



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
GEOLOGÍA AMBIENTAL

Curso 2023-2024

APLICACIONES DE *MACHINE LEARNING* A LA
CARTOGRAFÍA DE MANANTIALES. CLASIFICACIÓN Y
CARACTERIZACIÓN DE MANANTIALES
REPRESENTATIVOS DE LA HIDROGEOLOGÍA KÁRSTICA
EN EL GMU LAS LORAS

APPLICATIONS OF MACHINE LEARNING IN SPRING
CARTOGRAPHY. CLASSIFICATION AND
CHARACTERIZATION OF REPRESENTATIVE SPRINGS OF
KARST HYDROGEOLOGY IN THE LAS LORAS UGGP

ELVIRA ESTER MUSAKKA

TUTOR/ES DEL TRABAJO: Pedro Martínez Santos

África de la Hera Portillo (IGME-CSIC)



Facultad de Ciencias Geológicas Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Curso 2023-2024

APLICACIONES DE *MACHINE LEARNING* A LA CARTOGRAFÍA
DE MANANTIALES. CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
MANANTIALES REPRESENTATIVOS DE LA HIDROGEOLOGÍA
KÁRSTICA EN EL GMU LAS LORAS

APPLICATIONS OF MACHINE LEARNING IN SPRING
CARTOGRAPHY. CLASSIFICATION AND CHARACTERIZATION OF
REPRESENTATIVE SPRINGS OF KARST HYDROGEOLOGY IN
THE LAS LORAS UGGP

ELVIRA ESTER MUSAKKA

TUTOR/ES DEL TRABAJO: Pedro Martínez Santos

África de la Hera Portillo (IGME-CSIC)

Fdo.: **MARTINEZ
SANTOS
PEDRO - DNI
50739588R**

Firmado digitalmente por
MARTINEZ SANTOS PEDRO - DNI
50739588R
Nombre de reconocimiento (DN):
c=ES, o=UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE DE MADRID,
ou=CERTIFICADO ELECTRONICO DE
EMPLEADO PUBLICO,
serialNumber=IDCES-50739588R,
sn=MARTINEZ SANTOS,
givenName=PEDRO, cn=MARTINEZ
SANTOS PEDRO - DNI.50739588R
Fecha: 2024.07.08 16:13:28 +0200

Fdo.: **DE LA HERA
PORTILLO
AFRICA - DNI
43771563X**

Firmado digitalmente por DE LA HERA
PORTILLO AFRICA - DNI.43771563X
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES,
o=CONSEJO SUPERIOR DE
INVESTIGACIONES CIENTIFICAS,
ou=CERTIFICADO ELECTRONICO DE
EMPLEADO PUBLICO, ou=INSTITUTO
GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA,
ou=43771563,
serialNumber=IDCES-43771563X, sn=DE
LA HERA PORTILLO, givenName=AFRICA,
cn=DE LA HERA PORTILLO AFRICA - DNI
43771563X
Fecha: 2024.07.05 16:35:16 +0200



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Elvira Ester Musakka (autor/a) con PASAPORTE FP3884138, estudiante de Máster Geología Ambiental en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2023 -2024, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado *Aplicaciones de Machine Learning a la cartografía de manantiales. Clasificación y caracterización de manantiales representativos de la hidrogeología kárstica en el GMU Las Loras* y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es es/son: Pedro Martínez Santos y África de la Hera Portillo (IGME-CSIC)

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 10 de julio de 2024

Fdo.: Elvira Ester Musakka

ÍNDICE

RESUMEN.....	I
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
3. ÁREA DE ESTUDIO	4
3.1 Geología.....	4
3.1.1 Encuadre geológico de la zona de estudio.....	4
3.1.2 Afloramientos en el ámbito del GMU Las Loras	5
3.2 Geomorfología.....	6
3.3 Características hidrogeológicas.....	7
3.4 Manantiales en el GMU Las Loras.....	9
4. MATERIAL Y MÉTODOS	10
4.1 Datos y fuentes de datos.....	10
4.2 Clasificación de los manantiales.....	10
4.3 La caracterización de los edificios tobáceos asociados a los tres manantiales seleccionados	12
4.4 Software de <i>Machine Learning</i>	13
4.5 Variables explicativas	14
4.6 Indicadores de rendimiento	16
5. RESULTADOS.....	18
5.1 Análisis de manantiales	18
5.2 Caracterización de los tres manantiales seleccionados.....	19
5.2.1 Caracterización del manantial de Covalagua	19
5.2.2 Caracterización del manantial de Villaescobedo	21
5.2.3 Caracterización del manantial de Barriolucio	24
5.3 Análisis de técnicas de <i>Machine Learning</i>	27
5.3.1 Análisis colineal	27
5.3.2 Mapas predictivos	30
6. DISCUSIÓN.....	31
6.1 En relación con la tipología y clasificación de los tres manantiales seleccionados	31
6.2 En relación con el análisis de los 222 manantiales inventariados.....	33
6.2.1 Contraste con imágenes de satélite	33
6.2.2 En relación con las herramientas de ML aplicadas	33
7. CONCLUSIONES.....	35
8. BIBLIOGRAFÍA.....	36
ANEXO I.....	40
ANEXO II.....	44

RESUMEN

El Geoparque Mundial de la UNESCO (GMU) Las Loras es muy diverso geológicamente en relación con la interacción del paisaje con las aguas subterráneas, contando con un destacado número de manantiales, mayoritariamente de tipo kárstico, entre los que sobresalen aquellos asociados a cascadas y a generación de formaciones tobáceas. En este Trabajo Fin de Máster se dirige en primer lugar, a desarrollar una clasificación genética de tipo de manantial, a partir de la que se aplica una caracterización de formaciones tobáceas asociadas a tres manantiales petrificantes con formación de tuf, considerados como destacados hábitats de interés comunitario. Los tres manantiales seleccionados para la caracterización de los edificios tobáceos tienen una notable importancia, no solo desde el punto de vista hidrogeológico, sino también ambiental y culturalmente. El GMU Las Loras es un territorio poco conocido lo que destaca la importancia de este estudio.

La caracterización y clasificación de los manantiales determinan la importancia de los procesos geológicos en su funcionamiento y tipología. Un tipo de manantial puede compartir características comunes de otros tipos, lo que resalta la caracterización más detallada para reconocer las variaciones entre ellos. Los tres manantiales estudiados en este trabajo se han clasificado de acuerdo con Stevens et al. (2020) como *upland hillslope*, aunque comparten características comunes de otros tipos de manantiales.

Considerando la importancia de los manantiales en el conjunto del GMU Las Loras, se han aplicado las técnicas de *Machine Learning* (ML) en la identificación de manantiales desaparecidos en el GMU Las Loras. Para ello, se han elegido 14 variables explicativas que permiten predecir el valor de una variable objetivo, con el fin de crear mapas predictivos. Estos mapas se han obtenido usando los algoritmos ABC, RFC y QDA, ya que se consideran como los más representativos para este trabajo. Aunque los resultados de ML no han sido concluyentes en el estudio de manantiales desaparecidos en la zona de estudio, se ha podido confirmar que pueden ser útiles en este tipo de trabajos.

ABSTRACT

Las Loras UNESCO Global Geopark (UGGp) is geologically diverse in terms of the interaction between the landscape and groundwater, including a significant number of springs, especially karstic, with notable examples associated with waterfalls and tuff formations. In this Master's Thesis, a genetic classification of spring types is applied first, followed by a characterization of tuff formations associated with three petrifying

springs with tuff formations, considered as important habitats of community interest. The three selected springs for the characterization of tuff formations hold significant importance not only from a hydrogeological perspective but also environmentally and culturally. The UGGp Las Loras is a very unknown territory, which highlights the importance of this study.

The characterization and classification determine the importance of geological processes in their functioning and typology. One type of spring can share common characteristics with other types, highlighting more detailed characterization to recognize the variations between them. The three springs studied in this study have been classified according to Stevens et al. (2020) as upland hillslope, although they have common characteristics with other types of springs.

Considering the importance of springs in the UGGp Las Loras, Machine Learning (ML) techniques have been applied to identify disappeared springs in the UGGp Las Loras. In this respect, 14 explanatory variables were chosen to predict the target variable. The algorithms ABC, RFC and QDA have been used for predictive maps, as they are considered the most representable in this study. Although the ML results have not been conclusive in identifying disappeared springs in the study area, it has been confirmed that these techniques can be useful in this type of studies.

1. INTRODUCCIÓN

Los manantiales son salidas naturales de los acuíferos, resultados del corte de la superficie freática con la topográfica, que producen una surgencia (Martínez et al., 2018). El Geoparque Mundial de la UNESCO (GMU) Las Loras cuenta con 222 manantiales inventariados, siendo una cantidad considerable ya que cada uno de ellos representa un recurso hídrico para ecosistemas y uso humano. La presencia de abundantes manantiales refleja una considerable variedad de formaciones geológicas. Este es uno de los variados aspectos de la región que justifica su declaración como Geoparque Mundial por la UNESCO en 2017, aunque su nota más relevante son las llamadas “loras” de las que se hablará más adelante.

El GMU Las Loras se caracteriza por ser una zona escasamente poblada en la que los impactos antrópicos han tenido baja incidencia. Sin embargo, al situarse en el límite entre la vertiente atlántica y la mediterránea de la península Ibérica, conforma un área especialmente sensible a los impactos de cambio climático. Dentro de este contexto, la identificación y el monitoreo de los manantiales se vuelven esenciales para comprender y proteger los recursos hídricos subterráneos.

Los procesos fundamentales en la ocurrencia de manantiales son el origen del agua y la estructura de la roca que facilitan el acceso del agua a la superficie (Bryan, 1919). Los manantiales presentan una gran diversidad; hace años únicamente se consideraba importante estudiar aquellos que representaban características inusuales (Bryan, 1919). A lo largo del tiempo la clasificación de manantiales ha ganado importancia a nivel académico y los manantiales han sido clasificados basándose en varios criterios diferentes, por ejemplo, atendiendo a la geología, hidrología, química del agua, temperatura del agua, ecología y uso humano (Glazier, 2014), o concentrándose en la localización de la surgencia dentro del paisaje regional, incluyendo las características físicas como explicaciones secundarias (Stevens et al., 2020). La geomorfología y tipo de roca también pueden considerarse como clave en la aparición de los manantiales (Kresic, 2010). Por tanto, puede resultar complejo seleccionar un enfoque uniforme para determinar el origen o clasificación de un manantial debido a la gran variedad de formas y características que muestran (Pitts y Alfaro, 2001).

Este trabajo se centra en la clasificación genética de tipología habitual de manantiales aplicado al inventario de manantiales del GMU Las Loras, y en la caracterización de tres manantiales seleccionados en la zona de estudio asociados a cascadas y formación de edificios tobáceos. La geomorfología de la ubicación de la surgencia del

manantial y del área circundante puede ofrecer información detallada para conocer el funcionamiento del manantial y su clasificación.

En el GMU Las Loras se encuentran diversos tipos de hábitats de interés comunitario relacionado con manantiales, que son aquellos que se sitúan cerca de surgencias de aguas subterráneas. La Directiva Hábitats de la Unión Europea (92/43/CEE) identifica distintos tipos de hábitats de interés comunitario (HIC) relacionados con manantiales, teniendo cada uno de ellos unas características ecológicas propias. Los tres manantiales seleccionados pertenecen al tipo “Manantiales petrificantes con formación de tuf”, dominados por briofitas (*Cratoneuron commutatum*), caracterizados por presencia de agua carbonatada y depósitos de caliza (toba). Son HIC especialmente vulnerables y valiosos desde el punto de vista ambiental, lo que hace que su clasificación y caracterización sea especialmente importante. La razón de su vulnerabilidad e interés radica en que su formación depende de la surgencia de aguas subterráneas, y al hecho de que pueden responder de modo rápido a las variaciones climáticas.

Debido a la gran importancia de manantiales su monitorización se vuelve cada vez más importante. Las técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección son frecuentemente usadas para cartografiar el potencial hidrogeológico, que a menudo se correlaciona en el espacio con la presencia de manantiales (Al-Fugara et al., 2020; Oh et al., 2011; Ozdemir, 2011). En este sentido, las técnicas de *Machine Learning* (ML) pueden reemplazar los métodos convencionales de predicción (Al-Fugara et al., 2020). El ML es una rama de inteligencia artificial que usa algoritmos y modelos estadísticos para encontrar una vinculación importante entre varias variables explicativas y una variable objetivo. Algunos autores consideran que puede ser una técnica adecuada en situaciones donde existen una gran cantidad de datos de entrada, por ejemplo, numerosos datos de manantiales, pero donde la interpretación hidrogeológica está incompleta (Aliago-Alvarado et al., 2023). En este sentido, la identificación de patrones de correlación entre una variable objetivo, la presencia o ausencia de manantiales, y una serie de variables explicativas, como la morfología del terreno, la litología, el grado de fracturación de una roca o el contraste entre unos materiales y otros, permite elaborar cartografía predictiva. Este trabajo se propone el uso de esta técnica a nivel exploratorio para identificar zonas donde los manantiales podrían haberse secado por efecto de la variabilidad climática.

2. OBJETIVOS

El GMU Las Loras cuenta con una diversidad geológica, especialmente en relación con la interacción del paisaje con el agua subterránea (De la Hera-Portillo et al., 2023a). Los manantiales son destacadamente importantes no solo por su capacidad de demostrar los procesos hidrogeológicos y su importancia cultural para la población de la zona, sino por su valor propio como ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (Australian Government-Geoscience Australia, 2023).

El objetivo principal de este trabajo es clasificar primero los manantiales existentes de forma genética, para después aplicar una clasificación más de detalle (Stevens et al., 2020) en sus aspectos referidos a manantiales kársticos seleccionados en el GMU Las Loras. En este geoparque los manantiales son aún ecosistemas poco conocidos, por lo que su clasificación y caracterización puede proporcionar información de interés en la generación de conocimientos sobre su génesis y funcionamiento.

Este objetivo general se desglosa en una serie de objetivos parciales:

- Establecer una caracterización genérica de los 222 manantiales inventariados que se encuentran en el GMU Las Loras aplicando la clasificación genérica de Martínez et al. (2018).
- Identificar una tipología de manantiales kársticos para los tres manantiales seleccionados, de acuerdo con Stevens et al. (2020).
- Caracterizar tres manantiales seleccionados representativos de HIC Manantiales petrificantes con formación de tuf, identificados como de notable interés en el marco de la Directiva Hábitat (92/43/CEE).
- Implementar metodologías de ML en la identificación de zonas de descarga natural de agua subterránea y zonas susceptibles a la interacción del nivel freático con la superficie del terreno en el GMU Las Loras.
- Encontrar variables relacionadas con la presencia de manantiales para usarlos como datos de entrada en la aplicación de herramientas de ML.
- Comprender el funcionamiento de ML y aplicar distintos algoritmos para construir modelos de representación de áreas con manantiales posiblemente inactivos.
- Analizar y evaluar la importancia relativa de las variables utilizadas para establecer cuáles pueden tener mayor influencia en la probabilidad de que un manantial se pueda secar.
- Evaluar los diferentes modelos de ML a fin de establecer cuales podrán mostrar mejores resultados en los estudios similares en el futuro.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El GMU Las Loras se sitúa en el sur de la Cordillera Cantábrica, en el noreste de la provincia de Palencia y noroeste de Burgos. Incluye 16 municipios, situándose cinco de ellos en Palencia (Aguilar de Campoo, Alar del Rey, Pomar de Valdivia, Santibáñez de Ecla y Berzosilla) y once en Burgos (Basconcillos del Tozo, Humada, Huérmeces, Montorio, Rebolledo de La Torre, Sargentos de la Lora, Sotresgudo, Villadiego, Urbel del Castillo, Valle de Sedano y Valle de Valdelucio). El área de estudio abarca una extensión de 950,76 km² (Salman et al. 2015). Existen cuatro municipios, Orbaneja del Castillo, Valdelateja, Covanera y Tubilla del Agua, que actualmente no están incluidos en el Geoparque. Sin embargo, se espera que sean incorporados en el futuro ya que comparten características geológicas similares a las del geoparque y esta propuesta de ampliación de los límites del Geoparque se encuentra en tramitación. Cuentan con elementos importantes por lo cual se van a tener en cuenta en el presente estudio en ciertos aspectos.

La precipitación media anual entre el periodo de 2009-2021 es 570 mm, siendo 2017 el año más seco con una precipitación anual de 379,6 mm, y el más húmedo el 2010 con una precipitación anual de 730,7 mm (AEMET, s.f). La temperatura media anual se sitúa alrededor de 9,8°C, con una gran variabilidad entre las temperaturas mínimas de -4,66°C en diciembre de 2009 y las máximas de 27,08°C en julio de 2023 (AEMET, s.f)

3.1 Geología

3.1.1 Encuadre geológico de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en la zona de confluencia de tres importantes áreas: Macizo Ibérico, Cordillera Vasco-Cantábrica y Cuenca del Duero (figura 1). El borde sur de la zona de estudio encaja con el cabalgamiento de la cuenca del Duero (De la Hera y López, 2022).

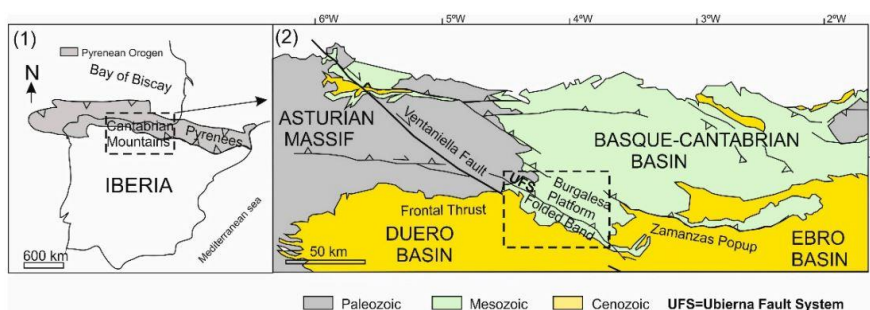


Figura 1. Contexto geológico de GMU Las Loras. Fuente: De la Hera-Portillo et al. (2023a). UFS = Ubierna Fault System.

3.1.2 Afloramientos en el ámbito del GMU Las Loras

En la mayor parte del área de estudio afloran materiales de edad mesozoica, principalmente de Cretácico superior (figura 2). Los afloramientos más antiguos de la zona pertenecen al Triásico superior, representados por arcillas rojas y yesos de la facies Keuper. Estos están relacionados con las principales fallas y cabalgamientos, donde debido a su plasticidad han tenido una función de plano de deslizamiento (de la Hera-Portillo et al., 2022; Salman et al., 2015). La continuidad estratigráfica presenta sedimentos marinos de facies Lías, Dogger y Malm (Jurásico): carnioles, calizas dolomíticas en plataformas y ritmitas caliza margosas en las pendientes (De la Hera-Portillo et al., 2023a). A estas unidades siguen materiales continentales detríticos y carbonatados en discordancia notable con el Jurásico superior y Cretácico inferior, continuando con formaciones alternas de calizas y suelo franco de Cretácico superior. Finalmente, los depósitos cuaternarios cubren las rocas consolidadas (De la Hera-Portillo et al., 2023a).

