – 2018) de siete estaciones meteorológicas. La selección de estas se ha efectuado en varios pasos; (1) La obtención de ficheros con datos meteorológicos mensuales registrados en las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) que dispone el Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC) en la provincia de Girona en formato

Excel, recibidos vía correo electrónico, tras una petición efectuada a través del formulario disponible en <https://www.meteo.cat/wpweb/serveis/formularis/peticio-dinformes-i-dades-meteorologiques/peticio-de-dades-meteorologiques/>. En [el apéndice 8.1](#) se encuentra un resumen de la información recibida. (2) Descarga de datos directamente desde la base de datos climática del SMC a resolución mensual, en formato .txt disponibles en <https://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/serveis-i-dades-climatiques/series-climatiques-historiques/>. (3) Selección de las estaciones meteorológicas con datos disponible y continuos para el periodo 1989 – 2018, en base de su localización tanto si se encuentran en las cuencas hidrográficas de estudio como si se mantienen una relativa cercanía a estas.

Revisando la información obtenida se llega a la conclusión de que la distribución espacial de las estaciones meteorológicas con datos disponibles para el periodo seleccionado en las cuencas de estudio es irregular y muy escasa; solo siete estaciones cumplen con las características requeridas. Los datos en estas estaciones son continuos y sometidos a un análisis de calidad y homogeneidad.

Dado que la precipitación es una variable distribuida en el espacio de forma continua, pero las mediciones de esta se ven limitadas por la recogida y toma de datos en una red muy reducida de estaciones meteorológicas con datos disponibles en ubicaciones geográficas precisas definidas por unas coordenadas (X, Y), se hace imprescindible la generación de una superficie continua. Para poder generar una superficie de estas características, se toma como referencia la primera ley de Tobler (1970) de geografía que establece que existe una correlación espacial, de modo que, los lugares cercanos presentan más similitudes que los lugares más distantes, de manera que existe una alta probabilidad que las ubicaciones cercanas presenten relativamente características similares (Miller, 2004).

Basándose en este último concepto, se ha recurrido a la utilización de métodos indirectos como los modelos geoestadísticos que engloban una serie de herramientas y técnicas, para analizar y estimar los valores de precipitación en los puntos que no disponen de mediciones directas, considerando la estructura de correlación espacial e integrando los datos obtenidos directamente en las estaciones meteorológicas (Chen et al, 2017; Frolla

et al, 2015; Mair & Fares, 2007 ; Moges et al, 2007; Naoum & Tsanis, 2004; Nusset & Dug, 2012; Shope & Maharjan, 2015 ; Tomczak, 1998 ; Yang et al, 2015).

En este trabajo se utilizan modelos de interpolación espacial en un SIG para calcular la precipitación teórica, en ubicaciones que carecen de mediciones directas, a partir de valores reales medidos en ubicaciones concretas y cercanas, que corresponden a las estaciones meteorológicas seleccionadas (tabla 3).

Tabla 3. Red de estaciones meteorológicas seleccionadas para el área de estudio.

Cod. EM	Nombre EM	Comarca	Fecha inicio	Fecha fin	X UTM (m)	Y UTM (m)	Z (m)
514D	Breda	Selva	01/01/1989	31/12/2018	463204	4622015	169
576D	Cadaqués	Alt Empordà	01/01/1989	31/12/2018	522741	4681973	10
UB	Figueres/Cabanes	Alt Empordà	01/01/1989	31/12/2018	496369	4684011	31
585D	Palafrugell	Baix Empordà	01/01/1989	31/12/2018	513412	4640472	81
U2	Sant Pere Pescador	Alt Empordà	01/01/1989	31/12/2018	507995	4669451	4
586D	La Tallada d'Empordà	Baix Empordà	01/01/1989	31/12/2018	505220	4655976	16
544D	Torrella/Estartit	Baix Empordà	01/01/1989	31/12/2018	516619	4655892	2

Fuente: *Elaboración propia*

EM= Estación Meteorológica

Los datos necesarios para la aplicación de los métodos de interpolación son de tipo puntual con cuatro valores, X e Y para localizar el punto de toma directa de las mediciones, Z como parámetro a estudiar que en este caso es la precipitación y la elevación para mejorar la estimación de la precipitación.

Con el objetivo de seleccionar el mejor método, se han aplicado siete métodos diferentes de interpolación espacial (ADW, IDW, Ordinary kriging, Simply kriging, Universal kriging, Multilevel b-spline, Thin plate spline) para interpolar los datos de precipitación del periodo 1989-2018 a una resolución de 25 X 25 m (Figura. 3). La elección de los métodos se realiza en base a los procedimientos de interpolación más utilizados en la interpolación de la precipitación anual, disponibles en los SIG de código abierto. En concreto, se ha utilizado el software SAGA GIS 4.1.0. generando datos de validación cruzada (Cross-validation) utilizados para la comparación de la calidad relativa de los métodos de interpolación seleccionados en base de los resúmenes estadísticos de los errores generados.

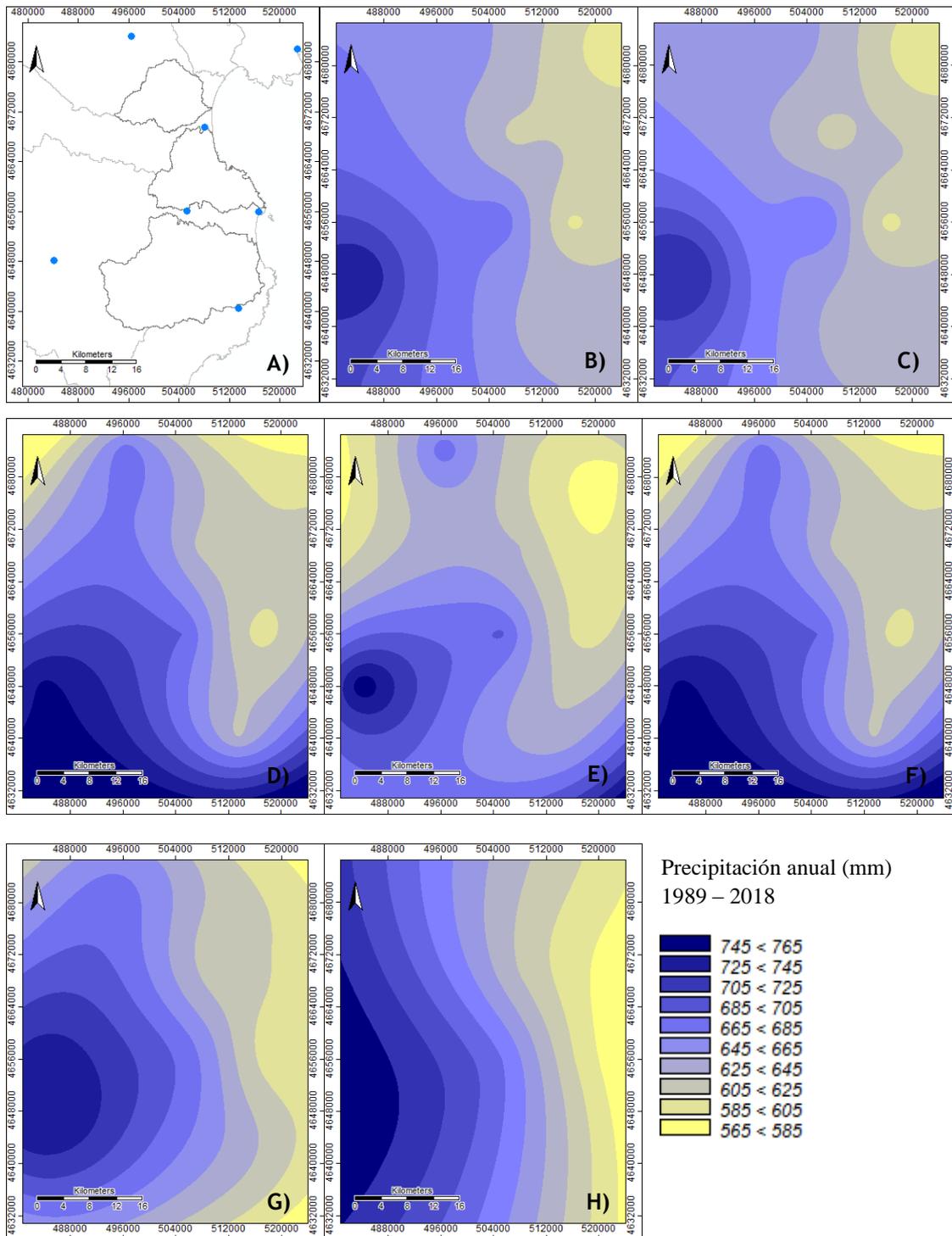


Figura 3. A) Observaciones B) ADW, C) IDW, D) Ordinary kriging, E) Simply kriging, F) Universal kriging, G) Multilevel b-spline, H) Thin plate spline.

La evaluación de calidad de los siete métodos de interpolación implementados se llevó a cabo utilizando, el error absoluto Medio (MAE), error relativo medio (MRE), error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (R), y el coeficiente de determinación (R^2). MRE representa la precisión relativa de la interpolación, el MAE y el RMSE son indicadores de la magnitud de los errores extremos. Los valores más bajos de MAE, MRE y RMSE indican mayores tendencias centrales y comúnmente errores extremos más pequeños. Sin embargo, el coeficiente de correlación de Pearson (R), y el coeficiente de determinación (R^2) se utilizó para la evaluación del ajuste de los datos estimados a los datos observados, los resultados de estos dos indicadores oscilan entre 0 y 1, de forma que cuanto más cerca de 1 se situó su valor, mayor será el ajuste del modelo de estimación a los datos observados y viceversa, cuanto más cerca de 0 menos ajustado es el modelo (Yang et al, 2015).

Según los resultados de la evaluación que se presenta en la tabla 4, el método de interpolación “Ordinary kriging” es la mejor precisión según los valores de MAE, MRE y RMSE, y los valores de R y R^2 . El método de interpolación es significadamente ajustado a los datos observados. En consecuencia, el método “Ordinary kriging” es seleccionado para generar la capa de precipitación (figura. 4) para ser integrada en la EMC como factor.

Tabla 4. Errores de interpolación de la precipitación anual

Métodos de interpolación	MAE	MRE	RMSE	R	R^2
ADW	40.266875	0.060941	623.811745	0.789383	0.623125
IDW	11.486248	0.017384	177.944189	0.945769	0.89448
Ordinary kriging	0.000446	0.000001	0.006904	0.999476	0.998952
Simple kriging	-3.783331	-0.005726	58.611118	0.999476	0.998952
Universal kriging	0.000446	0.000001	0.006904	0.937684	0.879251
Multilevel b-spline	0.004583	0.000007	0.071005	0.813864	0.662374
Thin plate spline	0.009583	0.000015	0.148464	1.000000	1.000000

Fuente: Elaboración propia.

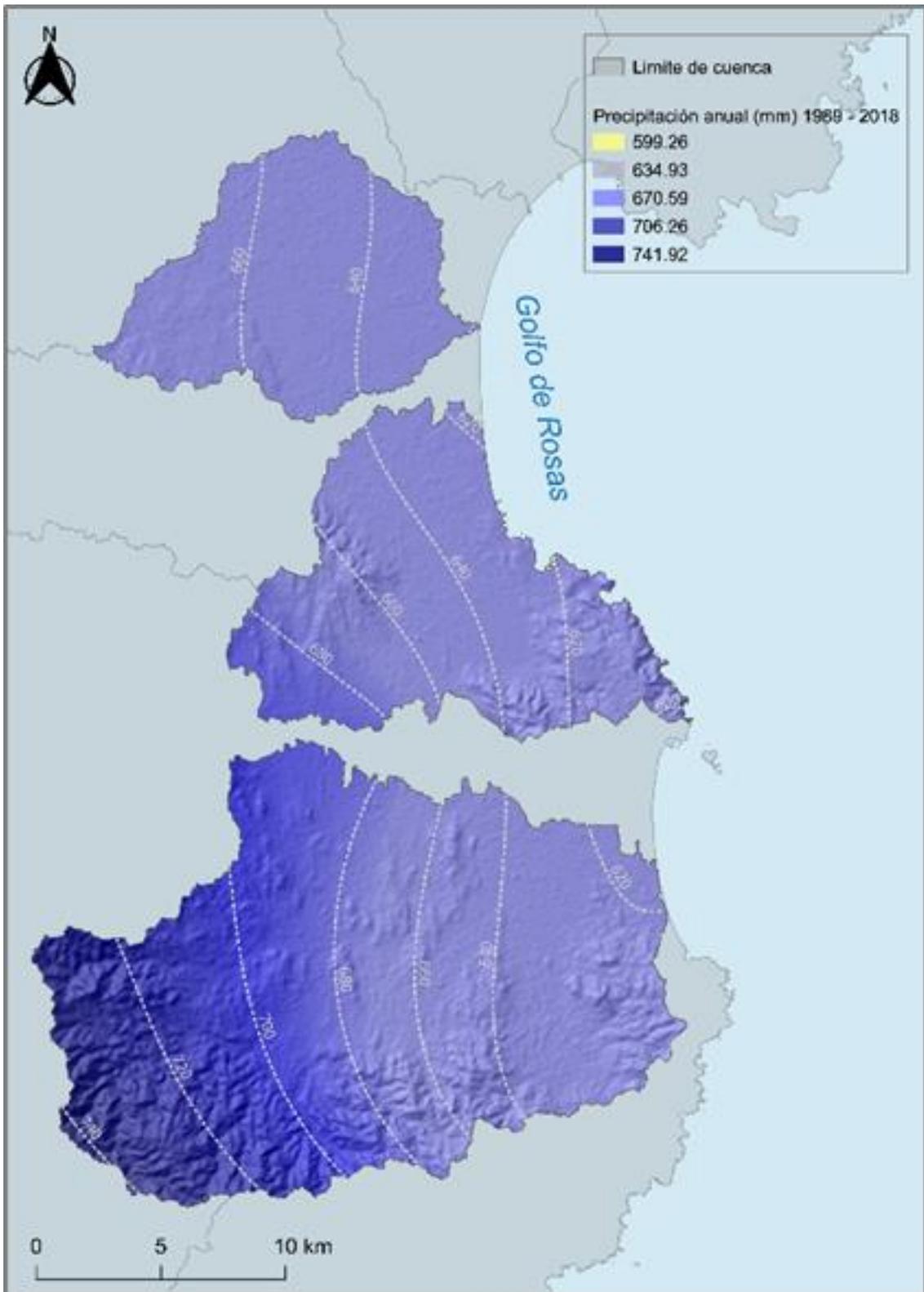


Figura 4. Precipitación anual en milímetros en el área de estudio creado con datos adquiridos del SMC aplicando el método de interpolación “Ordinary kriging”.

Geología

Los materiales geológicos afectan a la ocurrencia y el movimiento de las aguas subterráneas, dado que condicionan la cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo y la velocidad a la que puede hacerlo en función de unas propiedades relevantes tal como la composición mineral, tamaño de grano, consistencia, resistencia, etc. (Rajaveni et al, 2017).

Los diferentes materiales geológicos tienen muy distinta capacidad de retención y transmisión de agua, en función de su porosidad y permeabilidad de manera que, la cantidad de agua es proporcional a la porosidad de los materiales según tamaño, de forma que, a gran tamaño de los poros aumenta la circulación y transmisión del agua y viceversa (Sen, 2015).

Los materiales formados por partículas de arena, arcilla y limo se diferencian significativamente en función de tamaño y caracterizan el suelo en su efecto en la infiltración y la circulación del agua, comúnmente en las partículas gruesas la infiltración es más rápida y facilitan la circulación del agua (arena) y en las partículas pequeñas la infiltración es más lenta (arcilla, limo) (Fetter, 2001; Fitts, 2002).

El mapa de las unidades geológicas (Figura. 5A, 5B) fue creado y extraído a partir del “Mapa Geológico de Cataluña 1:25.000” descargado desde la base de cartografía geológica y geomática del ICGC. El mapa de las unidades geológicas se clasifica en 5 clases, en función del tamaño del poro, de la partícula y su grado de permeabilidad (muy baja, baja, media, moderada, y alta) por lo que varias unidades presentes en el mapa original se consideran en una sola unidad en el mapa de potencialidad de agua subterránea.

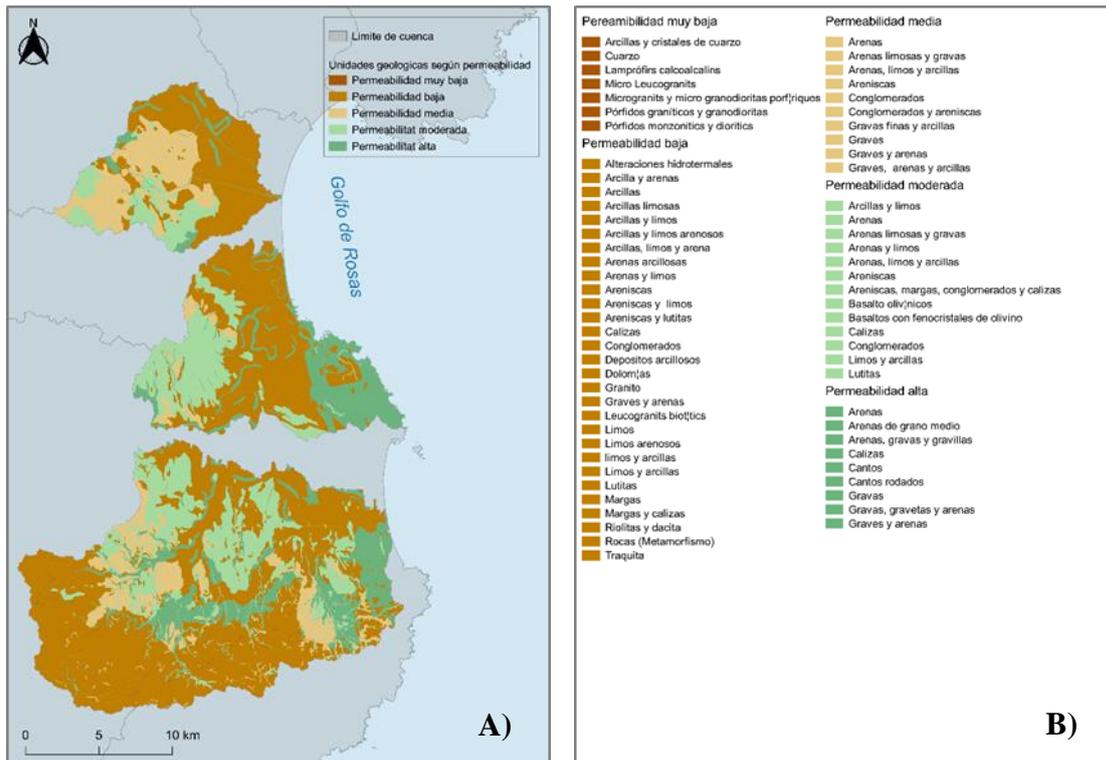


Figura 5. A) Mapa de las principales unidades geológicas según su grado de permeabilidad en el área de estudio creado con los datos de ICGC “Mapa geológico 1:25.000”. B) Leyenda del mapa de las unidades geológicas.

Litología

El tipo de roca, las tasas de meteorización y fractura son factores relevantes que determinan la capacidad del lecho rocoso, para transmitir y retener agua dado que aumentan la porosidad de la roca por lo tanto su permeabilidad (Horton, 1933; Fitts, 2002).

El mapa de litología (Figura. 6) se ha creado a partir del “Mapa Hidrogeológico de Cataluña 1:25000”. La estructura litológica del área de estudio se conforma principalmente por rocas carbonatadas, rocas detríticas consolidadas, rocas detríticas no consolidadas, rocas metamórficas, rocas plutónicas; y rocas volcánicas.

Las rocas sedimentarias se forman a partir de la acumulación de sedimentos sometidos a un complejo proceso químico y físico llamado diagénesis, generalmente provoca cambios en los sedimentos originales en el tamaño de los poros, así como en la estructura de los granos. La porosidad del lecho de roca sedimentaria se forma durante la disposición de los sedimentos generando espacios vacíos entre los granos, creando poros de diferente tamaño en función de la naturaleza de los sedimentos originales, también se forma en los casos de fractura por diversas fuerzas debido a un movimiento violento, caída, carga, la actividad tectónica que puede causar pliegues y fallas o grietas por contracción y expansión. Esta fractura es una fuente importante de porosidad. La existencia de espacios porosos y las fracturas en las rocas dan paso a la circulación de agua a lo largo de los mismos (Fetter, 2001).

Las rocas plutónicas y metamórficas son dos tipos de roca magmática dado a su origen, que se forman por el enfriamiento y solidificación del magma donde las rocas plutónicas se forman cuando el magma se enfría lentamente bajo la superficie y la roca metamórfica cuando se modifican rocas preexistentes sometidas al calor y/o presión. Estas rocas se caracterizan por tener una porosidad muy baja, atribuido a su formación por grandes cristales interconectados. Las rocas volcánicas se forman a partir del enfriamiento rápido y la solidificación del material magmático sobre la superficie, que incluye lava y cenizas, en el mismo proceso del surgimiento a la superficie se forman en la lava y el magma burbujas por el hecho del escape de gases creando espacios abiertos, aunque no sean

interconectados y se generan grietas por contracción que producen una alta porosidad en la roca (Fetter, 2001).

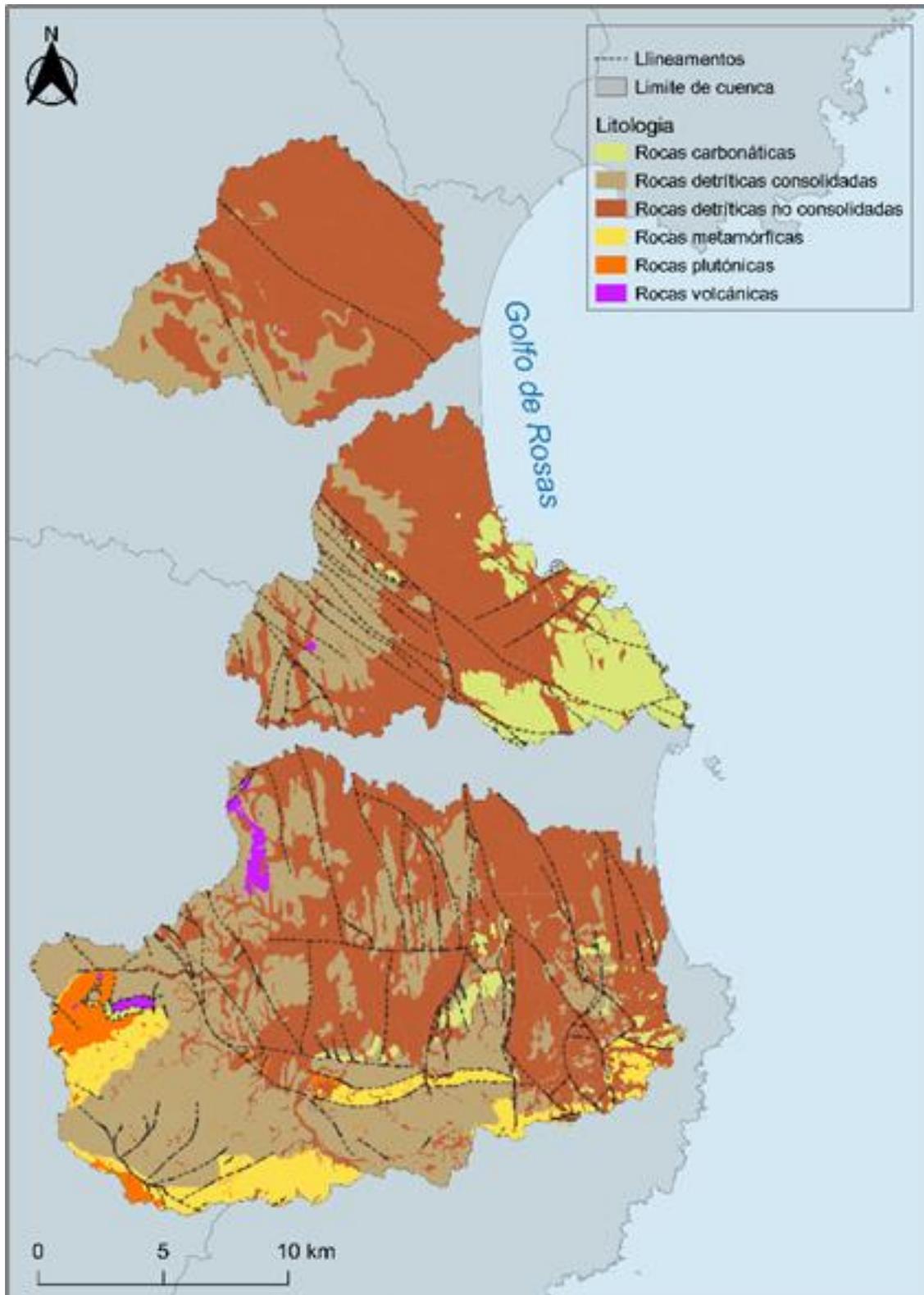


Figura 6. Mapa de las principales unidades litológicas en el área de estudio, creado con datos de ICGC “Mapa hidrogeológico 1:25.000”.