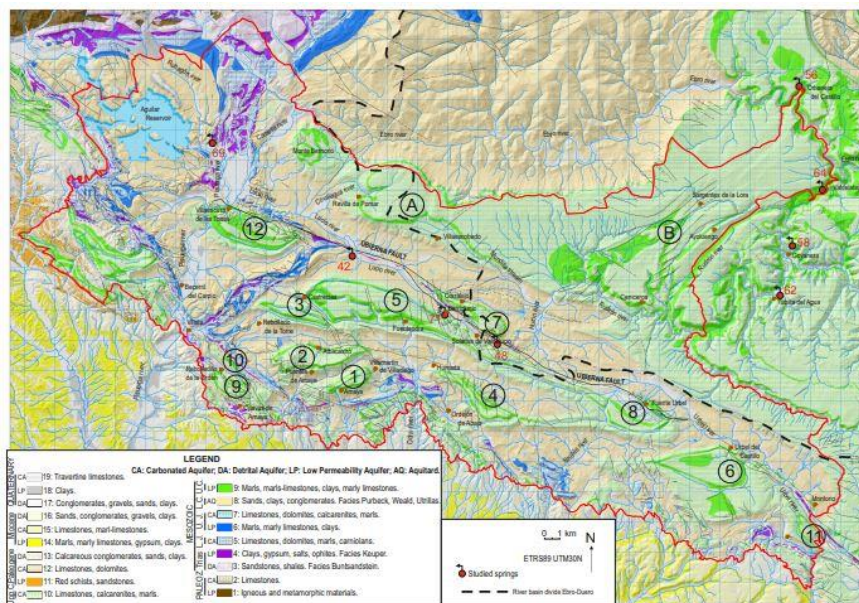


Figura 2. Mapa hidrogeológico de la zona de estudio. Páramos y loras diferenciados: A = Páramo de Lora de Covalagua; B = Páramo de Lora de la Pata del Cid; 1 = Lora de Peña Amaya; 2 = Lora de Albacastro; 3 = Lora de Rebolledo de la Torre; 4 = Lora de Ulaña o de Humada; 5 = Lora de Barriolucio; 6 = Lora de Pinza; 7 = Lora de Corralejo; 8 = Lora de Fuente Urbel; 9 = Lora de Cuevas de Amaya; 10 = Lora de Villela; 11 = Lora de Monte Carrascal; 12 = Lora de las Tuerces. Fuente: De la Hera-Portillo et al. (2023a).

Varios manantiales de la zona están asociados a los procesos activos de formación de tobas calcáreas. Se forman a consecuencia de la desgasificación de CO_2 y la precipitación de carbonatos debido a la disolución de las rocas por las que fluye. Una vez en contacto con la atmósfera, el agua discurre sobre el terreno, depositando el precipitado de carbonato cálcico al liberarse el CO_2 , sobre plantas y restos vegetales, generando formas singulares.

3.2 Geomorfología

La falla de Ubierna atraviesa el área de estudio dividiéndola en dos zonas bien diferenciadas: la Plataforma Burgalesa (PB), al norte de la citada falla; y la Banda Plegada (BP), al sur (figura 3). La Plataforma Burgalesa, está formada por páramos calcáreos de notable extensión correspondientes a un gran sinclinal (De la Hera-Portillo, et al., 2022; De la Hera-Portillo et al., 2023a), erosionado posteriormente, dando lugar a suaves desniveles. La Banda Plegada está formada por las estructuras llamadas “loras”, que son sinclinales colgados y erosionados, dando lugar a un paisaje característico, abrupto y único.

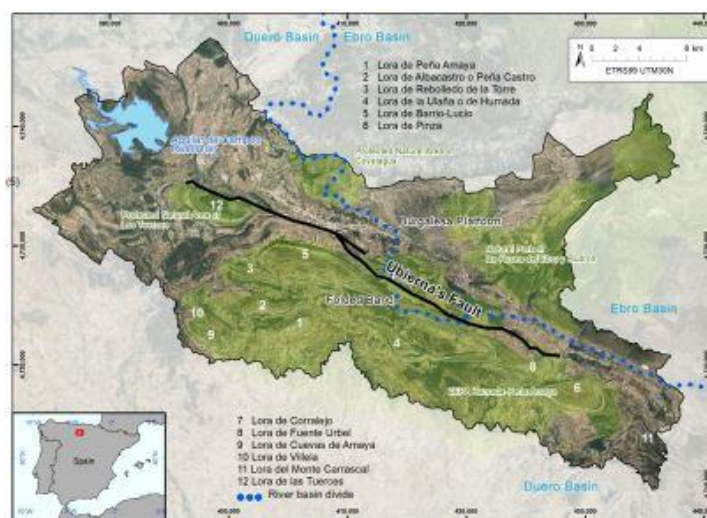


Figura 3. Localización de GMU Las Loras. Fuente: De la Hera-Portillo et al. (2023a).

Ambas zonas (PB y BP) presentan un paisaje similar, pero desde el punto de vista de las altitudes y del drenaje se pueden encontrar grandes diferencias. Atendiendo a la altitud de las “loras”, Martínez Arnaíz (2013) ha identificado 12 loras (figura 3), en las cuales se encuentra la cota más elevada de la zona de estudio, 1377 metros en lora de Peña Amaya. En la PB las altitudes máximas oscilan entre 1000 y 1100 metros, descendiendo hasta 610 metros en las zonas colindantes del río Ebro y Rudrón. En esta zona (PB) el drenaje de los ríos y el agua subterránea fluye hacia la cuenca del Ebro, excluyendo el Espacio Natural Protegido (ENP) de Covalagua, donde el drenaje se dirige hacia la cuenca del Duero, como en la BP. Se encuentran pendientes muy pronunciadas, oscilando los valores de 0 a 33,9%. Mayoritariamente se aprecian en el suroeste y sureste del área del estudio, correspondiendo con las “loras”. Sin embargo, alrededor de los valles del Ebro y Rudrón se encuentran las pendientes más significativas. Ambos ríos atraviesan la Paramera de la Lora (PB) dando lugar a profundas hondas tajaduras al encajarse en los valles (Martínez Arnaíz, 2013).

3.3 Características hidrogeológicas

El GMU Las Loras está situado entre las cuencas hidrográficas del Duero y del Ebro. En la cuenca del Duero los ríos con mayor importancia son Pisuerga, y sus afluyentes Camesa, Lucio, Monegro y Sauguillo (figura 4). El río Odra nace en la zona de estudio, desembocando en el río Pisuerga. Además, el río Urbel nace también en el GMU Las Loras en el este desembocando al río Arlanzón, afluente del río Arlanza, y este, a su vez, del Pisuerga. El río Rudrón también nace en el geoparque, y limita la zona de estudio en el noreste junto con el río Ebro.

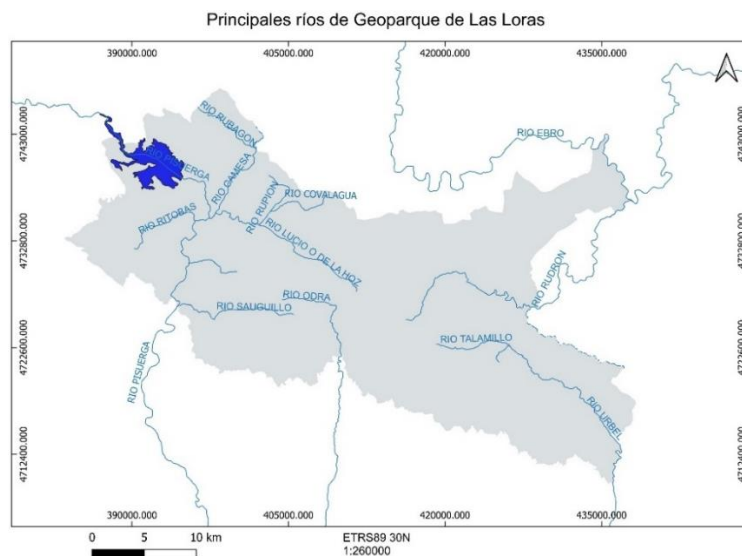


Figura 4. Principales ríos de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

El GMU las Loras se sitúa entre dos masas de agua subterránea (MASb): Quintanilla-Peñahorada-Las Loras (cuenca del Duero), y Páramo de Sedano y Lora (cuenca del Ebro). Ambas comparten las mismas formaciones geológicas permeables de naturaleza carbonatada. Ambas MASb se recargan a través de la infiltración de la precipitación, descargándose por el drenaje de los ríos o a través de manantiales en el contacto de materiales permeables con formaciones menos permeables.

Se pueden distinguir tres tipos de acuíferos en la zona: un acuífero libre superior, formado por materiales permeables, principalmente las calizas pertenecientes al Cretácico superior, y un acuífero inferior confinado o semiconfinado formado por materiales jurásicos (De la Hera-Portillo et al., 2023a). En el GMU Las Loras el acuífero confinado formado por materiales jurásicos se considera como acuífero regional por su extensión y profundidad. El acuífero libre formado por materiales de Cretácico superior se puede considerar como local, debido a que estos afloramientos forman acuíferos independizados, de poca extensión y desconectados hidrogeológicamente del acuífero regional.

3.4 Manantiales en el GMU Las Loras

A los 212 manantiales de la zona de estudio (GMU Las Loras, s.f) se han añadido diez manantiales estudiados en De la Hera-Portillo et al. (2023a) no incluidos en esa base de datos inicial, es decir un total de 222 manantiales. Éstos son manantiales de Barriolucio, Ceniceros, Covalagua, Orbaneja, Peñalonga, Pisadera, Pozo Azul, Tubilla de Agua, Valdelateja y Villaescobedo. El manantial de Ceniceros no se presenta en los mapas elaborados en este trabajo, ya que no se conocen las coordenadas exactas. Sin embargo, este manantial se encuentra citado en Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (1998), lo que puede justificar su existencia. La mayoría de los manantiales se sitúan en la BP, pudiéndose observar la mayor concentración en la zona sur y sureste (figura 6). Sin embargo, se puede apreciar que dos manantiales se encuentran fuera de los límites actuales de GMU Las Loras. Estos corresponden a Pozo Azul y Tubilla del Agua.

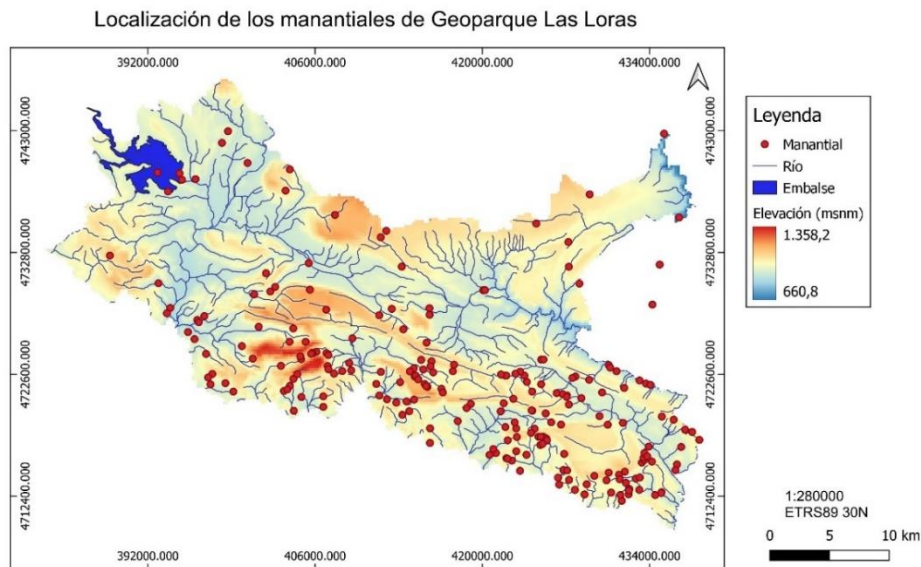


Figura 6. Localización de los manantiales considerados en este estudio (221 manantiales). Fuente: Elaboración propia.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología del trabajo ha seguido las siguientes fases: (1) La revisión bibliografía de publicaciones que aportan conocimiento local y regional de la zona de estudio. (2) La integración de información de datos procedentes de distintas fuentes en relación con el inventario y conocimiento de los manantiales. (3) El tratamiento en GIS de la información geológica e hidrogeológica del GMU Las Loras. El conocimiento de la función hidrogeológica de la zona es fundamental para poder aplicar las metodologías de ML y obtener resultados coherentes. (4) La aplicación de herramientas de ML al análisis de identificación de manantiales actualmente secos o desaparecidos.

4.1 Datos y fuentes de datos

Se ha realizado una tabla de recopilación de información de los manantiales (Anexo I), que se ha elaborado con el apoyo de la cartografía geológica digital continua (GEODE) a escala 1:50.000, el visor de Iberpix y las imágenes de satélite de Landsat (17/06/2019), CNES/Airbus (30/08/2019) y Airbus (9/07/2023 y 21/04/2024) en Google Earth Pro. Estas imágenes se han usado para determinar si un manantial está inactivo o activo, basándose en el criterio de que, si el manantial no es visible en las imágenes, se ha tenido en cuenta la salud de la vegetación alrededor del manantial. Varios manantiales no tienen nombre, por lo cual en la tabla se han nombrado en orden numérico, 001, 002, 003, y así consecutivamente.

En los tres manantiales caracterizados en este trabajo, se han realizado medidas in situ de parámetros inestables (Conductividad Eléctrica, Potencial Redox, Temperatura del agua y pH) usando un medidor multiparamétrico portátil digital Hach HQ40D, tres canales, con electrodos estándar de pH de gel PHC201 y LDO101, y cable de 1 m. Con exactitud de pH de $\pm 0,002$ pH.

4.2 Clasificación de los manantiales

Se ha aplicado una clasificación genética de los manantiales siguiendo los criterios descritos por Martínez et al. (2018). El autor describe seis tipos frecuentes de manantiales (figura 7), de los cuales se han identificado dos en la zona de estudio: manantial por contacto y por falla. Sin embargo, esta clasificación es una primera aproximación a la tipología, y está abierta a mejoras de conocimiento en el futuro. El manantial por contacto resulta cuando el agua subterránea entra en contacto con materiales impermeables sobresaliendo en la superficie. En este trabajo la tipología por contacto se ha clasificado tanto por contacto regional como local. Por último, el manantial por falla se produce cuando el agua subterránea asciende por un plano de falla por las grietas de la roca hasta llegar en la superficie.

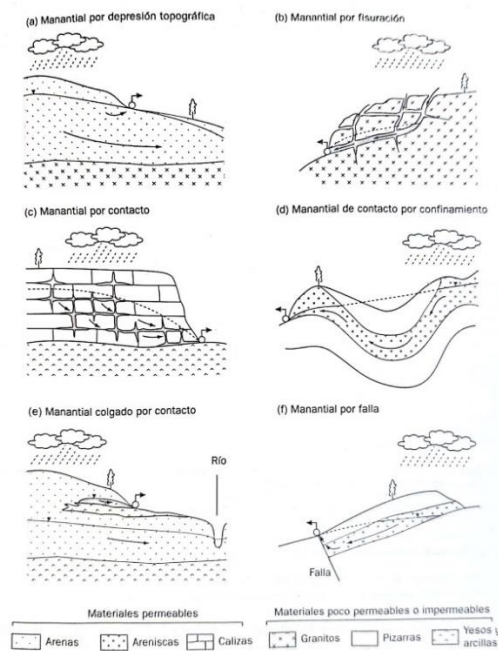


Figura 7. Tipologías habituales de manantial. Fuente: Martínez et al. (2018).

Se ha realizado una clasificación en función del tipo de descarga y caracterización geomorfológica, según Stevens et al. (2020) para tres manantiales dentro de la zona de estudio. La caracterización se lleva a cabo mediante claves dicotómicas aplicadas a la geomorfología. Se han elegido casos representativos de manantiales formados por contacto local y regional para aplicar esta clasificación. En la figura 7 se puede ver que el tipo genético en el cual aparecen más frecuentemente los manantiales kársticos es manantial por contacto. Teniendo en cuenta que en el GMU Las Loras los manantiales kársticos son los más abundantes, se determina que hace falta centrarse en elaborar una clasificación más ajustada a manantiales kársticos aplicando la clasificación de Stevens et al. (2020). Estos autores no se centran exclusivamente en manantiales kársticos, pero sí mayoritariamente. Esta clasificación procede originariamente de Springer y Stevens (2009) siendo el resultado de un proceso más evolucionado. La selección de los manantiales a clasificar y caracterizar se ha determinado con el criterio que todos los HIC requieren una protección y conservación del manantial, lo que viene determinado por la Directiva Hábitat (92/43/CEE). Estos manantiales son Barriolucio, Covalagua y Villaescobedo.

La clasificación de manantiales de Stevens et al. (2020) se divide en dos grupos bien diferenciados: lénticos y lóuticos. En total estos autores proponen 13 tipos (de los cuales 12 están representados en la figura 8 y 9): *helocrene*, *fountain*, *hypocrene*, *limnocrene*, *mound-forming*, *exposure* (lénticos), *rheocrene*, *gushet*, *upland hillslope o*

floodplain hillslope, geyser, hanging garden y cave) (lóticos). Los nombres de los tipos se presentan en inglés, ya que se desconoce la traducción oficial al español.

Los tipos de manantiales pueden estar asociados a ciertos microhábitats geomórficos. Para clasificar éstos se tiene en cuenta consideraciones geomórficas: las unidades hidroestratigráficas, entorno y geomorfología de la surgencia, zona de descarga y características del flujo (Springer y Stevens, 2009).

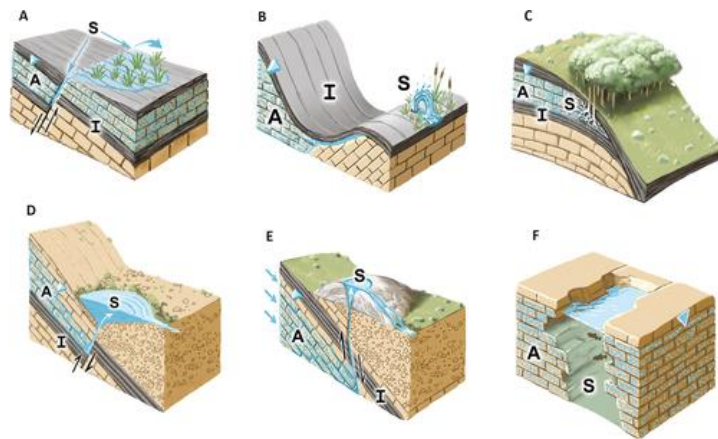


Figura 8. Clasificación de manantiales léntricos. (A) *helocrene*, (B) *fountain*, (C) *hypocrene*, (D) *limnocrene*, (E) *mound-forming*, y (F) *semi-lotic fountain springs*. A = Acuífero, I = barrera poco permeable (acuitardo); S = agua subterránea superficial (fuente de manantial). Fuente: Stevens et al. (2020).

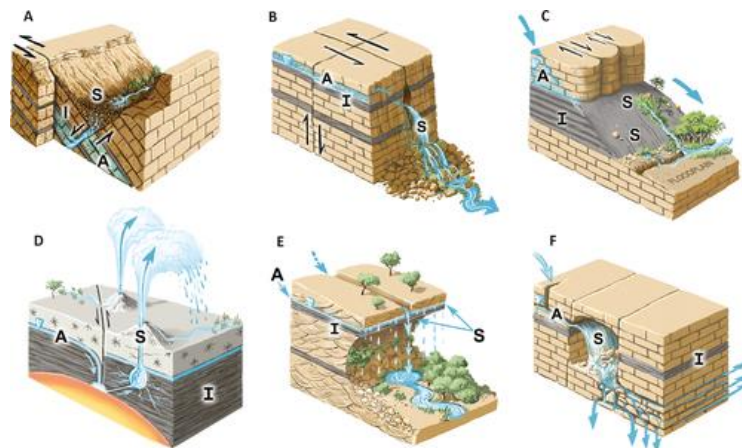


Figura 9. Clasificación de manantiales lóticos. (A) *rheocrene*, (B) *gushet*, (C) *floodplain vs. upland hillslope*, (D) *geyser*, (E) *hanging gardens*, y (F) *cave springs*. A = Acuífero, I = barrera poco permeable (acuitardo); S = agua subterránea superficial (fuente de manantial). Fuente: Stevens et al. (2020).

4.3 La caracterización de los edificios tobáceos asociados a los tres manantiales seleccionados

Esta caracterización se ha desarrollado aplicando las pautas establecidas en las guías metodológicas publicadas por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) para los HIC “manantiales petrificantes con formación de tuf” en España (Carcavilla et al., 2019; Cabrera et al., 2019; Vegas et al., 2019). Constituye

una de las principales aportaciones de este trabajo. Un edificio tobáceo activo se entiende como una formación geológica que cuenta con sectores con presencia de vegetación y agua de manera permanente o estacional, produciendo precipitación de carbonato cálcico. Por otro lado, el edificio tobáceo inactivo es aquello que cuenta con sectores que no tienen vegetación ni presencia de agua de manera permanente ni estacional (Carcavilla et al., 2019).

La caracterización de los manantiales seleccionados se ha realizado completando los datos de la ficha diseñada (Anexo II) en una visita de campo fechada en 22 de junio de 2024.

4.4 Software de Machine Learning

Este estudio usa MLMapper software, una herramienta de cartografía predictiva basada en ML (Aliaga-Alvarado et al., 2023), desarrollado por Martínez-Santos y Renard (2020), y posteriormente por Gómez-Escalonilla (2022a). La versión usa varios clasificadores de aprendizaje supervisado, incluyendo *Support Vector Classifier* (SVC), *Linear Support Vector Machines* (LVC), *Logistic Regression* (LRG), *Decision Tree Classifier* (DTC), *Random Forest Classifier* (RFC), *Multi-layer Perceptron Classifier* (MLP), *AdaBoost Classifier* (ABC), *Gradient Boosting Classifier* (GBC), *K-neighbour classification* (KMM), *Linear Discriminant Analysis* (LDA), *Ridge Regression* (RID), *Stochastic Gradient Descent* (SGD), *Perceptron* (PER), *Passive Agressive Classifier* (PASSI), *Extra-trees Classifier* (ETC), *Gaussian Naive Bayes* (NBA) y *Quadratic Discriminant Analysis* (QDA).

Los algoritmos de ML usan un número de casos conocidos para concluir cómo distintas combinaciones de variables explicativas pueden razonar el resultado (Aliaga-Alvarado et al., 2023). Las variables explicativas se conocen para cada píxel en la zona de estudio, y los patrones identificados por los algoritmos se pueden usar para delimitar en el espacio posible zonas donde los manantiales se hayan secado en las últimas décadas.

El entrenamiento de algoritmos requiere que cada punto de manantial se clasifique como positivo (valor 1) y negativo (valor 0) (figura 10). Valor 1 significa presencia de manantial mientras valor 0 significa ausencia de manantial. Para ello se ha creado 112 puntos de entrenamiento de valor 0, para construir un modelo más preciso. La ubicación de estos puntos de muestreo se ha elegido usando criterio hidrogeológico, donde los puntos se han situado a la distancia de mayoritariamente más de 500 metros de los ríos, zonas de baja precipitación y densidad de río. También se ha tenido

en cuenta la permeabilidad del suelo, situando los puntos en las zonas de permeabilidad baja o muy baja.

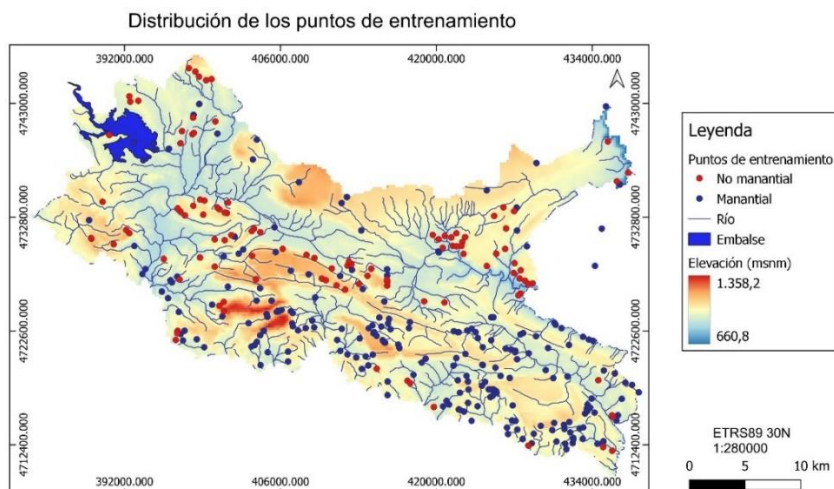


Figura 10. Distribución geográfica de los puntos de entrenamiento (puntos positivos y negativos). Fuente: Elaboración propia.

4.5 Variables explicativas

Para poder aplicar metodologías de ML se han seleccionado 14 variables explicativas (tabla 1) en la presencia de manantiales. Estos son: la altitud, densidad del río, distancia a fallas a 500 metros, distancia a ríos a 500 metros, índice de rugosidad del terreno (TRI), índice de potencia de corriente (SPI), índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), infiltración, litología, pendiente (%), permeabilidad, precipitación, profundidad del nivel freático y usos del suelo. En la tabla 1 se puede observar la reclasificación de las variables explicativas usadas.

ID	Reclasificación			Fuente
	1	2	3	
Altitud	0-850	850-1100	1100-1360	Elaborado de PNOA MDT200 Burgos, IGN. Reclasificado en m
Densidad de drenaje	alta	media	baja	Ríos completos clasificados según Pfafstetter modificado, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Distancia a fallas	Distancia <500	Distancia >500	-	GEODE, IGME. Reclasificado en m
Distancia a ríos	Distancia <500	Distancia >500	-	Ríos completos clasificados según Pfafstetter modificado, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Reclasificado en m
Infiltración	0-10	10-30	30-50	SIMPA, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Reclasificado mm/año
Litología	Calizas, dolomías	Arenas, areniscas, limos, conglomerados	Lutitas, arcillas	GEODE, IGME
NDVI	-0,3-0	0-0,3	0,3-1	Sentinel-2A (09/08/2023), Copernicus
Pendiente %	0-5	5-10	10-34	Elaborado de PNOA MDT200 Burgos, IGN
Permeabilidad	Alta, muy alta	Media	Baja, muy baja	del Pozo Gómez, M. (2009). Mapa Litoestratigráfico, de Permeabilidad e Hidrogeológico de España continuo digital a escala 1:200.000. IGME
Precipitación	50-70	70-90	90-105	SIMPA, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Reclasificado mm/año
Profundidad de nivel freático	-17-0	0-50	50-203	Elaborado de datos piezométricos (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico) y manantiales asociados a acuífero regional (elaboración propia)
SPI	-3 - 2	2 - 7	7 - 15	Elaborado de PNOA MDT200 Burgos, IGN
TRI	0-116	116-240	240-290	Elaborado de PNOA MDT200 Burgos, IGN
Usos de suelo	Bosque	Tierras agrícolas	Zona industrial, urbana	Mapa de ocupación del suelo en España escala 1:100.000 2018, IGN

Tabla 1. Reclasificación de variables explicativas. Fuente: Elaboración propia

La litología muchas veces controla el potencial de las aguas subterráneas (Aliaga-Alvarado et al., 2023). Las rocas sedimentarias no consolidadas como grava y arena, y consolidadas como caliza y arenisca presentan un elevado potencial de almacenamiento y flujo de agua subterránea, aunque en la zona de estudio muchas veces se encuentran intercaladas con materiales impermeables, como arcillas y margas. Los materiales impermeables pueden presentar un alto potencial de agua subterránea si están asociados a fracturas. Sin embargo, en este trabajo la litología se ha reclasificado según la permeabilidad de los materiales. La litología y fallas se ha obtenido a partir del Mapa Geológico Digital Continuo de España a escala 1:50.000 (GEODE). Los datos de permeabilidad se han obtenido en el Mapa Litoestratigráfico, de Permeabilidad e Hidrogeológico de España continuo digital a escala 1:200.000. Estos dos mapas están editados por el de Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Las características topográficas pueden favorecer las condiciones para la infiltración y recarga de agua subterránea. Las pendientes pronunciadas pueden considerarse zonas desfavorables mientras las llanuras o zonas con índice de rugosidad del terreno (TRI) pueden ser más favorables. La altitud de la zona de estudio, pendientes, densidad de drenaje, TRI y SPI se han elaborado usando el modelo digital del terreno (MDT) de Burgos con una resolución de 200 metros, del Instituto Geográfico Nacional (IGN). El NDVI puede proporcionar información sobre la salud de la vegetación, lo cual, a su vez, puede indicar la presencia de agua subterránea. Este índice se ha calculado usando Sentinel-2 de Copernicus con una resolución de 10 metros, usando la fórmula $(NIR - R) / (NIR + R)$. La imagen se ha obtenido en la fecha 9 de agosto de 2023, teniendo en cuenta que este mes se caracteriza por la escasez de las precipitaciones, lo que podría proporcionar información relevante sobre la posible descarga de agua subterránea.

La profundidad de nivel freático puede afectar a la presencia de los manantiales, ya que, si representa valores muy elevados, puede ser un indicador de ausencia de manantiales. El mapa de profundidad de nivel freático se elaboró usando datos piezométricos de ocho manantiales recopilados por MITECO y 16 manantiales posiblemente asociados al acuífero regional del inventario del GMU Las Loras (figura 11). De los piezómetros recopilados siete se encuentran en la cuenca del Duero y uno en la cuenca del Ebro, situándose sobre materiales cretácicos y cuaternarios. La identificación de los manantiales asociados al acuífero regional se basa en el criterio de que estos manantiales se encuentran sobre materiales jurásicos y triásicos, a una

altitud similar a la de los ríos cercanos, que constituyen el nivel de base del acuífero regional.

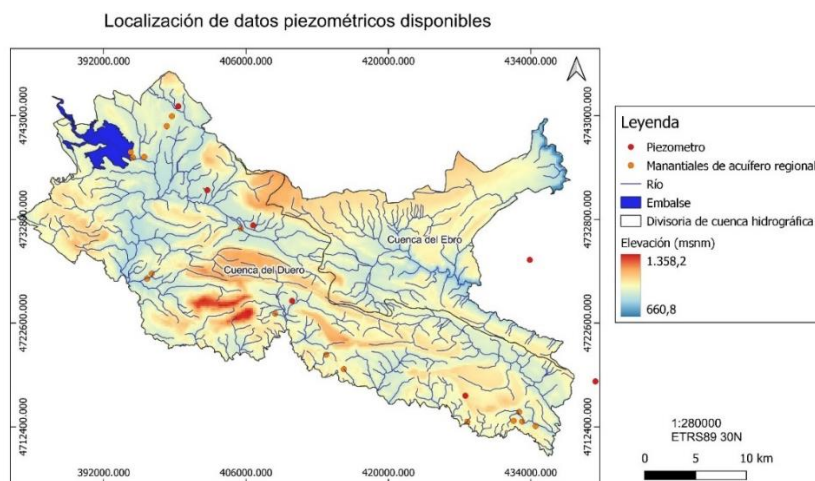


Figura 11. Localización de datos piezométricos usados. Fuente: Elaboración propia.

También se ha tenido en cuenta los usos del suelo. Prasad et al. (2020) determina que varios estudios han demostrado que la agricultura y zonas industriales suelen estar más asociadas con zonas de presencia de agua subterránea. Se ha usado el Mapa de ocupación del suelo en España escala 1:100.000, perteneciente al proyecto europeo Corine Land Cover, del año 2018. Sin embargo, esto no quiere decir que estos usos determinen el potencial de agua subterránea, ya que la disponibilidad de agua subterránea es lo que permite el desarrollo de estos (Gómez-Escalonilla et al., 2022).

Las condiciones climáticas pueden limitar el potencial de agua subterránea (Aliaga-Alvarado et al., 2023). En este caso la recarga de los acuíferos no depende únicamente de las precipitaciones, sino también están afectados por otros factores hidrológicos y geológicos. Sin embargo, los datos de precipitación se han incluido ya que es un factor importante. Debido a la ausencia de estaciones meteorológicas en la zona de estudio para realizar una interpolación de datos de precipitación, se han usado los datos de modelo SIMPA, del MITECO, de los años 2019 y 2020. La capa de ríos procede del MITECO, usando la capa de Ríos completos clasificados según Pfafstetter modificado.

Los resultados se han obtenido usando QGIS versión 3.28.14.

4.6 Indicadores de rendimiento

El algoritmo se basa en dos métricas: *test score* y *area under the receiver operator characteristic curve* (AUC) (Aliaga-Alvarado et al., 2023). El AUC demuestra cómo varía la eficacia del algoritmo para diferenciar entre las dos clases posibles en un problema binario (Gómez-Escalonilla et al., 2021). Es una métrica probabilística

oscilando de 0,5 a 1, estimando la capacidad del algoritmo para diferenciar entre clases. El valor 1 expresa una predicción perfecta, mientras los valores alrededor de 0,5 no son más precisos que una elección al azar (Gómez-Escalonilla et al. 2021). *Test score* expresa cuántas predicciones acertadas hizo el algoritmo en comparación con el número total de intentos en la prueba de conjunto de datos (Gómez-Escalonilla et al. 2021). Gómez-Escalonilla et al. (2021) y Marzban (2004) determinan que los AUC mayores a 0,8 son muy representativos, mientras *test score* de ese valor está considerado como aceptable.

Para entrenar el algoritmo es necesario revisar si dos o más de las variables explicativas están correlacionadas entre sí. La colinealidad puede causar ruido pudiendo afectar al resultado, por lo cual es recomendable eliminar al menos una de ellas. Después de optimizar el modelo y seleccionar las variables explicativas más importantes es necesario elegir un umbral de rendimiento basado en métricas de rendimiento de ML (Gómez-Escalonilla et al., 2021), para identificar los modelos que pueden predecir la variable objetivo de manera más efectiva para su análisis más detallado. Gómez-Escalonilla et al. (2021) señala que es posible que existan diferencias en los resultados ya que cada uno de los algoritmos con mejor rendimiento puede depender una combinación distinta de variables explicativas.

5. RESULTADOS

5.1 Análisis de manantiales

En el Anexo I se presenta la integración de información relevante de los manantiales considerados en el GMU Las Loras en este trabajo. La mayoría de los manantiales se ha identificado, como primera aproximación, de tipología por contacto local (Anexo I) ya que la mayoría de los manantiales se encuentran en contacto con materiales permeables y poco permeables. Se ha podido aproximar que 12 manantiales se han producido por contacto regional, mayoritariamente por contactos entre calizas y margas del Cretácico y arcillas del Cuaternario. La mayoría de los manantiales se han podido identificar apareciendo asociados a materiales cretácicos, 92 de Cretácico superior y 67 del inferior. Unos 46 están asociados a materiales cuaternarios. Los materiales de Cretácico inferior se comportan como acuitardo asociado al acuífero regional. Algunos manantiales relacionados con estos materiales se han asociado al acuífero local ya que se encuentran a una altitud más elevada a la de los ríos cercanos. Los manantiales del Cretácico superior y Cuaternario podrían alimentarse por un acuífero local, que indica que al menos 138 manantiales están asociados a éste.

En total se han podido identificar 43 manantiales asociados a falla, debido a su cercanía. Se han considerado que los manantiales ubicados a una distancia de 100 m desde la falla podrían estar asociados a esta. La presencia del complejo sistema de fallas de Ubierna en el GMU Las Loras permite aproximar que existe una cantidad mayor de manantiales formados por falla, lo que conduce a la necesidad de realizar estudios más profundos.

No obstante, existen 27 manantiales para los cuales no se ha podido determinar la tipología.

En el estudio del estado de manantiales, que se ha llevado a cabo mediante las imágenes de satélite, se ha podido identificar, como la primera aproximación, 89 manantiales inactivos (o secos) y 132 activos (figura 12 y Anexo I). La mayoría de los inactivos se sitúan sobre zonas agrícolas donde no se puede observar evidencia de actividad de manantiales. Otros manantiales clasificados como inactivos se han visto situados en zonas donde no se ha observado vegetación en un periodo seco, lo que puede indicar la ausencia de agua en estos manantiales al menos en las fechas contrastadas con las imágenes disponibles. Por otro lado, los manantiales clasificados como activos se han identificado viendo la surgencia en una imagen de satélite o situándose en una zona donde se observa vegetación en un periodo seco.

La clasificación que se plantea en este trabajo es una primera aproximación que requerirá una investigación más profunda para ser completada.