Usos y cubiertas del suelo

Los usos y cubiertas del suelo son formas de la ocupación del territorio, inducidas por procesos geomorfológicos, litológicos, edáficos, climáticos, y socioeconómicos, donde los usos del suelo presentan las funciones socioeconómicas inducidas por la acción antrópica que presentan una relación muy estrecha entre el crecimiento de la población y la expansión de las áreas urbanas, infraestructuras de comunicación, actividades económicas y el aprovechamiento de los recursos, que implica un crecimiento importante en el consumo del suelo, mientras que las cubiertas del suelo presentan la naturaleza de los elementos que ocupan el territorio, como pueden ser los bosques, vegetación, cultivos, aguas superficiales, etc. (Burriel, 2005; Lozano 2011) Dicho eso, los usos y cubiertas del suelo son un factor importante que influye en la recarga de las aguas subterráneas, porque proporcionan información esencial sobre la capacidad de infiltración de agua según la permeabilidad e impermeabilidad de las superficies, atribuido a su constitución por diferentes materiales (Brater, 1968).

El mapa de los usos y cubiertas del suelo se ha creado a partir del "Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña, 2017" (MCSC) realizado por el grupo de investigación en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (CREAF-UAB) descargado desde la base cartográfica del Departamento de Territorio y Sostenibilidad (DTES). Se ha procedido a la reclasificación de las categorías simplificándolas en: aguas superficiales, infraestructuras viarias, zonas industriales y comerciales, zonas urbanas, cultivos, prados, vegetación, bosque, zonas con vegetación escasa o nula y arenas y playas (Figura. 7).

El criterio de clasificación utilizado ha sido el grado de la permeabilidad del suelo en función de la artificialidad / naturalidad de estos que después permitirá estandarizar los valores. Se han considerado elementos como las zonas edificadas que incluyen las zonas urbanas, industriales, comerciales y las infraestructuras de comunicación (ejes viarios y terrenos asociados). Estos elementos proporcionan impermeabilidad a las superficies que ocupan y afectan a la capacidad de infiltración de agua que llega a estas superficies aumentando el coeficiente de escorrentía y disminuyendo la cantidad de agua disponible para penetrar en el suelo y el subsuelo. Mientras que el bosque, vegetación, prados, cultivos, y aguas superficiales son elementos naturales que promueven y facilitan la

infiltración y previenen el exceso de la escorrentía superficial conduciendo a un mayor flujo en el subsuelo contribuyendo en la recarga de las aguas subterráneas.

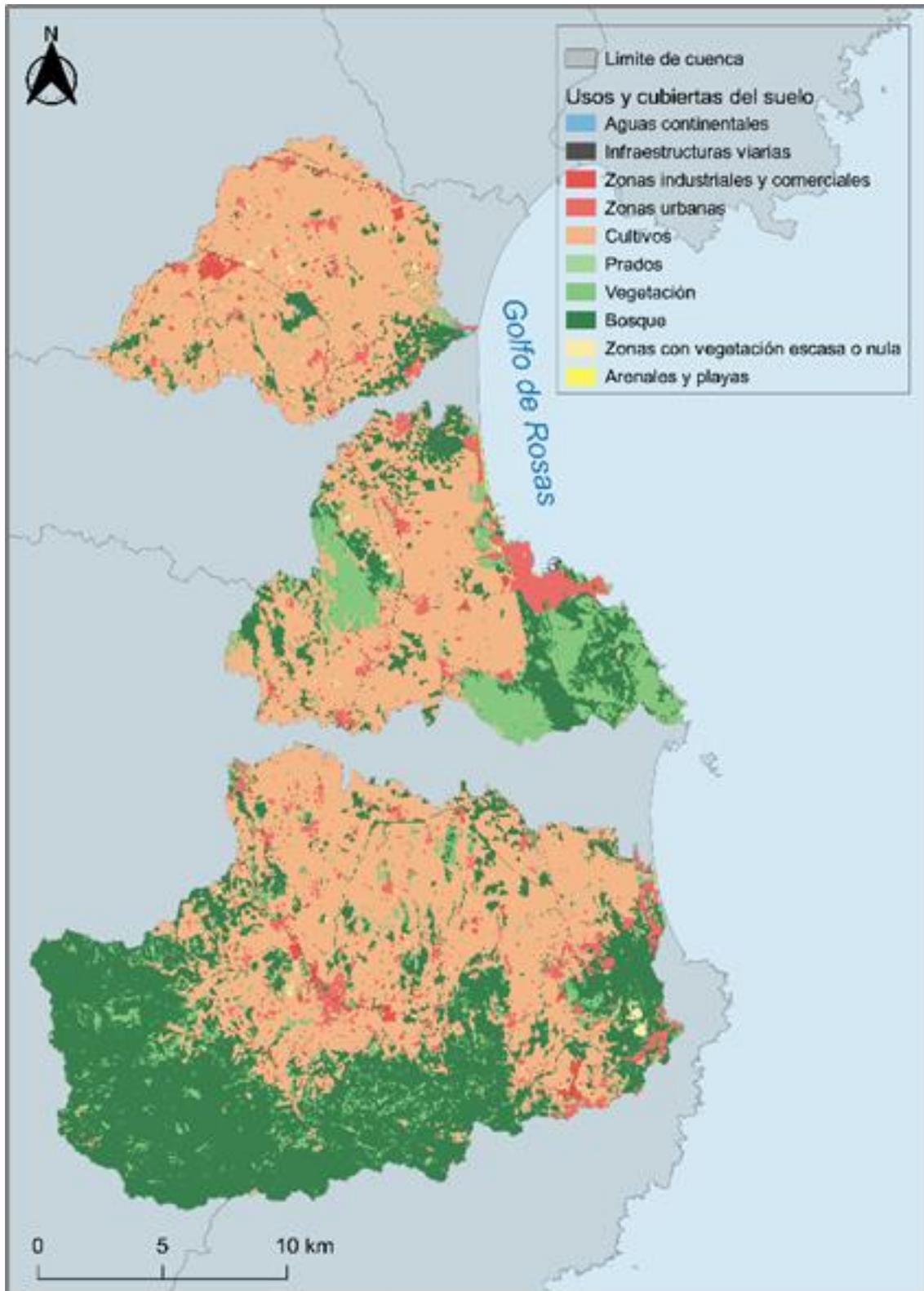


Figura 7. Mapa de los usos y cubiertas del suelo en el área de estudio creado con los datos de DTES y (CREAF-UAB” Mapa de Cubiertas del Suelo de Cataluña, 2017”.

Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es un índice importante que permite identificar las características de los sistemas de drenaje tanto desde el punto de vista geomorfológico como hidrológico, ya que proporciona una medida numérica útil de disección del territorio y del potencial de la escorrentía. En cuanto a la disección del territorio, la distribución espacial de una red de ríos y canales en una cuenca de drenaje contribuye en gran medida a la fragmentación del relieve, en los tipos e intensidades de algunos procesos geomorfológicos (Chorley, 1995). En términos del potencial de escorrentía, la densidad de drenaje es crucial dado que juega un papel significativo en la escorrentía superficial, que a su vez condiciona la concentración y la acumulación del agua variando la capacidad de infiltración en un área (Maidment et al, 1988). Por consiguiente, la densidad de drenaje es considerado un factor relevante en la ocurrencia de las aguas subterráneas porque proporciona una medida numérica útil para poder caracterizar la tasa de infiltración y el potencial de la escorrentía en el área de cuestión. La densidad de drenaje relaciona el desarrollo lineal total de un curso de agua en una cuenca de drenaje y la superficie de esta y se expresa en km/km^2 obtenido a partir de la fórmula matemática:

$$\text{Densidad de drenaje} = \text{Longitud de curso fluvial} / \text{Área de la cuenca}$$

La interpretación se hace en base a la consideración de que la ocurrencia de la escorrentía superficial y su cantidad aumentan significadamente con la densidad de drenaje. A mayor densidad de drenaje, más escorrentía superficial y por lo tanto menos infiltración y a menor densidad de drenaje menos escorrentía favoreciendo la infiltración y la posibilidad de presencia de aguas subterráneas (Carlston, 1963). Por ello la densidad de drenaje se considera un factor importante para tenerlo en cuenta en el modelamiento del potencial de las aguas subterráneas.

El mapa de densidad de drenaje (figura. 8) ha sido creado a partir del mapa de la red hidrográfica descargada desde la base cartográfica de la Agencia Catalana del Agua, utilizando el algoritmo de “line density” en QGIS. El mapa de densidad de drenaje se clasifica en 5 clases utilizando la clasificación de intervalos iguales.

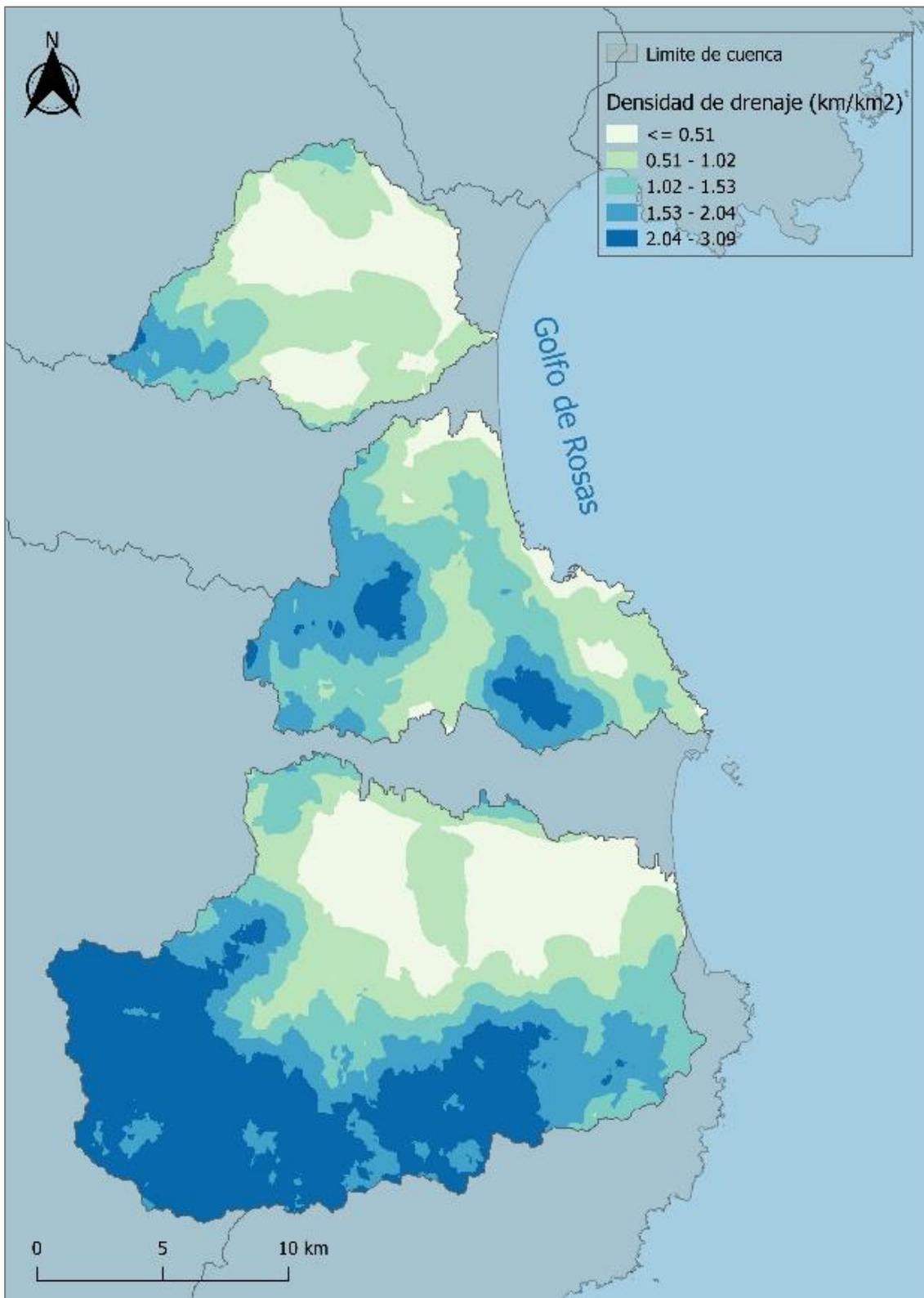


Figura 8. Mapa de densidad de drenaje creado con los datos de ACA “Cuencas, ríos y delimitaciones administrativas 1:50.000”.

Densidad de lineamentos

Los lineamentos con diferentes características estructurales y actividades tectónicas según su dirección y número reflejan patrones de fractura de la roca, proporcionando información sobre las estructuras geológicas lineales o ligeramente curvilíneas que representan la discontinuidad de un área, tal como fallas, zonas de corte, fracturas, contactos litológicos y estructuras de pliegue (Florinsky, 2016). Estos sistemas proporcionan espacios y caminos para el flujo de agua, resultando en mayor porosidad y permeabilidad, promoviendo la infiltración de la escorrentía superficial en el suelo y el subsuelo. Son muy importantes para el movimiento y el almacenamiento de las aguas subterráneas (Florinsky, 2012). Los lineamentos establecen una relación muy estrecha con la ocurrencia de las aguas subterráneas, y por eso si tienen en cuenta como factor que controla la dinámica de las aguas subterráneas.

El análisis de los lineamentos se hace en base a la densidad de los lineamentos, mediante la medida de la frecuencia con la que se producen los lineamentos dentro de un área (Carrión et al, 2016). Se expresa en unidades de longitud por unidad de área expresada en km/km^2 a partir de la aplicación de la fórmula matemática:

$$\text{Densidad de lineamento} = \text{Longitud de lineamento} / \text{Área de la cuenca}$$

Una alta densidad de lineamentos indica que el área es afectada por la perturbación tectónica y estructural, lo que le convierte en un área potencial de aguas subterráneas. A mayor densidad de lineamentos mayor cantidad de agua infiltrada y mayor circulación/movimiento, facilitando la ocurrencia de las aguas subterráneas y su almacenamiento. A menor densidad menos agua infiltrada y mayor escorrentía superficial. El potencial de aguas subterráneas es alto cerca de las áreas con alta densidad de lineamentos y viceversa (Kim et al, 2004).

El mapa de densidad de lineamentos (Figura. 9) ha sido creado a partir de la información de fallas y placas extraída del “Mapa Hidrogeológico de Cataluña 1:25.000” descargado desde la base cartográfica del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, y aplicando el algoritmo de “line density” en QGIS. El mapa de densidad de lineamentos se clasifica en 5 clases utilizando la clasificación de intervalos iguales.

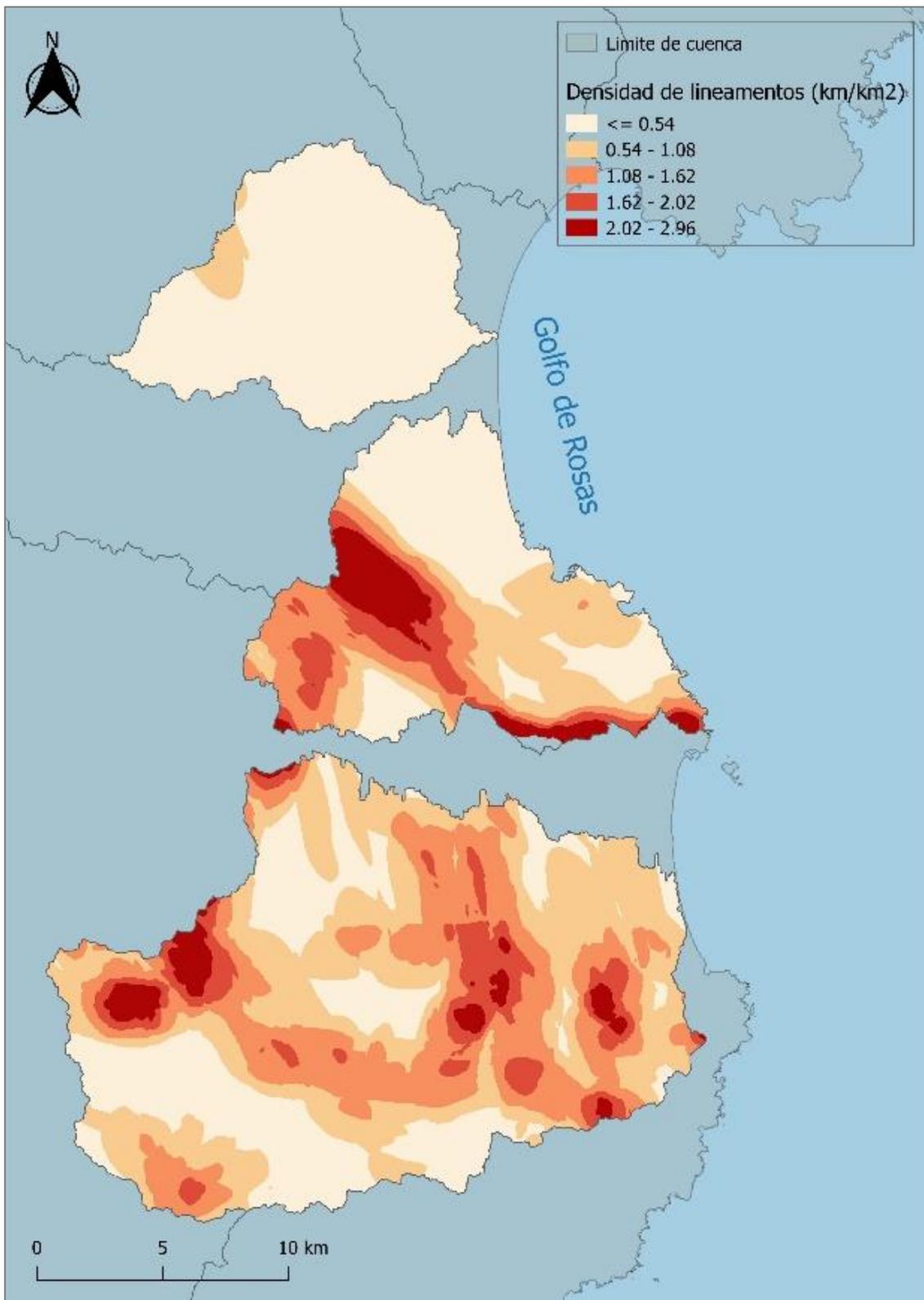


Figura 9. Mapa de densidad de lineamientos en el área de estudio creado con los datos de ICGC “Mapa geológico 1:25.000”.

Pendiente

La pendiente representa el grado de cambio en la elevación de la superficie terrestre, indicando su inclinación (Florinsky, 2016). Juega un papel importante en la generación de la escorrentía superficial y subterránea (Clark et al, 2015). La pendiente como atributo topográfico afecta a los patrones de la distribución y la velocidad de la escorrentía superficial y subterránea alimentada por la lluvia (Hallema et al, 2016), influyendo en los procesos de transporte, promoviendo la aceleración gravitacional, alterando tanto la cantidad como la velocidad del flujo de agua en dirección de la pendiente más empinada hacia las zonas más bajas (Chen & Young, 2006).

La velocidad de la escorrentía aumenta de manera proporcional al grado de inclinación, disminuyendo la capacidad de retención de agua en las zonas altas, liberando las aguas de precipitación hacia las zonas bajas, generalmente tomando curso hacia los ríos, depresiones y lagos. Cuanto más alto es el valor de la pendiente, más pronunciada es la inclinación, y a cuanto más bajo es el valor, el terreno es más plano (Pishvai et al, 2020).

En conclusión, las pendientes pronunciadas desfavorecen la infiltración y afectan negativamente a la recarga de las aguas subterráneas, debido a la escorrentía rápida del agua de precipitación caída, mientras que las pendientes suaves favorecen la infiltración al haber menos escorrentía (Kirkham, 2005) y el agua de precipitación permanece más tiempo en contacto con el suelo, lo que facilita su desplazamiento encontrando camino entre los espacios libres en el suelo y la roca, por lo que se consideran condiciones óptimas para la recarga y el almacenamiento de las aguas subterráneas.

El mapa de pendiente (Figura. 10) fue creado a partir del MDE descargado desde la base cartográfica del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, aplicando el algoritmo pendiente del procesamiento de Análisis de Terreno ráster en QGIS. El mapa de pendientes esta expresado en porcentajes y se clasifica en 5 clases utilizando la clasificación de intervalos iguales.