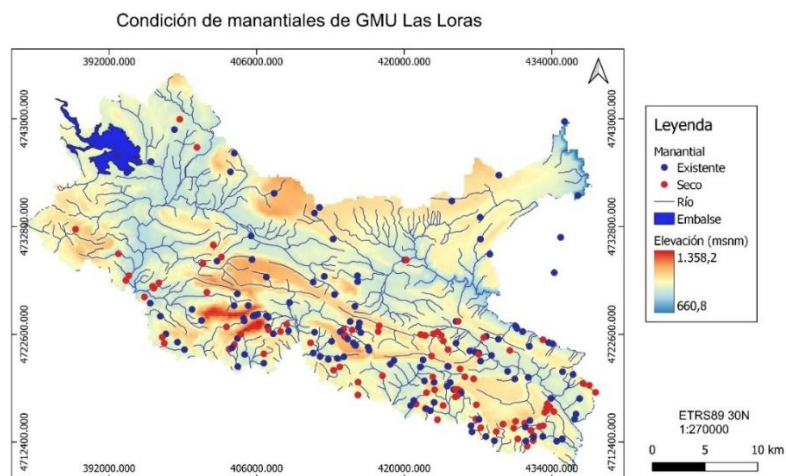


Figura 12. Manantiales existentes y secos identificados en el GMU Las Loras mediante contraste de imágenes de satélite. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Caracterización de los tres manantiales seleccionados

5.2.1 Caracterización del manantial de Covalagua

En la figura 13 se puede observar que el manantial de Covalagua se sitúa en la margen izquierda de un pequeño valle que está atravesado por el río Covalagua (también llamado Ivia, afluente del río Lucio por su margen derecha). El páramo de la Lora de Valdivia que rodea el valle forma paredes muy verticales de varios metros, en los que el nivel más alto corresponde a un afloramiento de calizas sin vegetación aparente asociada. Las margas se sitúan debajo de esta capa de calizas, con un cambio de pendiente más suave, donde abunda la vegetación. Lo mismo se puede observar en la ubicación de la surgencia del manantial, por lo cual se puede proponer que se forma en el contacto entre calizas permeables y margas poco permeables con presencia de agua. Unos metros más abajo de la surgencia de Covalagua se ha generado un edificio tobáceo de estructura cuneiforme (figura 14). Se puede observar el desarrollo de un edificio tobáceo estructurado en distintos niveles que configuran una serie de chorreras. En una parte de ellas se observa la zona de cascada. El edificio tiene una altura de 5 m, anchura de 10 m y profundidad de 10 m. Esta toba ha crecido frontalmente, hacia la dirección del flujo del agua. La surgencia genera un arroyo que fluye hacia el río de Covalagua, dentro de la cuenca del Duero. Durante la visita no se ha observado la cascada, quedándose seca la parte frontal del edificio, pero se ha apreciado goteo continuo en el sector derecho y central con las paredes húmedas (figura 14, 15B y 15C). Esto puede indicar la permanencia del manantial. Sin embargo, el sector izquierdo se ha observado inactivo (figura 14 y 15D), posiblemente

durante mucho tiempo por la presencia de musgo seco en las paredes. Delante del edificio, se observa un prado húmedo, vegetación herbácea. Este manantial no dispone de datos que garanticen que es permanente pero la persistencia de la toba activa así parece atestiguarlo.

Las medidas realizadas *in situ* presentan los siguientes valores: caudal 0,18 l/s, la conductividad eléctrica 460,5 μ S/cm, potencial redox 173,3 mV y pH 8,4.

Aplicando la clasificación de Stevens et al. (2020) al manantial Covalagua se propone el tipo *upland hillslope* (figura 9C). Como se muestra en la figura 9, el manantial tipo *hillslope* nace de un acuífero libre en el contacto entre materiales con contraste de permeabilidad. Aunque demuestra la presencia de falla de desgarre en el material permeable encima del impermeable, no es aplicable al caso, ya que no se observan este tipo de fallas en la zona. En el contacto de material permeable-semipermeable donde nace la surgencia, la pendiente cambia más suave con la presencia de vegetación. La surgencia forma un pequeño arroyo, que desemboca en el río Covalagua.

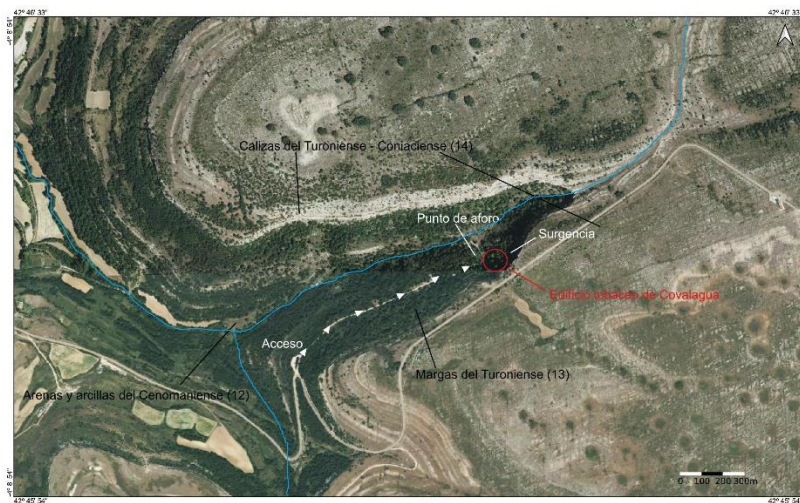


Figura 13. Ubicación de manantial Covalagua. Las flechas blancas indican el camino de acceso. El punto de aforo corresponde a las coordenadas (ETRS89): 407656.356, 4735965.208. Los números hacen referencia a las formaciones geológicas de la hoja MAGNA – 134 (Anexo II, figura II.2). Fuente: Elaboración propia.

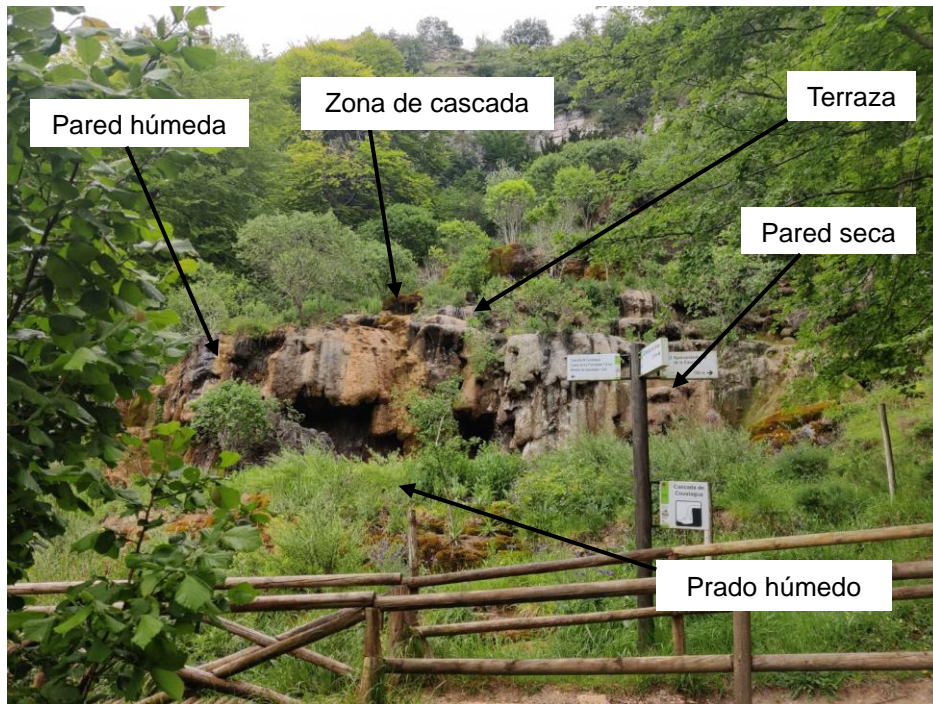


Figura 14. Caracterización del manantial de Covalagua. Fuente: Elaboración propia.



Figura 15. Imágenes de detalle. A) Presencia de musgo en las tobas calcáreas. B) y C) goteo en las paredes. D) pared seca. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Caracterización del manantial de Villaescobedo

Igual que Covalagua, Villaescobedo se ubica en el páramo de la Lora de Valdivia, en el contacto de calizas y margas (figura 16). La surgencia original se encuentra en una cueva, que durante la visita de campo estaba inactiva (figura 19A), mientras que la surgencia actual es una captura de agua, antrópica, que se sitúa a unos 50 m de la citada cueva (figura 17 y 18A). A unos 5 m de la surgencia se observan pequeñas

tobas (figura 18C), y a unos 10 m un edificio tobáceo más grande (figura 17). Debajo de este edificio se encuentra otro edificio tobáceo en cascada.

Se puede ver que la morfología del edificio tobáceo de Villaescobedo es diferente de Covalagua (figura 17). Se pueden observar láminas horizontales, creciendo de forma frontal. En total se observan cuatro saltos de agua donde se han formado las tobas, de los cuales los dos primeros son los más importantes, pudiéndose describir a escala métrica, mientras los dos siguientes tienen un tamaño más pequeño, inferiores a escala métrica. Los dos primeros presentan una altura de unos tres metros. Encima del edificio se observa vegetación herbácea saturada.

Se ha observado musgo en todas las tobas, pero mayoritariamente en la toba del primer salto de agua. Esto indica la abundancia de paredes húmedas. El agua se diversifica al salir del manantial, fluyendo por estas tobas, generando una pequeña cascada que se encontraba activa en la fecha de visita (22/06/2024). En el pie de la cascada se forma una concentración de agua, generando el Arroyo de Mundilla (figura 16) (afluente del río Hurón). Sin embargo, se ha podido ver que la surgencia natural generaba un flujo bajando por la margen izquierda de las formaciones tobáceas (figura 19B) hacia el arroyo de Mundilla. Este arroyo drena hacia la cuenca del Ebro. Este hecho pone de manifiesto, que la Lora de Valdivia tenga dos direcciones de drenaje diferentes. A diferencia de Covalagua, este manantial no tiene carácter permanente, sino que tiende a secarse durante el verano (De la Hera y López, 2022).

En la visita de campo del 22/06/2024 se ha medido *in situ* caudal de 2,9 l/s, conductividad eléctrica media de 479,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, potencial redox 197 mV y pH de 8,1.

Aplicando la clasificación de Stevens et al. (2020) el manantial Villaescobedo se clasificaría como *upland hillslope* (figura 9C). La surgencia nace del contraste de permeabilidad entre un acuífero libre formado por materiales permeables (calizas) con paredes verticales, y materiales semipermeables con una pendiente más suave y presencia de vegetación. No existe curso de agua en aguas arriba de la surgencia, sino que el curso de agua se concentra a pie de los edificios tobáceos, a partir de donde se genera el arroyo de Mundilla, afluente del río Hurón. Esta concentración se encuentra en la parte baja del páramo, donde la pendiente ya es menos pronunciada.

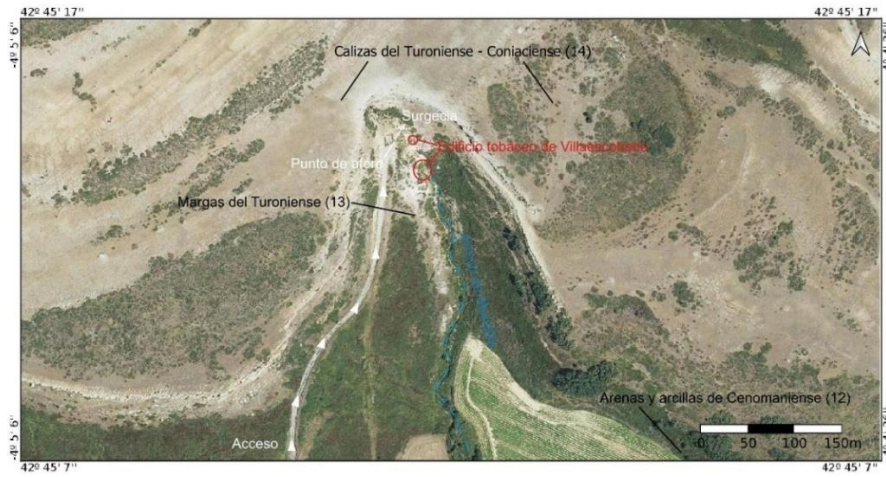


Figura 16. Ubicación de manantial de Villaescobedo. El acceso a la surgencia se indica con flechas blancas. Coordenadas del punto de aforo (ETRS89): 411521.258, 4734038.606. Los números hacen referencia a las formaciones geológicas de la hoja MAGNA – 134 (Anexo II, figura II.2). Fuente: Elaboración propia.



Figura 17. Caracterización del manantial de Villaescobedo. Fuente: Elaboración propia.

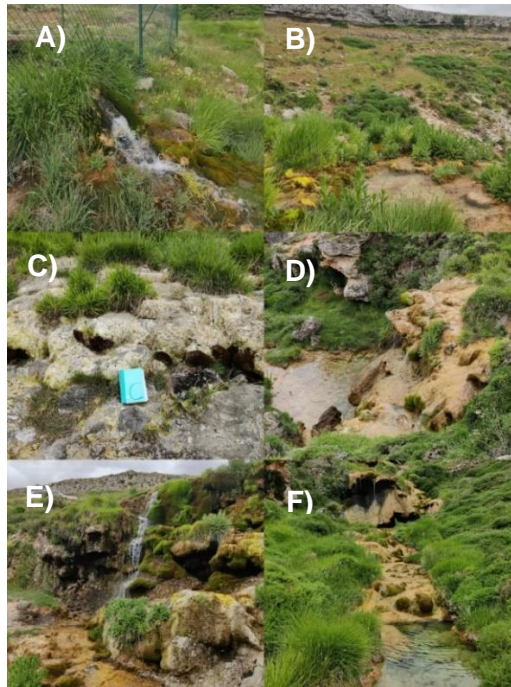


Figura 18. Imágenes de detalle. A) Surgencia actual. B) Concentración de agua formada encima del edificio tobáceo. C) Pequeñas tobas. D) y E) Laminas horizontales de edificio tobáceo y concentración de agua abajo. F) Nacimiento del arroyo de Mundilla. Fuente: Elaboración propia.

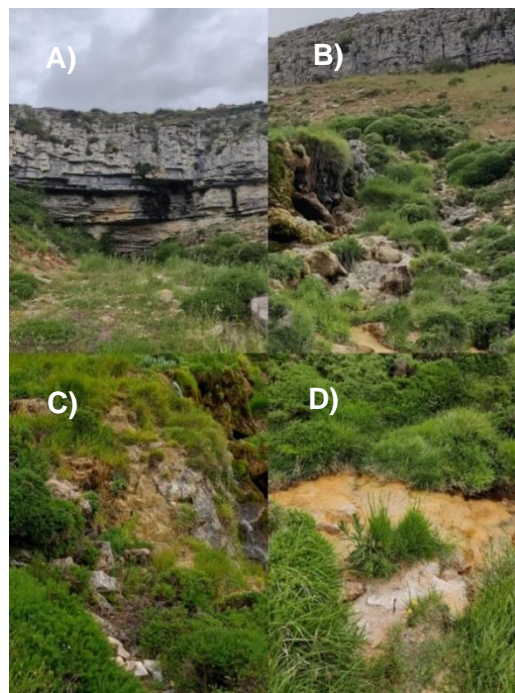


Figura 19. Imágenes de detalle. A) Cueva. B) Cauce seco de la surgencia natural. C) Pared seca. D) Sector inactivo del arroyo de Mundilla. Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Caracterización del manantial de Barriolucio

La surgencia del manantial de Barriolucio nace en el contacto entre calizas y margas, en el norte de la Lora de Barriolucio. Se sitúa en el sistema de fallas asociadas a la falla de Ubierna. Es un manantial permanente que forma un arroyo, que aguas abajo

es conocido como río Lucio. Al oeste de esta surgencia se puede observar el Arroyo de Fuentilloso, que actualmente se encuentra seco. Se pudo comprobar en la visita de campo que el Arroyo de Fuentilloso lleva seco un tiempo, ya que no se ha observado presencia de agua en su cauce y la vegetación que lo ocupa es muy abundante siendo indicio de la presencia de un nivel freático próximo al nivel del suelo.

La surgencia de Barriolucio se encuentra a unos 150 m aguas arriba del edificio tobáceo de Barriolucio (figura 20). Este edificio se ha formado creciendo frontalmente, formando en un único salto de agua, con una altura de 3 a 4 m, generando una cascada (figura 21). Tiene una anchura aproximadamente de unos 15 a 20 m, creciendo en la margen izquierda de la cascada actual. Al pie del salto de agua se forma un pequeño escalón, donde se genera una pequeña concentración de agua, dando lugar al río Lucio. Se ha podido ver que casi todo el edificio está activo. El agua cae en las paredes húmedas por la margen derecha e izquierda del edificio tobáceo (figura 22C y 22D), dejando sin agua visible la parte frontal. Todo el edificio está cubierto por musgo, y debido a que comprueba la abundante vegetación briofítica viva, se puede confirmar que, aunque no se aprecia agua, ésta está presente en casi toda la formación tobácea. Solo se ha detectado un pequeño sector inactivo, evidenciado por una pared seca, en el sector frontal, donde se observa musgo seco, en una superficie muy pequeña (figura 23). La vegetación de ribera asociada a este ecosistema está formada por fresnos y helechos (figura 21).

Se ha medido el caudal *in situ* en tres puntos diferentes: a unos dos metros del pie de cascada, a unos 330 m aguas abajo de la cascada y en la surgencia (figura 20). El primer caso representa un valor de 3,2 l/s, el segundo 14,3 l/s y el tercero 3,5 l/s. La media hecha de conductividad eléctrica es 504,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tanto a pie de la cascada como en la surgencia, mientras el potencial redox fue 242,9 mV en la surgencia y 496 mV a pie de la cascada. El pH es 8,14 en el primer punto de aforo y 8,11 en la surgencia.

Este manantial se puede clasificar como *upland hillslope* según Stevens et al. (2020). La surgencia se sitúa en el contacto entre materiales permeables representados por calizas de paredes verticales que conforman un acuífero libre (con una extensión de afloramiento de ámbito local), y materiales menos permeables (margas). Desde el contacto con las margas la pendiente empieza a suavizarse llegando a un valle, donde el agua de la surgencia se une a otro arroyo que viene del este (Arroyo de las Solanas) formando el río Lucio.



Figura 20. Ubicación de manantial de Barriolucio. El acceso a la surgencia se indica con flechas blancas. Coordenadas de punto de aforo 1 y 2 (ETRS89): 411368.161, 4727533.400 y 411459,40, 4727865,07. Surgencia: 411319,76, 4727394,68. Los números hacen referencia a las formaciones geológicas de la hoja MAGNA – 134 (Anexo II, figura II.2). Fuente: Elaboración propia.

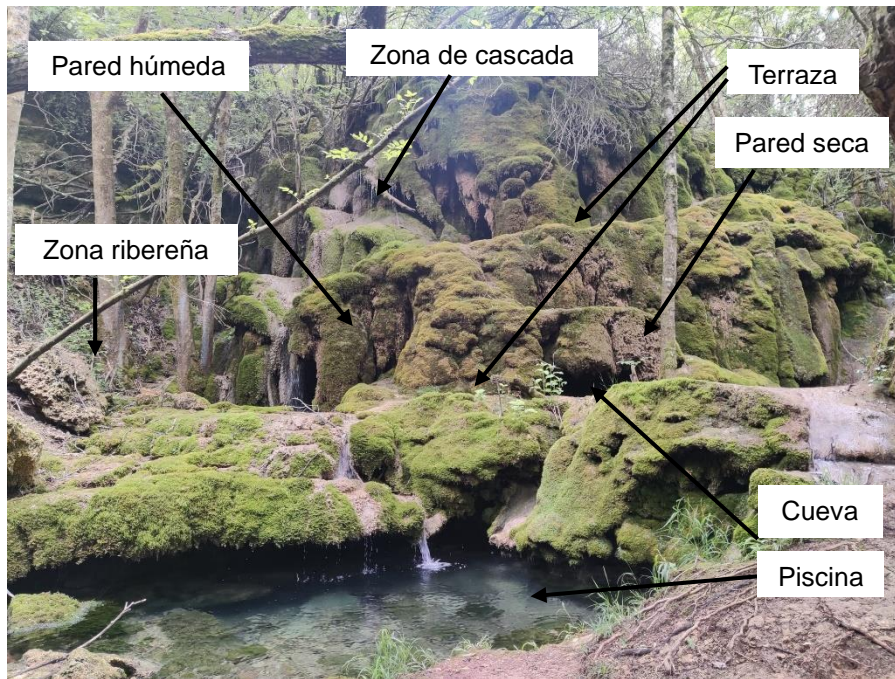


Figura 21. Caracterización del manantial de Barriolucio. Fuente: Elaboración propia.

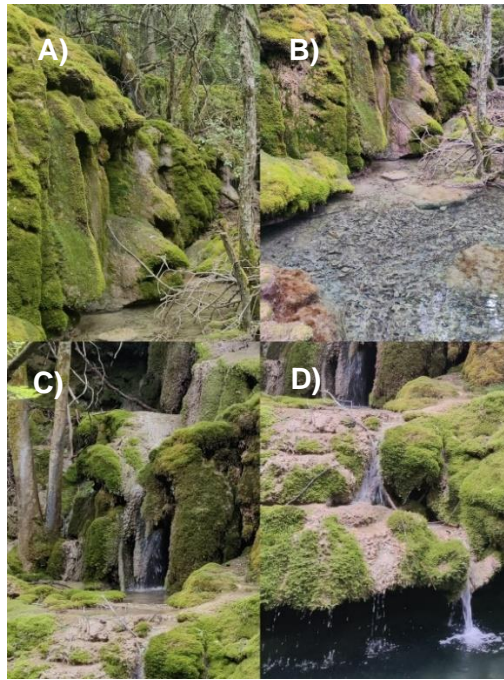


Figura 22. Imágenes de detalle. A) Paredes húmedas con musgo. B) Concentración de agua en la margen izquierda del edificio tobáceo. C) y D) goteo y flujo de agua. Fuente: Elaboración propia.



Figura 23. Imagen de detalle. Pared inactiva. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Análisis de técnicas de *Machine Learning*

5.3.1 Análisis colineal

En la figura 24 se puede observar la matriz de correlación de las variables explicativas, representado por un rango de -1 (correlación inversa) a 1 (correlación directa). Dormann et al. (2013) muestra que un umbral de correlación aceptable oscila de 0.4 a 0.85, pero no existe un rango específico.

No se han observado altas correlaciones directas, es decir, mayores a 0,6 (Gómez-Escalonilla et al., 2021). La correlación directa con valor más alto se observa entre las variables TRI y pendiente. Las correlaciones inversas se observan entre profundidad de nivel freático y TRI, NDVI y pendiente, litología y pendiente, y litología y TRI. Estas correlaciones negativas se pueden entender como interacciones naturales entre el

suelo (litología), forma del suelo (pendiente y rugosidad del terreno) y disponibilidad de agua (profundidad de nivel freático). Esto es debido a que los suelos de menor pendiente tienden a tener profundidad de nivel freático más bajas, y así, por la disponibilidad de agua, mayor NDVI (mayor vigor de la vegetación).

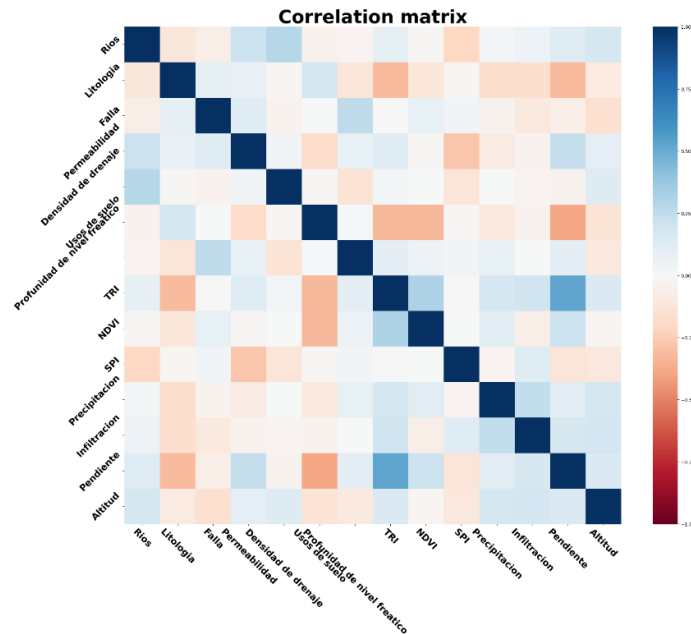


Figura 24. Matriz de correlación de las variables explicativas.

En la tabla 2 se puede observar el resumen estadístico de las métricas producidas por MLMapper. Para saber lo que lleva a cabo la validación de distintos modelos de ML, es necesario entender los resultados. *Train score* es una métrica de rendimiento generada por el conjunto de datos de entrenamiento indicando cuantas veces acierta el estudio. *Test score* se podría entender como capacidad real de predicción, usando los conocimientos de *train score*. Los algoritmos de ML generan números de puntos verdaderos positivos (TP), verdaderos falsos (TN), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN). Los términos positivos y negativos se refieren a la predicción del clasificador mientras verdadero y falso indican si esta predicción es correcta. A partir de esto ML calcula la precisión, refiriéndose a la correlación de casos verdaderos positivos entre positivos totales. La exhaustividad calcula la tasa de verdaderos positivos. Estos se han calculado tanto para la clase 0 (no manantial) como la clase 1 (manantial). F1 es la media calculada de la precisión y la exhaustividad, también generada para ambas clases. Por último, AUC (área bajo la curva) se usa para estimar el rendimiento de los modelos, representando valor 1 un modelo perfecto y 0,5 un resultado no mejor que una clasificación aleatoria (Aliaga-Alvarado et al., 2023).

Por su propia naturaleza, los algoritmos presentan una lógica interna compleja, lo que hace que pueda ser difícil elegir un algoritmo cuando se trabaja con una base de datos

más o menos extensa. Gómez-Escalonilla et al. (2022) determina que, para llegar a mejor resultado, es recomendable usar varios algoritmos para posteriormente elegir los que muestran mejor rendimiento.

Se puede observar que los mejores *test score* muestran ABC, DTC, QDA y RFC (tabla 2). Sin embargo, se han elegido los algoritmos ABC, RFC y QDA como mejores resultados debido a su representación más coherente.

F1 score para la clase 0 presenta valores 0,93 y 0,94 para ABC, RFC y QDA, lo que indica que estos algoritmos predicen la ausencia de los manantiales con una gran precisión. Sin embargo, estos valores son más bajos comparados con los de la clase 1, en los cuales el valor oscila entre 0,94 y 0,96.

El AUC representa valores entre 0,96 y 0,99, lo que teóricamente implica que los algoritmos tienen una alta probabilidad de realizar predicciones con adecuación sobre la variable objetivo.

Algoritmo	Train score	Test score	prec_0	prec_1	rec_0	rec_1	f1_sc_0	f1_sc_1	auc	tn	tp	fp	fn
QDA	0.89	0.96	0.94	0.96	0.94	0.96	0.94	0.96	0.96	33	55	2	2
NBA	0.89	0.93	0.94	0.93	0.89	0.96	0.91	0.95	0.96	31	55	4	2
KMM	0.99	0.90	0.88	0.91	0.86	0.93	0.87	0.92	0.94	30	53	5	4
SVC	0.99	0.67	1	0.66	0.14	1	0.25	0.79	0.90	5	57	30	0
LVC	0.86	0.90	0.82	0.96	0.94	0.88	0.88	0.92	-	33	50	2	7
LRG	0.92	0.93	0.97	0.92	0.86	0.98	0.91	0.95	0.96	30	56	5	1
DTC	0.89	0.96	0.94	0.96	0.94	0.96	0.94	0.96	0.97	33	55	2	2
RFC	0.96	0.95	0.97	0.93	0.89	0.98	0.93	0.96	0.99	31	56	4	1
LDA	0.93	0.90	0.86	0.93	0.89	0.91	0.87	0.92	0.94	31	52	4	5
ABC	0.92	0.95	0.97	0.93	0.89	0.98	0.93	0.96	0.99	31	56	4	1
GBC	0.98	0.93	0.97	0.92	0.86	0.98	0.91	0.95	0.99	30	56	5	1
RID	0.92	0.92	0.89	0.95	0.91	0.93	0.9	0.94	-	32	53	3	4
ETC	0.91	0.93	0.97	0.92	0.86	0.98	0.91	0.95	0.97	30	56	5	1

Tabla 2. Resultados de algoritmos. Train_score = Training score optimizado; Test_score = Test score optimizado; Prec_0 = Precisión clase 0; Prec_1 = Precisión clase 1; Rec_0 = exhaustividad clase 0; Rec_1 = exhaustividad clase 1; f1_0 = Media entre precisión y exhaustividad clase 0; f1_1 = Media entre precisión y exhaustividad clase 1; AUC = Área bajo la curva.

En la figura 25 se puede apreciar la importancia de las variables explicativas en los algoritmos de mejor rendimiento. Se pueden ver grandes diferencias entre los algoritmos de ACB y RFC. ABC señala que la variable con mayor influencia en la posible sequía de manantiales es la pendiente, con un valor de 0,6, mientras el RFC marca la permeabilidad como una variable más importante (0,7-0,75 aproximadamente). Sin embargo, la segunda variable más importante según ABC es la permeabilidad, mientras la de RFC es la pendiente. ACB indica igual importancia tanto de profundidad de nivel freático como ríos. RFC señala que litología, NDVI, presencia de falla, TRI y SPI tienen cierta importancia. Sin embargo, RFC representa, dentro de las variables con mayor influencia, densidad de drenaje, precipitación y usos de suelo con menor importancia. ABC señala que aparte de las cuatro variables que más peso tienen en la determinación del resultado, las 10 otras variables no representan casi ningún valor. En caso de RFC, solo infiltración no muestra ningún valor.

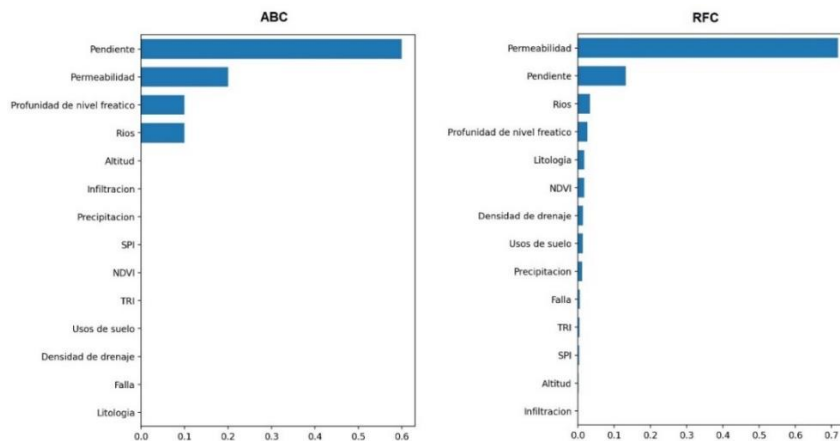


Figura 25. Importancia de las variables explicativas.

5.3.2 Mapas predictivos

En la figura 26 se pueden apreciar los mapas predictivos de zonas de ausencia de manantiales obtenidos por tres diferentes algoritmos, ABC, RFC y QDA. El color azul representa áreas donde el algoritmo ha encontrado una combinación de variables explicativas que forman clase 1 (presencia de manantiales), mientras el color rojo representa aquellos donde el algoritmo ha encontrado combinaciones que forman clase 0 (ausencia de manantiales).

Todos los mapas representan bastante similitud, pero se pueden observar algunas diferencias entre ellos. RFC es el algoritmo que muestra ligeramente menor cantidad de zonas susceptibles a la sequía de manantiales, mientras QDA representa mayor intensidad de estas.

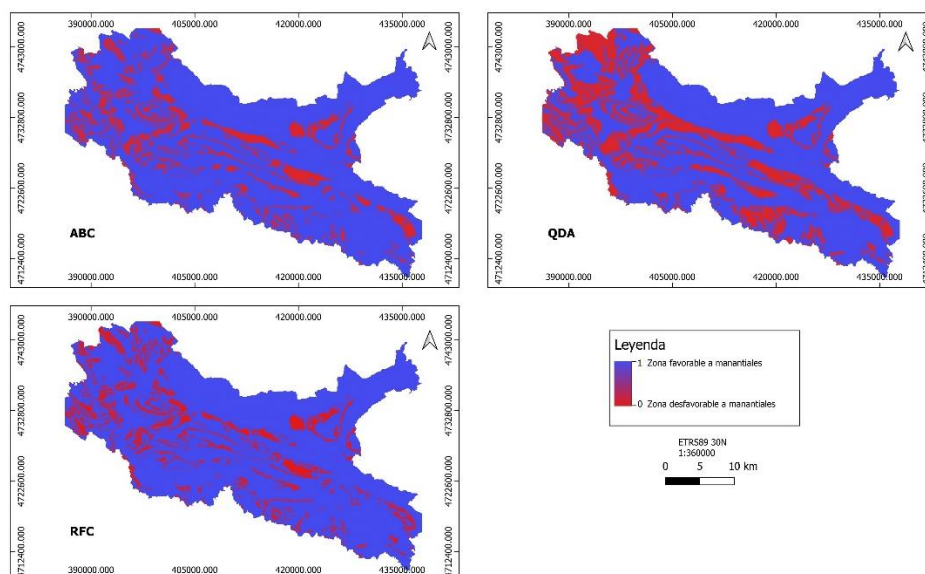


Figura 26. Mapas de predicción de zonas susceptibles a presentar manantiales secos representados por diferentes algoritmos. Fuente: Elaboración propia

6. DISCUSIÓN

6.1 En relación con la tipología y clasificación de los tres manantiales seleccionados

La Directiva Hábitats (92/43/CEE) define varios tipos de HIC, de los cuales los tres manantiales seleccionados en este trabajo pertenecen al tipo “Manantiales petrificantes con formación de tuf (código 7220)”. Estos tres manantiales seleccionados presentan edificios tobáceos asociados, de tamaño métrico, con crecimiento frontal y lateral. Las características de los edificios tobáceos son bastante similares. Los edificios tobáceos se observan activos casi completamente, siendo Barriolucio el más activo, y Covalagua el más reducido en volumen de caudal. En Covalagua se ha observado goteo en el edificio tobáceo, mientras en Villaescobedo y Barriolucio se ha apreciado un flujo de agua más concentrado con existencia de cascada. En todos los edificios tobáceos se observan pequeñas terrazas. Las partes inactivas de las formaciones tobáceas permiten analizar su propia evolución. En Villaescobedo la surgencia natural es a la salida de la cueva, que actualmente se encuentra inactiva. Sin embargo, se ha podido observar el curso de agua original que esta surgencia generaba. En el edificio tobáceo en la margen izquierda se observa partes inactivas, que indican el recorrido del flujo procedente de la surgencia natural.

La formación de edificios tobáceos está directamente vinculada a los caudales (Cabrera et al., 2019). Covalagua y Barriolucio son manantiales cuyo funcionamiento parece asociado a un régimen permanente, mientras que Villaescobedo llega a secarse en los meses de verano. Barriolucio y Villaescobedo presentan caudales moderados, mientras en Covalagua se ha medido el caudal más bajo de los tres manantiales, lo que posiblemente ha llevado a la reducción del agua visible en el edificio tobáceo. De la Hera y López (2022) indican que el caudal de arroyo de Covalagua ha sido medido en 1988 después de abundantes lluvias, representando un valor de 94 l/s. En Villaescobedo se ha medido un caudal de 2,9 l/s en la visita de campo. En 1988 después de las lluvias intensas se ha medido un caudal de 53 l/s (De la Hera y López, 2022). El caudal más alto se ha medido en Barriolucio, en el río Lucio, a unos trescientos metros aguas abajo de la formación tobácea. Aunque los caudales han sido moderados durante la visita del campo, se puede confirmar que han sido suficientes para la precipitación de carbonato cálcico. En todos los manantiales estudiados los edificios tobáceos se han observado casi totalmente activos, lo que demuestra la dependencia de las aguas subterráneas. Esto hace que su protección y el mantenimiento de las condiciones hidrológicas sea fundamental. En Covalagua, donde el caudal ha sido más bajo, se ha observado menos formación de musgos,

comparado con Barriolucio, donde todo el edificio está totalmente cubierto por este tipo de briofita.

En el afloramiento de la surgencia del manantial de Barriolucio se pueden observar bloques de caliza elevados respecto al terreno circundante, debido a la falla asociada a la falla de Ubierna. La ubicación del manantial se encuentra en el bloque sur de la serie. Estos bloques cortan la continuidad de los materiales, pudiendo así alimentar el manantial (De la Hera-Portillo et al., 2023b). La conductividad eléctrica durante la visita del campo fue 504,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tanto en la surgencia como a pie de la cascada. El valor más elevado medido fue 536 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Anexo II), y en 2022 se ha medido un valor de 612 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (De la Hera-Portillo et al., 2023a). Esto indica la presencia de sales en el agua lo que demuestra mayor recorrido del agua dentro de acuífero. Se puede ver que el valor medido durante la visita del campo es más bajo, pero más elevado que en Covalagua o Villaescobedo, donde no hay presencia de discontinuidades que puedan influir en el régimen de los manantiales. Además, el potencial redox es más alto en este manantial, pudiendo retener más bicarbonatos facilitando formación de las tobas. En Barriolucio se ha medido también el potencial redox y pH más elevado. El edificio tobáceo formado en Barriolucio es el más grande de los tres estudiados, presentando mayor actividad.