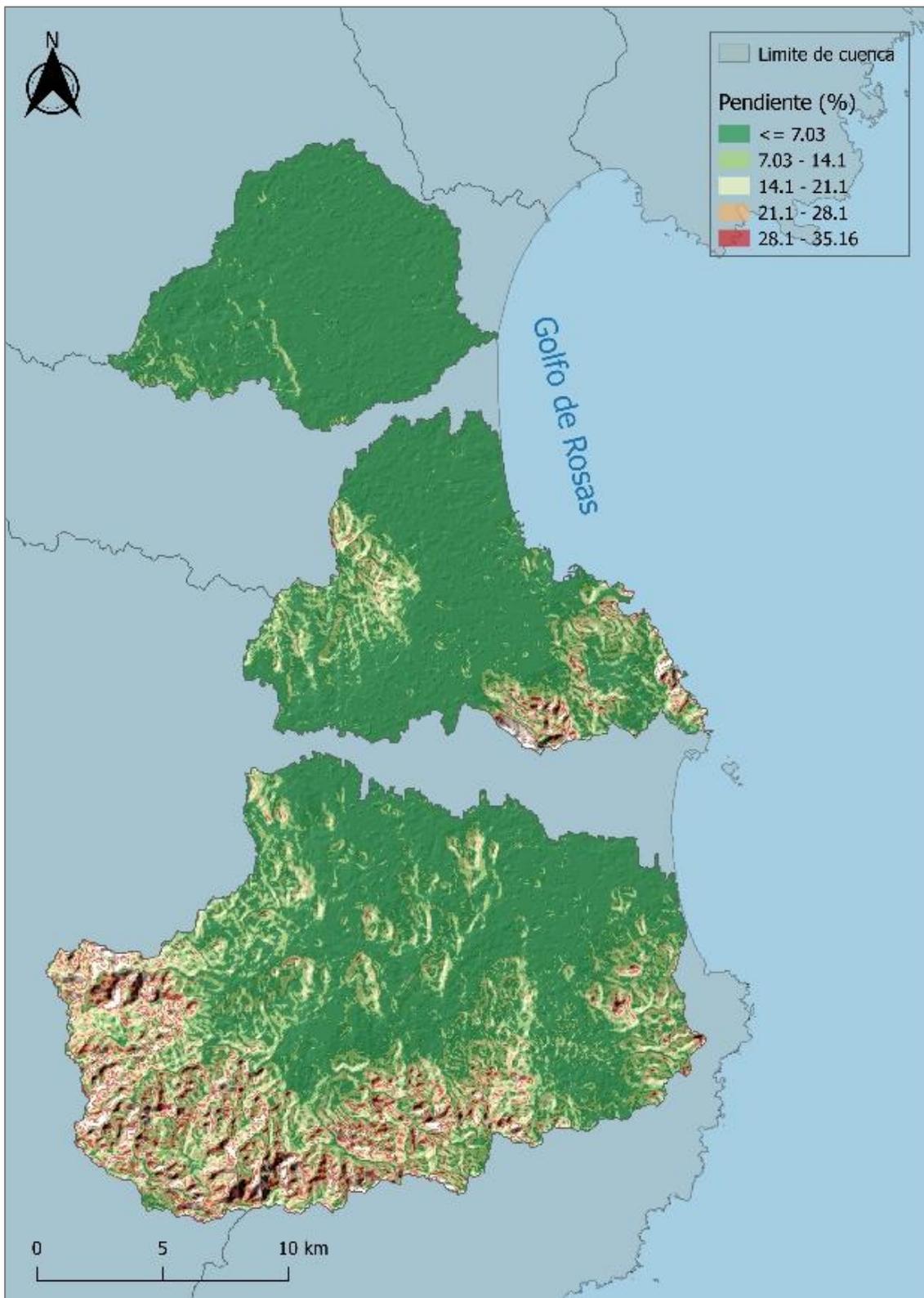


Figura 10. Mapa de Pendientes creado con los datos de ICGC “MDE”.

Curvatura general

La curvatura general o total, es la curvatura de la superficie misma, es un atributo fundamental en la topografía de la superficie terrestre, para el análisis del terreno en términos de morfometría de aplicación extendida en hidrología (Schmidt & Brinkmann, 2003). Permite cuantificar el papel de la topografía en la redistribución del agua en la superficie terrestre e influye en la divergencia / convergencia del flujo de agua (Bogaart & Troch, 2006). En términos de interpretación, la curvatura general puede ser positiva o convexa indicando picos, negativa o cóncava indicando valles, o cero indicando una superficie plana. Determina la aceleración o desaceleración del flujo a través de la superficie, por lo que tiene un impacto en los patrones de distribución de agua y la infiltración en el suelo.

La infiltración tendría a divergir en las partes convexas de la superficie y a converger en las zonas cóncavas. La curvatura positiva indica que la superficie es convexa, y favorece la aceleración del movimiento de agua hacia las zonas más bajas y el contenido de agua del suelo disminuye cuando el flujo diverge. Una curvatura negativa indica que la superficie es cóncava hacia arriba, favorece la acumulación de agua y el contenido de agua aumenta cuando el flujo converge (Krebs et al, 2015).

El mapa de la curvatura general (Figura. 11) se ha extraído y calculado a partir del MDE descargado desde la base cartográfica del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, se aplicó el módulo pendiente, orientación y; curvatura de la biblioteca de morfometría del análisis de terreno en SAGA.

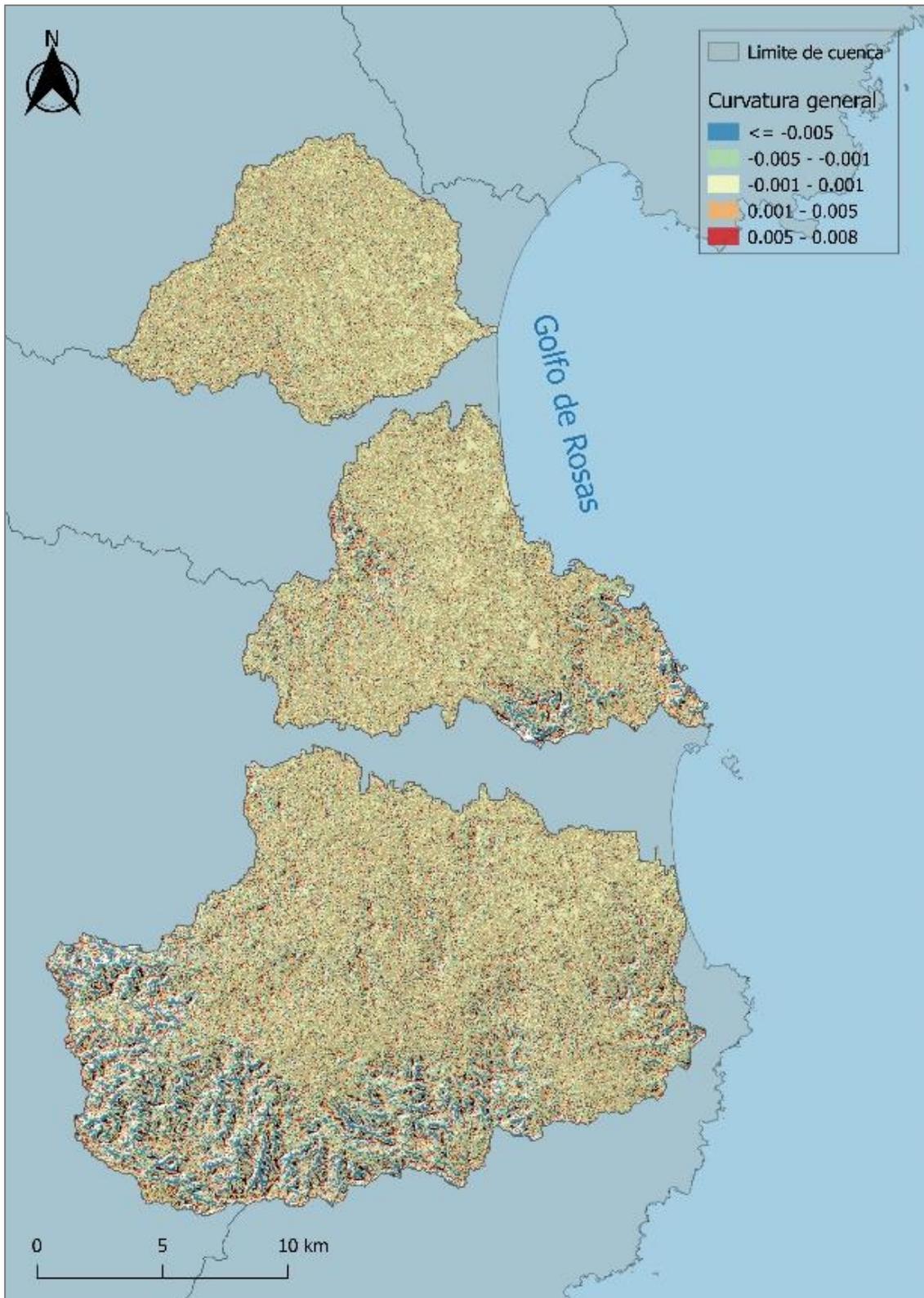


Figura 11. Mapa de la curvatura general creado con los datos ICGC “MDE”.

Rugosidad

La rugosidad superficial representa un conjunto de irregularidades característico de la superficie terrestre, expresadas en diferencias en la elevación del terreno y ondulaciones de la topografía. Su estimación es sencilla como variable derivada del MDE (Candela & Aronica, 2005). La rugosidad superficial es uno de los factores importantes que determinan los procesos superficiales como la infiltración, circulación y captura de agua (Zhang et al, 2016). Una superficie rugosa contiene muchas depresiones y barreras que suelen disminuir la velocidad del flujo de agua, decreciendo así el volumen y la magnitud de la esorrentía (Yang et al, 2015). Las superficies con mayor rugosidad tienden a tener una tasa de infiltración alta que aquellas con menor rugosidad, afectando en gran medida a la posible recarga de aguas subterráneas (Darboux et al, 2004; Rai et al, 2010).

El mapa de la rugosidad (Figura. 12) se obtiene a partir del MDE, descargado desde la base cartográfica del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, utilizando el algoritmo de rugosidad en el marco de procesamiento derivado de las herramientas GDAL ráster empleado en QGIS. El mapa de rugosidad se clasifica en 5 clases utilizando la clasificación de intervalos iguales.

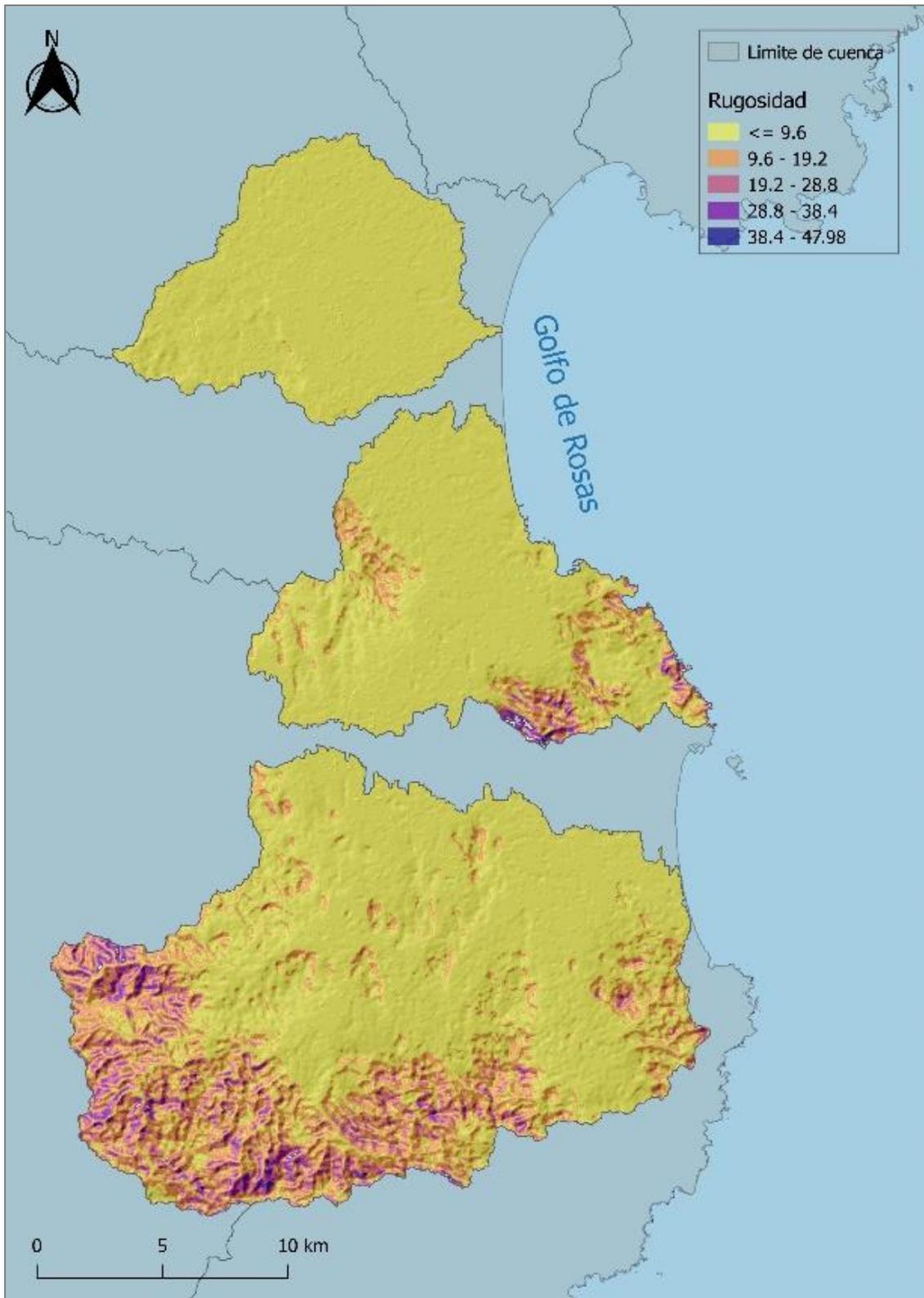


Figura 12. Mapa de rugosidad creado con los datos creado con los datos ICGC “MDE”.

Índice de Posición Topográfica (IPT)

El Índice de Posición Topográfica (IPT), es una variable que caracteriza la topografía local con relación a su contexto espacial (Weiss, 2001). Compara la elevación de cada píxel en un MDE con la elevación media de las celdas vecinas (Mokarram, 2018). Permite la descripción de aspectos morfológicos del territorio y juega un papel importante en la distribución del agua y la infiltración en el suelo (Hjerdt et al, 2004). En interpretación del IPT, los valores positivos del IPT corresponden a las zonas más altas que el promedio de su entorno (picos), los valores negativos representan zonas que son más bajas que los alrededores (valles), y los valores 0 representan zonas planas (Weiss, 2001).

El mapa del IPT (Figura. 13) se ha extraído y calculado a partir del MDE descargado desde la base cartográfica del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, utilizando el algoritmo de “Topographic Position Index (TPI)” de la biblioteca de morfometría del análisis de terreno en SAGA. El mapa de IPT se clasifica en 5 clases utilizando la clasificación de intervalos iguales.

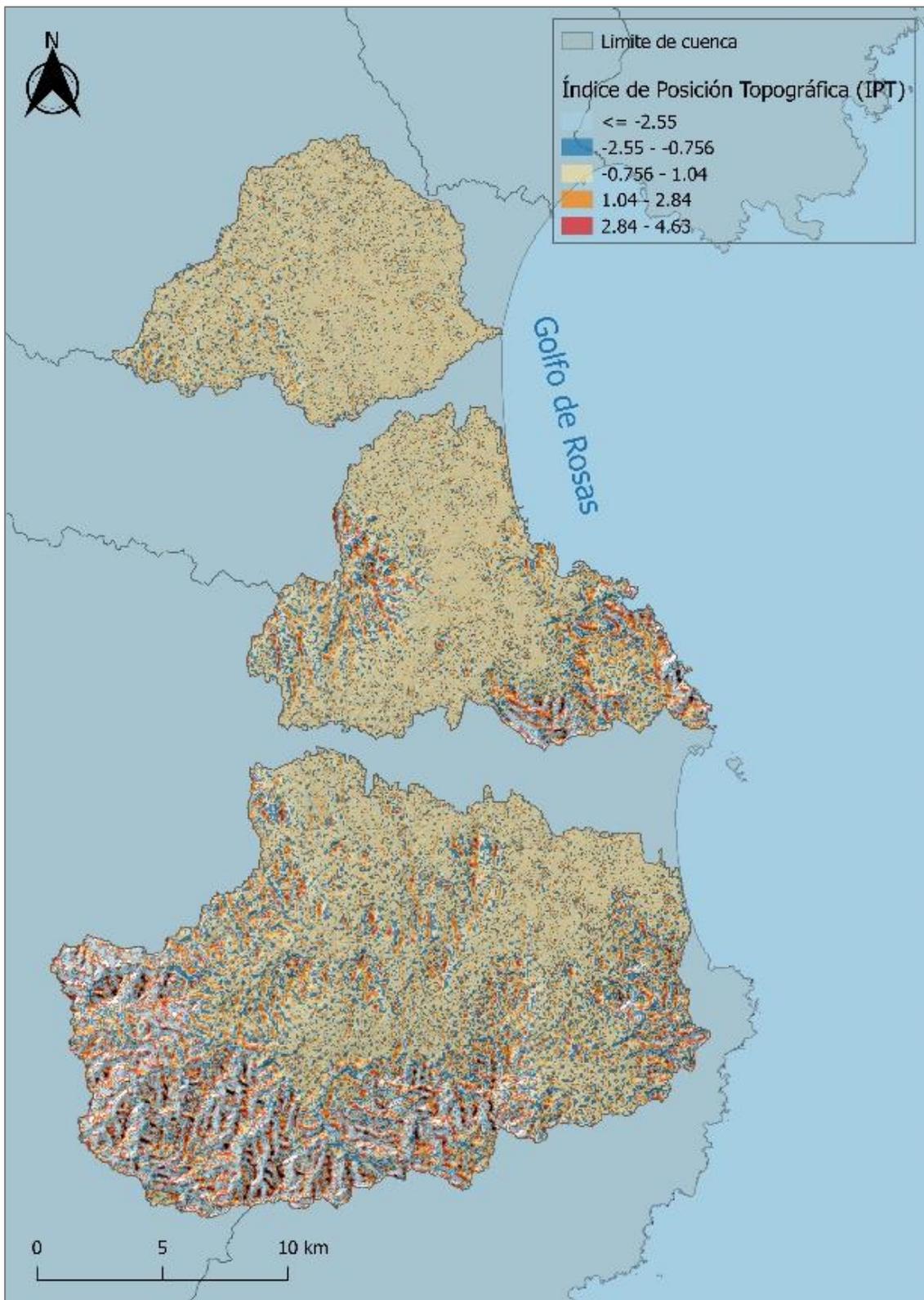


Figura 13. Mapa del Índice de Posición Topográfica (IPT) creado con los datos ICGC “MDE”.

Índice Topográfico de Humedad (ITH)

El Índice Topográfico de Humedad (ITH), proporciona información clave para el análisis morfológico del territorio y permite identificar las zonas donde se concentra la humedad y/o la acumulación de agua (Sørensen et al, 2006). El ITH es comúnmente utilizado para cuantificar el control de la topografía sobre los procesos hidrológicos, así como la variación espacial de las condiciones hidrológicas, la distribución espacial de la humedad del suelo, el flujo y la variación espacial del nivel de las aguas subterráneas. Existe una correlación positiva entre el ITH y el nivel de las aguas subterráneas según estudios que han empleado el ITH para predecir los patrones espaciales de los niveles promedios de aguas subterráneas (Rinderer et al, 2014; Grabs et al, 2009).

El mapa de ITH (Figura. 14) delimita las superficies de gran potencial de recepción de agua, y fue creado a partir del MDE descargado desde la base cartográfica del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, utilizando el algoritmo de “Topographic Wetness Index (TWI)” de la biblioteca de morfometría del análisis de terreno en SAGA. El mapa de ITH se clasifica en 5 clases utilizando la clasificación de intervalos iguales.

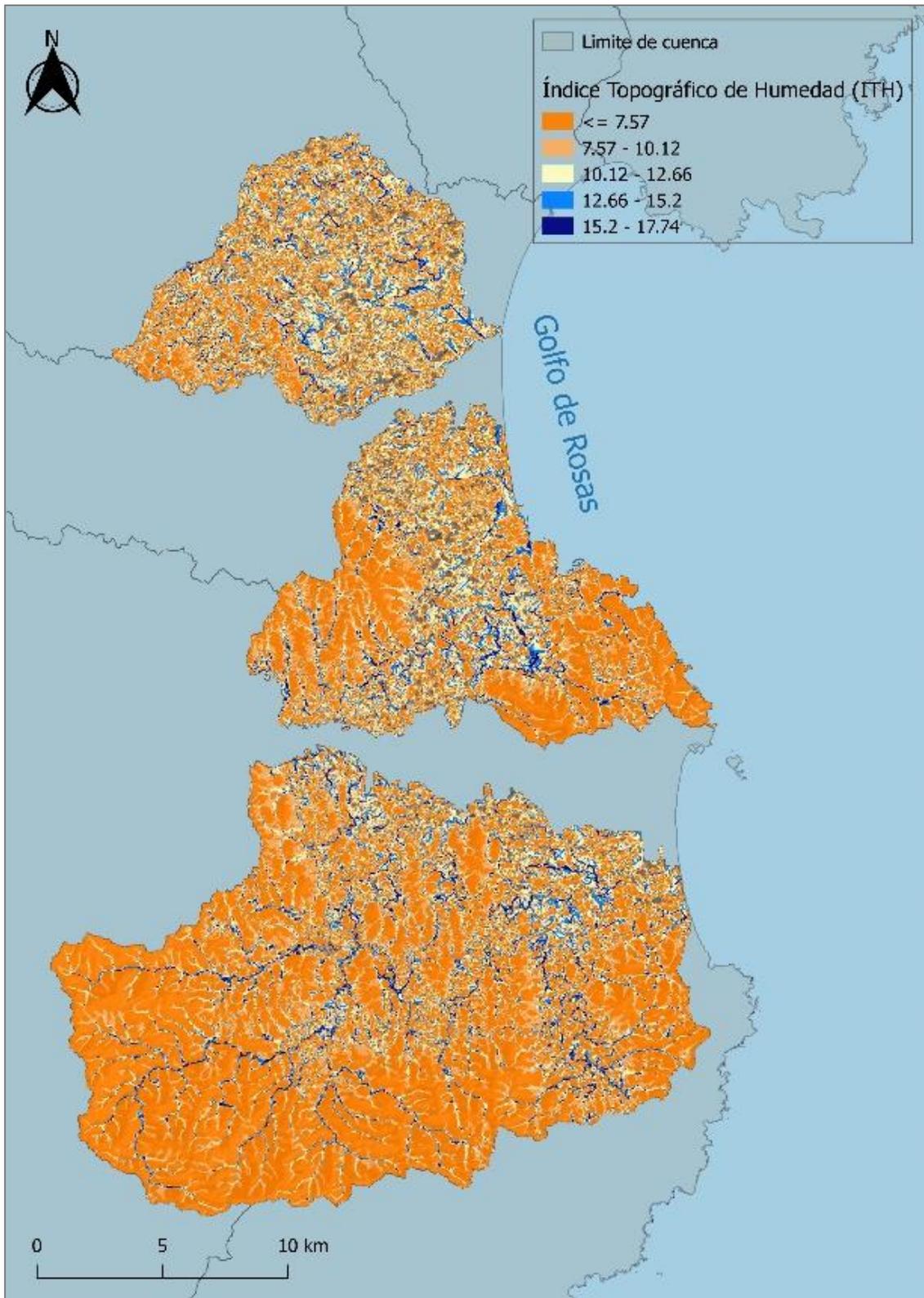


Figura 14. Mapa del Índice Topográfico de Humedad (ITH) creado con los datos ICGC "MDE"

4.4 Asignación y normalización de los valores

Los factores seleccionados se expresan en diferentes unidades y escalas de medida, también existen factores de tipo cuantitativo y otros de tipo cualitativo (Eastman, 1995), por lo que son incompatibles entre sí, por ejemplo, entre los factores seleccionados los hay expresados en kilómetros por kilómetros cuadrados, porcentajes, milímetros, categorías, etc. Para hacer que los factores medidos en diferentes escalas y unidades sean comparables, es necesario transformarlos a una escala común con la misma unidad de medición (Malczewski, 1996). Este tipo de transformación se llama estandarización, de manera que se trasladan todos los factores a una escala de medición común con la misma unidad de medición a un rango numérico discreto, antes de aplicar cualquier peso (Voogd, 1982) y de integrarlos en el algoritmo de EMC (Sumatoria Lineal Ponderada o Combinación Lineal Ponderada, Weighted Lineal Combination en inglés).