Los manantiales estudiados se han clasificado como *upland hillslope*, pero se puede discutir sobre su similitud con otros dos tipos: *gushet* y *hanging garden* (figura 9B y 9E). Los tres manantiales seleccionados se sitúan en el contacto entre calizas y margas del Cretácico superior, donde las calizas representan paredes casi verticales. En la figura 9B se puede ver que este tipo de manantial genera la cascada al salir de la surgencia. Un caso bastante similar se puede observar en Covalagua y Villaescobedo, pero las surgencias se encuentran a unos metros más arriba de las cascadas formadas. En el caso de Villaescobedo, la surgencia natural (cueva) está inactivo, y el agua sale de una captura antrópica, generando una cascada a unos 10 m de ésta. Covalagua y Barriolucio son parecidos también a *hanging garden*. Sin embargo, este tipo de manantial se forma en contactos casi horizontales entre materiales permeables e impermeables, causando un goteo en la parte frontal y creando una pared húmeda de forma cóncava. En el área de surgencia se observa un río, y, al caer genera una piscina y cauce fluvial. Sin embargo, ninguno de los tres manantiales cuenta con un río fluyendo aguas arriba o en la superficie superior del afloramiento calizo o en la proximidad de la surgencia. Estos tres tipos de manantiales presentan mayor diversidad geomorfológica (Stevens et al., 2020), que se ha podido confirmar en la clasificación de los casos estudiados.

Los manantiales lóticos se consideran ser de flujo rápido mientras lénticos corresponden a aguas prácticamente estancadas. Los manantiales estudiados en el GMU Las Loras corresponden a manantiales lóticos y se han podido clasificar como *upland hillslope*, según Stevens et al. (2020). Los manantiales tipo *hillslope* se pueden dividir en dos subtipos: a) *floodplain* y b) *upland*. Estos pueden ocurrir en condiciones de flujo tanto léntico como lótico, aunque en este caso se confirma que son lóticos, teniendo en cuenta los caudales medidos. Los tres manantiales estudiados se han clasificado como *upland hillslope*, ya que se encuentran ubicados en laderas con elevadas pendientes. A diferencia de *floodplain hillslope*, donde la surgencia está asociado a los terrenos más llanos, cercanos a los ríos principales con la presencia de inundaciones (Stevens et al., 2020), los *upland hillslope* no se encuentran cerca de los ríos principales y el terreno demuestra pendientes entre 15 y 60 grados. En todos los casos la pendiente no alcanza los 15 grados, pero se considera suficientemente elevada para poder clasificar como *upland hillslope*, ya que se encuentran alejados de los ríos principales de la zona.

No obstante, el tipo *hillslope* es el único tipo de estos tres mencionados, que puede estar asociado a las formaciones tobáceas o travertinos (Stevens et al. 2020). Razón por la cual se ha visto que Covalagua, Villaescobedo y Barriolucio pueden ajustarse más a la clasificación de este tipo de manantial.

6.2 En relación con el análisis de los 222 manantiales inventariados

6.2.1 Contraste con imágenes de satélite

En cuanto al monitoreo de los manantiales, mediante las imágenes de satélite se ha podido hacer una primera aproximación en relación con la actividad de los manantiales, resultando que unos 89 manantiales se encuentran inactivos.

6.2.2 En relación con las herramientas de ML aplicadas

Se han aplicado las técnicas de ML para determinar áreas de manantiales secos. En general, puede decirse que los resultados obtenidos a partir de técnicas de inteligencia artificial son acordes a la realidad, si bien el nivel de precisión obtenido es demasiado grueso como para extraer conclusiones inequívocas.

La pendiente y la permeabilidad han sido las variables explicativas que parecen correlacionar mejor con el rendimiento del modelo. Cabe destacar que no son variables hidrológicas. Observando el mapa geológico (figura 2) se puede ver que estas áreas que los algoritmos identifican como desfavorables para los manantiales se sitúan principalmente en materiales de Triásico, Jurásico y Cretácico inferior. Los

materiales que se encuentran en estas áreas son mayoritariamente arcillas, yesos y margas, materiales poco permeables que limitan el flujo de agua subterránea hacia la superficie. Los mapas predictivos señalan también que algunas zonas desfavorables se encuentran sobre materiales del Cretácico superior, pero se puede observar una cierta limitación en las "loras". Se puede ver que se encontrarían al pie de las loras: Lora de las Tuerces (número 12, figuras 2 y 3), Lora de Barriolucio (número 5, figuras 2 y 3), lora de Rebodello de la Torre (número 3, figuras 2 y 3) y Lora de Albacastro o Peña Castro (número 2, figuras 2 y 3). Ya que las "loras" son sinclinales colgados, pueden presentar pendientes abruptas. Las "loras" están formados por capas de calizas y margas que está bien presentado en algunas zonas por los algoritmos. En las zonas correspondientes a las "loras" esto se traduce en la demostración de una cartografía con zonas de permeabilidad correspondientes a las calizas (color azul) seguido por zonas de baja permeabilidad correspondiendo a margas (color rojo).

Los resultados indican también que las zonas donde se podría encontrar manantiales secos o desaparecidos se presentan relacionadas con la falla de Ubierna y su complejo sistema de fallas asociado, que atraviesa el GMU Las Loras. Sin embargo, debido a la ausencia de datos no es posible demostrar de manera fehaciente esta relación.

Los algoritmos delimitan adecuadamente las zonas de descarga natural, así como las zonas desfavorables, pero los resultados no permiten cuantificar en número de manantiales individuales inactivos en relación con las condiciones naturales. Una limitación importante en este sentido es la ausencia de determinados datos de entrada sobre variables como la precipitación o la piezometría. La mejora de las redes de observación sin duda contribuiría a una mejor caracterización de la evolución hidrogeológica de la zona de estudio.

7. CONCLUSIONES

El análisis de los 222 manantiales considerados en este trabajo dentro del GMU Las Loras constituye un punto de partida al conocimiento de este tipo de ecosistemas asociados al ciclo de agua, y de vital importancia tanto para la gestión de los recursos hídricos, como para la conservación del patrimonio natural. Los resultados del análisis hidrogeológico muestran que 46 manantiales aparecen asociados a materiales cuaternarios, 92 al Cretácico superior, 67 al Cretácico inferior y 16 al Jurásico y/o Triásico, siendo muy superior en número los manantiales asociados a acuíferos locales (138). Con relación a su posible relación con fallas, 43 podrían estar relacionados. Mediante las imágenes de satélite se han identificado 89 potenciales manantiales desaparecidos, cuya confirmación exige un trabajo de campo adicional que no se ha podido desarrollar en este trabajo debido a causas presupuestarias.

La clasificación del tipo de manantial basado en la caracterización es bastante eficiente y clara. Se han observado bastantes similitudes en los manantiales estudiados en cuanto a sus características geomorfológicas, pero también existen notables diferencias que se han desarrollado en el discurso de clasificación del tipo de manantial.

Aplicando la clasificación de Stevens et al. (2020), se ha podido identificar la correspondencia con el tipo *upland hillslope* para los tres casos. Algunos de estos manantiales presentan características similares a otros tipos de manantiales debido a la diversidad geomorfológica, pero el hecho de que solo el tipo *upland hillslope* puede estar asociado a las tobas calcáreas, ha permitido determinar la tipología.

Para representar los mapas de predicción de manantiales secos se han usado los algoritmos *AdaBoost Classifier*, *Random Forest Classifier* y *Quadratic Discriminant Analysis*. La precisión de aplicación de técnicas de ML en este trabajo no ha sido muy adecuada, pero el algoritmo QDA parece representar el mejor resultado.

Los resultados obtenidos mediante técnicas de ML indican la capacidad de ésta de identificar zonas donde puede haber manantiales y donde no, pero no se ha podido reconocer la cantidad exacta de manantiales secos en el GMU Las Loras. Esto apunta que la información disponible en el GMU Las Loras es insuficiente para usar las técnicas de ML en la identificación de manantiales secos individuales, y a la necesidad de un chequeo en campo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- AEMET (s.f). Agencia Estatal de Meteorología. <https://www.aemet.es/es/portada>
- Al-Fugara, A., Pourghasemi, H.R., Al-Shabeeb, A.R., Habib, M., Al-Adamat, R., Al-Amoush, H. y Collins, A.L. (2020). A comparison of machine learning models for the mapping of groundwater spring potential. *Environ Earth Sciences*, 79(206). <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08944-1>
- Aliaga-Alvarado, M., Gomez-Escalonilla, V. y Martínez-Santos, P. (2023). Identification of non-conventional groundwater resources by means of machine learning in the Aconcagua basin, Chile. *Journal of Hydrology: Regional studies*, 49, 101502. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101502>
- Australian Government-Geoscience Australia (2023). Groundwater dependent ecosystems. <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/water/groundwater/understanding-groundwater-resources/groundwater-dependant-ecosystems>
- Bryan, K. (1919). Classification of springs. *The Journal of Geology*, 27(7), 522-561. <https://digitalcommons.unl.edu/usgsstaffpub/493/>
- Cabrera, A.M., Vegas, J. y Carcavilla, L. (2019). *Definición de criterios para generar una propuesta de localidades de seguimiento para los diferentes tipos de formaciones tobáceas*. Serie “Metodologías para el seguimiento del estado de conservación de los tipos de hábitat”. Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO).
- Carcavilla, L., Vegas, J. y Cabrera, A.M. (2019). *Establecimiento de una cartografía específica de formaciones tobáceas*. Serie “Metodologías para el seguimiento del estado de conservación de los tipos de hábitats”. Ministerio para la Transición Ecológica.
- Copernicus Browser (2023, 9 de agosto). https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=10&lat=42.74092&lng=-3.75348&themeld=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=https%3A%2F%2Fsh.dataspace.copernicus.eu%2Fogc%2Fwms%2Fa91f72b5-f393-4320-bc0f-990129bd9e63&datasetId=S2_L2A_CDAS&fromTime=2023-08-09T00%3A00%3A00.000Z&toTime=2023-08-09T23%3A59%3A59.999Z&layerId=1_TRUE_COLOR&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30&dateMode=SINGLE
- Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres (BOE núm 206, de 22 de julio de 1992). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1992-81200>
- De la Hera-Portillo, A., Llorente-Isidro, M., Moreno, J., Sánchez, J.A., Salman, K., Corral Lledó, M.M., Galindo, E., López, Ghanem, M., Hind Mohammad, A., Chulli, B., Laftouhi, N.E. y Abdel-Gawad, F.K. (2022). *Geoheritage and geoconservation in the Las Loras UNESCO Global Geopark*. ProGEO SW Europe Regional Working Group “Virtual Conference on Geoconservation”, 30-31 Marzo 2022.
- De la Hera Portillo, A. y López Gutiérrez, J. (2022). *Estudio del posible hidrotermalismo asociado a la falla de Ubierna dentro del Geoparque Mundial de la UNESCO Las Loras: consecuencias en relación a la sostenibilidad de las aguas subterráneas y a su proyección a futuro*. IGME-CSIC.
- De la Hera-Portillo, A., López-Gutiérrez, J., Moreno-Merino, L., Llorente-Isidro, M., Fensham, R., Fernández, M., Ghanem, M., Salman, K., Sánchez-Fabián, J.A., Gallego-Rojas, N., Mar Corral, M., Galindo, E., Chamizo-Borreguero, M. y Laftouhi,

N.E. (2023a). Geodiversity of Las Loras UNESCO Global Geopark: Hydrogeological Significance of Groundwater and Landscape Interaction and Conceptual Model of Functioning. *Resources*, 12(1), 14. <https://doi.org/10.3390/resources12010014>

De la Hera-Portillo, A., López-Gutiérrez, J., Salman, K., Sánchez, J.A., Ghanem, M., Mohammad, A.H., y Laftouhi, N. (2023b). Caracterización y perspectivas de adaptación al cambio global de los edificios tobáceos del Geoparque Mundial UNESCO Las Loras (Palencia-Burgos). En J. Benavente, M.L. Calvache, A. Castillo, C. Duque, M.L. Fernández, M. López, J.A. López y J.C. Rubio (Eds.), *XI Simposio del agua en Andalucía. Cuatro décadas dándole voz al agua en Andalucía. Tomo III. Temas: Investigación, control, explotación, y aprovechamiento sostenible-Contaminación de las aguas. Diagnósticos, procesos e impactos-Estudios, caracterización y procesos hidroquímicos* (pp. 1167-1181).

De la Hera-Portillo, A., Llorente, M., Lopez-Gutiérrez, J., Salman, K., Sánchez, J.A., Gallego Rojas, N., Ballesteros, D., Moreno, L., Corral Lledó, M.M., Galindo Rodríguez, E., Ghanem, M., Hind Mohammad, A., Chulli, B., Laftouhi, N.-E. y Abdel-Gawad, F.K. (2022). Hydrogeological Setting of Las Loras UNESCO Global Geopark (Palencia-Burgos, Spain): State of Knowledge and Needs for Water Resources Sustainability Research. En B. Andreo, J. A. Barberá, J. J. Durán-Valsero, J. M. Gil-Márquez, y M. Mudarra (Eds.), *EuroKarst 2022, Málaga. Advances in Karst Science* (pp. 241-247). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16879-6_35

Del Pozo Gómez, M. (Coord) (2009). *Mapa Litoestratigráfico, de Permeabilidad e Hidrogeológico de España continuo digital a escala 1:200.000*. Convenio de colaboración entre el Ministerio de Medio Ambiente y el Instituto Geológico y Minero de España para la realización de trabajos técnicos en relación con la aplicación de la Directiva Marco del Agua en materia de agua subterránea. IGME.

Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Carré, G. C. G., García Márquez, J. R., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitao, P. J., Münkemüller, T., McClean, C. J., Osborne, P. E., Reneking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance: open access. *Ecography*, 36(1), 27-46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>

Geoparque Las Loras (s.f). <https://geoparquelasloras.es/>

Glazier, D.S. (2014). Springs. En S.A. Elias (Ed.) *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09322-2>

Gómez-Escalonilla, V., Diancoumba, O., Traoré, DY., Montero, E., Martín-Loeches. M. y Martínez-Santos, P. (2022). Multiclass spatial predictions of borehole yield in southern Mali by means of machine learning classifiers. *Journey of Hydrology: Regional studies*, 44, 101245. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101245>

Gómez-Escalonilla, V., Vogt, M.L., Destro, E., Isseini, M., Origgi, G., Djoret D., Martínez-Santos, P. y Holecz, F. (2021). Delineation of groundwater potential zones by means of ensemble tree supervised classification methods in the Eastern Lake Chad basin. *Geocarto International*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.2007298>

Google Earth (s.f). <https://earth.google.com/web/@0,-0.5718999,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r/data=OgMKATA>

INFOIGME (s.f). Visor cartográfico. GEODE. *Mapa Geológico digital continuo de España a escala 1: 50.000*. © CN Instituto Geológico y Minero de España (IGME). <http://info.igme.es/visorweb/>

Instituto Geológico y Minero de España (1998). *Atlas hidrogeológico de la provincia de Burgos*. Diputación Provincial de Burgos e Instituto Geológico y Minero de España. https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros1_HR/libro74/lib74.htm

Instituto Geológico y Minero de España (2010). *Banda Plegada de Ubierna – Lías NW cortes geológicos. Selección y caracterización de áreas y estructuras geológicas favorables para el almacenamiento geológico de CO₂*. CD-GE-16-GEOL-02-01. <https://info.igme.es/algeco2/>

Instituto Geográfico Nacional (s.f). Iberpix. Visor cartográfico. <https://www.ign.es/iberpix/visor/>

Instituto Geográfico Nacional (s.f). *Mapa de ocupación del suelo en España a escala 1:100.000*, CORINE Land Cover 2018. Centro Nacional de Información Geográfica. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=MDT02#>

Instituto Geográfico Nacional (s.f). *Modelo Digital del Terreno de 1ª cobertura (2009-2015) con paso de malla de 200 metros (MDT200) de España*, Modelo Digital del Terreno - MDT200, Burgos- Huso 30 2010, 2012. Centro Nacional de Información Geográfica. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=MDT02>

Kresic, N. (2010). Chapter 2 - Types and classification of springs. En N. Kresic y Z. Stevanovic (Eds.), *Groundwater Hydrology of Springs* (pp. 31-85). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-502-9.00002-5>

Mártinez Arnáiz, M. (2013). *Loras y Paramera de la Lora en Burgos. El incierto horizonte del desarrollo rural en un espacio de montaña media en recesión demográfica* [Tesis doctoral, Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/4223>

Martínez Santos, P., Martínez Alfaro, P. E., Montero González, E., Villarroya Gil, F., Martín-Loeches Garrido, M., Díaz Alcaide, S. y Castaño Castaño, S. (2018). *Hidrogeología. Principios y aplicaciones*. McGrawHill Education.

Martínez-Santos, P. y Renard, P. (2020). Mapping groundwater potential through an ensemble of big data methods. *Groundwater*, 58(4), 583–597. <https://doi.org/10.1111/gwat.12939>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s.f). Modelo SIMPA. Periodo de simulación: 1940/41 a 2017/18. <https://www.miteco.gob.es/ca/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/evaluacion-recursos-hidricos-regimen-natural.html>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s.f). Red hidrográfica. Ríos completos clasificados según Pfafstetter modificado. <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/red-hidrografica.html>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s.f). Sistema de Información de Redes de seguimiento del estado e información hidrológica. <https://sig.mapama.gob.es/redes-seguimiento/>

Molnar, C. (2024). *Interpretable Machine Learning. A Guide for Making Black Box Models Explainable (2nd Edition)*. <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book/>

Oh, H.J., Kim, Y.S., Choi, J.K. y Lee, S. (2011). GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, 399, 158–172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.027>

Ozdemir, A. (2011). GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. *Journal of Hydrology*, 411, 290–308. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.010>

Pendas Hernández, F. y Menéndez Casares, E. (1990). Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. MAGNA50 núm. 134 Polientes, Instituto Geológico y Minero de España.

Pitts, M.W. y Alfaro, C. (2001). Geologic/Hydrogeologic Setting and Classification of Springs. En P.E. LaMoreaux y J.T. Tanner (Eds.), *Springs and Bottled Waters of the World* (pp. 33-71). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56414-7_3

Prasad, P., Loveson, V.J., Kotha, M., y Yadav, R. (2020). Application of machine learning techniques in groundwater potential mapping along the west coast of India. *GIScience & Remote Sensing*, 57(6), 735–752. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1794104>

Salman Monte, K., Sánchez Fabián, J.A., García García, F., Basconcillos Arce, J., Rodríguez García, A., Gallego Rojas, N. (2015). Application Dossier to be a UNESCO Global Geopark. Diputación de Palencia, Diputación de Burgos, Junta de Castilla y León, ADECO Camino, Agrupación Comarcal de Desarrollo Montaña Palentina, Páramos y Valles Palentinos, Asociación. <https://geoparquealoras.es/wp-content/uploads/2021/06/Application-Dossier-Las-Loras-Geopark-Project-Main-document-b.pdf>

Springer, A. y Stevens, L.E. (2009). Spheres of discharge of springs. *Hydrogeology Journal*, 17, 83-93. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0341-y>

Stevens, L.E., Schenk, E.R. y Springer, A.E. (2020). Spring ecosystem classification. *Ecological Applications*, 0(0), e02218. <https://doi.org/10.1002/eap.2218>

Vegas, J., Carcavilla, L. y Cabrera, A.M. 2019. *Selección y descripción de variables que permitan diagnosticar el estado de conservación de la 'Estructura y función' de los diferentes tipos de formaciones tobáceas*. Serie "Metodologías para el seguimiento del estado de conservación de los tipos de hábitat". Ministerio para la Transición Ecológica.

ANEXO I

Resumen de la base de datos generada en relación con los 222 manantiales considerados dentro del GMU Las Loras

	Nombre	X	Y	Cota (msnm)	Material (GEODE)	Edad (GEODE)	Acuífero	Asociado a una falla	Estado	Tipología (Martínez et al. 2016)	Explicación
1.	Fuente Andero	397244.086	4721753.19	934	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
2.	Fuente Anteluela	428986.276	4737662.88	1059.12	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local	Si	Existente		
3.	Fuente Arenal	415571.557	4728135.09	936	Lutitas y areniscas	Jurásico	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
4.	Fuente Armudo	388822.779	4732539.12	1066	Dolomirritas, margas y arcillas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas y arcillas
5.	Fuente Arroyal	413253.784	4731609.87	1034.02	Arenas, margas arenosas, calizas y dolomías	Cretácico superior	Local		Existente		
6.	Fuente Canalón	430594.426	4723338.09	839.66	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto regional	Contacto entre calizas/dolomías y arcillas
7.	Fuente Castro	424087.463	4717690.15	1024.63	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local	Si	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
8.	Fuente Cuartillo	412802.559	4720224.16	975.67	Calizas y margas	Cretácico superior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
9.	Fuente Cubillo	424519.505	4735215.01	1064	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local	Si	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
10.	Fuente Cueto	427208.579	4733670.72	1033.66	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local		Existente	Por falla	Cercanía a una falla
11.	Fuente Cuevas	412420.782	4728075.7	995	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
12.	Fuente de Barriolucio	411365.435	4727538.32	978.54	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local	Si	Existente	Por contacto regional	Contacto entre calizas/dolomías y margas, nunca se ha secado por lo cual es difícil que se alimente por un acuífero local
13.	Fuente de Inero	415665.544	4723272.13	994.65	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y lutitas
14.	Fuente de la Corrigüela	424881.456	4717370.15	1019.83	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local	Si	Seco	Por falla/contacto local	Contacto entre areniscas y margas
15.	Fuente de la Ermita	392804.765	4739491.06	952.21	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre gravas/arenas y lutitas
16.	Fuente de la Gargantilla	411378.572	4720819.16	930.03	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
17.	Fuente de la Gargantilla	417940.515	4718674.16	939	Areniscas, arcillas y conglomerados en la base	Cretácico inferior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
18.	Fuente de la Huera	428741.415	4713385.17	1015.63	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local	Si	Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
19.	Fuente de la Legaña	399870.674	4724955.15	993.52	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y lutitas
20.	Fuente de la Planta	415617.528	4716847.18	970.7	Cantos, gravas, arenas, limos y arcillas	Cuaternario	Local	Si	Seco		
21.	Fuente de la Reguera	405568.54	4729677.8	1134.79	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
22.	Fuente de la Turquilla	400780.663	4723909.16	1073.27	Margas, calizas, biocalcarentitas y calizas	Cretácico superior	Local	Si	Existente	Por falla/contacto local	Contacto entre calizas y margas
23.	Fuente de la Venta	438170.35	4717100.12	1004.29	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Seco		
24.	Fuente de la Virgen	393684.754	4737910.07	947	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente		
25.	Fuente de las Hoyas	411964.601	4734608.05	1089.86	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto regional	Contacto entre calizas/dolomías y margas
26.	Fuente de las Mimbres	409119.302	4725607.63	951.07	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y arcillas
27.	Fuente de los Cinco Caños	394854.846	4738889.4	904	Arcillas, limos, arenas y gravas	Jurásico superior/Cretácico inferior	Regional		Existente	Por contacto regional	Contacto entre calizas con arcillas
28.	Fuente de los Pilonos	437567.357	4717768.11	1039.66	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas y margas
29.	Fuente de Miranjas	411505.576	4722794.14	974.7	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas/yesos/halita
30.	Fuente de Montecillo	412020.566	4720502.16	985.96	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
31.	Fuente de Oncejuelo	403677.634	4721325.17	1006.34	Lutitas, areniscas y conglomerados	Jurásico superior/Cretácico inferior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
32.	Fuente de Hontañón o de las Meadinas	406685.606	4719867.18	951.2	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y arcillas
33.	Fuente de Orbaneja	435219.202	4742739.18	675	Margas y calizas arcillosas	Cretácico superior	Local		Existente		
34.	Fuente de Ostra	415582.755	4727579.09	950.5	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente		
35.	Fuente de Peñalonga	395987.124	4738941.03	901.71	Arcillas, limos, arenas y gravas	Triásico superior	Regional	Si	Existente	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre calizas y arcillas/yesos/halita
36.	Fuente de Pisadera	405472.092	4731903.39	912.55	Lutitas, areniscas y conglomerados	Jurásico superior/Cretácico inferior	Regional		Existente	Por contacto regional	Contacto entre areniscas/conglomerados y arcillas/yesos/halita
37.	Fuente de Pozo Azul	434848.639	4731780.73	702.08	Calizas arcillosas y calcarenitas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/calcarentitas y margas
38.	Fuente de San Bol	415329.551	4725249.11	1008.47	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local	Si	Existente	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre calizas/dolomías y margas
39.	Fuente de San Cristol	413885.549	4719509.16	979.39	Lutitas, areniscas y conglomerados	Jurásico superior/Cretácico inferior	Regional		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas/conglomerados y arcillas
40.	Fuente de San Pedro	414263.555	4723097.13	982	Calizas y margas	Cretácico superior	Local	Si	Seco	Por falla	Cercanía a una falla
41.	Fuente de Tres Quimanas	413304.553	4719200.17	997.66	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y lutitas
42.	Fuente de Tubilla del Agua	434242.177	4728432.48	816.86	Margas arcillo-arenosas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y margas
43.	Fuente de Valdeateja	436479.446	4735723.2	659.45	Margas y calizas arcillosas	Cretácico superior	Local		Existente	Por falla	La elevada temperatura del agua no se explicaría si no fuera proceder de profundidades considerables, pero sale al exterior por la presencia de una falla
44.	Fuente de Valdienda	406684.609	4720746.17	964.62	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas y dolomías y margas
45.	Fuente del Carril	414634.549	4722171.14	1077.63	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
46.	Fuente del Gusto	413388.67	4726361.11	1014.82	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local	Si	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
47.	Fuente del Obispo	397393.688	4722627.18	1034.89	Calizas arcillosas y calcarenitas	Cretácico superior	Local	Si	Existente	Por falla	Cercanía a una falla

48.	Fuente del Pontón	415625.531	4718068.17	979	Lutitas, areniscas y conglomerados	Jurásico superior/Cretácico inferior	Regional		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas/conglomerados y arcillas
49.	Fuente del Pozo	398204.729	4741976.02	925.12	Brechas calcáreas, cantolias y dolomías	Triásico superior/Jurásico inferior	Regional	SI	Existente	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre brechas/dolomías y arcillas
50.	Fuente del Sapo	428126.163	4730190.04	961.73	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local		Existente		
51.	Fuente el Colmenar	401891.672	4731058.1	1047.01	Calizas bioclásticas y margas	Jurásico medio	Local	SI	Seco	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre calizas y lutitas/margas
52.	Fuente el Hoyo	420175.625	4729722.66	863.17	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías con margas
53.	Fuente el Piñón	400341.708	4740295.03	938.99	Cantos con matriz arcillosa	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y cantos con matriz arcillosa
54.	Fuente Fresca	402250.666	4729530.11	975	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente		
55.	Fuente Hongarrera	404515.631	4722613.16	1168.93	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local	SI	Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
56.	Fuente Ibillo	427239.474	4731606.03	996.18	Margas y calizas arcillosas	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
57.	Fuente Iglesia Vieja	395351.712	4726132.15	911	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local	SI	Seco	Por falla	Cercanía a una falla
58.	Fuente Junquera	395908.706	4725539.16	938.55	Margas, calizas, biocalcarenitas y calizas margosas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/biocalcarenitas y areniscas/lutitas
59.	Fuente la Casa	403881.678	4739753.03	1029.77	Arenas, margas arenosas, calizas y dolomías	Cretácico superior	Local		Existente		
60.	Fuente la Planilla	426433.434	4713362.18	961.14	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y arcillas
61.	Fuente las Poleas	393874.729	4728152.14	865.13	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco		
62.	Fuente las Riberas	393598.73	4727705.15	861	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y cantos con matriz arcillosa
63.	Fuente Lucía	403527.676	4737981.04	1031.59	Arenas, margas arenosas, calizas y dolomías	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre brechas/dolomías y margas
64.	Fuente Odra	424699.457	4717367.15	1015	Areniscas (y lutitas)	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por falla/contacto local	Contacto entre areniscas y margas
65.	Fuente Patro	402654.664	4729911.11	968	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y lutitas
66.	Fuente Peñía	399158.67	4721146.19	986.15	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas arcillosas/calcarenitas y arcilla
67.	Fuente Prabal	408102.223	4724484.44	1073.8	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
68.	Fuente Ribota	397033.689	4722328.18	965.89	Calizas arcillosas y calcarenitas	Cretácico superior	Local	SI	Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas/calcarenitas y margas
69.	Fuente Rumbel	396728.704	4727469.14	904.59	Arcillas, yesos y halitas	Triásico superior	Regional		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas/dolomías y margas
70.	Fuente Salada	398712.727	4742950.01	936	Brechas calcáreas, cantolias y dolomías	Triásico superior/Jurásico inferior	Regional		Seco	Por contacto local	Contacto entre brechas/dolomías y arcillas/yesos/halita
71.	Fuente San Roque	401277.666	4726574.14	966	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
72.	Manantial Canaleja	432853.383	4713864.16	957	Calizas lacustres	Jurásico superior/Cretácico inferior	Regional	SI	Seco	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre calizas y arcillas
73.	Manantial de Arcellares	425053.453	4716794.16	995.77	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
74.	Manantial de Carretafuente	424375.462	4718036.15	1010.26	Calizas y margas	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
75.	Manantial de Cenciceros*	425168.53	4728235.06	944	Calizas y dolomías	Cretácico superior	Local		-	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
76.	Manantial de Dujuelo	428560.414	4712535.18	997.23	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y margas
77.	Manantial de Embajando	429375.412	4714089.17	1089	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
78.	Manantial de Fuentesuna	428943.436	4722134.1	964.04	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y margas
79.	Manantial de Guitera	433190.381	4713956.16	966.04	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
80.	Manantial de Horticonle	431907.411	4712342.1	1010	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y arcillas
81.	Manantial de Hoya Redonda	405206.332	4725315.34	1152.56	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
82.	Manantial de la Cárcava	422121.477	4717069.16	961.78	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
83.	Manantial de la Ceña	403861.843	4725321.84	1070.98	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
84.	Manantial de la Ermita	419031.51	4720115.14	1004.23	Calizas y margas	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
85.	Manantial de la Magdalena	406928.625	4728013.11	1061.53	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local	SI	Existente	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre arenas/gravas y margas
86.	Manantial de la Pedrosa	433503.383	4715618.14	990	Calizas y margas	Cretácico superior	Local	SI	Seco	Por falla	Cercanía a una falla
87.	Manantial de los Ojales	404169.643	4726433.13	1067.43	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente		
88.	Manantial de la Veguecilla	422891.472	4717345.16	1030.38	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y margas
89.	Manantial de las Matas	433568.383	4715999.14	974.08	Calizas y margas	Cretácico superior	Local	SI	Seco	Por falla	Cercanía a una falla
90.	Manantial de las Moreras	433167.402	4722079.09	866.9	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto regional	Contacto entre calizas/dolomías y arcillas
91.	Manantial de las Navas	430783.397	4712688.17	1002	Areniscas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
92.	Manantial de las Quintanas	407112.611	4723021.15	1024.48	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local	SI	Seco	Por falla	Cercanía a una falla
93.	Manantial de las Quintanas	421929.482	4718180.15	973.27	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
94.	Manantial de los Milagros	433546.382	4715409.14	1011.68	Calizas y margas	Cretácico superior	Local	SI	Seco	Por falla	Cercanía a una falla
95.	Manantial de los Ojales	422836.474	4718064.15	1034.32	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local	SI	Existente	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
96.	Manantial de los Pradillos	433809.381	4715732.14	1012.99	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Seco		
97.	Manantial de Monte la Peña	426587.445	4718387.14	1028.79	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
98.	Manantial de San Millán	432016.389	4713506.16	972.4	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
99.	Manantial de Santa Marina	421789.488	4720173.14	1009.82	Calizas y margas	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre calizas/dolomías y margas
100.	Manantial de Sotillo	430396.403	4713715.17	1008	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas

101.	Manantial de Taracón	425105.454	4717375.15	1019.59	Calizas y margas	cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
102.	Manantial de Trescasares	427798.446	4722409.1	993.9	Calizas y margas	cretácico superior	Local		Existente	Por contacto regional	Contacto entre calizas y lutitas
103.	Manantial de Trescuevas	425301.457	4719316.13	1016.65	Calizas y margas	cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas con lutitas
104.	Manantial de Valdehayas	426221.455	4721027.12	973.47	Calizas y margas	cretácico superior	Local	Si	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
105.	Manantial de Valdemudo	434198.376	4715284.14	1015.25	Calizas y margas	cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
106.	Manantial de Valledrías	423728.477	4721957.12	1009.21	Conglomerados calcáreos	Paleógeno	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre conglomerados y arcillas
107.	Manantial del Carlo Rodado	404761.633	4724109.15	1145.14	Calizas y margas	cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
108.	Manantial del Collado	423163.463	4714548.18	987	Carinos, gravas, arenas, limos y arcillas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre gravas/arenas y margas
109.	Manantial del Dujó	433935.382	4716546.13	926	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local	Si	Existente	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre arenas/gravas y lutitas
110.	Manantial del Endrinal	414876.551	4723805.12	1026.42	Areniscas (y lutitas)	cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
111.	Manantial del Juncal	422842.469	4716152.17	1040.46	Calizas y margas	cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
112.	Manantial del Portillo	435028.379	4719058.11	1010	Calizas y margas	cretácico superior	Local		Existente		
113.	Manantial del Pradal	425765.452	4718574.14	972.02	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
114.	Manantial del Val	418688.511	4719767.15	955	Areniscas (y lutitas)	cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y lutitas
115.	Manantial del Vallejo	422710.476	4718571.15	960	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
116.	Manantial de Covalagua	407665.55	4735943.75	1076.83	Margas y calizas arcillosas	cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
117.	Manantial Fuente de la Rana	431443.396	4714186.16	995.53	Areniscas (y lutitas)	cretácico inferior/superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
118.	Manantial Fuente de las Calenturas	434468.367	4712482.17	936.23	Brechas calcáreas, carnioles, dolomías y calizas	Triásico superior/Jurásico inferior	Regional		Existente	Por contacto local	Contacto entre dolomías y arcillas
119.	Manantial Fuente del Moro	431936.393	4714442.16	1033.22	Calizas y margas	cretácico inferior/superior	Local	Si	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
120.	Manantial la Rascosa	430497.414	4718374.13	969.9	Margas y calizas margosas	cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y margas
121.	Manantial Quemadilla	432241.385	4712542.17	1000	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local	Si	Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y arcillas
122.	Manantial Rehoya	432272.386	4712652.17	1003.43	Brechas calcáreas, carnioles, dolomías y calizas	Triásico superior/Jurásico inferior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y arcillas
123.	Manantial San Benito	431674.388	4712007.18	1023.91	Calizas y margas	cretácico superior	Local		Seco		
124.	Manantial Valdespino	432302.386	4712965.17	973	Arcillas, yesos y halita	Triásico superior	Regional		Seco		
125.	Manantial de Villascobedo	411492.63	4734067.86	1090.15	Calizas bioclásticas y dolomías	cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
126.	001	394651.751	4739424.05	945.95	Lutitas, areniscas, conglomerados	Jurásico superior/cretácico inferior	Regional		Existente		
127.	002	396131.708	4727147.15	885	Arcillas, yesos y halitas	Triásico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y arcillas/yesos/halita
128.	003	396262.707	4726959.15	884.02	Arcillas, yesos y halitas	Triásico superior	Regional	Si	Seco	Por contacto local	Contacto entre brechas calcáreas/dolomías y arcillas/yesos/halita
129.	004	400902.676	4729286.12	948	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
130.	005	392885.742	4730217.13	898	Areniscas (y lutitas)	cretácico inferior/superior	Local	Si	Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
131.	006	420220.824	4729636.97	896.54	Calizas bioclásticas y dolomías	cretácico superior	Local		Seco		
132.	007	396872.695	4724306.17	966.91	Areniscas (y lutitas)	cretácico inferior/superior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
133.	008	398490.677	4721855.18	983.7	Calizas arcillosas y calcarenitas	cretácico superior	Local	Si	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
134.	009	404181.633	4722206.16	1058.06	Calizas y margas	cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
135.	010	415054.548	4723005.13	975	Lutitas y areniscas	cretácico inferior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
136.	011	404218.625	4719543.19	919	Calizas bioclásticas y dolomías	cretácico superior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
137.	012	413652.553	4720325.16	966.05	Lutitas y areniscas	cretácico inferior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
138.	013	404830.631	4723867.15	1099	Areniscas (y lutitas)	cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
139.	014	405809.625	4724359.14	1084.38	Areniscas (y lutitas)	cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
140.	015	407580.606	4722652.15	1008.49	Lutitas, areniscas y conglomerados	Jurásico superior/cretácico inferior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas/conglomerados y margas
141.	016	413933.557	4722842.14	1029.58	Calizas y margas	cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
142.	017	415175.544	4721789.14	1076.33	Calizas bioclásticas y dolomías	cretácico superior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
143.	018	415402.542	4721554.14	1098.94	Calizas bioclásticas y dolomías	cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
144.	019	407050.613	4723286.15	1058.56	Areniscas (y lutitas)	cretácico inferior/superior	Local	Si	Existente	Por falla/	Cercanía a una falla,
145.	020	408269.602	4722866.15	1024.45	Lutitas, areniscas, conglomerados	Jurásico superior/cretácico inferior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas/conglomerados y margas
146.	021	408853.599	4723538.14	959	Arcillas, yesos y halitas	Triásico superior	Regional	Si	Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas y arcillas/yesos/halita
147.	022	413120.561	4721937.14	989.12	Calizas bioclásticas y dolomías	cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
148.	023	403137.643	4723297.16	1005.52	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas
149.	024	406942.616	4724369.14	1030.33	Areniscas (y lutitas)	cretácico inferior/superior	Local		Existente		
150.	025	407107.615	4724206.14	1022.85	Areniscas (y lutitas)	cretácico inferior/superior	Local		Existente		
151.	026	409027.596	4722924.15	1005.02	Brechas calcáreas, carnioles, dolomías y calizas	Triásico superior/Jurásico inferior	Local	Si	Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
152.	027	411097.577	4721802.15	970	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local	Si	Seco	Por contacto local	Contacto entre arenas/gravas y lutitas