En este trabajo, los factores se estandarizaron reduciendo las diferentes unidades de las capas temáticas a un intervalo de valores común [1-5]. En los factores de precipitación, densidad de lineamentos, curvatura general y el Índice Topográfico de Humedad, los valores altos indican idoneidad alta para la ocurrencia y recarga de aguas subterráneas, indicando una dirección de aptitud directa (creciente), mientras que en las capas temáticas de los factores de densidad de drenaje, pendiente, rugosidad, e Índice de Posición Topográfica, los valores bajos indican las áreas más adecuadas presentando una dirección de aptitud indirecta (decreciente). En las capas cualitativas como la litología, geología y las cubiertas del suelo, se asignan valores altos a las clases que presentan alta idoneidad y capacidad para contener aguas subterráneas y viceversa.

La preparación de las capas temáticas de los factores estandarizados se hace utilizando el módulo de reclasificar valores de celdas en SAGA-GIS, clasificando cada factor de tipo numérico en 5 clases utilizando el método de intervalos iguales y asignando nuevos valores de rango [1-5] en función de la dirección de aptitud de cada factor. Para los factores de tipo cualitativo, se asignan los nuevos valores en función de la aptitud de cada clase. En la tabla. 5 aparece la información de estandarización de cada uno de los factores, de modo que en la columna “valor antiguo” aparece el valor original si es de tipo

cualitativo o el intervalo de clasificación mientras que en la columna “valor de idoneidad” aparece el nuevo valor determinado en función de la idoneidad para la presencia de aguas subterráneas.

Tabla 5. Valores de normalización para las once capas temáticas utilizadas en la generación del mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas.

ID	Factor	Valor antiguo	Valor de idoneidad
1	Pendiente	0 - 7.03	5
		7.03 - 14.1	4
		14.1 - 21.1	3
		21.1 - 28.1	2
		28.1 - 35.16	1
2	Rugosidad	0 - 9.6	5
		9.6 - 19.2	4
		19.2 - 28.8	3
		28.8 - 38.4	2
		38.4 - 47.98	1
3	Curvatura general	-0.004	1
		-0.004	2
		-0.002	3
		0.001 - 0.005	4
		0.005 - 0.008	5
4	Índice de Posición Topográfica (IPT)	-1.71	5
		-1.78	4
		-0.77 - 1.04	3
		1.04 - 2.84	2
		2.84 - 4.63	1
5	Índice Topográfico de Humedad (ITH)	5.08 - 7.61	1
		7.61 - 10.1	2
		10.1 - 12.7	3
		12.7 - 15.2	4
		15.2 - 17.74	5
6	Geología	Permeabilidad muy baja	1
		Permeabilidad baja	2
		Permeabilidad media	3
		Permeabilidad moderada	4
		Permeabilidad alta	5
7	Litología	Rocas carbonatadas	4
		Rocas detríticas consolidadas	5
		Rocas detríticas no consolidadas	5
		Rocas metamórficas	2
		Rocas plutónicas	1
	Rocas volcánicas	3	

	0 - 0.51	5
	0.51 - 1.02	4
8 Densidad de drenaje (km/km ²)	1.02 - 1.53	3
	1.53 - 2.04	2
	2.04 – 3.09	1
	Aguas continentales	4
	Infraestructuras viarias	2
	Zonas industriales y comerciales	1
	Zonas urbanas	3
9 Usos y cubiertas del suelo	Cultivos	4
	Prados	5
	Vegetación	5
	Bosque	5
	Vegetación escasa o nula	3
	Arenales y playas	3
	0 - 0.54	1
	0.54 - 1.08	2
10 Densidad de lineamentos (km/km ²)	1.08 - 1.62	3
	1.62 - 2.15	4
	2.15 - 2.96	5
	605.0 - 630.8	3
	630.8 - 656.6	4
11 Precipitación	656.6 - 682.4	5
	682.4 - 708.1	5
	708.1 - 733.8	5

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Ponderación. Cálculo de los pesos de cada factor

Para determinar los pesos de cada factor, se utiliza el método del Proceso de Jerarquía Analítica (Analytic Hierarchy Process, AHP), método que permite el establecimiento de prioridades o importancias entre factores para obtener como resultado una jerarquización priorizada, que muestra la preferencia para cada uno de los factores involucrados (Saaty, 1987).

El establecimiento de prioridades con el AHP consiste en comparaciones pareadas o por pares, señalando la importancia relativa de cada factor respecto al resto mediante una matriz de comparación por pares (Saaty, 2001). Cada factor se compara con los otros factores, en función de su importancia según, la escala de intensidades de preferencias o importancia de Saaty (tabla. 6). Donde una calificación de 1 representa la misma importancia entre los dos factores, una calificación de 1/9 indica que el primer factor del

par es extremadamente menos importante que el segundo, mientras que la de 9 supone que el primer factor del par es extremadamente más importante que el segundo (Saaty, 1983).

Tabla 6. Escala de Saaty. Escala de calificación continua utilizada para la comparación por pares de los factores en la EMC.

Menos importante				Más importante				
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema	Fuerte	Moderada	Igual		Moderada	Fuerte	Extrema	

Fuente: *Thomas Saaty, 1997. Decision making for leaders*

Una vez elaborada la matriz de comparación por pares, se puede calcular el peso de cada uno de los factores comparados. Es conveniente realizar un análisis de consistencia de la matriz de comparación para comprobar que la decisión muestra un juicio coherente, ya que cabe la posibilidad de haber inconsistencia. Para este fin, AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia entre los factores pareados mediante el cálculo del coeficiente de consistencia para cada matriz (Saaty, 1977).

En el desarrollo del caso de aplicación en este trabajo, para generar un mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas, las calificaciones dadas a cada factor seleccionado se decidieron en función de la documentación sobre la influencia y control de cada factor en la ocurrencia y almacenamiento de las aguas subterráneas, en base de una revisión de referencias bibliográficas. En consecuencia, todas las capas temáticas (Factores) se comparan entre sí en una matriz de comparación por pares (tabla. 7, 8) y el proceso completo se incluye en los apéndices 8.2 y 8.3. Las categorías resultado de la agrupación de los diferentes factores también se comparan entre sí (tabla. 9) y todo el proceso se recoge en el apéndice 8.4. El procedimiento se lleva a cabo utilizando el complemento de "Easy AHP" disponible en QGIS 2.18.3 que proporciona un análisis de proceso de jerarquía analítica (AHP) y combinación lineal ponderada (WLC), para estimar los pesos de la importancia de las capas temáticas (Apéndice 8.5). Al suponer que se tienen n factores en cierta jerarquía específica, el AHP establece una matriz de comparación por pares de $n \times n$ y para validar el grado de consistencia entre las calificaciones asignadas en la matriz de comparación por pares, la herramienta ofrece el cálculo de la razón de consistencia (CR, Consistency Ratio). Para su estimación se realizan los siguientes pasos:

1. Se estima el índice de consistencia (IC) de la matriz $n \times n$ y se obtiene de la escala de Saaty 1- 9, donde el IC viene definido por:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \text{ Índice de consistencia de la matriz}$$

Donde λ_{max} es el máximo autovalor de la matriz.

2. Se determina el Índice Aleatorio (IA) que es el índice de consistencia de una matriz de comparación por pares generada de forma aleatoria, donde este depende del número de los factores que se comparan. Es calculado de manera empírica y viene definido por:

$$IA = \frac{1.98(n - 2)}{n} \text{ Índice de consistencia aleatoria de la matriz}$$

3. Se establece la razón de consistencia como se presenta en la ecuación matemática. El valor de CR debe ser inferior a 0.1 para pesos consistentes, de lo contrario, los pesos correspondientes deben reevaluarse para evitar inconsistencias.

$$RC = \frac{IC}{IA} \text{ Razón de consistencia de la matriz}$$

Si $RC \leq 0.1$, el nivel de inconsistencia es aceptable

Tabla 7. Matriz de comparación por pares (Saaty) de 5 capas temáticas para calcular los pesos de las condiciones topográficas

	Pendiente	Rugosidad	Curvatura general	IPT	ITH
Pendiente	1	3	5	7	7
Rugosidad	1/3	1	3	5	7
Curvatura general	1/5	1/3	1	3	5
IPT	1/7	1/5	1/3	1	3
ITH	1/7	1/7	1/5	1/3	1

$\lambda = 5.311$ CI = 0.078 CR = 0.07

Tabla 8. Matriz de comparación por pares (Saaty) de 5 capas temáticas para calcular los pesos de las condiciones del terreno

	Geología	Litología	Densidad de drenaje (km/km2)	Usos y cubiertas del suelo	Densidad de lineamentos (km/km2)
Geología	1	5	3	7	9
Litología	1/5	1	1/3	3	5
Densidad de drenaje (km/km2)	1/3	3	1	5	7
Usos y cubiertas del suelo	1/7	1/3	1/5	1	5
Densidad de lineamentos (km/km2)	1/9	1/5	1/7	1/5	1

$\lambda = 5.384$ CI = 0.096 CR = 0.086

Tabla 9. Matriz de comparación por pares (Saaty) de 3 capas temáticas para calcular los pesos del MZPAS.

	Condiciones topográficas	Condiciones del terreno	Condiciones ambientales
Condiciones topográficas	1	2	3
Condiciones del terreno	1/2	1	3
Condiciones ambientales	1/3	1/3	1

$\lambda = 3.054$ CI = 0.027 CR = 0.047

4.6 Combinación Lineal Ponderada (WLC)

La agregación de las capas temáticas se realiza mediante el método Combinación Lineal Ponderada (WLC, *Weighted Linear Combination*) que requiere la suma de los factores ponderados (Malczewski, 2000). De forma que los factores estandarizados se combinan aplicando un peso a cada uno, seguido de una suma de los resultados (Malczewski, 2011) para obtener el mapa de zonas potencial de aguas subterráneas. Donde la suma del conjunto de ponderaciones de los factores para la evaluación debe ser uno. El mapa resultante obtendrá el mismo rango de valores que los mapas de factores estandarizados empleados (Drobne & Lisec, 2009).

$$S = \sum W_i X_i$$

Donde S es idoneidad, W_i es el peso del factor i , y X_i es el valor del criterio del factor i

El mapa de potencial de aguas subterráneas se generó utilizando el complemento “Easy AHP” disponible en QGIS 2.18.3 que combina el análisis AHP y WLC. Después de calcular los indicadores con AHP, se ejecuta el análisis WLC utilizando los pesos de cada capa temática de salida del AHP para generar el mapa de potencial de aguas subterráneas,

en este paso “Easy AHP” utiliza la herramienta calculadora ráster SAGA de “Processing Toolbox”.

4.7 Modelo de zonas con potencial de aguas subterráneas

El Mapa de Zonas Potenciales de Aguas Subterráneas (MZPAS) se genera en entorno SIG, basándose en el enfoque de Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y el uso de la combinación lineal ponderada (WLC) de las capas temáticas de los factores. El modelo cartográfico desarrollado para la determinación de las zonas potenciales de aguas subterráneas combinando SIG-EMC, se muestra en la figura 15.

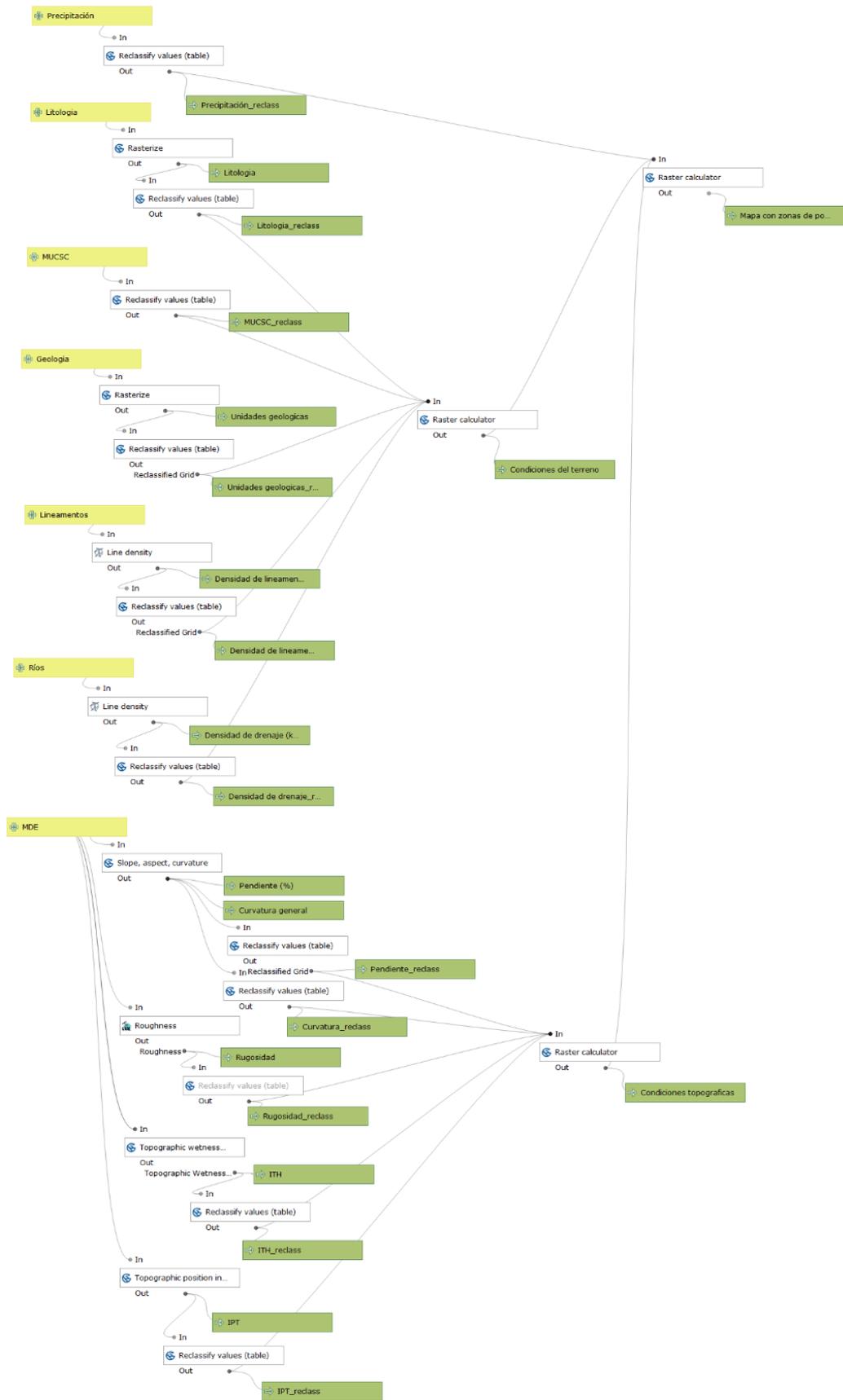


Figura 15. Modelo cartográfico del proceso de la generación del mapa resultado de las zonas potenciales de aguas subterráneas.

4.8 Análisis de sensibilidad

El modelo aplicado en este trabajo para la determinación de zonas potenciales de aguas subterráneas se basa en técnicas SIG-EMC y el enfoque AHP, que tiene en cuenta una serie de factores ponderados según su grado de importancia y una regla de decisión. Dado que el desarrollo del modelo implica un grado de subjetividad, es sumamente importante llevar a cabo una evaluación del grado de consistencia de los resultados obtenidos. Para ello se opta por realizar un Análisis de Sensibilidad (AS) utilizando el AS de tipo local, que es el método denominado “uno a la vez” (*One at a Time*, OAT) considerando su simplicidad y su uso extendido en el análisis de sensibilidad de modelos espaciales (Mair et al, 2012).

Este método consiste en la eliminación de uno de los factores del modelo manteniendo los demás fijos, con la intención de comprobar el efecto que este produce en el resultado de salida (Lodwick et al 1990). La operación se repite tantas veces como factores haya en el modelo. Esta operación ayuda a comprender las implicaciones y el impacto de los diferentes factores involucrados en SIG-EMC y AHP debido a su exclusión (Saltelli, 2002) en la determinación de las zonas potenciales de aguas subterráneas. La sensibilidad se mide identificando los cambios producidos en la salida (Chen & Khan, 2010) comparando el nuevo resultado (todos los factores menos uno) con el resultado original (todos los factores presentes en el modelo), calculando la variación en porcentaje producida por cada tipo de zona de aguas subterráneas (Muy bajo, bajo, medio, moderado, alto) por cada factor eliminado (tabla. 13). Se considera que cualquier cambio observado se atribuye al único factor eliminado (Crosetto & Tarantola, 2001) porque, al eliminar un factor, se mantienen los demás fijos, así como los pesos asignados en la implementación del AHP y WLC. Todos los cambios se calculan en referencia al mismo mapa final de la determinación de zonas potenciales de aguas subterráneas.

Todo el proceso de la aplicación del Análisis de sensibilidad (SA) “uno a la vez” (*One at a Time*, OAT), se lleva a cabo utilizando el complemento de “Easy AHP” disponible en QGIS 2.18.3, de forma que se elimina cada factor, y se repite todo el proceso por cada factor eliminado, mantenido el resto de las condiciones fijas para finalmente obtener el mapa final de las zonas potenciales de aguas subterráneas. Se ha utilizado el módulo de

“Confusion Matrix, two Grids) que permite comparar dos capas ráster clasificadas (la capa original del modelo y la capa en la que se ha eliminado un factor) creando una matriz de confusión y coeficientes derivados para el análisis de los cambios producidos (Apéndice 8.6).

4.9 Técnicas de validación

La validación del mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas se lleva a cabo comparando los resultados con el mapa de la ubicación de los puntos de agua con dato de nivel piezométrico y las fuentes de agua (*Springs*), cuya información fue extraída del “Mapa Hidrogeológico de Cataluña 1:25.000” descargado desde la base cartográfica del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña. El mapa final de salida de las zonas potenciales de aguas subterráneas se superpone a los pozos y fuentes de agua para verificar la coincidencia con las zonas detectadas con el modelo. Para ello se utiliza el módulo “Add Grid Values to point” en SAGA-GIS que realiza una unión espacial y permite recuperar información de las capas ráster (MZPAS) en las posiciones de los puntos de la capa de puntos (nivel piezométrico y fuentes de agua) y la agrega a la capa resultante de salida (SAGA-GIS Module Library Documentation, 2020).

Tabla 10. Vista de la tabla de comparación de los resultados en función de la localización de 488 puntos de agua.

ID	ID_EH	X	Y	PROF_PA	COTA_Z	PROF_NP	COTA_NP	TIPUS_PA	Ubicación de los pozos en el MZPAS
1	ABON0001	505662.6051	4661380.2040	23.00	16.10	11.90	4.20	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
2	ABON0002	506968.6021	4660713.1930	3.25	7.70	2.40	6.10	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
3	ABON0003	506074.6075	4661616.2020	30.00	6.80	3.20	4.40	Pou/piezometre amb dada de nivell	Bajo
4	ABON0004	505955.6072	4661597.2020	9.05	10.50	6.50	4.70	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
5	ABON0005	508441.6173	4662423.1850	7.40	5.00	1.60	3.30	Pou/piezometre amb dada de nivell	Medio
6	ABON0006	508149.6160	4662315.1870	9.70	5.40	2.30	3.10	Pou/piezometre amb dada de nivell	Medio
7	ABON0007	508789.6111	4661540.1810	52.00	6.00	3.60	3.50	Pou/piezometre amb dada de nivell	Bajo
8	ABON0008	508579.6087	4661260.1820	37.70	5.70	3.40	2.20	Pou/piezometre amb dada de nivell	Bajo
9	ABON0009	507454.6201	4662995.1930	10.40	3.90	2.10	1.90	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
10	ABON0010	507979.6170	4662480.1880	38.40	5.00	3.50	1.50	Pou/piezometre amb dada de nivell	Bajo
11	ABON0011	506860.6103	4661825.1960	4.20	6.00	1.40	4.60	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
12	ABON0012	506903.6105	4661845.1960	2.80	5.80	2.00	4.40	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
13	ABON0013	506906.6093	4661676.1950	6.50	9.40	3.50	6.90	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
14	ABON0014	506827.6115	4661986.1960	13.63	5.20	1.10	4.20	Pou/piezometre amb dada de nivell	Bajo
15	ABON0015	506885.6160	4662573.1970	18.50	4.10	0.50	3.60	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
16	ABON0016	507226.6031	4660800.1920	40.00	6.90	2.20	4.70	Pou/piezometre amb dada de nivell	Medio
17	ABON0017	507530.6053	4661027.1900	2.60	6.80	2.20	5.50	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
18	ABON0018	507569.6054	4661028.1890	2.10	6.80	1.30	5.50	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
19	BCdE0001	506956.5765	4657320.1880	305.00	11.39	2.52	9.62	Pou/piezometre amb dada de nivell	Moderado
20	BCdE0002	508585.6026	4660456.1810	30.00	6.80	2.70	4.10	Pou/piezometre amb dada de nivell	Bajo
21	BCdE0003	510201.6033	4660213.1680	10.00	4.10	1.20	2.90	Pou/piezometre amb dada de nivell	Medio
22	BCdE0004	510963.6073	4660583.1630	22.25	8.60	5.50	3.50	Pou/piezometre amb dada de nivell	Bajo
23	BCdE0005	510780.6125	4661316.1650	4.00	8.90	2.00	8.70	Pou/piezometre amb dada de nivell	Medio

MZPAS. Mapa de Potencial de Aguas Subterráneas.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del “Mapa hidrogeológico 1:25.000” (ICGC).

5. Resultados

5.1 Mapa de Zonas con Potencial de Aguas Subterráneas (MZPAS)

Las zonas potenciales de aguas subterráneas se identificaron a partir de las diferentes capas temáticas ponderadas y agrupadas en las tres categorías que, controlan la recarga y el almacenamiento de las aguas subterráneas e integradas en un SIG-EMC. Las calificaciones asignadas a cada capa y a cada categoría para obtener los pesos se muestran en las tablas 7, 8, y 9.

Según el resultado de la matriz de comparación por pares, para determinar las condiciones topográficas (tabla. 7) y el resumen de los pesos asignados que aparece en la tabla 11, muestran que la pendiente tiene el mayor peso seguido por la curvatura y rugosidad. Se obtuvo menor peso para el Índice Topográfico de Humedad (ITH) seguido por el Índice de Posición Topográfica (IPT). La razón de consistencia (CR) es 0.07, que se considera consistente, por lo que se reduce la subjetividad involucrada en el proceso de asignación de los pesos a las diferentes capas temáticas. La figura 16A muestra el mapa de las condiciones topográficas creado, en el que se puede observar que las cuencas de Rec Sirvent y Rieres del Montgrí Empúries muestran mayor valor de idoneidad para la presencia de aguas subterráneas (medio y moderado), mientras que en la cuenca del Daró presenta menor idoneidad, sobre todo en el extremo meridional.

Según el resultado de la matriz de comparación por pares, para determinar las condiciones del terreno (tabla. 8) y el resumen de los pesos asignados que aparece en la tabla 11, muestran que la geología tiene el mayor peso seguido por la densidad de drenaje y litología, mientras que la densidad de lineamentos y los usos del suelo obtuvieron los menores pesos respectivamente. La razón de consistencia (CR) es 0.09 mostrando consistencia de los pesos asignados a cada capa temática, para generar la capa de las condiciones del terreno (Figura. 16B). en el mapa de las condiciones del terreno se puede observar que las cuencas de Rec Sirvent y Rieres del Montgrí Empúries muestran mayor valor de idoneidad para la presencia de aguas subterráneas (medio y moderado), mientras que en la cuenca del Daró presenta menor idoneidad, sobre todo en el extremo meridional.

Y para las condiciones ambientales, se considera únicamente la precipitación como factor (Figura. 17). Para ser integrado en la EMC con el objetivo de generar el Mapa final (MZPAS). Las cuencas de estudio presentan moderada y alta idoneidad de presencia de aguas subterráneas a lo largo de una importante área de su extensión destacando la cuenca del Darò.

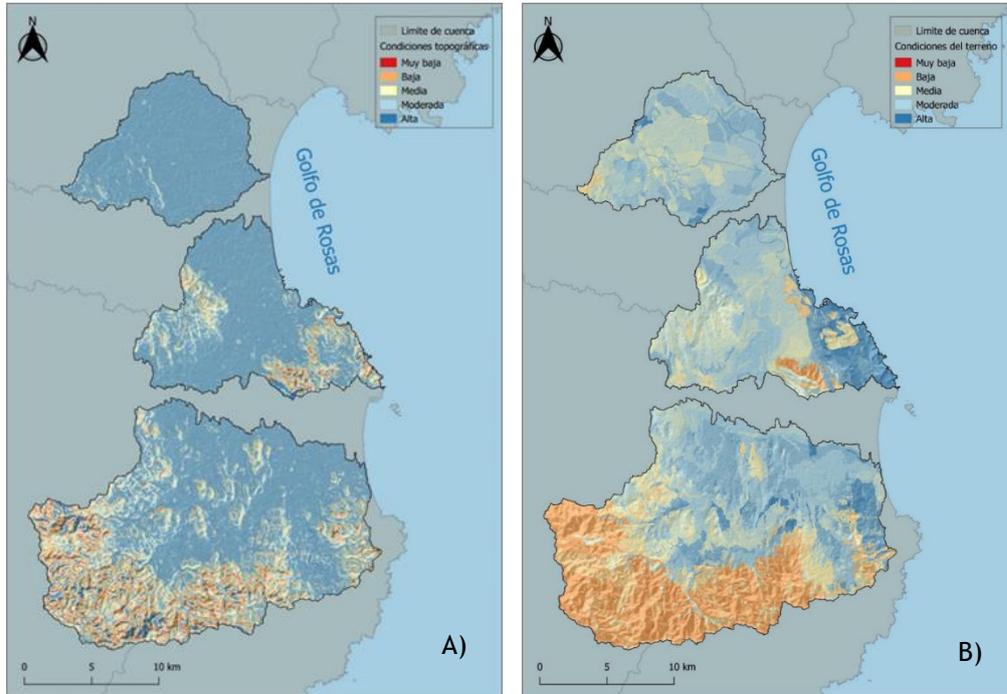


Figura 16. A) Mapa de las condiciones topográficas. B) Mapa de las condiciones del terreno.

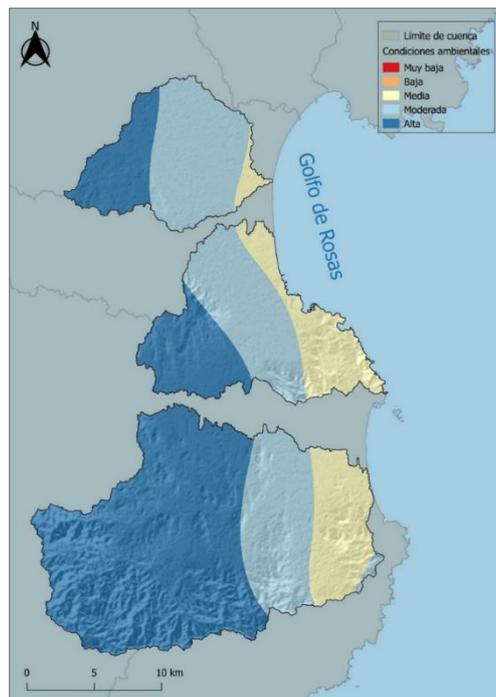


Figura 17. Mapa de las condiciones ambientales

La matriz de comparación por pares para determinar el Mapa de Zonas Potenciales de Aguas Subterráneas (MZPAS), se muestra en la tabla 9. El mayor peso corresponde a las condiciones topográficas (52%), seguido por las condiciones del terreno (33%), y las condiciones ambientales (14%). La razón de consistencia (0.047) indica consistencia positiva en la asignación de los pesos. En la tabla 11 se muestra un resumen de los pesos asignados a cada factor y cada categoría para crear el MZPAS.

Tabla 11. Resumen de los pesos asignados a cada factor y a cada categoría

Categoría	Factor	Peso %	
Condiciones topográficas	Pendiente	49%	52%
	Rugosidad	26%	
	Curvatura general	14%	
	IPT	7%	
	ITH	4%	
Condiciones del terreno	Geología	50%	33%
	Litología	13%	
	Densidad de drenaje (km/km ²)	26%	
	Usos y cubiertas del suelo	8%	
	Densidad de lineamentos (km/km ²)	3%	
Condiciones ambientales	Precipitación		14%

Fuente: elaboración propia.

el MZPAS creado en el área de estudio según la metodología expuesta, se muestra en la figura 18. El MZPAS se clasifica en cinco categorías (zonas) que son “Muy bajo”, “Bajo”, “Medio”, “Moderado” y “Alto” potencial de aguas subterráneas en el área de estudio. Alrededor de 0.41% del área de estudio recae en la zona de categoría “muy bajo”, 21.54% en la zona de categoría “bajo”, 43.05% en la categoría “medio” y el 35% del área está en la zona de categoría “moderado” potencial de aguas subterráneas. No se detecta ningún área en la zona de categoría “alta”. La variación espacial del potencial del agua subterránea está controlada principalmente por la pendiente, rugosidad, curvatura general, geología, litología, densidad de drenaje y las condiciones óptimas de lluvia, que justifica

las zonas potenciales de agua subterránea resultantes. Según las áreas que ocupan cada categoría en las cuencas del Darò, Rieres del Montgrí Empúries, y Rec Sirvent, la tendencia de las tres cuencas apunta a unos máximos en las zonas de categoría “medio” y “moderado”, mínimos en la categoría “muy bajo”, y nula en la categoría “alto”. La cuenca Rec Sirvent presenta el mayor valor de la categoría “moderado” (50.91%) y la cuenca del Daró el menor valor (27.32%). Sin embargo, según la suma de las categorías “medio” y “moderado”, las tres cuencas presentan valores similares; Daró (74.10%), Rieres del Montgrí Empúries (84.09%), y Rec Sirvent (82.23 %). Según los valores bajos de idoneidad para la presencia de aguas subterráneas “bajo” y “muy bajo” la cuenca del Daró presenta el mayor valor (25.90%) y se concentran mayormente en el extremo meridional de la cuenca.

Tabla 12. Área expresada en Km² y % de las diferentes zonas de potencial de aguas subterráneas

Valor	Clase	Darò		Rieres del Montgrí Empúries		Rec Sirvent	
1	Muy bajo	1.91	0.53%	0.38	0.24%	0.31	0.27%
2	Bajo	90.61	25.37%	24.23	15.66%	19.93	17.50%
3	Medio	167.08	46.78%	66.64	43.06%	35.67	31.32%
4	Moderado	97.57	27.32%	63.49	41.03%	57.98	50.91%
5	Alto	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
		357.17	100.00%	154.74	100.00%	113.89	100.00%

Fuente: Elaboración propia.

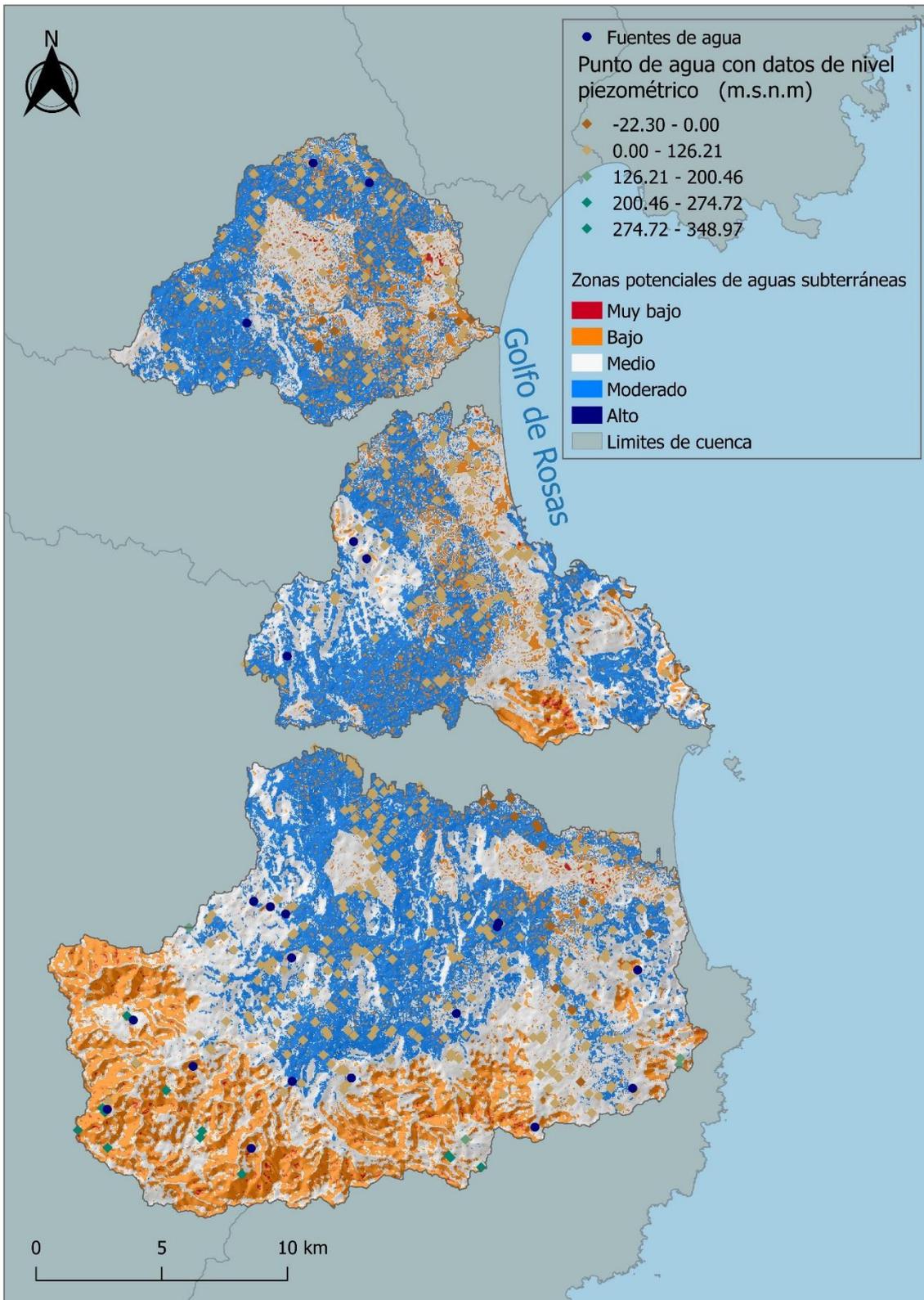


Figura 18. Mapa de Zonas Potenciales de Agua Subterránea (MZPAS)

5.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad llevado a cabo permite detectar la sensibilidad del modelo (MZPAS) a la exclusión de cada factor.

En la tabla 13 se expone la variación en porcentaje del área correspondiente a las diferentes categorías, bajo la exclusión de cada factor. En términos de interpretación de los resultados, un valor negativo representa la reducción en el área de la categoría en cuestión bajo la influencia de la eliminación de cada factor a la vez, mientras que un valor positivo indica un aumento en el área de las diferentes categorías, con la exclusión de cada factor.

Se observa que la superficie aumentó en el tipo “muy bajo” potencial de las aguas subterráneas por la exclusión de los usos y cubiertas del suelo (445%), densidad de lineamentos (278%), precipitación (231%), litología (151%) y densidad de drenaje (114%) (tabla 13). Para el tipo “medio”, destaca la eliminación del factor pendiente produciendo un aumento de un 50% de esta categoría de potencial. También se observaba variación destacable en el tipo “moderado” bajo la exclusión de los factores; precipitación (74%), ITH (70%), curvatura (69%), IPT (64%) y densidad de drenaje (54%).

El tipo “alto” potencial de aguas subterráneas aumenta ligeramente bajo la exclusión de precipitación, geología, litología, usos y cubiertas del suelo, densidad de drenaje, y densidad de lineamentos mientras que, muestra un cambio nulo a la hora de eliminar los factores como; curvatura general, rugosidad, IPT, y ITH. Para los tipos “bajo” y “medio” todos los factores tienen un impacto significativo reduciendo el área de estos con valores similares, sobre todo para mantener un potencial medio de las aguas subterráneas.

Tabla 13. Variación (%) en área expresada en km², de las diferentes categorías bajo la exclusión de cada factor

Factor eliminado	Muy bajo		Bajo		Medio		Moderado		Alto	
Precipitación	23.00	231%	115.75	-49%	283.45	-44%	666.78	74%	3.05	3.05
Geología	1.79	-74%	119.16	-47%	446.82	-12%	529.73	38%	2.44	2.44
Litología	17.43	151%	148.29	-34%	419.08	-18%	513.62	34%	1.57	1.57
Usos y cubiertas del suelo	37.89	445%	145.80	-35%	416.07	-18%	499.05	30%	1.20	1.20
Densidad de drenaje	14.84	114%	135.50	-40%	357.33	-30%	590.53	54%	1.73	1.73
Densidad de lineamentos	26.29	278%	149.79	-33%	377.36	-26%	545.23	42%	1.32	1.32
Pendiente	1.00	-86%	173.13	-23%	763.16	50%	115.41	-70%	0.00	0.00
Curvatura general	21.09	204%	139.97	-38%	315.61	-38%	647.54	69%	0.01	0.01
Rugosidad	0.80	-89%	144.24	-36%	508.18	0%	470.88	23%	0.00	0.00
Índice de Posición Topográfica (IPT)	15.06	117%	145.40	-35%	334.47	-34%	629.16	64%	0.00	0.00
Índice Topográfico de Humedad (ITH)	6.24	-10%	149.11	-34%	318.88	-37%	650.89	70%	0.00	0.00
MZPAS	6.95	0%	225.25	0%	510.21	0%	383.29	0%	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Valores en negrita expresan valores destacables

5.4 Verificación de las zonas con potencial de aguas subterráneas

Para validar el Mapa de las Zonas Potenciales de Aguas Subterráneas (MZPAS) se compararon sus resultados con la capa de fuentes y niveles piezométricos del “Mapa hidrogeológico de Cataluña 1:25.000” (ICGC). Los resultados muestran una alta concentración de varios pozos de agua en los tipos “medio” y “moderado”, no se detectaron pozos y fuentes de agua en el tipo “muy bajo” y “alto” y coincide un número mínimo en el tipo “bajo”.

La concentración de los pozos de agua en el MZPAS (tabla. 14) para las tres cuencas de estudio (Darò, Rieres del Montgrí Empúries, y Rec Sirvent) muestra máximos en el tipo “moderado” con un 44.06%, 49.49%, 43.69% respectivamente. En el tipo “medio”, la cuenca del Darò muestra mayor concentración (47.20%), seguida por la cuenca de Rec Sirvent (39.81%), y finalmente, Rieres del Montgrí Empúries (23.23%).

Tabla 14. Resumen de la comprobación de la localización de 488 pozos en el MZPAS

Cuencas		Darò			Rieres del Montgrí Empúries			Rec Sirvent		
Valor	Clase	Núm.	% Respecto al total		Núm.	% Respecto al total		Núm.	% Respecto al total	
			cuenca	área de estudio		cuenca	área de estudio		cuenca	área de estudio
1	Muy bajo	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
2	Bajo	25	8.74%	5.12%	27	27.27%	5.53%	17	16.50%	3.48%
3	Medio	135	47.20%	27.66%	23	23.23%	4.71%	41	39.81%	8.40%
4	Moderado	126	44.06%	25.82%	49	49.49%	10.04%	45	43.69%	9.22%
5	Alto	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
Total, cuenca		286	100.00%	58.61%	99	100.00%	20.29%	103	100.00%	21.11%
Total, área de estudio		488		100.00%	488	100.00%	100.00%	488		100.00%

Fuente: Elaboración propia.

Valeres en negrita expresan valores destacables

En cuanto a la concentración de las fuentes de agua en MZPAS (tabla. 15), muestra una concentración en el tipo “medio” y “moderado” sumando 23 fuentes de las 29 (total en el área de estudio) la cuenca del Darò. Sin embargo, solo se localizan 3 fuentes en las Rieres del Montgrí Empúries y otras 3 en el Rec Sirvent. Según los resultados, el número de las fuentes de agua localizadas en el MZPAS no es representativo, y en consecuencia la correlación no es significativa sobre todo en las cuencas de Rieres del Montgrí Empúrie y Rec Sirvent.

Tabla 15. Resumen de la comprobación de la localización de 29 fuentes de agua en el MZPAS

Cuencas		Darò			Rieres del Montgrí Empúries			Rec Sirvent		
Valor	Clase	Núm.	% Respecto al total		Núm.	% Respecto al total		Núm.	% Respecto al total	
			cuenca	área de estudio		cuenca	área de estudio		cuenca	área de estudio
1	Muy bajo	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
2	Bajo	1	4.35%	3.45%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
3	Medio	14	60.87%	48.28%	1	33.33%	1.15%	2	66.67%	6.90%
4	Moderado	8	34.78%	27.59%	2	66.67%	2.30%	1	33.33%	3.45%
5	Alto	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
Total, cuenca		23	100.00%		3	100.00%		3	100.00%	
Total, área de estudio		29		100.00%	29			29		100.00%

Fuente: Elaboración propia.

Valeres en negrita expresan valores destacables

6. Conclusiones

Para una planificación, gestión eficaz de recursos hídricos y garantizar la seguridad de agua en el futuro, es crucial una evaluación precisa de los recursos disponibles. Además, el conocimiento de las zonas potenciales de recarga de las aguas subterráneas es fundamental para acotar las posibilidades de explotación sostenible de las mismas.

En este estudio se diseña una metodología en la que se aplican técnicas de Evaluación Multicriterio, basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), para determinar las zonas potenciales de agua subterránea en tres cuencas hidrográficas representativas: El Darò, Riera del Montgrí Empúries y Rec Sirvent. Se seleccionaron un total de once capas temáticas que representan los factores en el área de estudio y se agruparon en tres categorías: pendiente, curvatura general, rugosidad, Índice de Posición Topográfica (IPT) y el Índice Topográfico de Humedad (ITH) (condiciones topográficas). Geología, litología, usos y cubiertas del suelo, densidad de drenaje, densidad de lineamentos (condiciones del terreno). Precipitación (condiciones ambientales). Los factores se estandarizaron, se calcularon los pesos de cada factor y se agregaron para obtener el Mapa final de las Zonas Potenciales de Agua Subterránea (MZPAS).

El MZPAS viene clasificado en cinco zonas potencial de aguas subterráneas: “muy bajo”, “bajo”, “medio”, “moderado”, “alto”, y cubren 0.41%, 21.54%, 43.05%, 35% y 0% respectivamente para el total del área de estudio. Las zonas de potencial de aguas subterráneas para cada cuenca de estudio (Darò, Rieres del Montgrí Empúries y Rec Sirvent) ocupan en la zona de categoría “muy bajo” el 0.53%, 0.24%, 0.27% respectivamente, en la zona de categoría “bajo” el 25.37%, 15.66% y 17.50%, en la zona de categoría “medio” el 46.78%, 43.06% y 31.32%, en la zona de categoría “moderado” el 27.32%, 41.03% y 50.91%). Ninguna de las tres cuencas presenta zonas de categoría “alto” potencial. La tendencia en las tres cuencas presenta máximos en las zonas de categoría “medio” y “moderado”, mínimos en la categoría “muy bajo”, y nula en la categoría “alto”. La variación espacial del potencial del agua subterránea está controlada principalmente por los usos y cubiertas del suelo, densidad de lineamentos, litología,

densidad de drenaje, y las condiciones óptimas de lluvia, que justifica las zonas potenciales de agua subterránea resultantes según el MZPAS y el análisis de sensibilidad.

La validación realizada para cuantificar el grado de satisfacción del resultado, según la coincidencia de la localización de los pozos de agua en el área de estudio muestra una correlación significativa con el MZPAS. Este hecho nos hace pensar que el mapa obtenido representa de forma adecuada la potencialidad de la presencia de aguas subterráneas en la zona o, por lo menos, que es una aproximación inicial a la misma dado que no existe otra cartografía de esta temática. A pesar de que resultó una correlación no significativa con la localización de las fuentes de agua, debido al número de fuentes no representativo.

En línea de los objetivos marcados se desarrolló satisfactoriamente la adquisición, almacenamiento, recuperación, manipulación, análisis de datos, la combinación de datos geográficos, el establecimiento de preferencias de acuerdo con las reglas de decisión y las combinaciones de prioridades jerárquicamente para modelar el agua subterránea, utilizando datos mínimos y accesibles de entrada y SIG de código abierto. Sin embargo, la selección adecuada de los factores y la asignación razonable de los pesos es crucial para una aplicación exitosa y eficaz de las técnicas SIG-EMC y AHP para la identificación de las zonas potenciales de aguas subterráneas.

Desde el punto de vista metodológico, tanto los datos como las herramientas SIG disponible, se revelan relativamente adecuados para la elaboración de estudios predictivos de presencia de aguas subterráneas. Existe un abanico muy amplio de geoinformación accesible de toda Cataluña, facilitada por las instituciones y las autoridades que generan datos territoriales, pero a pesar de que pretenden mantener los datos actualizados, existen algunos parámetros que cambian con el paso del tiempo y en la cartografía disponible, los datos están referidos a un tiempo temporal concreto, y mayormente se encuentran desactualizados. Las herramientas SIG de código abierto mostró utilidad para llevar a cabo todos los procesos de cartografía, georreferenciación y los análisis requeridos de forma válida y eficiente. Cabe destacar el gran apoyo de los complementos “plugin” para desarrollar técnicas y métodos eficientes aplicables para las aguas subterráneas, y cabe la posibilidad de crear nuevos complementos más específicos

para el análisis de las aguas subterráneas si se genera un interés y voluntad para desarrollarlos.

La relevancia de este estudio consiste en proporcionar una base cartográfica sólida como alternativa para la planificación y gestión sostenible de las aguas subterráneas en las cuencas de estudio. Además, este modelo es extensible a otras áreas, dado que la metodología desarrollada se basó en condiciones lógicas y genéricas con algunas adaptaciones a la naturaleza y características específicas de las regiones en cuestión. Además, el MZPAS puede ser utilizado como información primaria para planificar mejor los trabajos de campo de detalle.