153.	028	414343.553	4722402.14	1048.71	Calizas y margas	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
154.	029	414416.552	4722490.14	1018.53	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local	SI	Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
155.	030	415293.543	4721606.14	1072.9	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
156.	031	415750.545	4723682.12	1072.5	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
157.	032	415886.541	4722757.13	986	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y lutitas
158.	033	405767.625	4724403.14	1071.71	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y lutitas
159.	034	405664.626	4724314.14	1084.89	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y lutitas
160.	035	403389.636	4721198.17	968	Lutitas, areniscas y conglomerados	Jurásico superior/Cretácico inferior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
161.	036	403887.633	4721628.17	1019.33	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local	SI	Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas/yesos/halitas
162.	037	404858.623	4720690.17	950.51	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
163.	038	414285.548	4720476.15	1010.99	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
164.	039	417630.528	4723399.12	1019.3	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y arcillas
165.	040	417535.528	4722855.13	1018	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y lutitas
166.	041	424921.467	4721765.12	971.5	Margas arcillo-arenosas	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
167.	042	421138.482	4716005.17	935	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
168.	043	422474.47	4715365.17	1010.91	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
169.	044	427245.444	4720065.12	1001.64	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
170.	045	424925.472	4723827.1	971.6	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
171.	046	425124.471	4723833.1	972	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y lutitas
172.	047	423520.48	4722490.11	976.67	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y lutitas
173.	048	422603.482	4720540.13	1002.7	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre conglomerados y arcillas
174.	049	416580.532	4721377.14	1009	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y lutitas
175.	050	416686.53	4721076.14	1031.49	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y lutitas
176.	051	427086.447	4720831.12	997.73	Calizas y calcarenitas	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
177.	052	426714.45	4720943.12	1008.39	Calizas y calcarenitas	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
178.	053	427062.447	4720698.12	1009.19	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
179.	054	421531.488	4719493.14	935.39	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
180.	055	424179.467	4719545.14	1002.76	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
181.	056	429813.421	4719092.12	957.38	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
182.	057	424855.454	4716680.16	1008.4	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local	SI	Seco	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre areniscas y lutitas
183.	058	424170.471	4721150.12	1002	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre conglomerados y arcillas
184.	059	424124.468	4719575.14	1013.58	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
185.	060	425365.452	4717214.15	996.67	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local	SI	Seco	Por falla	Cercanía a una falla
186.	061	425407.451	4717073.15	987.09	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local	SI	Existente	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre areniscas y lutitas
187.	062	423698.461	4715856.17	983	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y lutitas
188.	063	423169.483	4722818.11	966.64	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local	SI	Seco	Por falla	Cercanía a una falla
189.	064	422771.486	4722644.11	973	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre gravas/arenas y conglomerados
190.	065	421924.493	4722497.12	977	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre gravas/arenas y conglomerados
191.	066	422006.492	4722487.12	977	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre gravas/arenas y conglomerados
192.	067	421564.496	4722579.12	980	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre gravas/arenas y conglomerados
193.	068	420915.485	4716334.17	932.47	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
194.	069	428293.437	4720597.12	946.25	Calizas arcillosas y calcarenitas	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre calizas arcillosas/calcarenitas y arcillas
195.	070	420606.486	4715846.17	930.06	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
196.	071	422012.474	4715570.17	1021.71	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
197.	072	422117.474	4715529.17	1009.3	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
198.	073	427549.447	4722294.11	961.65	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Seco	Por contacto regional	Contacto entre areniscas con margas/arcillas
199.	074	426849.436	4715926.16	1006.52	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
200.	075	426339.436	4713938.17	971.8	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local	SI	Existente	Por falla/	Cercanía a una falla,
201.	076	426789.434	4714583.17	982.33	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
202.	077	427105.431	4714543.17	975.89	Areniscas (y lutitas)	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y arcillas
203.	078	427749.422	4712917.18	988.83	Lutitas, areniscas y conglomerados	Jurásico superior/Cretácico inferior	Regional		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
204.	079	427265.428	4713755.17	990	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
205.	080	430704.424	4723160.09	847.34	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto regional	Contacto entre calizas/dolomías y arcillas
206.	081	431239.42	4722853.09	855.81	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto regional	Contacto entre calizas/dolomías y arcillas
207.	082	433701.397	4721820.09	876.4	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto regional	Contacto entre areniscas/gravas y margas
208.	083	434063.394	4721715.09	894.05	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto regional	Contacto entre areniscas/gravas y margas
209.	084	430027.424	4721076.11	960	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local	SI	Seco	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre areniscas y lutitas
210.	085	436018.371	4718790.11	1034.42	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
211.	086	431770.404	4718530.12	930	Areniscas, arcillas y conglomerados en la base	Cretácico inferior	Local	SI	Existente	Por falla	Cercanía a una falla
212.	087	436968.361	4717961.11	1014.48	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Seco	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
213.	088	433345.383	4715199.15	1007	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y lutitas
214.	089	436845.36	4716511.13	940.72	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y lutitas
215.	090	436296.359	4715047.14	943.08	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local	SI	Existente	Por falla/contacto local	Cercanía a una falla, contacto entre areniscas y lutitas
216.	091	430578.403	4714359.16	1069	Margas y calizas margosas	Cretácico superior	Local	SI	Seco	Por falla	Cercanía a una falla
217.	092	431555.39	4712489.17	1033.62	Calizas bioclásticas y dolomías	Cretácico superior	Local	SI	Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas/dolomías y margas
218.	093	435003.363	4712722.16	960.79	Calizas y margas	Cretácico superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre calizas y lutitas
219.	094	434978.364	4712660.16	940.8	Areniscas (y lutitas)	Cretácico inferior/superior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
220.	095	436165.359	4714576.14	921.88	Arcillas, limos, arenas y gravas	Cuaternario	Local	SI	Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas/gravas y margas
221.	096	431495.394	4715815.16	980.94	Lutitas y areniscas	Cretácico inferior	Local		Existente	Por contacto local	Contacto entre areniscas y margas
222.	097	433146.379	4712924.17	943.58	Arcillas abigarradas, yesos y halitas	Triásico superior	Regional		Existente	Por contacto local	Contacto entre brechas/dolomías y arcilla/yeso/halita

*No se conocen las coordenadas exactas.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO II

FICHA DE CARACTERIZACIÓN DE LOS MANANTIALES 1: Covalagua

1. Localización

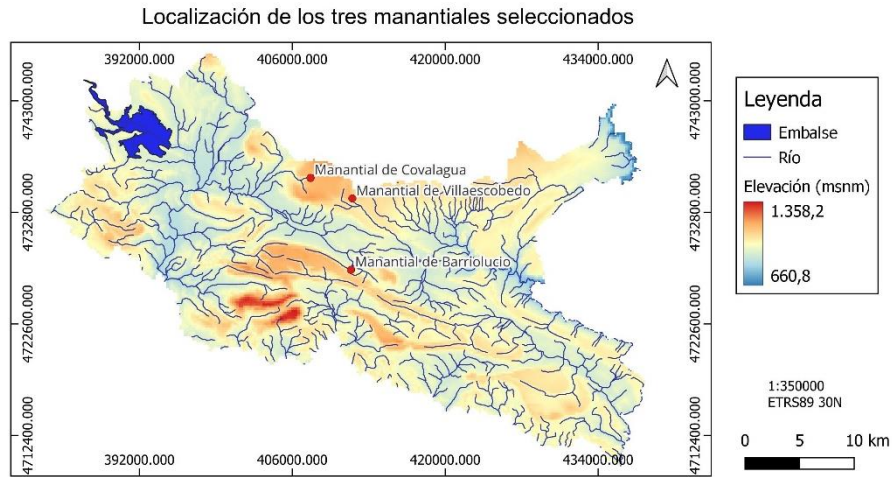


Figura II.1. Fuente: Elaboración propia.

2. Descripción geológica

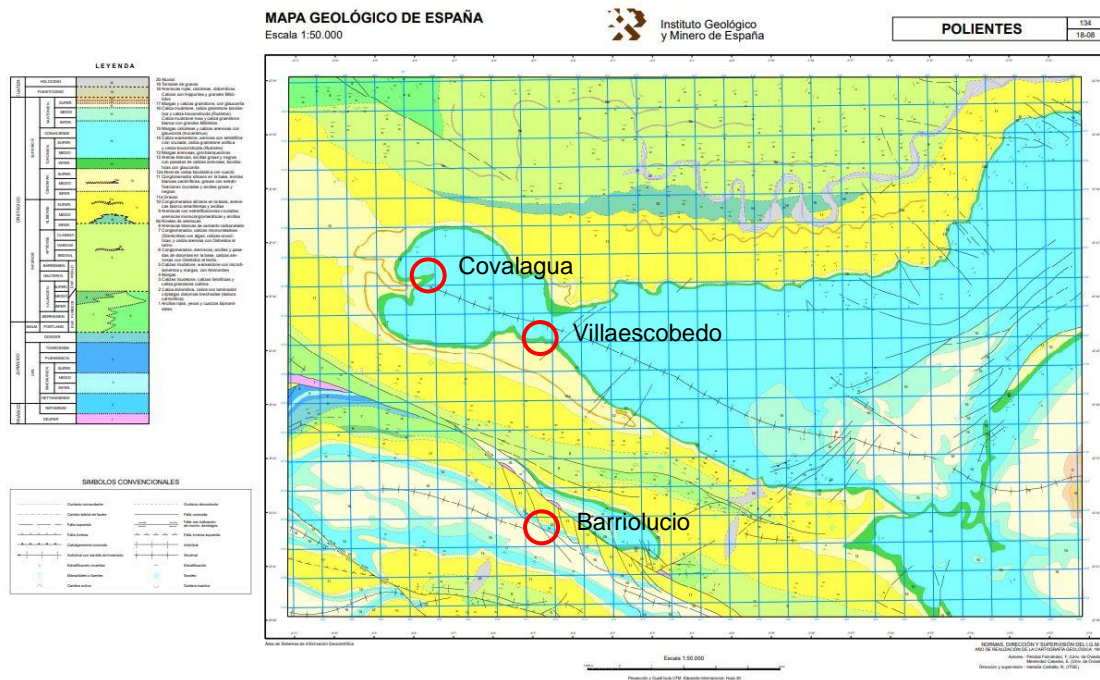


Figura II.2. Fuente: Pendas y Menéndez (1990).

El manantial se encuentra en el oeste del sinclinal de la Lora de Valdivia, en el contacto entre las calizas del Turoniense-Coniaciense-Santonense (14) con las margas del Santoniense (15) y arenas y arcillas del Cenomaniense (12).

3. Caracterización y clasificación (Stevens et al., 2020)

Upland hillslope.

Paredes activos e inactivos, terrazas, prado húmedo, cascada.

4. Caudal de la surgencia

	1	2	3	4	Media
Caudal	0,18 l/s	0,21 l/s	0,19 l/s	0,21 l/s	0,2 l/s

Tabla II.1. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados el 22/06/2024.

5. Características físico-químicas del agua/facies hidroquímica

	1	2	3	Media
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	462	421	459	447,3
Potencial redox (mV)	199,6	-	173,3	186,45
pH	-	8,4	-	8,4
T °C	14/14,2	13/14	-	13,8

Tabla II.2. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados el 22/06/2024.

Facies hidroquímica: Aguas bicarbonatadas cálcicas (De la Hera-Portillo et al., 2022).

6. Descripción del funcionamiento del edificio tobáceo:

a) Partes activas

Se observan paredes húmedas con algunas partes con goteo (figura 15B y 15C), pero sin cascada. Presencia de musgo en 40% del edificio.

b) Partes inactivas

Se observa pared sin vegetación con presencia de poco musgo seco, sin presencia de agua (figura 15D).

7. Funcionamiento de los sectores activos e inactivos

Edificio crecido frontalmente de forma cuneiforme con chorreras y pequeños escalones. El edificio tiene una altura de 5 m, anchura 10 m y profundidad 10 m, y está mayoritariamente activo. En la margen derecha y central se observa goteo sin cascada (figura 15C). En la margen izquierda se observa partes de pared seco con musgo color marrón (figura 15D). La margen más izquierda cuenta con presencia de musgo color verde y goteo otra vez. La parte superior del edificio está cubierto totalmente por musgo (figura 15A).

FICHA DE CARACTERIZACIÓN 2: Villaescobedo

1. Localización

Para ver el mapa topográfico general vea Anexo II, ficha 1, figura II.1.

2. Descripción geológica

Para ver hoja Magna general vea Anexo II, ficha 1, figura II.2.

El manantial se sitúa en el sureste de la Lora de Valvidia, en el contacto entre las calizas del Turoniense-Coniaciense-Santoniense (14) con las margas del Santoniense (15) y arenas y arcillas del Cenomaniense (12).

3. Caracterización y clasificación (Stevens et al., 2020)

Upland hillslope.

Cueva, paredes activos e inactivos, terrazas, prado húmedo, cascada, piscina.

4. Caudal de la surgencia

	1	2	3	4	Media
Caudal	3,2 l/s	3 l/s	2.5 l/s	2,9 l/s	2,9 l/s

Tabla II.3. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados el 22/06/2024.

5. Características físico-químicas del agua/facies hidroquímica

	1	2	Media
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	504	455	479,5
Potencial redox (mV)	-	197	197
pH	-	8,1	8,1
T °C	10,8/12,1	10,8/12,3	11,5

Tabla II.4. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados el 22/06/2024.

Facies hidroquímica: sin datos en la literatura previa.

6. Descripción del funcionamiento del edificio tobáceo:

a) Activos

Surgencia con presencia de agua (figura 18A). Pequeña piscina formada encima de la cascada (figura 18B). Paredes con flujo de agua y musgo (figura 18E). Concentración de agua debajo de las cascadas donde empieza el arroyo de Mundilla (figura 18F).

b) Inactivos

Cueva (surgencia natural) agua (figura 19A). Curso antiguo de la surgencia natural sin presencia de agua (figura 19B). Pared seca con musgo color marrón (figura 19C). Antiguo curso de arroyo Mundillo (figura 19D).

7. Funcionamiento de los sectores activos e inactivos

Edificio crecido frontalmente con láminas horizontales (figura 18D y 18E) de una altura de 3 m, anchura de 1,5 m y profundidad de 2 m. La surgencia natural es una cueva (figura 19A), que se encuentra en el contacto de calizas y margas. Actualmente se encuentra inactivo. Surgencia actual en una captura antrópica (figura 18A) a unos 50 m de la cueva. A unos 5 m de la surgencia se encuentran pequeñas tobas con musgo (activo) (figura 18C). No se ha observado agua, pero el musgo indica la presencia de agua estacional. A unos metros de esto se forma una concentración de agua (figura 18B) donde empieza a caer por el edificio tobáceo. Se observa goteo en la parte central del edificio tobáceo, casi todo el edificio está cubierto por musgo. En la margen izquierda se puede ver sector inactivo, correspondiendo al flujo generado por surgencia natural (figura 19B). El edificio tobáceo forma dos saltos, generando abajo una concentración de agua (figura 18F), a partir de donde nace el arroyo de Mundilla. En el arroyo se pueden observar sector inactivo en la margen derecha (figura 19D).

FICHA DE CARACTERIZACIÓN 3: Barriolucio

1. Localización

Para ver el mapa topográfico general vea Anexo II, ficha 1, figura II.1.

2. Descripción geológica

Para ver hoja Magna general vea Anexo II, ficha 1, figura II.2.

El manantial se encuentra en el norte del sinclinal de la Lora de Barriolucio, en el contacto entre las calizas del Turoniense-Coniaciense-Santoniense (14) con las margas del Santoniense (15) y arenas y arcillas del Cenomaniense (12).

Las calizas forman una serie de bloques a causa del sistema de fallas asociado a la falla de Ubierna (Anexo II, figura II.2). La surgencia se encuentra a pie del páramo y el edificio tobáceo a unos 150 m hacia el norte.

3. Caracterización y clasificación (Stevens et al., 2020)

Upland hillslope.

Paredes activos e inactivos, terrazas, vegetación de ribera, cascada, cueva, piscina.

4. Caudal de la surgencia

	1	2	3	4	Media
Caudal 1	2,5 l/s	3,9 l/s	-	-	3,2 l/s
Caudal 2	12,5 l/s	15,7 l/s	14,6 l/s	-	14,3 l/s
Caudal 3	2,9 l/s	3,5 l/s	3,6 l/s	4 l/s	3,5 l/s

Tabla II.5. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados el 22/06/2024.

Facies hidroquímica: Aguas bicarbonatadas cálcicas (De la Hera-Portillo et al., 2022).

5. Características físico-químicas del agua/facies hidroquímica

Punto de aforo-1	1	2	Media
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	513	496	504,5
Potencial redox (mV)	-	224,9	224,9
pH	8,14	-	8,14
T °C	11,9/12,4	11,2/11,5	11,75

Tabla II.6. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados el 22/06/2024.

Surgencia	1	2	Media
CE ($\mu\text{S/cm}$)	473	536	504,5
Potencial redox (mV)	242,9	-	242,9
pH	-	8,11	8,11
T °C	10,5/11,1	10,5/11	10,8

Tabla II.7. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados el 22/06/2024.

6. Descripción del funcionamiento del edificio tobáceo

a) Activos

Paredes con musgo color verde (figura 22A) y presencia de goteo sin cascada (figura 22C y 22D). Formación de pequeña piscina (figura 22B).

b) inactivos

Paredes secas sin goteo con musgo color marrón (figura 23).

7. Funcionamiento de los sectores activos e inactivos

Edificio crecido frontalmente de una altura de 3 a 4 m, anchura de 15 a 20 m y profundidad de 10 a 20 m. El edificio está casi completamente activo, que se puede comprobar por la presencia del musgo de color verde (figura 22A), que está presente en todo el edificio. El flujo de surgencia se observa en la margen derecha e izquierda del edificio (figura 22C y 22D). En la parte frontal en el centro se observa pequeñas partes inactivos, debido al color marrón del musgo seco (figura 23). El edificio ha crecido en la margen izquierda, siendo completamente cubierto por musgo de color verde.