7. Bibliografía

- Adeyeye, O. A., Ikpokonte, E. A., & Arabi, S. A. (2019). GIS-based groundwater potential mapping within Dengi area, North Central Nigeria. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(2), 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.04.003>
- Adiat, K. A. N., Nawawi, M. N. M., & Abdullah, K. (2012). Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool - A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *Journal of Hydrology*, 440–441, 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.028>
- Afonso, M. J., Freitas, L., & Chaminé, H. I. (2019). Groundwater recharge in urban areas (Porto, NW Portugal): the role of GIS hydrogeology mapping. *Sustainable Water Resources Management*, 5(1), 203–216. <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00302-9>
- Agarwal, R., & Garg, P. K. (2016). Remote Sensing and GIS Based Groundwater Potential & Recharge Zones Mapping Using Multi-Criteria Decision-Making Technique. *Water Resources Management*, 30(1), 243–260. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1159-8>
- Agencia Catalana del Agua (2012). Plan de gestión del distrito de cuenca fluvial de Cataluña (2016-2020).
- Ajay Kumar, V., Mondal, N. C., & Ahmed, S. (2020). Identification of Groundwater Potential Zones Using RS, GIS and AHP Techniques: A Case Study in a Part of

- Deccan Volcanic Province (DVP), Maharashtra, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 3. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01086-3>
- Arshad, A., & Zulfiqar, A. (2012). Integration of Groundwater Flow Modeling and GIS. *Water Resources Management and Modeling*. <https://doi.org/10.5772/34257>
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 9(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>
- Bera, S. (2018). Delineation of Ground Water Prospect Zone in hard rock terrine part of Purulia District of West Bengal-India using Remote Sensing & GIS Approach. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology* © 2018 IJSRCSEIT, 3(1), 1361–1370. Retrieved from <http://www.imd.gov.in>
- Bogaart, P. W., & Troch, P. A. (2006). Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(6), 925–936. <https://doi.org/10.5194/hess-10-925-2006>
- Bonneau, J., Fletcher, T. D., Costelloe, J. F., & Burns, M. J. (2017). Stormwater infiltration and the ‘urban karst’ – A review. *Journal of Hydrology*, 552, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.043>
- Borouhaki, S., & Malczewski, J. (2008). Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. *Computers and Geosciences*, 34(4), 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.04.003>
- Brater, E. F. (1968). Steps toward a better understanding of urban runoff processes. *Water Resources Research*, 4(2), 335–347. <https://doi.org/10.1029/WR004i002p00335>
- Burriel, J.A.; Ibáñez, J.J.; Pons. (2005). Cambios en los usos y las cubiertas del suelo en el ámbito metropolitano de Barcelona. *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 19 (Universidad Autónoma de Barcelona), 35–39.
- Cai, Z., & Ofterdinger, U. (2016). Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland. *Journal of Hydrology*, 535, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.066>
- Candela, A., Noto, L. V., & Aronica, G. (2005). Influence of surface roughness in hydrological response of semiarid catchments. *Journal of Hydrology*, 313(3–4), 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.023>
- Carlston, C. W. (1963). Drainage density and streamflow. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. No. 42*, 2–C, 8pp. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/pp/0422c/report.pdf>
- Carrión, A. M., Veroslavsky, G., Vives, L., & Rodríguez, L. (2016). Influencia De Los Lineamientos Estructurales Sobre El Flujo Del Sistema Acuífero Guaraní En La

Provincia De Corrientes. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 73(4), 478–492.

- Carver, S. J. (1991). Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(3), 321–339. <https://doi.org/10.1080/02693799108927858>
- Çelik, R. (2019). Evaluation of Groundwater Potential by GIS-Based Multicriteria Decision Making as a Spatial Prediction Tool: Case Study in the Tigris River Batman-Hasankeyf Sub-Basin, Turkey. *Water*, 11(12), 2630. <https://doi.org/10.3390/w11122630>
- Chaudhary, B. S., & Kumar, S. (2018). Identification of Groundwater Potential Zones using Remote Sensing and GIS of K-J Watershed, India. *Journal of the Geological Society of India*, 91(6), 717–721. <https://doi.org/10.1007/s12594-018-0929-3>
- Chen, L., & Young, M. H. (2006). Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces. *Water Resources Research*, 42(7), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2005WR004468>
- Chen, T., Ren, L., Yuan, F., Yang, X., Jiang, S., Tang, T., ... Zhang, L. (2017). Comparison of spatial interpolation schemes for rainfall data and application in hydrological modeling. *Water (Switzerland)*, 9(5), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w9050342>
- Chen, Y., Yu, J., & Khan, S. (2010). Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling and Software*, 25(12), 1582–1591. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.001>
- Chorley, R. (1995). Horton, R.E. 1945: Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America* 56, 275-370. *Progress in Physical Geography*, 19(4), 533–554. <https://doi.org/10.1177/030913339501900406>
- Clark, M. P., Nijssen, B., Lundquist, J. D., Kavetski, D., Rupp, D. E., Woods, R. A., ... Rasmussen, R. M. (2015). Evaluating the relationship between topography and groundwater using outputs from a continental-scale integrated hydrology model. *Water Resources Research*, 51(6602–6621), 2498–2514. <https://doi.org/10.1002/2015WR017200.A>
- Crosetto, M., & Tarantola, S. (2001). Uncertainty and sensitivity analysis: Tools for GIS-based model implementation. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(5), 415–437. <https://doi.org/10.1080/13658810110053125>
- Darboux, F., Reichert, J. M., & Huang, C. (2004). Soil roughness effects on runoff and sediment production. *13th International Soil Conservation Organisation Conference (4-8 July)*, (116), 1–6.
- Das, B., Pal, S. C., Malik, S., & Chakraborty, R. (2019). Modeling groundwater potential zones of Puruliya district, West Bengal, India using remote sensing and GIS

- techniques. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 3(3), 223–237. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1555740>
- Das, S. (2017). Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain in Gangajalghati block, Bankura district, India using remote sensing and GIS techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(4), 1589–1599. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0396-7>
- Drobne, S., & Lisec, A. (2009). Multi-attribute decision analysis in GIS: Weighted linear combination and ordered weighted averaging. *Informatica (Ljubljana)*, 33(4), 459–474.
- Duvert, C., Jourde, H., Raiber, M., & Cox, M. E. (2015). Correlation and spectral analyses to assess the response of a shallow aquifer to low and high frequency rainfall fluctuations. *Journal of Hydrology*, 527, 894–907. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.054>
- Eastman, R., Jin, W., Kyem, P. A. K., & Toledano, J. (1995). for Procedures Raster Decisions Multi-Criteria. *Measurement*, 61(5), 539–547.
- European Commission (2008). Groundwater Protection in Europe. *Directorate-General for the Environment*. <https://doi.org/10.2779/84304>
- Fagbohun, B. J. (2018). Integrating GIS and multi-influencing factor technique for delineation of potential groundwater recharge zones in parts of Ilesha schist belt, southwestern Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 77(3), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7229-5>
- Fetter, C. W. (2001). *Applied hydrogeology*. Prentice-Hall, Inc (Vol. 4th Ed.).
- Fitts, C. R. (2002). *Groundwater Science*. Elsevier Inc (Vol. 53). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2009-0-62950-0>
- Florinsky, I. V. (2012). Accumulation Zones and Fault Intersections. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*, 255–262. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385036-2.00014-6>
- Florinsky, I. V. (2016). Global Topography and Tectonic Structures. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*, 387–407. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804632-6.00016-x>
- Florinsky, I. V. (2016). Influence of Topography on Soil Properties. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*, 265–270. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804632-6.00009-2>
- Florinsky, I. V. (2016). Lineaments and Faults. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*, 353–376. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804632-6.00014-6>

- Frolla, F. D., Zilio, J. P., & Kruger, H. (2015). Variabilidad espacial de la profundidad del suelo. Métodos de interpolación para el sudoeste bonaerense. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 41(3), 309–316.
- Ghayoumian, J., Mohseni Saravi, M., Feiznia, S., Nouri, B., & Malekian, A. (2007). Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(2), 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.11.002>
- Ghorbani Nejad, S., Falah, F., Daneshfar, M., Haghizadeh, A., & Rahmati, O. (2017). Delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS-based data-driven models. *Geocarto International*, 32(2), 167–187. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1132481>
- Gnanachandrasamy, G., Zhou, Y., Bagyaraj, M., Venkatramanan, S., Ramkumar, T., & Wang, S. (2018). Remote Sensing and GIS Based Groundwater Potential Zone Mapping in Ariyalur District, Tamil Nadu. *Journal of the Geological Society of India*, 92(4), 484–490. <https://doi.org/10.1007/s12594-018-1046-z>
- Gogu, R. C., Carabin, G., Hallet, V., Peters, V., & Dassargues, A. (2001). GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling. *Hydrogeology Journal*, 9(6), 555–569. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0167-3>
- Grabs, T., Seibert, J., Bishop, K., & Laudon, H. (2009). Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *Journal of Hydrology*, 373(1–2), 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.031>
- Hallema, D. W., Moussa, R., Sun, G., & McNulty, S. G. (2016). Surface storm flow prediction on hillslopes based on topography and hydrologic connectivity. *Ecological Processes*, 5(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s13717-016-0057-1>
- Hjerdt, K. N., McDonnell, J. J., Seibert, J., & Rodhe, A. (2004). A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage. *Water Resources Research*, 40(5), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2004WR003130>
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in hydrology cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 445–460.
- Ibrahim-Bathis, K., & Ahmed, S. A. (2016). Geospatial technology for delineating groundwater potential zones in Doddahalla watershed of Chitradurga district, India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19(2), 223–234. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.002>
- Ifediegwu, S. I., Nnebedum, D. O., & Nwatarali, A. N. (2019). Identification of groundwater potential zones in the hard and soft rock terrains of Kogi State, North Central Nigeria: an integrated GIS and remote sensing techniques. *SN Applied Sciences*, 1(10), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1181-1>
- Instituto de Estadística de Cataluña (2019). El municipio en cifras.

- IPCC. (2013). Cambio climático 2013, bases físicas. Resumen para responsables de políticas. *Contribución Del Grupo de Trabajo I Al Quinto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático*, 27. Retrieved from https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/ar5_wg1_headlines_es.pdf
- Jahan, C. S., Rahaman, M. F., Arefin, R., Ali, M. S., & Mazumder, Q. H. (2019). Delineation of groundwater potential zones of Atrai–Sib river basin in north-west Bangladesh using remote sensing and GIS techniques. *Sustainable Water Resources Management*, 5(2), 689–702. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0240-x>
- Jakovljević, G., Govedarica, M., & Álvarez-Taboada, F. (2019). Waterbody mapping: a comparison of remotely sensed and GIS open data sources. *International Journal of Remote Sensing*, 40(8), 2936–2964. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1538584>
- Jani, J. (2012). GIS as a tool for modelling groundwater flow. *ISBEIA 2012 - IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications*, 513–517. <https://doi.org/10.1109/ISBEIA.2012.6422939>
- Jasrotia, A. S., Kumar, A., & Singh, R. (2016). Integrated remote sensing and GIS approach for delineation of groundwater potential zones using aquifer parameters in Devak and Rui watershed of Jammu and Kashmir, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2326-9>
- Kallali, H., Anane, M., Jellali, S., & Tarhouni, J. (2007). GIS-based multi-criteria analysis for potential wastewater aquifer recharge sites. *Desalination*, 215(1–3), 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.11.016>
- Kamila, A., Bal, A., Sen, T. S., Parvin, J., & Sultana, F. (2018). An Integrated GIS Approach for Assessment of Ground Water Potential Zone: A case Study on the Upper Catchment Area of Subarnarekha River, 16(April), 1–11.
- Karami, G. H., Bagheri, R., & Rahimi, F. (2016). Détermination de la zone potentielle de recharge des eaux souterraines et des bassins d'alimentation de sources karstiques : région de Saldoran, Ouest de l'Iran. *Hydrogeology Journal*, 24(8), 1981–1992. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1458-z>
- Keenan, P. B., & Jankowski, P. (2019). Spatial Decision Support Systems: Three decades on. *Decision Support Systems*, 116(October 2018), 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2018.10.010>
- Kim, G. B., Lee, J. Y., & Lee, K. K. (2004). Application of representative elementary area (REA) to lineament density analysis for groundwater implications. *Geosciences Journal*, 8(1), 27–42. <https://doi.org/10.1007/BF02910276>
- Kirkham, M. B. (2005). Infiltration. In *Principles of Soil and Plant Water Relations* (pp. 145–172).

- Kotchoni, D. O. V., Vouillamoz, J. M., Lawson, F. M. A., Adjomayi, P., Boukari, M., & Taylor, R. G. (2019). Relationships between rainfall and groundwater recharge in seasonally humid Benin: a comparative analysis of long-term hydrographs in sedimentary and crystalline aquifers. *Hydrogeology Journal*, 27(2), 447–457. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1806-2>
- Krebs, P., Stocker, M., Pezzatti, G. B., & Conedera, M. (2015). An alternative approach to transverse and profile terrain curvature. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(4), 643–666. <https://doi.org/10.1080/13658816.2014.995102>
- Lodwick, W. A., Monson, W., & Svoboda, L. (1990). Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: Suitability analysis. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(4), 413–428. <https://doi.org/10.1080/02693799008941556>
- Lozano, A. V. (2011). Dinámica espacio temporal de usos/cubiertas del suelo y sostenibilidad ambiental en las áreas metropolitanas de la Comunidad Valenciana. *Univetsitat de València*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10261/40775>
- M. Ganesh, K., Jai Sankar, G., Jagannadha Rao, M., & Subba Rao, R. (2018). Identification of Groundwater Potential Zones of Visakhapatnam Urban Area using Integrating Multi Criteria Evaluation with Geographical Information System. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.31), 234. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.31.18555>
- Machireddy, S. R. (2019). Delineation of groundwater potential zones in South East part of Anantapur District using remote sensing and GIS applications. *Sustainable Water Resources Management*, 5(4), 1695–1709. <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00324-3>
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.10.007>
- Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, Inc. Retrieved from http://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf
- Mair, A., & Fares, A. (2011). Comparison of rainfall interpolation methods in a mountainous region of a tropical island. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(4), 371–383. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000330)
- Mair, M., Sitzenfrei, R., Kleidorfer, M., Möderl, M., & Rauch, W. (2012). GIS-based applications of sensitivity analysis for sewer models. *Water Science and Technology*, 65(7), 1215–1222. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.954>
- Malczewski, J. (1996). International Journal of Geographical Information A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making. *International Journal of Geographical Information Systems*, (March 2014), 37–41.

- Malczewski, J. (2000). On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approaches. *Transactions in GIS*, 4(1), 5–22. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>
- Malczewski, J. (2011). Local Weighted Linear Combination. *Transactions in GIS*, 15(4), 439–455. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2011.01275.x>
- Malczewski, J., Chapman, T., Flegel, C., Walters, D., Shrubsole, D., & Healy, M. A. (2003). GIS multicriteria evaluation with ordered weighted averaging (OWA): Case study of developing watershed management strategies. *Environment and Planning A*, 35(10), 1769–1784. <https://doi.org/10.1068/a35156>
- Mas-Pla, J. (2009). *Aigua i canvi climàtic*.
- Mas-Pla, J., & Menció, A. (2019). Groundwater nitrate pollution and climate change: learnings from a water balance-based analysis of several aquifers in a western Mediterranean region (Catalonia). *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3), 2184–2202. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1859-8>
- McKinney, D. C., & Cai, X. (2002). Linking GIS and water resources management models: An object-oriented method. *Environmental Modelling and Software*, 17(5), 413–425. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(02\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(02)00015-4)
- Méndez-Toribio, M., Ibarra-Manríquez, G., Navarrete-Segueda, A., & Paz, H. (2017). Topographic position, but not slope aspect, drives the dominance of functional strategies of tropical dry forest trees. *Environmental Research Letters*, 12(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa717b>
- Miller, H. (2004). Tobler's First Law and Spatial Analysis. *Annals of the Association of American Geographers*, 94(2), 284–289. Retrieved May 3, 2020, from https://www.jstor.org/stable/3693985?seq=1#metadata_info_tab_contents
- Mogaji, K. A., & Lim, H. S. (2017). Application of a GIS-/remote sensing-based approach for predicting groundwater potential zones using a multi-criteria data mining methodology. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5990-7>
- Moges, S. A., Alemaw, B. F., Chaoka, T. R., & Kachroo, R. K. (2007). Rainfall interpolation using a remote sensing CCD data in a tropical basin - A GIS and geostatistical application. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32(15–18), 976–983. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.002>
- Mohammadi-Behzad, H. R., Charchi, A., Kalantari, N., Nejad, A. M., & Vardanjani, H. K. (2019). Delineation of groundwater potential zones using remote sensing (RS), geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques: a case study in the Leylia–Keynow watershed, southwest of Iran. *Carbonates and Evaporites*, 34(4), 1307–1319. <https://doi.org/10.1007/s13146-018-0420-7>

- Mokadem, N., Boughariou, E., Mudarra, M., Ben Brahim, F., Andreo, B., Hamed, Y., & Bouri, S. (2018). Mapping potential zones for groundwater recharge and its evaluation in arid environments using a GIS approach: Case study of North Gafsa Basin (Central Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*, 141, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.02.007>
- Mondal, S. (2012). Remote Sensing and GIS Based Ground Water Potential Mapping of Kangshabati Irrigation Command Area, West Bengal. *Journal of Geography & Natural Disasters*, 01(01), 1–8. <https://doi.org/10.4172/2167-0587.1000104>
- Nair, H. C., Padmalal, D., Joseph, A., & Vinod, P. G. (2017). Delineation of Groundwater Potential Zones in River Basins Using Geospatial Tools—an Example from Southern Western Ghats, Kerala, India. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 1(1–2). <https://doi.org/10.1007/s41651-017-0003-5>
- Nampak, H., Pradhan, B., & Manap, M. A. (2014). Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of Hydrology*, 513, 283–300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.053>
- Naoum, S., & Tsanis, I. K. (2004). Ranking spatial interpolation techniques using a GIS-based DSS. *Global Nest Journal*, 6(1), 1–20. <https://doi.org/10.30955/gnj.000224>
- Nasir, M. J., Khan, S., Zahid, H., & Khan, A. (2018). Delineation of groundwater potential zones using GIS and multi influence factor (MIF) techniques: a study of district Swat, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, 77(10), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7522-3>
- Nusret, D., & Dug, S. (2012). Applying the Inverse Distance Weighting and Kriging methods of the spatial interpolation on the mapping the annual precipitation in Bosnia and Herzegovina. *IEMSS 2012 - Managing Resources of a Limited Planet: Proceedings of the 6th Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*, 2754–2760.
- Pani, S., Chakrabarty, A., & Bhadury, S. (2016). Groundwater Potential Zone Identification By Analytical Hierarchy Process (Ahp) Weighted Overlay in Gis Environment — a Case Study of Jhargram. *International Journal of Remote Sensing & Geoscience (IJRSG)*, 5(3), 1–10.
- Patra, S., Mishra, P., & Mahapatra, S. C. (2018). Delineation of groundwater potential zone for sustainable development: A case study from Ganga Alluvial Plain covering Hooghly district of India using remote sensing, geographic information system and analytic hierarchy process. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2485–2502. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.161>
- Pinto, D., Shrestha, S., Babel, M. S., & Ninsawat, S. (2017). Delineation of groundwater potential zones in the Comoro watershed, Timor Leste using GIS, remote sensing and analytic hierarchy process (AHP) technique. *Applied Water Science*, 7(1), 503–519. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0270-6>

- Pishvaei, M. H., Sabzevari, T., Noroozpour, S., & Mohammadpour, R. (2020). Effects of hillslope geometry on spatial infiltration using the TOPMODEL and SCS-CN models. *Hydrological Sciences Journal*, 65(2), 212–226. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1686636>
- Pla, E., & Pascual, D. (2012). *Adaptacions al Canvi Climàtic en l'Ús de l'Aigua (ProjectACCUA-CREAF)*.
- Rai, R. K., Upadhyay, A., & Singh, V. P. (2010). Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology*, 382(1–4), 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.022>
- Rajasekhar, M., Sudarsana Raju, G., Sreenivasulu, Y., & Siddi Raju, R. (2019). Delineation of groundwater potential zones in semi-arid region of Jilledubanderu river basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India using fuzzy logic, AHP and integrated fuzzy-AHP approaches. *HydroResearch*, 2, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.11.006>
- Rajaveni, S. P., Brindha, K., & Elango, L. (2017). Geological and geomorphological controls on groundwater occurrence in a hard rock region. *Applied Water Science*, 7(3), 1377–1389. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0327-6>
- Rehman, H. U., Ahmad, Z., Ashraf, A., & Ali, S. S. (2019). Predicting groundwater potential zones in Upper Thal Doab, Indus Basin through integrated use of RS and GIS techniques and groundwater flow modeling. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(20). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4783-4>
- Rinderer, M., Meerveld, H. J. van, & Seibert, J. (2014). Topographic controls on shallow groundwater levels in a steep, prealpine catchment. *Water Resources Research*, 6067–6080. <https://doi.org/10.1002/2013WR015009>.Received
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1983). Hierarchies, Reciprocal Matrices, and Ratio Scales. *Discrete and System Models*, 218–253. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5443-0_11
- Saaty, T. L. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. L. (2001). Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process. *Managing Forest Ecosystems*, 15–35. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9799-9_2
- Saltelli, A. (2002). Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk Analysis*, 22(3), 579–590. <https://doi.org/10.1111/0272-4332.00040>
- Schmidt, J., Evans, I. S., & Brinkmann, J. (2003). Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. *International Journal of Geographical*

- Şen, Z. (2015). Basic Porous Medium Concepts. In *Practical and Applied Hydrogeology* (pp. 43–97). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800075-5.00002-9>
- Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.03.002>
- Shaban, A., Khawlie, M., & Abdallah, C. (2006). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: The case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal*, 14(4), 433–443. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0437-6>
- Shantharam, Y., & Elangovan, K. (2018). Groundwater potential zones delineation using geo-electrical resistivity method and GIS for Coimbatore, India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 47(5), 1088–1095.
- Shope, C. L., & Maharjan, G. R. (2015). Modeling spatiotemporal precipitation: Effects of density, interpolation, and land use distribution. *Advances in Meteorology*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/174196>
- Singh, L. K., Jha, M. K., & Chowdary, V. M. (2018). Assessing the accuracy of GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis approaches for mapping groundwater potential. *Ecological Indicators*, 91(August 2017), 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.070>
- Singha, S. S., Pasupuleti, S., Singha, S., Singh, R., & Venkatesh, A. S. (2019). Analytic network process-based approach for delineation of groundwater potential zones in Korba district, Central India using remote sensing and GIS. *Geocarto International*, 6049. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1648566>
- Sørensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101–112. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>
- Souissi, D., Msaddek, M. H., Zouhri, L., Chenini, I., El May, M., & Dlala, M. (2018). Mapping groundwater recharge potential zones in arid region using GIS and Landsat approaches, southeast Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 63(2), 251–268. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1414383>
- Srinivasa Rao, Y., & Jugran, D. K. (2003). Delineation of groundwater potential zones and zones of groundwater quality suitable for domestic purposes using remote sensing and GIS. *Hydrological Sciences Journal*, 48(5), 821–833. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.5.821.51452>

- Thomas, B. F., Behrangi, A., & Famiglietti, J. S. (2016). Precipitation intensity effects on groundwater recharge in the southwestern United States. *Water (Switzerland)*, 8(3), 12–17. <https://doi.org/10.3390/w8030090>
- Tiwari, A., Ahuja, A., Vishwakarma, B. D., & Jain, K. (2019). Groundwater Potential Zone (GWPZ) for Urban Development Site Suitability Analysis in Bhopal, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(11), 1793–1815. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01027-0>
- Tomczak, M. (1998). Spatial Interpolation and its Uncertainty Using Automated Anisotropic Inverse Distance Weighting (IDW) - Cross-Validation/Jackknife Approach. *Journal of Geographic Information and Decision*, 2(2), 18–30.
- Uitto, J. I. (2001). Global Freshwater Resources. In *World Forests, Markets and Policies* (pp. 65–76). https://doi.org/10.1007/978-94-010-0664-4_3
- Van der Gun, J. (2012). Groundwater and Global Change: Trends, Opportunities and Challenges / *International Groundwater Resources Assessment Centre. Unesco*. Retrieved from <https://www.un-igrac.org/resource/groundwater-and-global-change-trends-opportunities-and-challenges>
- Voogd, J. H. (1982). Multicriteria Evaluation for Urban and Regional planning. In *Delftsche Uitgevers Maatschappij* (pp. 74–86). <https://doi.org/10.6100/IR102252>
- Vrba, J., & Verhagen, B. (2011). *Groundwater for emergency situations. International Hydrological Programme Division of Water Sciences* (Vol. 3).
- Walsh, M. R. (1993). Toward spatial decision support systems in water resources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(2), 158–169.
- Weiss, a. (2001). Topographic position and landforms analysis. *Poster Presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, 64, 227–245*. https://doi.org/http://www.jennessent.com/downloads/TPI-poster-TNC_18x22.pdf
- Yang, X., Xie, X., Liu, D. L., Ji, F., & Wang, L. (2015). Spatial Interpolation of Daily Rainfall Data for Local Climate Impact Assessment over Greater Sydney Region. *Advances in Meteorology*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/563629>
- Yang, Y., Endreny, T. A., & Nowak, D. J. (2015). Simulating the effect of flow path roughness to examine how green infrastructure restores urban runoff timing and magnitude. *Urban Forestry and Urban Greening*, 14(2), 361–367. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.03.004>
- Young, G., Demuth, S., Mishra, A., & Cudennec, C. (2015). Hydrological sciences and water security: An overview. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 366(June 2014), 1–9. <https://doi.org/10.5194/piahs-366-1-2015>
- Zhang, S. tang, Liu, Y., Li, M. miao, & Liang, B. (2016). Distributed hydrological models for addressing effects of spatial variability of roughness on overland flow. *Water Science and Engineering*, 9(3), 249–255.

8. Apéndice

8.1 Resumen de la información recibida del Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC)

Cod. EMA	Nombre EMA	Comarca	Fecha inicio	Fecha fin	X UTM (m)	Y UTM (m)	Z (m)
DN	Anglès	Selva	23/04/2001		469428	4645506	150
DJ	Banyoles	Pla de l'Estany	11/10/1999		482615	4662735	176
U1	Cabanes	Alt Empordà	11/06/1991		496276	4683806	31
UN	Cassà de la Selva	Gironès	08/03/1993		493937	4635843	171
DO	Castell d'Aro	Baix Empordà	10/05/2001		502692	4628523	14
W1	Castelló d'Empúries	Alt Empordà	14/03/2000		507442	4677233	2
DP	Das - Aeròdrom	Cerdanya	22/05/2001		406687	4693263	1097
VZ	Espolla	Alt Empordà	07/06/2000		500606	4692460	83
KP	Fogars de la Selva	Selva	05/01/1996		474584	4620837	36
UO	Fornells de la Selva	Gironès	10/06/1999		485130	4640311	97
XJ	Girona	Gironès	15/09/2010		484000	4647821	72
90D	Girona	Gironès	01/01/1950	31/12/2018	484094	4648026	72
DM	Girona - Bombers	Gironès	10/05/2001	15/09/2010	484002	4645366	90
DF	la Bisbal d'Empordà	Baix Empordà	25/03/1998		502935	4647279	28.6
U1	la Tallada d'Empordà	Baix Empordà	01/01/1988		505127	4655771	15
ZD	la Tosa d'Alp 2500	Cerdanya	04/09/2014		409127	4686130	2478
W9	la Vall d'en Bas	Garrotxa	16/03/2000		454927	4666083	461
CB	les Llosses	Ripollès	30/11/1995	02/06/2003	433832	4666836	700
CF	Lloret de Mar	Selva	05/02/1996	16/06/2003	486926	4619085	63.3
Z3	Malniu (2.230 m)	Cerdanya	03/11/1999		399579	4702246	2230
CG	Molló - Fabert	Ripollès	06/06/1996		451803	4691821	1405
UC	Monells	Baix Empordà	04/03/1998		499755	4647251	60
Y5	Navata	Alt Empordà	26/08/2014		488691	4675092	152
DG	Núria (1.971 m)	Ripollès	15/05/1998		430471	4694366	1971
YB	Olot	Garrotxa	21/07/2016		456316	4670800	433
DC	Olot - Pla de Baix	Garrotxa	24/04/1998	21/07/2016	457282	4671162	421.5

J5	Pantà de Darnius - Boadella	Alt Empordà	14/04/2015		486345	4687779	158
D6	Portbou	Alt Empordà	25/03/1998		513672	4698105	196
YA	Puigcerdà	Cerdanya	22/03/2016		412394	4699195	1213
D4	Roses	Alt Empordà	07/02/1996		514980	4679843	24
M6	Sant Joan de les Abadesses	Ripollès	13/01/1996		437500	4674691	730
CI	Sant Pau de Segúries	Ripollès	24/11/1995		447566	4678661	852
U2	Sant Pere Pescador	Alt Empordà	01/01/1989		507995	4669451	4
CK	Santa Coloma de Farners	Selva	05/02/1996	08/06/2004	472156	4634810	163
XS	Santa Coloma de Farners	Selva	26/03/2013		472152	4634829	162
UD	Serra de Daró	Baix Empordà	09/06/1999	31/05/2013	505155	4652992	12
W2	Torroella de Fluvià	Alt Empordà	14/03/2000	08/04/2014	504776	4670051	7
XZ	Torroella de Fluvià	Alt Empordà	08/04/2014		505122	4669918	7
UE	Torroella de Montgrí	Baix Empordà	09/06/1999		513014	4652348	4
Z4	Ulldeter (2.364 m)	Ripollès	08/11/2000	20/09/2011	438496	4696908	2364
ZC	Ulldeter (2.410 m)	Ripollès	28/09/2011		437940	4696816	2410
W3	Ventalló	Alt Empordà	14/03/2000	12/01/2015	505366	4666439	4
WF	Vilablareix	Gironès	11/04/2001	30/09/2015	481417	4644721	108
WS	Viladrau	Osona	17/03/2005		451743	4632184	953
CS	Viladrau - centre	Osona	05/12/1995	08/06/2004	449201	4632751	777
VN	Vilobí d'Onyar	Selva	09/06/1999		478645	4636755	117

8.2 Matriz de comparación por pares (Saaty) de 5 capas temáticas para calcular los pesos de las condiciones topográfica.

	Pendiente	Rugosidad	Curvatura general	IPT	ITH
Pendiente	1	3	5	7	7
Rugosidad	1/3	1	3	5	7
Curvatura general	1/5	1/3	1	3	5
IPT	1/7	1/5	1/3	1	3
ITH	1/7	1/7	1/5	1/3	1

	Pendiente	Rugosidad	Curvatura general	IPT	ITH
Pendiente	1	3	5	7	7
Rugosidad	0.33	1	3	5	7
Curvatura general	0.2	0.33	1	3	5
IPT	0.14	0.2	0.33	1	3
ITH	0.14	0.14	0.2	0.33	1
	1.82	4.68	9.53	16.33	23

$\lambda = 5.311$ CI = 0.078 CR = 0.07

	Pendiente	Rugosidad	Curvatura general	IPT	ITH	Peso %
Pendiente	0.55	0.64	0.52	0.43	0.3	49%
Rugosidad	0.18	0.21	0.31	0.31	0.3	26%
Curvatura general	0.11	0.07	0.1	0.18	0.22	14%
IPT	0.08	0.04	0.03	0.06	0.13	7%
ITH	0.08	0.03	0.02	0.02	0.04	4%
	1	1	1	1	1	100%

8.3 Matriz de comparación por pares (Saaty) de 5 capas temáticas para calcular los pesos de las condiciones del terreno.

	Geología	Litología	Densidad de drenaje (km/km ²)	Usos y cubiertas del suelo	Densidad de lineamientos (km/km ²)
Geología	1	5	3	7	9
Litología	1/5	1	1/3	3	5
Densidad de drenaje (km/km ²)	1/3	3	1	5	7
Usos y cubiertas del suelo	1/7	1/3	1/5	1	5
Densidad de lineamientos (km/km ²)	1/9	1/5	1/7	1/5	1

$\lambda = 5.384$ CI = 0.096 CR = 0.086

	Geología	Litología	Densidad de drenaje (km/km ²)	Usos y cubiertas del suelo	Densidad de lineamientos (km/km ²)
Geología	1	5	3	7	9
Litología	0.2	1	0.33	3	5
Densidad de drenaje (km/km ²)	0.33	3	1	5	7
Usos y cubiertas del suelo	0.14	0.33	0.2	1	5
Densidad de lineamientos (km/km ²)	0.11	0.2	0.14	0.2	1
	1.79	9.53	4.68	16.2	27

	Geología	Litología	Densidad de drenaje (km/km ²)	Usos y cubiertas del suelo	Densidad de lineamientos (km/km ²)	Peso %
Geología	0.56	0.52	0.64	0.43	0.33	50%
Litología	0.11	0.1	0.07	0.19	0.19	13%
Densidad de drenaje (km/km ²)	0.19	0.31	0.21	0.31	0.26	26%
Usos y cubiertas del suelo	0.08	0.03	0.04	0.06	0.19	8%
Densidad de lineamientos (km/km ²)	0.06	0.02	0.03	0.01	0.04	3%
	1	1	1	1	1	100%

8.4 Matriz de comparación por pares (Saaty) de 3 capas temáticas para calcular los pesos de las condiciones para generar el MZPAS

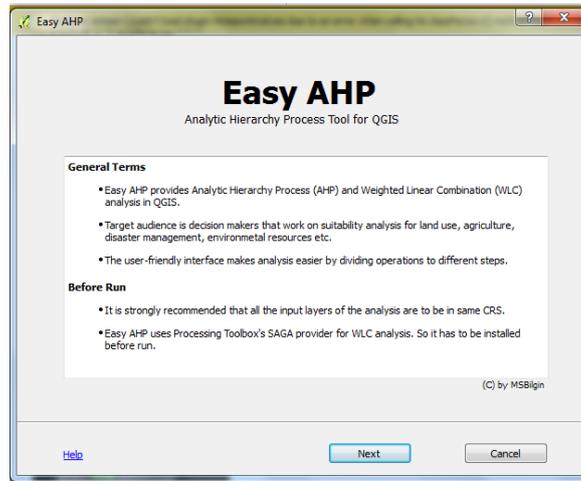
	Condiciones topográficas	Condiciones del terreno	Condiciones ambientales
Condiciones topográficas	1	2	3
Condiciones del terreno	1/2	1	3
Condiciones ambientales	1/3	1/3	1

$\lambda= 3.054$ $CI=0.027$ $CR=0.047$

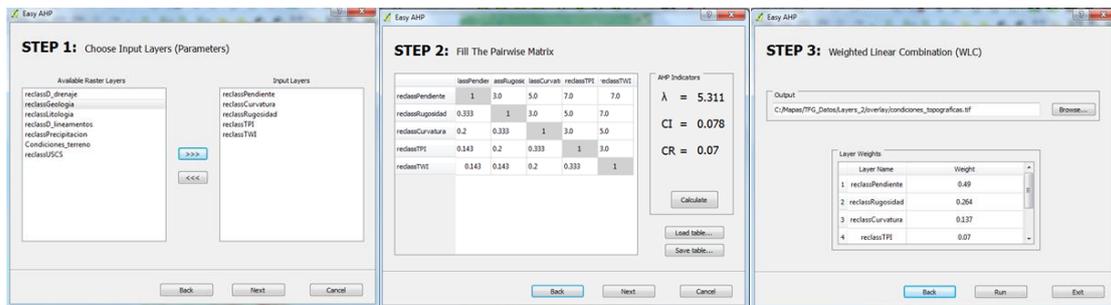
	Condiciones topográficas	Condiciones del terreno	Condiciones ambientales
Condiciones topográficas	1.00	2.00	3.00
Condiciones del terreno	0.50	1.00	3.00
Condiciones ambientales	0.33	0.33	1.00
	1.83	3.33	7.00

	Condiciones topográficas	Condiciones del terreno	Condiciones ambientales	Peso %
Condiciones topográficas	0.55	0.60	0.43	52%
Condiciones del terreno	0.27	0.30	0.43	33%
Condiciones ambientales	0.18	0.10	0.14	14%
	1.00	1.00	1.00	100%

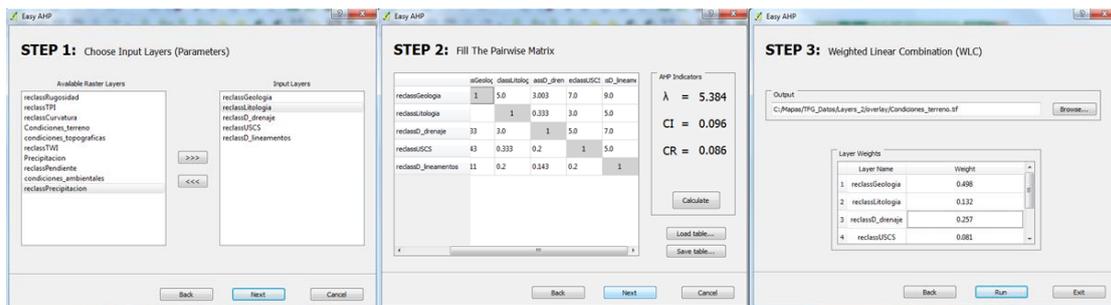
8.5 Uso del complemento “Easy AHP” Analytic Hierarchy Process Tool for QGIS



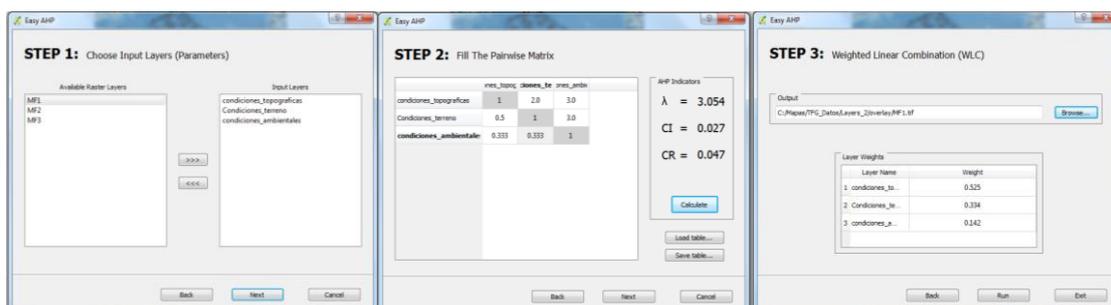
Condiciones topográficas



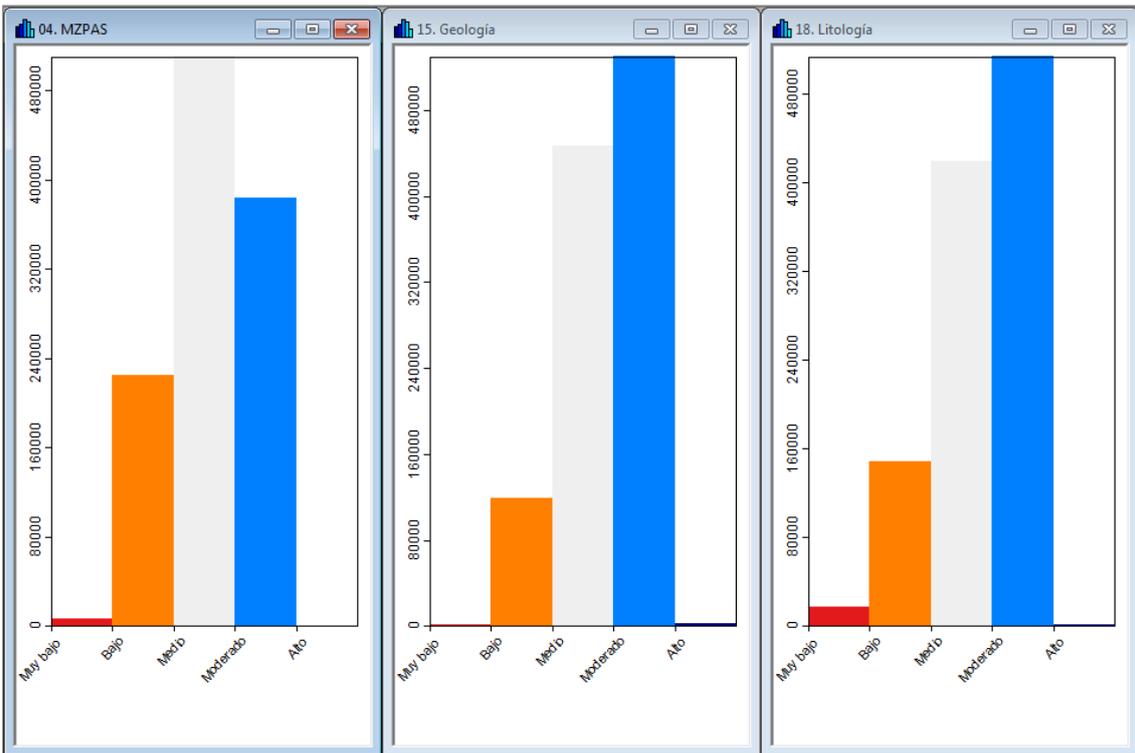
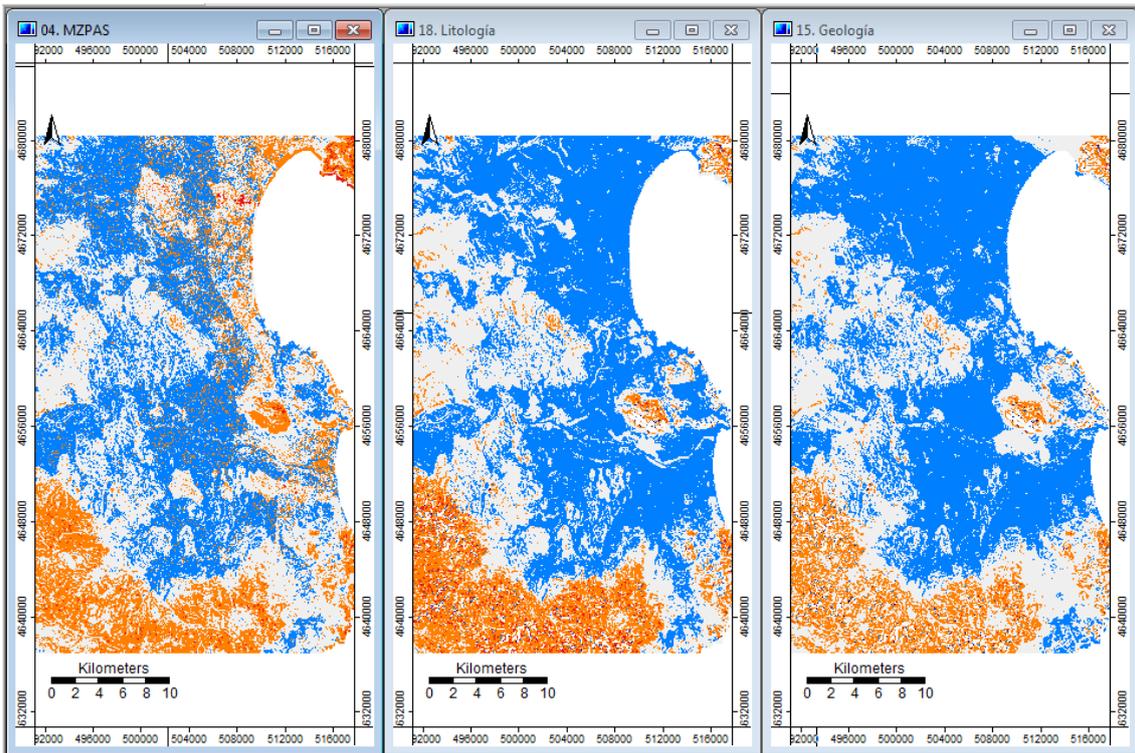
Condiciones del terreno

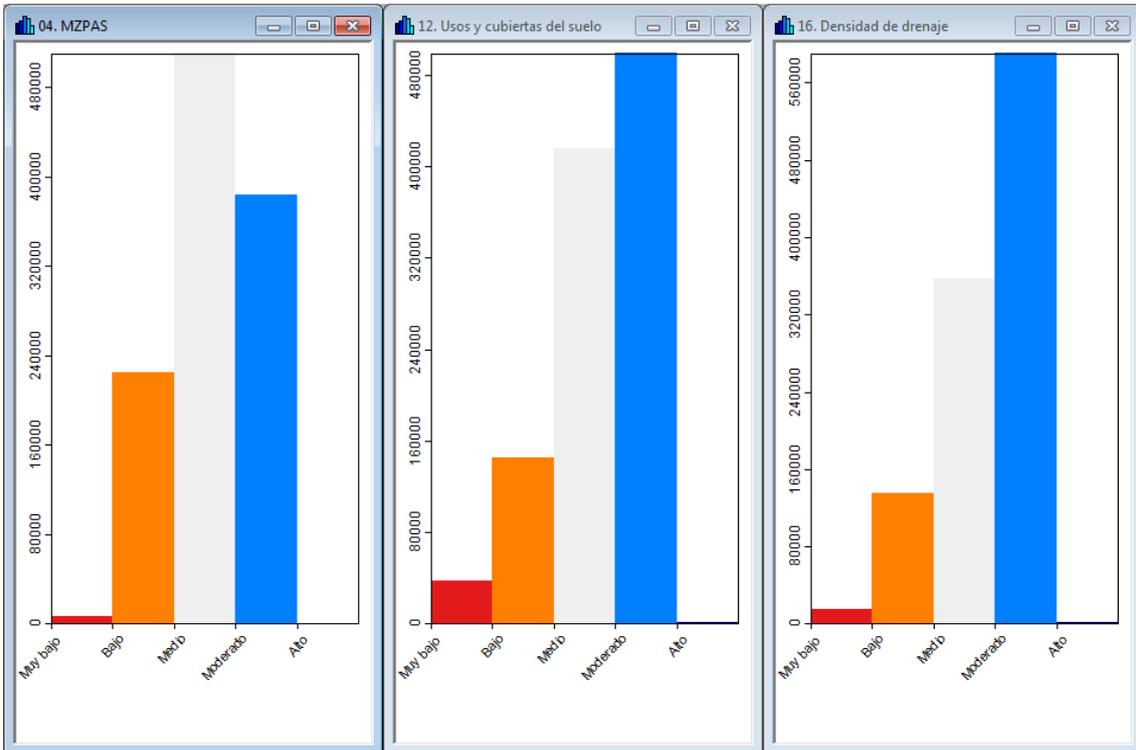
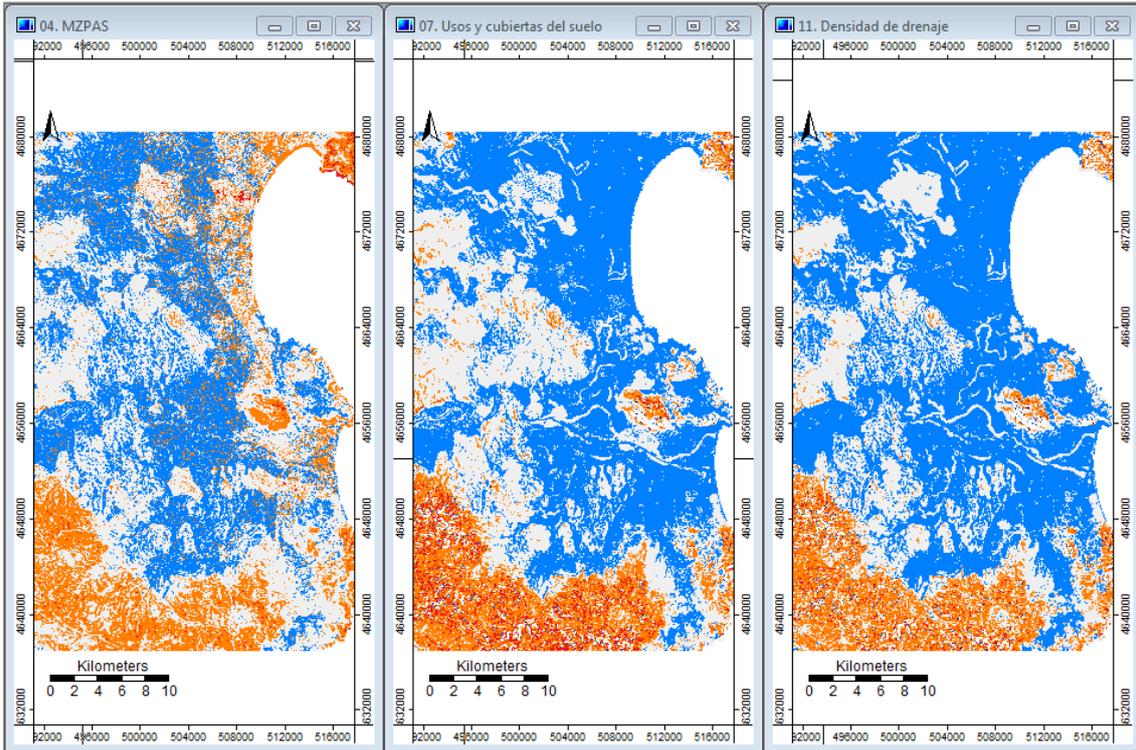


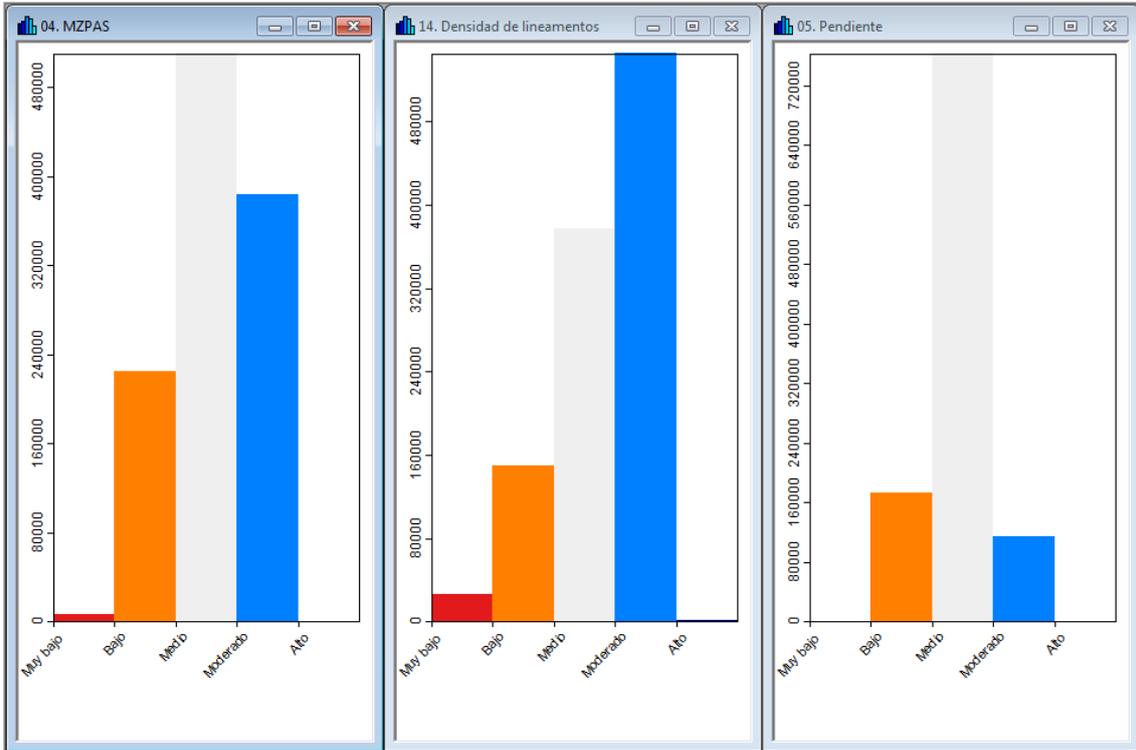
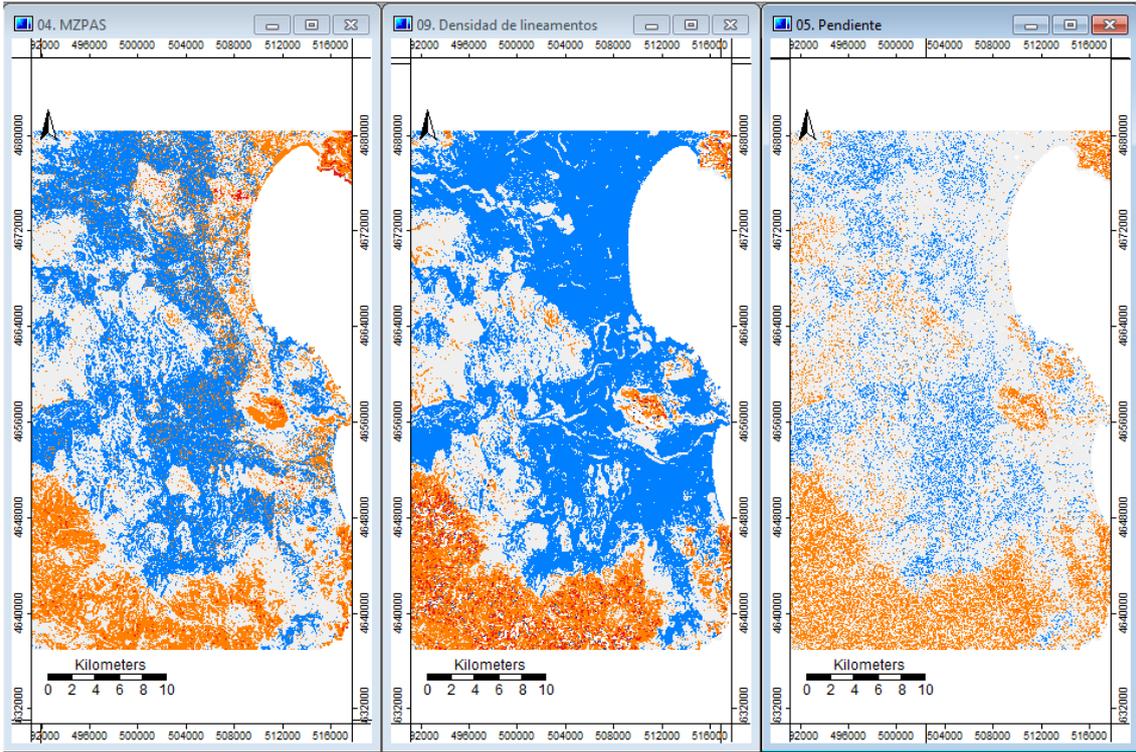
Mapa de Zonas Potenciales de Agua Subterránea (MZPAS)

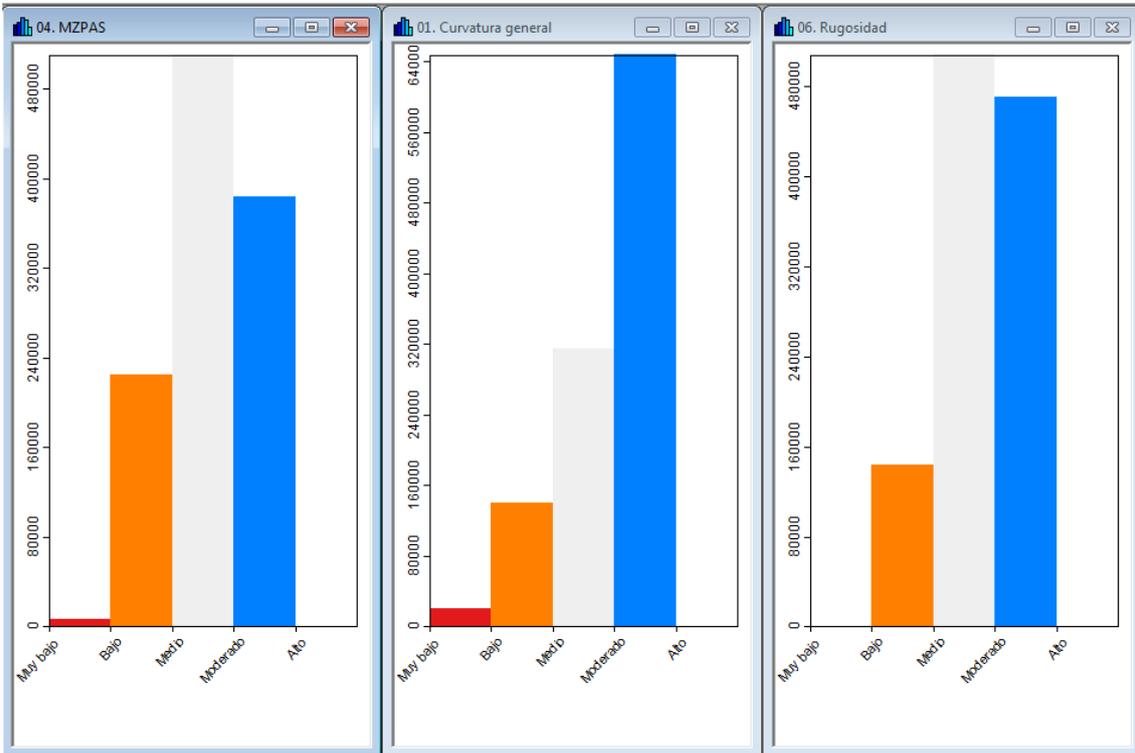
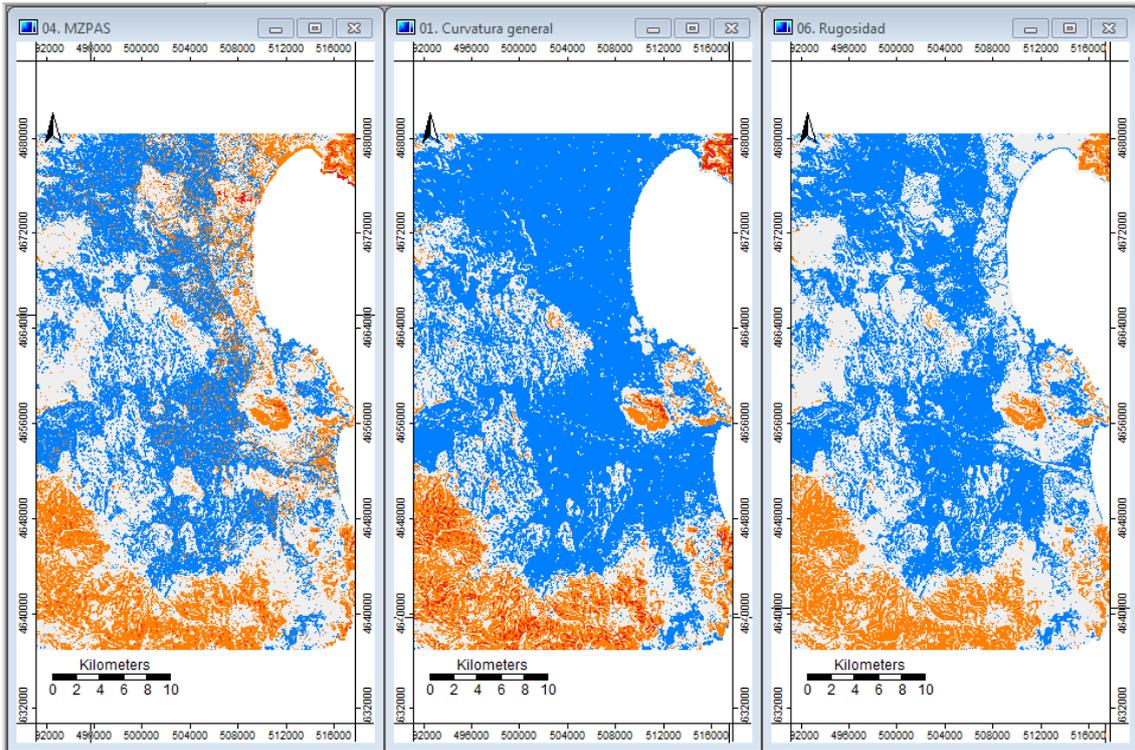


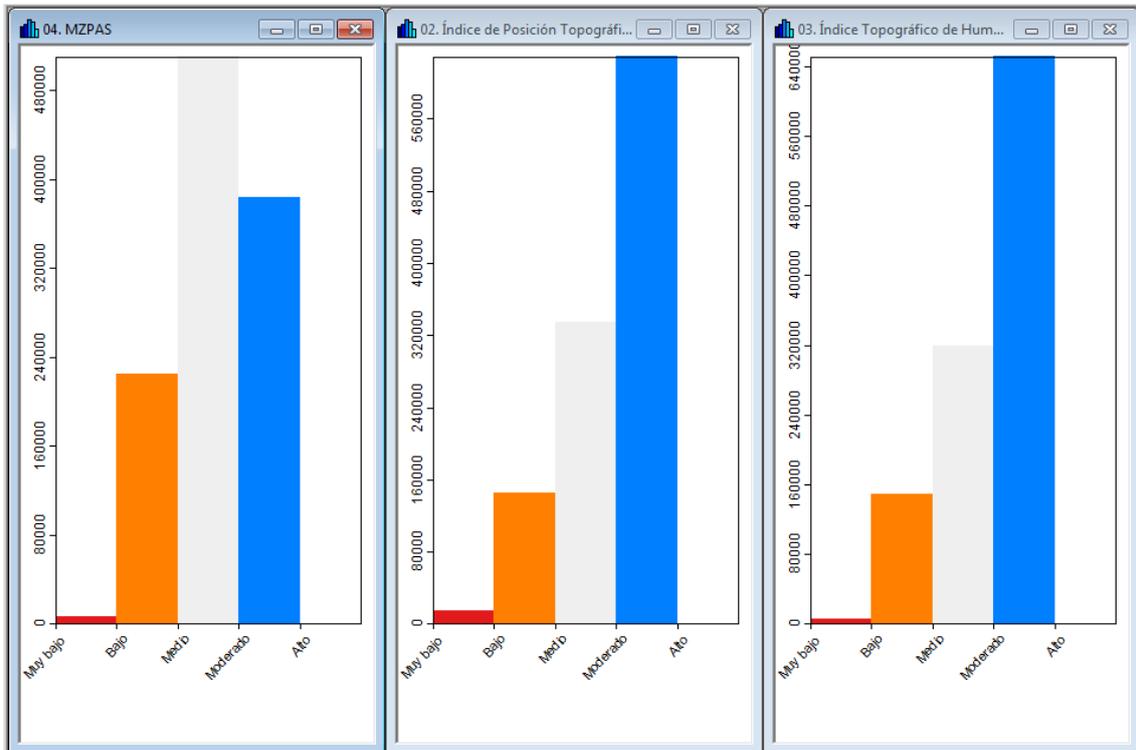
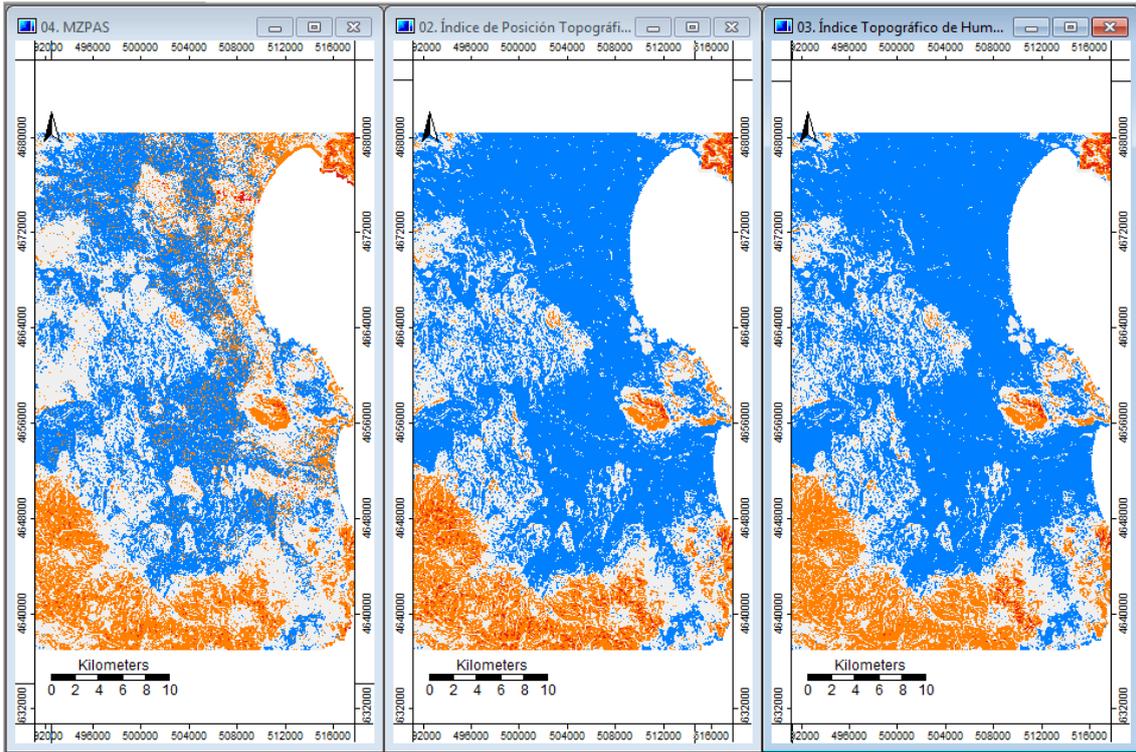
8.6 Comparación de los mapas e histogramas. Resultado del Análisis de Sensibilidad, eliminando un factor a la vez



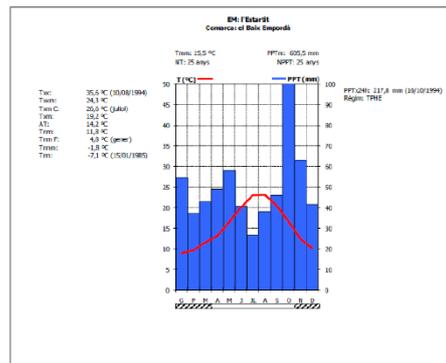
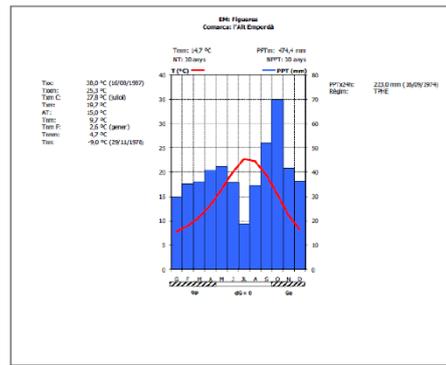
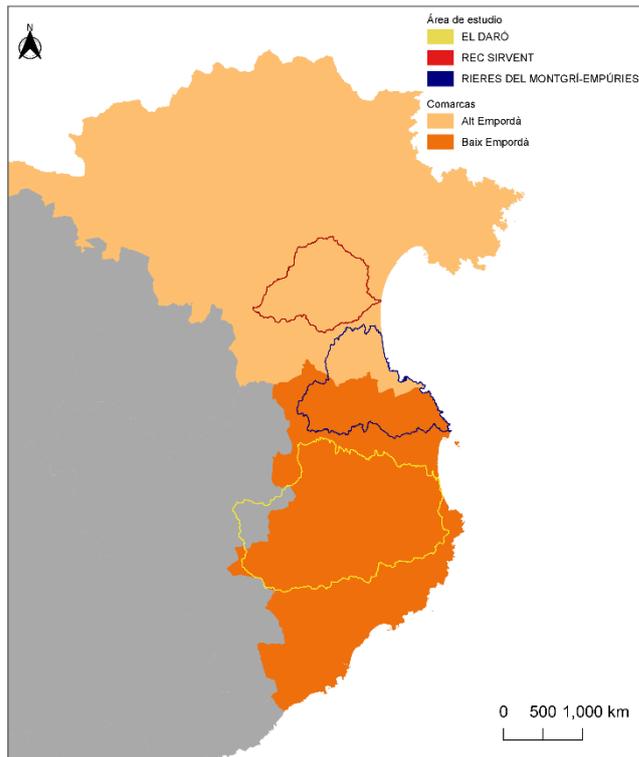








8.7 Caracterización del clima en el área de estudio



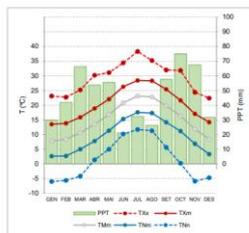
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC), 2020



TORROELLA DE MONTGRÍ

Normals climàtiques
(període de referència 2007-2016)

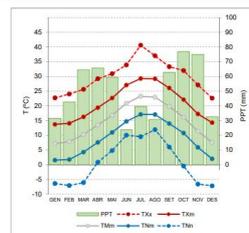
X UTM: 513014
Y UTM: 4652348
Altura: 4
Comarca: Baix Empordà



LA TALLADA D'EMPORDÀ

Normals climàtiques
(període de referència 2007-2016)

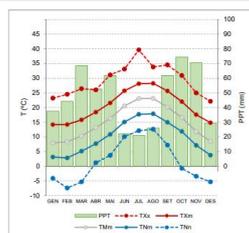
X UTM: 505127
Y UTM: 4655771
Altura: 15
Comarca: Baix Empordà



CASTELL D'ARO

Normals climàtiques
(període de referència 2007-2016)

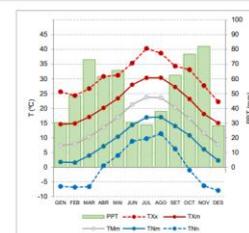
X UTM: 502692
Y UTM: 4628523
Altura: 14
Comarca: Baix Empordà



LA BISBAL D'EMPORDÀ

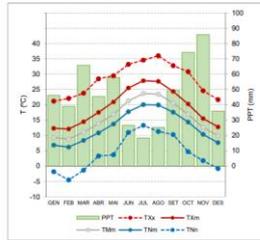
Normals climàtiques
(període de referència 2007-2016)

X UTM: 502935
Y UTM: 4647279
Altura: 28
Comarca: Baix Empordà



PORTBOU
Normals climàtiques
(període de referència 2007-2016)

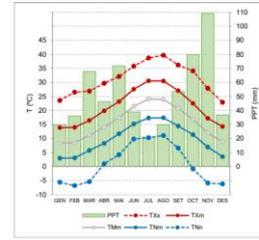
X UTM: 513672
Y UTM: 4698105
Altura: 195
Comarca: Alt Empordà



X UTM: 500606
Y UTM: 4692400
Altura: 93
Comarca: Alt Empordà

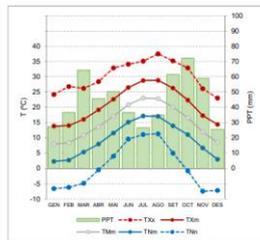


ESPOLLA
Normals climàtiques
(període de referència 2007-2016)



CASTELLÓ D'EMPÚRIES
Normals climàtiques
(període de referència 2007-2016)

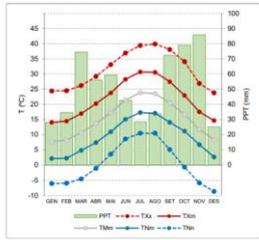
X UTM: 507442
Y UTM: 4677233
Altura: 2
Comarca: Alt Empordà



X UTM: 496276
Y UTM: 4683806
Altura: 31
Comarca: Alt Empordà



CABANES
Normals climàtiques
(període de referència 2007-2016)



Fuente: Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC), 2020



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI