

RESEARCH ARTICLE

Deep aquifers as strategic groundwater reservoir in Spain

Los acuíferos profundos como reserva estratégica de agua subterránea en España

Carlos Camuñas Palencia¹, Miguel Mejías Moreno¹, Jorge Hornero Díaz², Fernando Ruíz Bermudo³, Olga García Menéndez¹

¹ Departamento de Aguas y Cambio Global, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, c/ Ríos Rosas, 23 28003 Madrid, España; c.camunas@igme.es; m.mejías@igme.es; o.garcia@igme.es

² Departamento de Aguas y Cambio Global, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, avda. Miguel de Cervantes, 45, 5ºA 30009 Murcia, España; j.hornero@igme.es

³ Departamento de Aguas y Cambio Global, Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, Plaza de España - Torre Norte 41013 Sevilla, España; f.ruiz@igme.es

Corresponding author: Carlos Camuñas Palencia (c.camunas@igme.es)

ABSTRACT

Key points

The methodology developed for the assessment of a deep aquifer as a potential strategic reserve is summarized on a flow chart

The valuation process identifies the deep aquifer as: strategic groundwater reserve, punctual reserve or non-viable reserve

The first inventory of deep aquifers in Spain is carried out

The objective of this paper is to establish a definition of deep aquifers, develop a methodological proposal to help select them as strategic groundwater reserves and develop a first inventory of deep aquifers in peninsular Spain, organized by hydrographic districts. The basic premises followed to consider a permeable formation as a deep aquifer are: water table depth greater than 300 m in free aquifers or the top of the permeable formation in the case of confined aquifers. A deep aquifer is also considered to be the lower horizon of very thick aquifers (from 300 m), from which the most superficial horizon is used. The definition of the potentially favorable areas and the initial characterization is based on a compilation and synthesis of geological and hydrogeological information, structured in 5 large blocks: location and identification, geology, hydrogeology, current status and bibliography. For its evaluation, a flowchart has been proposed with the basic lines of the evaluation process. The relevant aspects for suitability would be: stratigraphy and structural geology, prior knowledge of the conceptual model and water renewal, quality, viability of exploitation, effects, final knowledge, and management and governance. The final result allows the aquifer to be classified into three categories: strategic groundwater reserve, punctual reserve or non-viable reserve. The inventory carried out encompasses a total of 64 deep aquifers located in 13 basin districts. Finally, as example, three deep aquifers are presented: Amblés Valley, Madrid detritic aquifer and El Maestrazgo.

Keywords: Deep aquifer; Groundwater; Strategic water reserves; Climate Change.

Article History:

Received: 27/04/2022

Accepted: 24/08/2022

RESUMEN

Puntos clave

La metodología desarrollada para la valoración de un acuífero profundo como potencial reserva estratégica se sintetiza en un diagrama de flujo

El proceso de valoración identifica el acuífero profundo como: reserva estratégica de agua subterránea, reserva puntual o reserva no viable

Se realiza el primer inventario de acuíferos profundos en España

El presente trabajo tiene como objetivo establecer una definición de acuífero profundo, elaborar una propuesta metodológica que ayude a seleccionarlos como reservas estratégicas de agua subterránea y desarrollar un primer inventario de acuíferos profundos en la España peninsular, organizado por demarcaciones hidrográficas. Las premisas básicas que se han seguido para considerar una formación permeable como acuífero profundo son: profundidad del nivel freático superior a 300 m en acuíferos libres o techo de la formación permeable en los acuíferos confinados. También al horizonte inferior de acuíferos de gran espesor (a partir de 300 m), de los que se aprovecha la zona más superficial. La delimitación de las zonas potencialmente favorables y su caracterización inicial se fundamenta en un trabajo de recopilación y síntesis de información geológica e hidrogeológica que se estructura en 5 grandes bloques: localización e identificación, geología, hidrogeología, estado actual y bibliografía. Para su valoración se ha seguido un proceso de evaluación que se sintetiza en un diagrama de flujo donde los aspectos considerados relevantes han sido: estratigrafía y geología estructural, conocimiento existente del funcionamiento y renovación del agua, calidad, viabilidad de la explotación, afecciones, conocimiento final, y gestión y gobernanza. El resultado final permite encuadrar el acuífero dentro de tres categorías: reserva estratégica de agua subterránea, reserva puntual o no viable como reserva. El inventario realizado engloba un total de 64 acuíferos profundos situados en 13 demarcaciones hidrográficas. Finalmente, y a modo de ejemplo, se presentan tres acuíferos profundos: Valle de Amblés, Acuífero detrítico de Madrid y El Maestrazgo.

Palabras clave: Acuífero profundo; Agua subterránea; Reserva estratégica de agua; Cambio climático.

Historial del artículo:

Recibido: 27/04/2022

Aceptado: 24/08/2022

1. Introducción y antecedentes

El conocimiento sobre la disponibilidad de recursos hídricos en cantidad suficiente y calidad adecuada se ha convertido en una prioridad. Por un lado, debido al significativo incremento de la demanda de agua directamente relacionado con el importante aumento de la población mundial (2600 millones de personas en 1950, 7875 millones en 2021 y previsiones para 2100 de 11000 millones; www.un.org, www.unfpa.org). Por otra parte, el calentamiento global está produciendo notables cambios en los patrones climáticos que repercuten negativamente en la recarga y almacenamiento del agua subterránea. Esto supondrá una notable reducción de los recursos disponibles en las próximas décadas (Goderniaux *et al.*, 2009 y 2015; Abbott *et al.*, 2019) y tendrá una incidencia destacable en el área mediterránea, sobre todo en las zonas de clima árido y semiárido (Llamas *et al.*, 2015; Touhami *et al.*, 2015; Custodio *et al.*, 2016; Moutahir *et al.*, 2017 y 2019; Miró *et al.*, 2021), como es el caso de España, donde se producirán episodios cada vez más frecuentes e intensos tanto de sequías como de lluvias torrenciales que, previsiblemente, se irán incrementando en el futuro (IPCC, 2014 y 2019).

Además, desde el último tercio del siglo pasado, gran parte de España, especialmente la mitad sur, está experimentando un notable incremento de la superficie de riego que utiliza habitualmente agua subterránea. Esta situación ha contribuido al mal estado cuantitativo de determinadas masas de agua subterránea (MITECO, 2020) a lo que se une el incremento de actividades potencialmente contaminantes (agricultura, ganadería intensiva, vertido de aguas residuales, etc.). Este escenario está generando problemas de afección a las aguas subterráneas y ecosistemas asociados, con el incremento en la concentración de nitratos, de metales o de sustancias emergentes (Pérez Gago *et al.*, 2001; López Gutiérrez *et al.*, 2010; Renau-Pruñerosa *et al.*, 2020).

En este contexto, es razonable considerar la explotación de agua subterránea almacenada en formaciones permeables profundas o acuíferos profundos. Sin embargo, existe todavía un gran desconocimiento de los acuíferos localizados a grandes profundidades, sobre todo en lo que respecta a la geometría de la estructura geológica, su funcionamiento hidrogeológico o la calidad y características físico-químicas del agua almacenada. No obstante, en las últimas décadas se han

desarrollado nuevas tecnologías que permiten avanzar en el conocimiento de la corteza terrestre a grandes profundidades. Así, a los avances tecnológicos generados por la exploración de hidrocarburos durante las décadas de 1960 y 1970, hay que sumar la aparición de nuevos intereses geoestratégicos que afectan al medio geológico profundo, como son la geotermia (Pereira *et al.*, 2014; Krawczyk *et al.*, 2019; Wawrzinek *et al.*, 2021; Yuan *et al.*, 2021), el almacenamiento de CO₂ (Tarkowski and Uliasz-Misiak, 2006; Alcalde *et al.*, 2013; Li and Pang, 2017; Diao *et al.*, 2021) o el de residuos peligrosos (Jeziński, 2013; Ivanov *et al.*, 2020). Así mismo, se ha avanzado en la investigación de las cuencas sedimentarias, y particularmente en las formaciones permeables profundas y salinizadas, o en antiguos campos de hidrocarburos agotados, ya que son áreas y depósitos favorables para el almacenamiento de CO₂ antropogénico (Kharaka *et al.*, 2009; Bachu, 2015).

En relación con el estudio sobre el uso potencial de los acuíferos profundos, hay que destacar el trabajo de Post *et al.* (2013) en el que se exponen las enormes posibilidades de investigación futura que ofrece la identificación y uso potencial de reservas de agua subterránea, tanto en acuíferos continentales como las que estén situadas en la plataforma continental. Godfrey *et al.* (2019) investigaron el acuífero profundo (600 m) de arenisca de Ogaden Jesoma (Etiopía), donde las actuaciones se estructuraron en tres fases, que incluyeron: el desarrollo de mapas de idoneidad de aguas subterráneas utilizando datos geológicos y de teledetección, verificación hidrogeológica de los mapas de campo y la perforación de sondeos de investigación en las ubicaciones seleccionadas. El estudio concluye que las captaciones en esta formación profunda pueden aportar agua dulce con unos rendimientos de 15 L/s. Relacionado específicamente con la calidad de las aguas de los acuíferos profundos, en el suroeste de Estados Unidos, Kang *et al.* (2019), identifican volúmenes considerables de aguas subterráneas profundas, potencialmente valiosos para fines domésticos, agrícolas e industriales.

La experiencia a nivel nacional en la investigación de acuíferos profundos es relativamente escasa, aunque se pueden destacar los estudios realizados por el IGME en el acuífero de El Maestrazgo (Castellón) (Antón-Pacheco *et al.*, 2005; Mejías *et al.*, 2008), donde también se evaluó la descarga de agua subterránea al mar mediante

isótopos de radón (García-Orellana *et al.*, 2006). En otro ámbito hidrogeológico cabe mencionar los trabajos que se han venido desarrollando en el acuífero Jurásico de la Loma de Úbeda (Jaén) (González-Ramón *et al.*, 2013; Heredia *et al.*, 2014; Marín Lechado *et al.*, 2018). En ambos casos, tanto la metodología utilizada como el avance en el conocimiento obtenido han servido de referencia a la hora de plantear cómo afrontar la investigación de los acuíferos profundos desde su vertiente metodológica.

El presente trabajo persigue tres objetivos fundamentales: i) definir qué se entiende por acuífero profundo, puesto que puede suscitar diferentes interpretaciones, ii) elaborar una propuesta metodológica específica que ayude a identificar las reservas de agua almacenadas en acuíferos profundos y iii) hacer una primera identificación de acuíferos profundos en la España peninsular. Este trabajo debe entenderse como una primera fase que debe dar paso a una segunda, en la que el objetivo será alcanzar un conocimiento robusto, mediante la realización de estudios específicos de las características geológicas e hidrogeológicas de los acuíferos profundos identificados, de

tal forma que sus aguas puedan ser consideradas como reservas estratégicas temporales para abastecimiento. No obstante, el contexto socioeconómico y medioambiental de cada momento podrá determinar la posibilidad de destinar estas reservas a otros posibles usos.

2. Consideraciones sobre el agua subterránea en los acuíferos profundos

En el medio subterráneo profundo existe un gran volumen de agua almacenado por debajo del horizonte más superficial, en el que se definen la gran mayoría de las masas de agua subterránea incluidas en la planificación hidrológica vigente (Figura 1). Estas masas suelen estar conectadas con el ciclo hidrológico y, por tanto, aportan una determinada cantidad de recursos renovables anuales que se localizan normalmente entre unas decenas y pocos centenares de metros de profundidad.

Como estimación orientativa, cabe tener en cuenta que los recursos renovables subterráneos situados en los 2 km superiores de la corteza te-

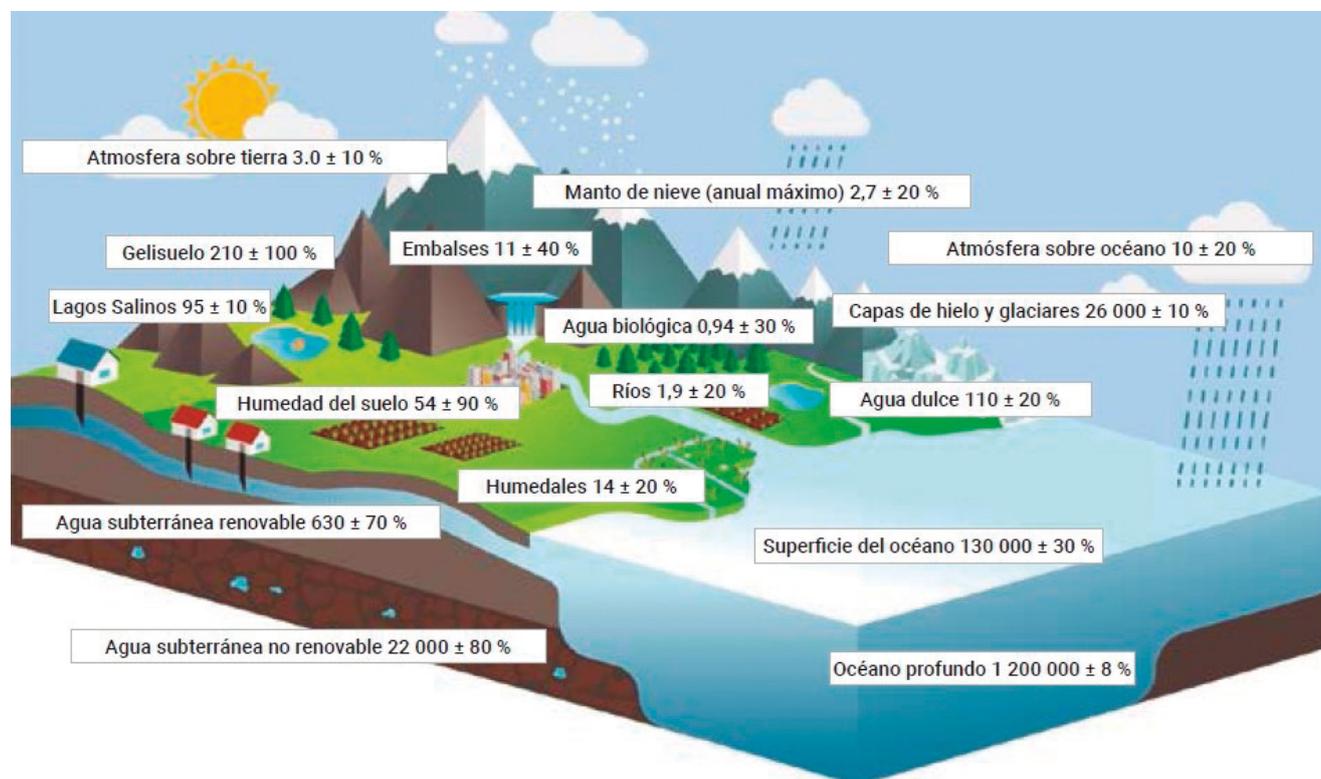


Figura 1. Estimación de volúmenes de agua presentes en el ciclo hidrológico global expresadas en $10^3 \text{ km}^3 \pm \%$ de incertidumbre (modificado de Abbott *et al.*, 2019).

Figure 1. Estimation of water volumes present in the global hydrological cycle expressed in $10^3 \text{ km}^3 \pm \%$ uncertainty (modified from Abbott *et al.*, 2019).

restre suponen un porcentaje en torno al 6% del total de agua subterránea existente (UNESCO UN-Water, 2020). El resto del agua subterránea se encontraría almacenada a una profundidad superior, formando parte de las reservas, cuya reposición, si se produce su aprovechamiento, conlleva a la recuperación de las condiciones hidrológicas naturales durante periodos muy dilatados de tiempo, de varias decenas de años a centenares, según las características hidrogeológicas.

Se puede afirmar, por tanto, que existe un gran volumen de agua subterránea almacenada en el medio profundo, aunque es cierto que pueden existir factores limitantes que no hagan posible un aprovechamiento directo, tal y como ocurre, en ocasiones, en acuíferos más someros. Algunas de estas limitaciones son:

- a) Desconocimiento hidrogeológico de los sectores más profundos de la corteza terrestre (Tsang and Niemi, 2013): resulta fundamental conocer el volumen de agua almacenado que podría ser recuperable desde el punto de vista técnico, económico y ambiental (Alley, 2007). Pero para obtener esta información, el coste de la investigación suele ser muy elevado debido principalmente a la necesidad de aplicar tecnologías de caracterización y de perforación similares a las de la prospección de hidrocarburos (Alley *et al.*, 2013).

Además, a priori, la calidad del agua a gran profundidad es inadecuada para los usos más convencionales (abastecimiento y riego), por lo que tradicionalmente estos acuíferos no han sido objeto de investigaciones específicas. Asimismo, en determinados contextos hidrogeológicos, existen importantes incertidumbres relacionadas con la posible afección a las formaciones superficiales, las que se definen en la planificación hidrológica, por el posible aprovechamiento de las formaciones profundas (Lapworth *et al.*, 2018).

En la planificación hidrológica en España, la disponibilidad de agua en superficie, en los acuíferos próximos a esta, ha sido hasta ahora considerada suficiente, tanto en calidad como en cantidad. Esta situación ha derivado en que la investigación de las formaciones permeables más profundas no haya sido una prioridad.

- b) El agua subterránea profunda almacenada en rocas duras (ígneas y metamórficas), se encuentra dispersa en una red de fracturas que no permiten extraer un flujo económicamente aprovechable (UNESCO, 1985). También en determinadas formaciones sedimentarias permeables existen singularidades estructurales y tectónicas que condicionan su aprovechamiento.
- c) La tasa de renovación, cociente entre la tasa de recarga y el volumen, en los acuíferos profundos determina, generalmente, que la renovación del agua sea lenta o muy lenta. Según Gleeson *et al.* (2016), aproximadamente un 40% del agua subterránea almacenada tiene un tiempo de renovación superior a los 100 años. Este aspecto entra en conflicto con el concepto de sostenibilidad que preside la filosofía de la Directiva Marco Europea del Agua (DMA), ya que no pueden considerarse estas reservas de agua como un recurso disponible, sobre todo en el caso de que se definan como aguas fósiles no renovables. Esto tiene relación con el hecho de que, en determinados casos, si se cumplen los requisitos que garantizan la idoneidad del agua a extraer, podría valorarse plantear como solución de emergencia la explotación de las reservas de agua almacenadas, práctica que se conoce como “minería del agua” (Custodio, 2015).
- d) Y, finalmente, el coste del aprovechamiento y su calidad son factores clave a la hora de tomar la decisión de extraer agua subterránea. Por tanto, en el caso de la captación de agua a profundidades de varios centenares de metros, el factor económico debe ser analizado de manera prioritaria. En este sentido, a la hora de decidir su explotación, tanto el análisis económico (en el término de “reservas económicamente explotables”) como el de los umbrales tolerables de calidad del agua, son aspectos que deben marcar la viabilidad y los límites razonables de su aprovechamiento. Además, teniendo en cuenta los escenarios temporales complejos que se prevén desde el punto de vista del cambio climático global, cabría considerar el uso transitorio de estos volúmenes de agua integrándolos en la planificación hidrológica.

3. Metodología

3.1. Definición de acuífero profundo

Las premisas básicas que se han seguido a la hora de considerar una formación permeable como acuífero profundo son las siguientes:

- a) La profundidad debe ser superior a 300 m, si se toma como referencia la profundidad del nivel freático en un acuífero libre, o bien, la del techo de la formación permeable en el caso de un acuífero confinado.
- b) Se considera también acuífero profundo al horizonte inferior de acuíferos de gran espesor (a partir de una profundidad superior a 300 m), de los cuales se conoce y aprovecha su horizonte más superficial (flujos activos), pero se desconoce, en gran medida, el funcionamiento de su parte más profunda (flujos de lenta renovación).

Por otra parte, con el fin de considerar a los acuíferos profundos como reservas estratégicas de agua en casos de emergencia hídrica en la planificación hidrológica nacional, en especial como elemento regulador, es importante: i) delimitar las diferencias conceptuales que hay entre recurso renovable (caudal de agua) y reserva (volumen de agua que se puede extraer) y ii) establecer esquemas hídricos que hagan compatibles el uso de los recursos y las reservas bajo una perspectiva medioambiental. En cuanto a las situaciones de emergencia bajo las que cabría plantearse el uso de estas reservas estratégicas se encontrarían los eventos de sequía prolongada, la contaminación química y/o biológica y otros efectos negativos, referidos principalmente a las consecuencias que tendrá el cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos.

3.2. Inventario de acuíferos profundos

La identificación, delimitación, catalogación y valoración de determinados acuíferos profundos como potenciales reservas estratégicas de agua subterránea se ha realizado a partir del análisis de la información hidrogeológica recopilada.

El primer paso, por tanto, ha consistido en la identificación de las zonas potencialmente favorables y en la elaboración de un inventario de acuíferos profundos dentro de la España peninsular, organizado por demarcaciones hidrográficas. Este inventario se ha basado en diversos

criterios que se exponen a continuación, si bien cabe destacar que no se trata de un inventario completo, sino que queda abierto a la incorporación de otros acuíferos en la medida que el conocimiento de la hidrogeología profunda a escala regional o local permita disponer de información suficiente para su incorporación.

Para la identificación de los acuíferos profundos no se han impuesto límites estrictos en lo referente a:

- a) El tipo de acuífero, litología, tipo de porosidad, parámetros hidráulicos de la formación, etc.
- b) La calidad del agua, toda vez que no ha sido definido inicialmente el uso de estas aguas y, por tanto, unos requerimientos de calidad concretos.
- c) La profundidad de referencia en cuanto al límite inferior del posible acuífero profundo (profundidad de muro de la formación). La identificación se ha limitado a definir la formación en cuestión, si bien podría ocurrir que únicamente fuera aprovechable una parte de esta, por ejemplo, un sector aislado del acuífero o el tramo superficial de la formación identificada como acuífero profundo.

3.3. Caracterización hidrogeológica inicial de los acuíferos profundos

Para la caracterización inicial de los acuíferos profundos se ha hecho un trabajo de recopilación y síntesis de la información disponible a nivel geológico e hidrogeológico. El grado de conocimiento de los acuíferos profundos suele ser muy limitado, si bien en ciertos casos se cuenta con un volumen de información disponible relativamente amplio.

La información recopilada procede de todo tipo de fuentes y ámbitos de investigación (estudios hidrogeológicos regionales o locales, proyectos técnicos, documentos de planificación hidrológica, proyecto ALGECO2, sondeos del petróleo, etc.) y se ha estructurado en 5 grandes bloques (Tabla 1).

3.4. Propuesta para la valoración de los acuíferos profundos identificados

Una de las principales contribuciones de este trabajo ha sido elaborar una propuesta que per-

1. Localización e identificación Localización con respecto a los límites administrativos, políticos e hidrológicos	<ul style="list-style-type: none"> – Comunidad/es autónoma/s – Provincia/s – Demarcación/es hidrográfica/s – Masa/s de agua subterránea, incluido el caso en que el acuífero se identifique en un área no definida como masa de agua subterránea – Situación geográfica en superficie – Área poligonal en superficie – Coordenadas del punto representativo (centroide)
2. Información geológica Información geológica necesaria para su dimensionamiento y caracterización	<ul style="list-style-type: none"> – Estructura geológica – Profundidad mínima y máxima (formación) – Potencia o rango de variación – Formación/es geológica/s que dan lugar al acuífero profundo – Litología/s
3. Hidrogeología Información hidrogeológica disponible y que puede aportar datos de interés para la caracterización del acuífero profundo y su posterior valoración como potencial reserva estratégica	<ul style="list-style-type: none"> – Régimen de acuífero – Tipo de porosidad – Parámetros hidráulicos – Piezometría – Conexión del acuífero con la superficie y/o con otros acuíferos – Estimación volumétrica de reservas – Datos hidroquímicos e isotópicos – Modelo hidrogeológico conceptual
4. Estado actual Información para valorar las condiciones del acuífero profundo y considerar posteriormente sus posibilidades de aprovechamiento	<ul style="list-style-type: none"> – Estado de aprovechamiento actual – Existencia de proyectos de otros posibles aprovechamientos que pueden interferir en su definición como reserva estratégica – Valoración del interés de la definición como potencial reserva estratégica en función de las necesidades actuales o potenciales requerimientos de uso locales, como puede ser el abastecimiento alternativo a una población
5. Bibliografía Información fundamental dado el escaso grado de conocimiento de la hidrogeología profunda	<ul style="list-style-type: none"> – Recopilar y unificar las referencias bibliográficas consultadas

Tabla 1. Relación de la información adquirida en la identificación de los acuíferos profundos seleccionados

Table 1. List of the information obtained in the identification of the selected deep aquifers

mita valorar los acuíferos profundos identificados como potencial reserva estratégica. En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo planteado con las líneas básicas del proceso.

En este diagrama se indican los aspectos considerados relevantes que tienen que ser estudiados antes de calificar la idoneidad de un acuífero profundo como reserva estratégica. Estos aspectos son los siguientes:

- Estratigrafía y geología estructural: el conocimiento estratigráfico y estructural, unido a la disposición de las capas geológicas y su permeabilidad aportará información sobre el tipo de acuífero: libre, confinado o semi-confinado.
- Conocimiento previo (funcionamiento/renovación de agua): la existencia de informa-

ción previa sobre el funcionamiento, áreas de recarga, piezometría, etc. del acuífero ayudará a conocer si hay renovación del agua subterránea almacenada y la forma de conexión con las zonas de recarga y descarga. En esta fase será fundamental tener un valor aproximado del volumen de agua subterránea almacenada. Con esta información se puede esbozar un modelo hidrogeológico conceptual inicial que explique el funcionamiento del acuífero.

- Calidad: la litología dominante en la estructura, el tiempo de residencia del agua en el acuífero o las condiciones de contorno de la formación permeable pueden ser factores determinantes en la calidad del agua del acuífero, ya que condicionan su grado de mineralización. Además, ciertos procesos y

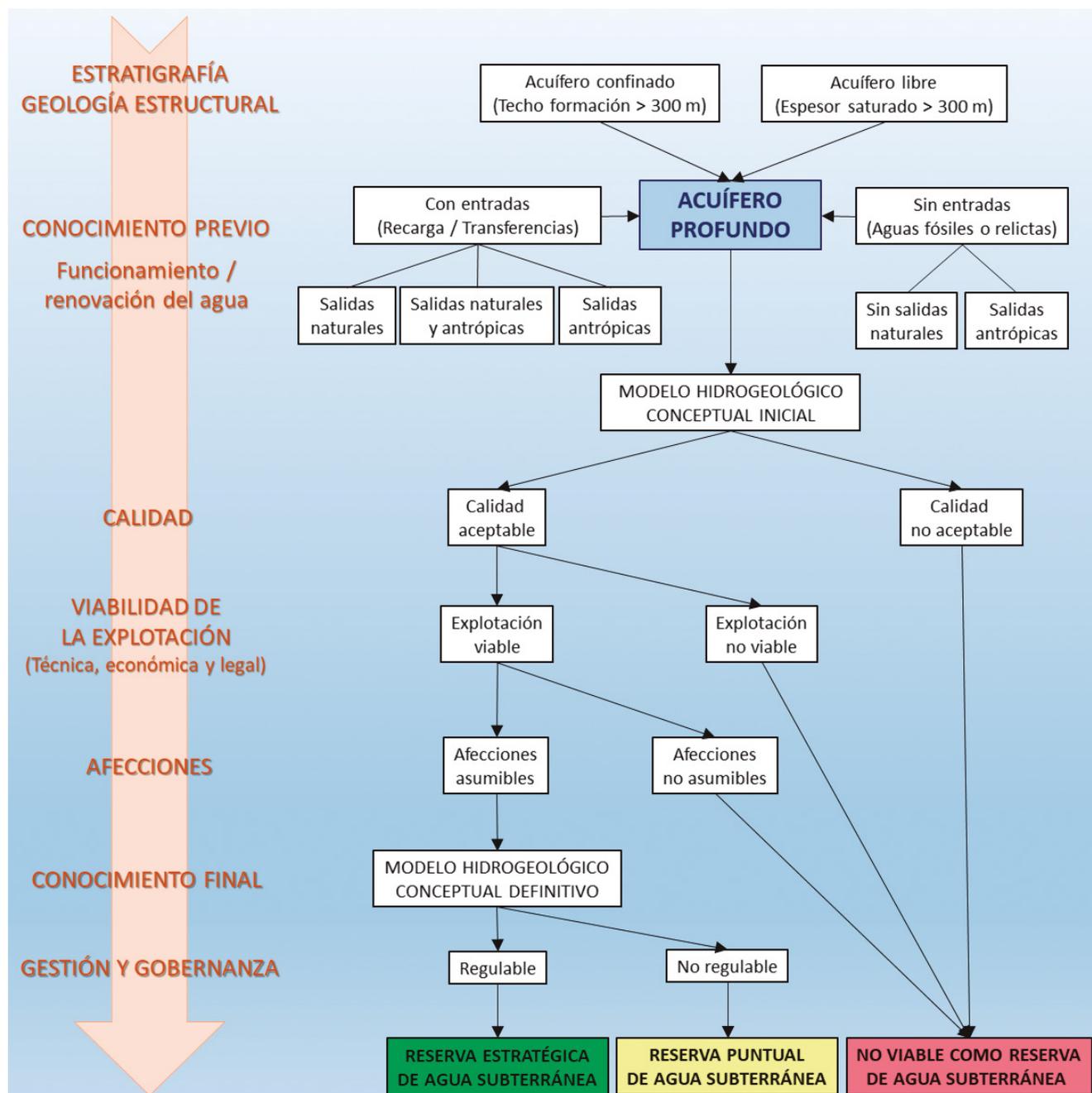


Figura 2. Esquema del proceso de valoración de un acuífero profundo como potencial reserva estratégica de agua subterránea.

Figure 2. Scheme of the valuation process of a deep aquifer as a potential strategic groundwater reserve.

reacciones químicas pueden causar cambios locales en la permeabilidad o la porosidad, así como en el flujo subterráneo (Tsang and Niemi, 2013).

- Viabilidad de la explotación: el aprovechamiento de un acuífero profundo puede llegar a ser un importante reto tecnológico y suele ir acompañado de un elevado coste económico. Además, determinados aspectos transversales tienen que ser valorados, ya que

tienen que cumplir con la legalidad vigente, especialmente en relación con la normativa en materia de agua y medio ambiente. Factores ineludibles que deben ser valorados y actualizados son la compatibilidad de usos, conocer si el volumen de agua cubre las demandas o analizar si los costes de la operación (perforación y explotación) son viables. Del mismo modo, la legislación aplicable sufre constantes modificaciones, por lo que las

políticas en materias relacionadas con los recursos hídricos y razones de índole socioeconómico y ambiental, pueden marcar en un futuro el desarrollo de un marco normativo específico que regule la explotación de estas reservas estratégicas de agua.

- Afecciones: hay que considerar especialmente los posibles efectos negativos que pudieran ocasionar tanto la construcción de la captación como la explotación del acuífero. Por tanto, es importante destacar que las posibles afecciones deberán ser analizadas antes de valorar si son asumibles y compatibles con el medio natural y sus servicios ecológicos. Además, será necesario diseñar y operar con redes de control durante la fase de aprovechamiento, así como en la fase previa y posterior.
- Conocimiento final: con la información obtenida y recopilada es necesario redefinir el modelo hidrogeológico conceptual, que ayude a conocer el funcionamiento del acuífero antes de planificar su uso y gestión. En el caso de que persistan algunas incertidumbres, se deberán realizar los trabajos de investigación necesarios para conocer con detalle las características del acuífero (parámetros hidráulicos, volumen de las reservas, geometría del acuífero, conexiones hidráulicas con otras formaciones acuíferas y/o con la superficie, etc.) y planificar una correcta explotación del mismo.
- Gestión y gobernanza: este aspecto está directamente relacionado con el hecho de que sea, o no, un recurso renovable. Si un acuífero profundo tiene recarga de agua, significa que los recursos hídricos extraídos serán renovados. La capacidad de renovación permitirá gestionar los recursos (regulable), por el contrario, si se trata de un acuífero en el que no existen entradas de agua, se estaría ante unas reservas de uso puntual (no regulable).

4. Acuíferos profundos peninsulares: análisis por demarcaciones hidrográficas

En total, se han identificado 64 acuíferos profundos en el territorio nacional peninsular (Tabla 2). Estos acuíferos se han agrupado según la demarcación hidrográfica en la que se sitúan, o

bien, si el acuífero abarca el territorio de dos o más demarcaciones se ha asignado a la demarcación hidrográfica en la que ocupa una mayor extensión (Figura 3).

Cabe mencionar que, en esta primera fase, no se han inventariado acuíferos profundos en todas las demarcaciones, ya que aquellas zonas en las que su litología es predominantemente ígnea y metamórfica, en principio, no resultan potencialmente favorables para la presencia de este tipo de formaciones permeables profundas, como es el caso de las demarcaciones hidrográficas de Galicia Costa y del Miño-Sil. Esto no quiere decir que en estas áreas no puedan existir acuíferos profundos, sino que además de constituir, en su caso, una excepción en términos hidrogeológicos, el conocimiento que se tiene actualmente, a efectos prácticos, es nulo y no permite establecer ninguna hipótesis sobre la idoneidad y características de estas posibles formaciones.

La información de los 64 acuíferos se puede consultar en la base de datos y en las fichas descriptivas depositadas en el Centro de Documentación del IGME. No obstante, a continuación, como ejemplo de potenciales formaciones permeables profundas, se incluye de manera simplificada la información hidrogeológica de tres acuíferos profundos con diferentes características litológicas y rasgos estructurales. El primero de estos acuíferos corresponde a la fosa tectónica del Valle de Amblés, ubicada al sur de la cuenca hidrográfica del río Duero; los otros dos acuíferos seleccionados son el acuífero detrítico de Madrid, cuenca intramontañosa de espesor muy variable ubicada en la cuenca hidrográfica del río Tajo, y el acuífero de El Maestrazgo, que constituye una secuencia sedimentaria de gran espesor con sectores según el tipo de estructura, situado en la cuenca hidrográfica del río Júcar.

4.1. Valle de Amblés

El valle ocupa el sector centro oriental de la provincia de Ávila y se sitúa a ambos lados del río Adaja (Figura 4), desde la población de Villatoro hasta Tornadizos de Ávila. La extensión considerada para el acuífero profundo es coincidente con la superficie de la masa de agua subterránea Valle de Amblés, que alcanza los 242 km².

El valle de Amblés es una fosa tectónica rellena de materiales detríticos terciarios de edad Eoceno-Oligoceno (arcosas, con alternancia de arcillas y arenas arcillosas), procedentes de la

ID	Demarcación hidrográfica	Código acuífero profundo	Denominación	Nº de acuíferos por demarcación
1 2 3	Cantábrico Oriental	APROF_017_01 APROF_017_02 APROF_017_03	Anticlinal Norte San Sebastián Mesozoico de Aizkorri - Aralar - Basaburúa	3
4 5 6 7 8 9 10 11 12	Cantábrico Occidental	APROF_018_01 APROF_018_02 APROF_018_03 APROF_018_04 APROF_018_05 APROF_018_06 APROF_018_07 APROF_018_08 APROF_018_09	Sinclinal de Somiedo Yermes - Tamezo Paleozoico de Oviedo Ponga - Ribadesella Picos de Europa Cabuerniga Puerto del Escudo Santillana - Santander Alisos	9
13 14 15 16 17 18 19 20 21	Duero	APROF_020_01 APROF_020_02 APROF_020_03 APROF_020_04 APROF_020_05 APROF_020_06 APROF_020_07 APROF_020_08 APROF_020_09	Jurásico Oriental de Soria Acuífero de Gormaz Cretácico Cantimpalos Cuenca de Almazán Terciario detrítico bajo Los Páramos Terciario Sur del Duero Terciario Salamanca Valle de Amblés Valdecorneja	9
22 23 24 25 26 27	Tajo	APROF_030_01 APROF_030_02 APROF_030_03 APROF_030_04 APROF_030_05 APROF_030_06	Cuenca de Loranca Portillo - Priego Terciario detrítico de Madrid Torrelaguna - Jadraque Sierra Cañaverál - Monfragüe Galisteo	6
28 29 30	Guadiana	APROF_040_01 APROF_040_02 APROF_040_03	Mesozoico de Altomira Jurásico de la Llanura Manchega Cámbrico carbonatado de Jabugo - Las Chinas	3
31 32 33 34 35 36	Guadalquivir	APROF_050_01 APROF_050_02 APROF_050_03 APROF_050_04 APROF_050_05 APROF_050_06	Acuífero termal Depresión de Granada Acuífero carbonatado Loma de Úbeda Acuífero transgresivo Mioceno de Base Sierra Gorda - Arroyo Salar Sierra de Baza Occidental Sierra de Baza Oriental	6
37 38 39	Cuencas Mediterráneas Andaluzas	APROF_060_01 APROF_060_02 APROF_060_03	Campo de Dalías Sierra de los Merinos - Barranco Plioceno profundo Bajo Guadalorce	3
40 41	Guadalete y Barbate	APROF_063_01 APROF_063_02	Sierra de las Cabras Sierra de Líbar - Sierra del Endrinal	2
42	Tinto, Odiel y Piedras	APROF_064_01	Desembocadura Tinto - Odiel	1
43 44 45 46 47 48 49 50	Segura	APROF_070_01a APROF_070_01b APROF_070_02 APROF_070_03 APROF_070_04 APROF_070_05a APROF_070_05b APROF_070_06	Alcadozo - Boquerón. Sector Alcadozo Alcadozo - Boquerón. Sector Boquerón Cingla Jumilla - Yecla Ascoy - Sopalmo Serral - Salinas. Sector Yecla Serral - Salinas. Sector Pinoso Sierra del Segura	8

ID	Demarcación hidrográfica	Código acuífero profundo	Denominación	Nº de acuíferos por demarcación
51	Júcar	APROF_080_01	Cabranta	5
52		APROF_080_02	Plana de Valencia Sur	
53		APROF_080_03	Depresión de Benisa	
54		APROF_080_04a	EI Maestrazgo. Zona Oriental Fallada	
55		APROF_080_04b	EI Maestrazgo. Zona Central Subtabular	
56	Ebro	APROF_091_01	Sinclinal de Villarcayo	6
57		APROF_091_02	Sinclinal de Tresp	
58		APROF_091_03a	Alfamén Mioceno	
59		APROF_091_03b	Alfamén Jurásico	
60		APROF_091_04	Campo de Belchite	
61		APROF_091_05	Mesozoico de La Galera	
62	Distrito de la Cuenca Fluvial de Cataluña	APROF_100_01	Alto Llobregat	3
63		APROF_100_02	Serrat - Mantos intermedios	
64		APROF_100_03	Depresión de Empordá	

Tabla 2. Relación de acuíferos profundos identificados por demarcaciones hidrográficas (en negrita los acuíferos profundos descritos a continuación).

Table 2. List of deep aquifers identified by river basin districts (in bold the deep aquifers described below).

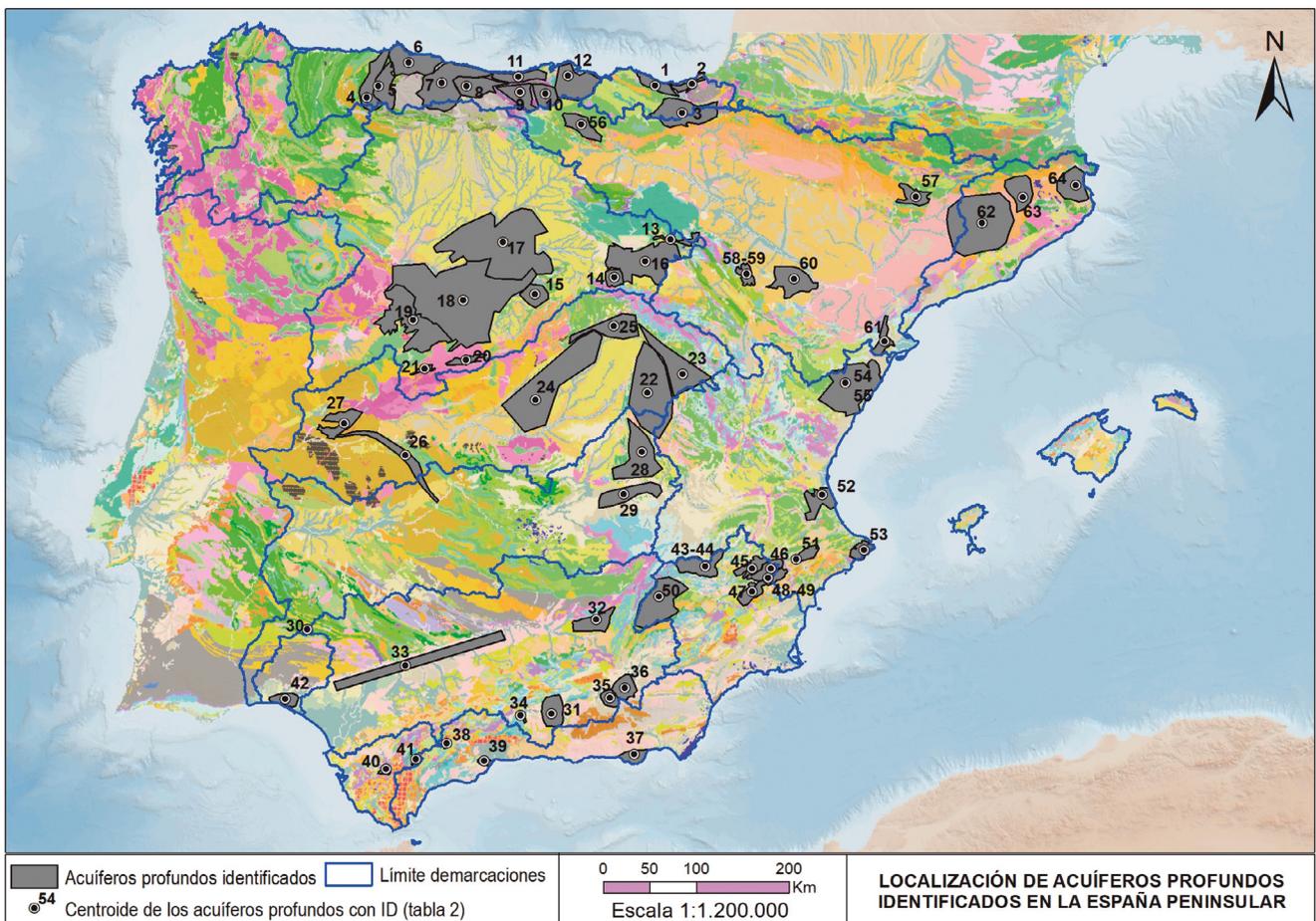


Figura 3. Acuíferos profundos identificados y delimitación en las demarcaciones hidrográficas peninsulares.

Figure 3. Identified deep aquifers and delimitation in the peninsular hydrographic river basins.

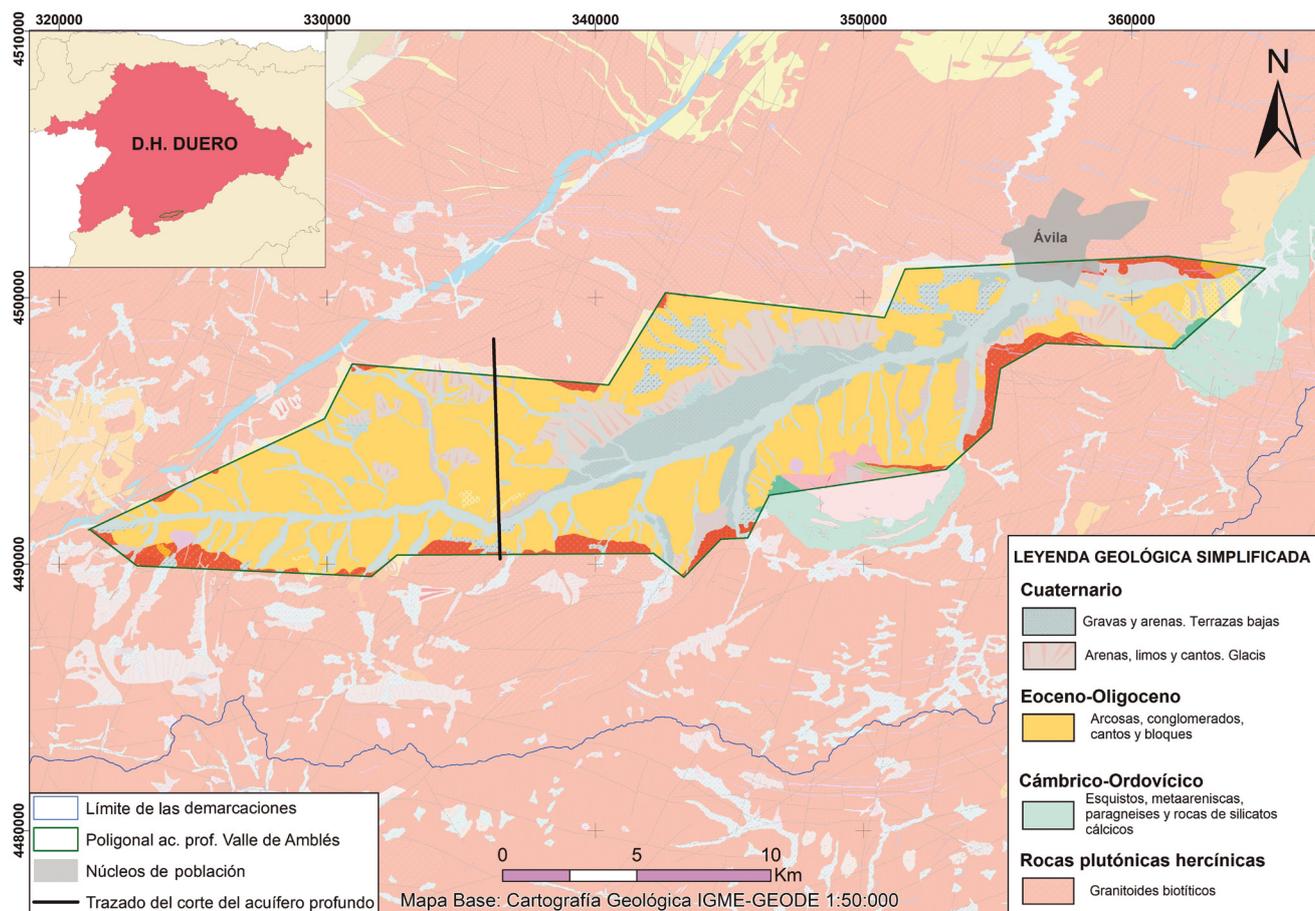


Figura 4. Situación del acuífero profundo Valle de Amblés.

Figure 4. Location of the deep aquifer of Amblés Valley.

erosión de los materiales ígneos y metamórficos que circundan el valle y, a la vez, constituyen el zócalo impermeable (ITGE, 1991), interrumpiendo cualquier conexión con otros acuíferos de entidad. Estos niveles fueron depositados en una fosa definida por fracturas de dirección NE-SO y ONO-ESE, de origen tardihercínico, la cual tiene forma alargada según la dirección E-O (IGME-DGA, 2009). Estos materiales son los que constituyen el acuífero, tanto en sus tramos más superficiales como en profundidad. Es decir, en este caso, se considera como acuífero profundo la zona más profunda de un acuífero de gran espesor. Se trata de una formación permeable por porosidad intergranular, y está formado por varias sucesiones de arcosas poco elaboradas en matriz arcillosa, entre las que se intercalan niveles de arcillas y limos de potencias variables; sufriendo, todo este conjunto, importantes variaciones laterales y verticales. Los espesores de estos sedimentos, como consecuencia de la gran compartimentación de la fosa, muestran fuertes variaciones (Figura 5), habiéndose detectado

potencias mayores de 600 m al SE de la ciudad de Ávila y la localidad de La Torre, en los extremos oriental y occidental respectivamente y, superando los 1000 m al SE de la localidad de El Fresno, en la zona centro-este de la fosa tectónica. Según IGME (1980) se le puede atribuir una transmisividad del orden de 40 m²/día.

4.2. Acuífero detrítico de Madrid

Se encuentra en la zona centro oriental de la cuenca del río Tajo (Figura 6), con una morfología alargada según la dirección NE-SO, una longitud de su eje mayor de unos 130 km y 26 km de anchura media. Su extremo nororiental se encuentra en la provincia de Guadalajara, entre las localidades de Humanes y Puebla de Belaña y continúa por la franja central de la provincia de Madrid, incluyendo la capital, donde tiene un mayor desarrollo, hasta llegar a la provincia de Toledo, extendiéndose hasta las localidades de Escalona y Toledo capital. Hidrográficamente destacan en superficie los ríos Torote, Jarama, Manzanares y Guadarrama.

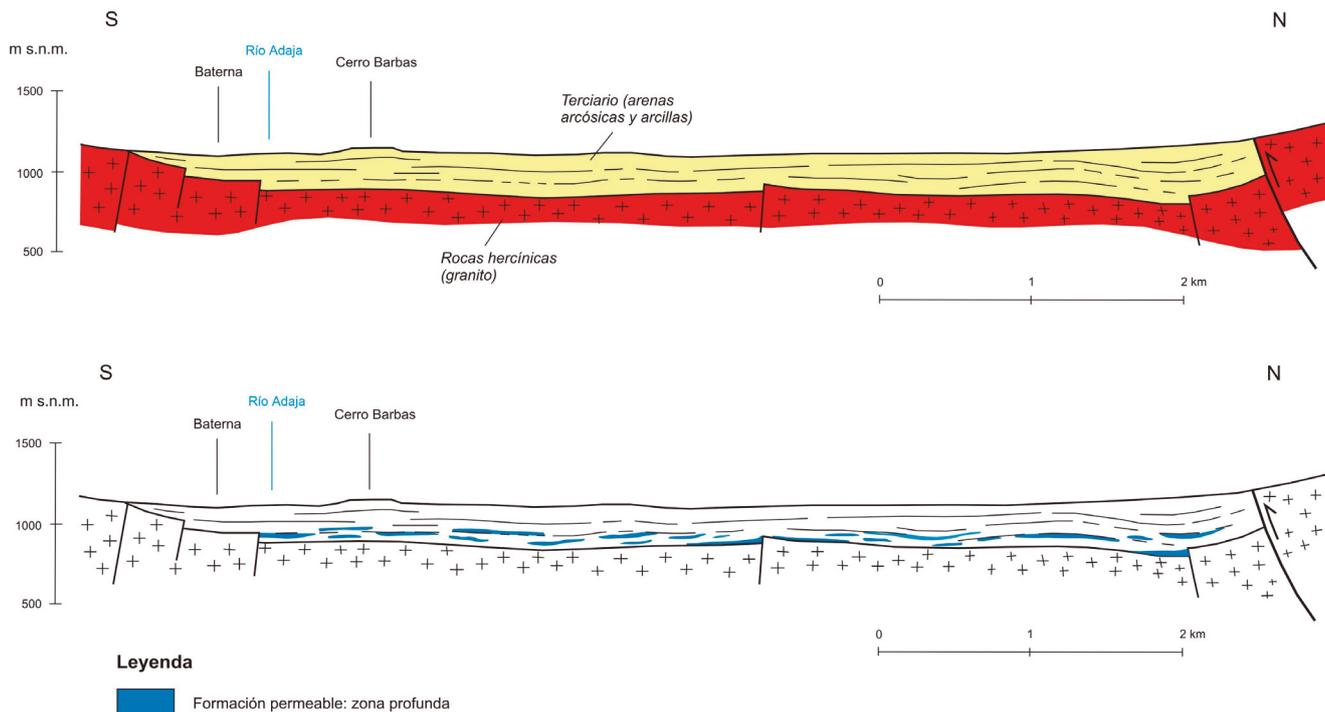


Figura 5. Perfil geológico e hidrogeológico del acuífero profundo Valle de Amblés.
Figure 5. Geological and hydrogeological profile of the deep aquifer of Amblés Valley.

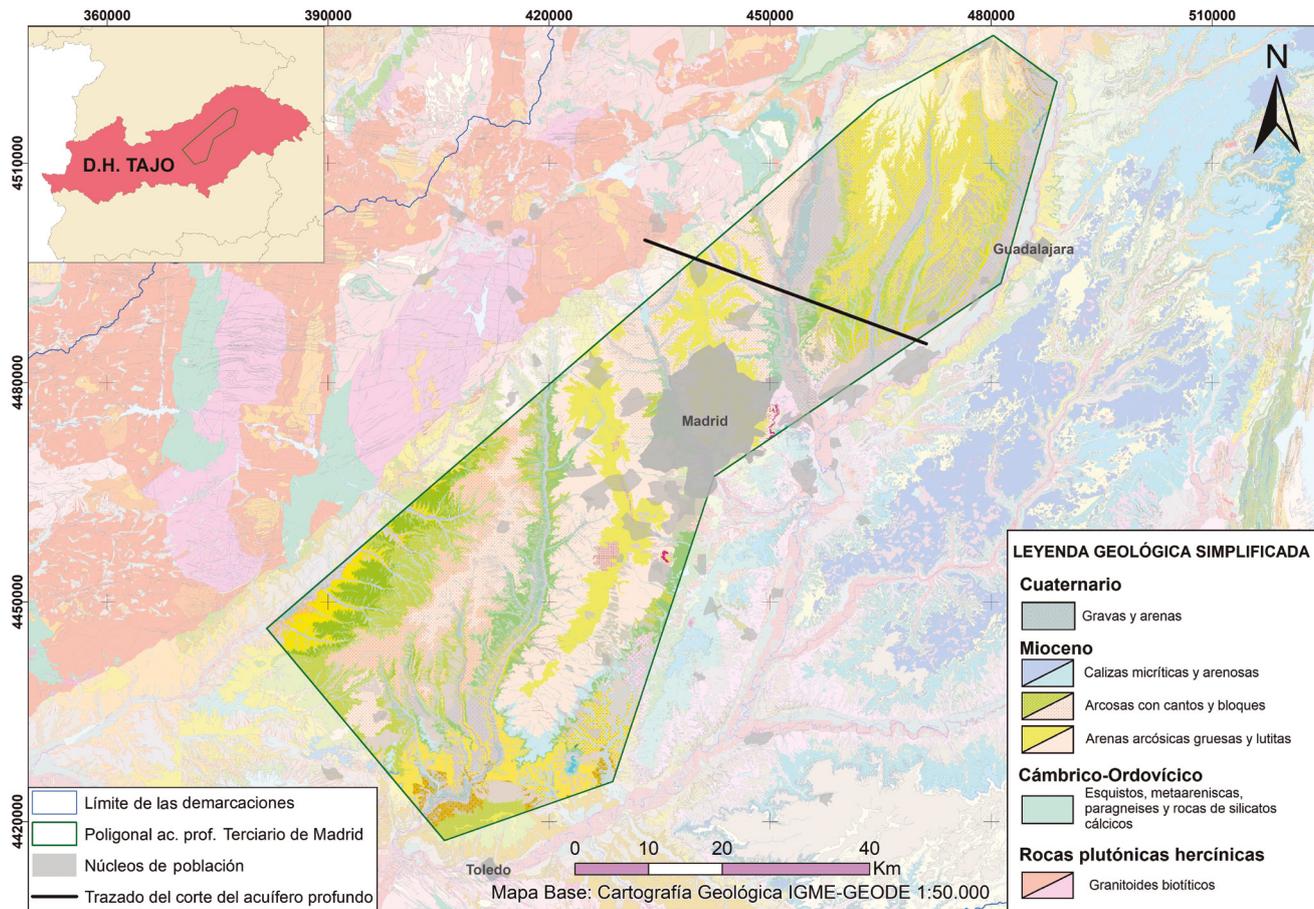


Figura 6. Situación del acuífero profundo detrítico de Madrid.
Figure 6. Location of the deep detrital aquifer of Madrid.

El acuífero profundo se instala en una sub-cuenca tectónica del Paleógeno-Neógeno, dentro de la gran cuenca terciaria del Tajo, constituyendo una cuenca intramontañosa situada entre el Sistema Central, los Montes de Toledo y el Sistema Ibérico, que constituyen el área fuente de los niveles de relleno de la cuenca (Figura 7).

El espesor del acuífero está condicionado por la profundidad del basamento Paleozoico-Cretácico, aunque se puede hablar de potencias mínimas de 75 m en las zonas de borde, hasta 1200 m en sectores centrales de la cuenca (López-Vera, 1977). Otros autores llegan a asignar una potencia máxima de 3000 m (Cadavid, 1977) para el conjunto Terciario, de distribución irregular por presencia de umbrales en el basamento.

El relleno está formado por depósitos de abanicos aluviales superpuestos, dispuestos en un conjunto de lentejones arenosos-arcillosos de pequeño tamaño, distribuidos en una matriz arcillosa, correspondientes a las facies detríticas del relleno Neógeno de la cuenca. Concretamente son conglomerados (con cantos graníticos y metamórficos), gravas finas, arenas arcósicas (constituidas por clastos de cuarzo, feldspatos y micas, con matriz arcillosa) y cuerpos de arcillas intercalados.

Se consideraría como nivel más favorable el sector más profundo de la Unidad Detrítica Superior (Neógeno), aunque también cabría considerar la Unidad Detrítica Inferior (Paleógeno). La estructura de cuenca sedimentaria le da a este acuífero multicapa, en conjunto, un carácter libre de gran potencia, heterogéneo y anisótropo y de baja permeabilidad. La permeabilidad media horizontal (Martínez-Alfaro, 1980) es del orden de 0.1 a 0.25 m/día, y la permeabilidad media vertical equivalente para el conjunto alternante de capas arenosas y arcillosas es de unas 50 a 200 veces inferior a la horizontal. Su baja permeabilidad vertical le confiere

un carácter de acuífero de tipo "cuenca". La estructura de cuenca sedimentaria le da a este acuífero multicapa, en conjunto, un carácter libre de gran potencia, heterogéneo y anisótropo y de baja permeabilidad. La permeabilidad media horizontal (Martínez-Alfaro, 1980) es del orden de 0.1 a 0.25 m/día, y la permeabilidad media vertical equivalente para el conjunto alternante de capas arenosas y arcillosas es de unas 50 a 200 veces inferior a la horizontal. Su baja permeabilidad vertical le confiere

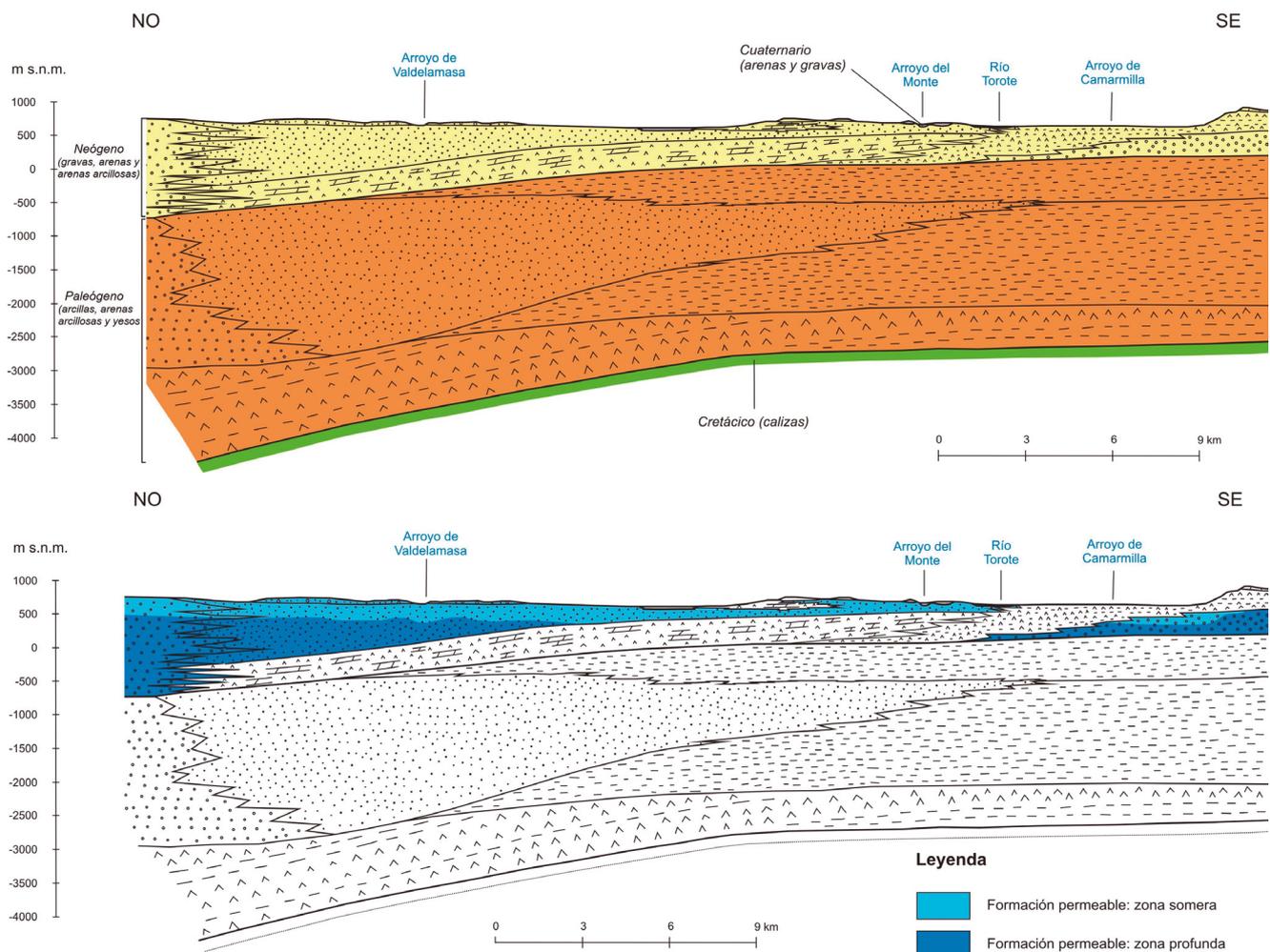


Figura 7. Perfil geológico e hidrogeológico del acuífero profundo detrítico de Madrid.

Figure 7. Geological and hydrogeological profile of the deep detrital aquifer of Madrid.

re un comportamiento hidráulico más parecido a un acuitardo que a un acuífero en sentido estricto.

Los niveles superficiales recargan mediante goteo el detrítico semiconfinado por capas de limos y arcillas, constituyendo así, su principal entrada de agua. La descarga se realiza a los cauces fluviales, dando lugar a dos tipos de flujo: uno local y somero, a cauces fluviales adyacentes al interfluvio, y otro regional o profundo, a cauces más lejanos al interfluvio. La descarga de su zona más somera también se produce por la extracción de agua de los pozos situados en el Terciario, aproximadamente unos 70 hm³/año.

Los modelos conceptuales de flujo que mejor se ajustan son los de Hubbert (1940) y Tóth (1963). De acuerdo con el primero de ellos, desarrollado para acuíferos libres, homogéneos e isotropos, en los interfluvios el potencial hidráulico disminuye al aumentar la profundidad, es decir, los pozos más profundos tienen sus niveles estáticos más profundos, mientras que, en las zonas de descarga, fondos de valle principalmente, el potencial hidráulico aumenta con la profundidad

(Figura 7). Asimismo, según el esquema de Tóth, la existencia de flujos locales, intermedios y regionales, conlleva a que en las zonas de descarga pueden confluir aguas con muy distintos recorridos y por tanto de muy distintos tiempos de residencia en el acuífero.

4.3. Acuífero de El Maestrazgo

El acuífero comprende el Alto y Bajo Maestrazgo (2400 km²). Se localiza entre la parte norte de la provincia de Castellón y la parte sureste de la provincia de Teruel (Figura 8). Geológicamente se encuentra en el sector oriental de la Cordillera Ibérica, en una zona considerada de transición hacia las Cadenas Costeras Catalanas (Canérot, 1974). Se han diferenciado dos zonas estructuralmente diferentes denominadas: Oriental Fallada y Central Subtabular.

A escala regional el acuífero está formado por materiales carbonatados de edad jurásica y del tránsito Jurásico-Cretácico. Presentan alta transmisividad por fisuración y karstificación (ITGE,

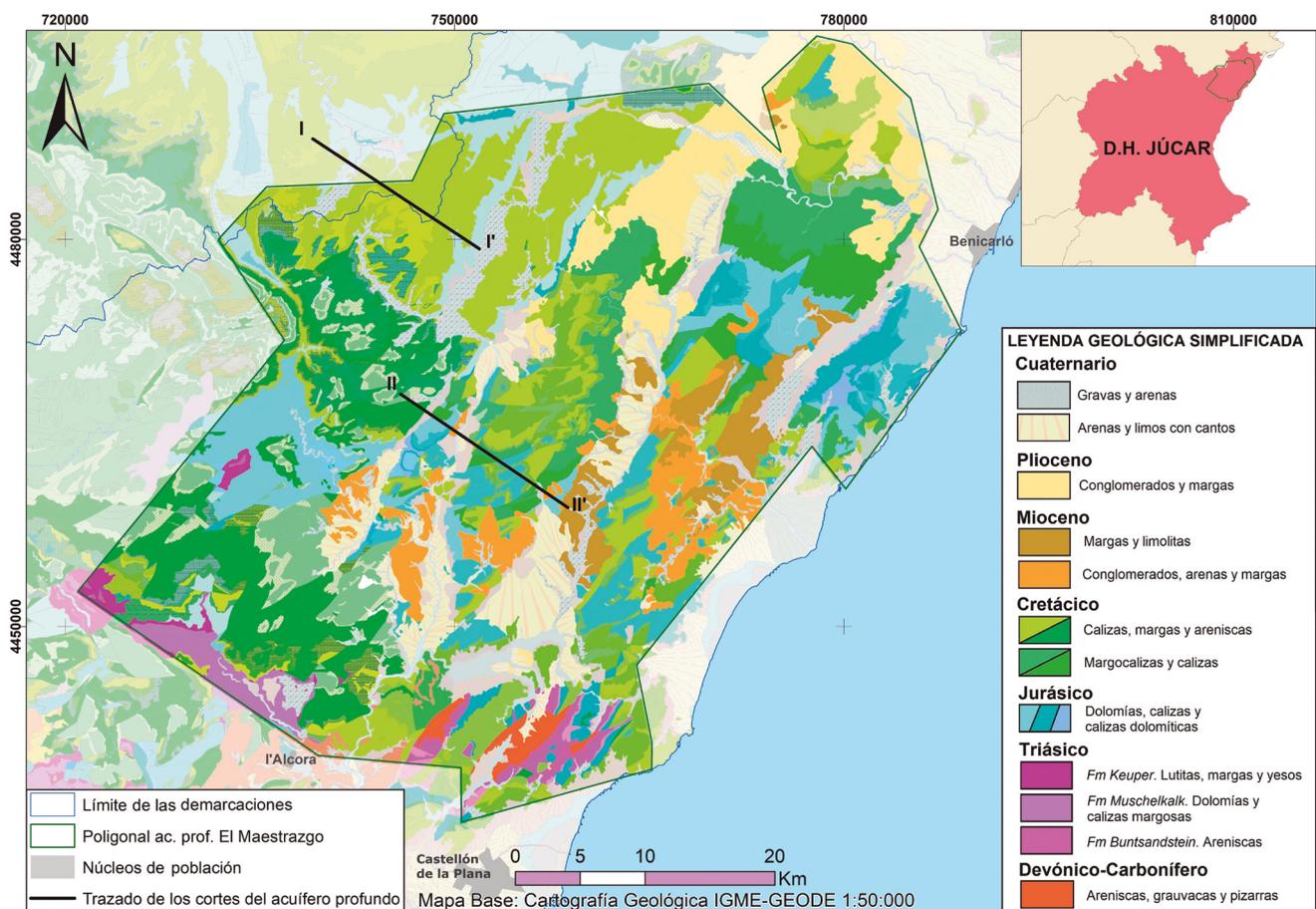


Figura 8. Situación del acuífero profundo El Maestrazgo.

Figure 8. Location of the deep El Maestrazgo aquifer.

1998) y su espesor medio está cercano a los 450 m, con valores máximos en el sector costero de la Sierra de Irta que alcanzan los 700 m (ITGE, 1998). En otros trabajos se indican potencias medias más elevadas para el acuífero Jurásico que oscilarían entre 1000 y 1500 m (Mejías *et al.*, 2008). Una alternancia de calizas y margas con horizontes arenosos y arcillosos del Cretácico inferior son los materiales que diferencian hidráulicamente los principales tramos del acuífero regional Jurásico del resto de formaciones permeables. La base impermeable del acuífero la conforman las arcillas y margas con yesos del Triásico (facies Keuper). El flujo subterráneo se dirige perpendicular a la línea de costa desde las áreas de recarga localizadas en zonas interiores.

La descarga media estimada en algunos estudios (García-Orellana *et al.*, 2006; Mejías *et al.*, 2008) muestra una elevada variabilidad y aunque es muy complejo calcular su balance hídrico, hay coincidencia a la hora de destacar la importancia de las descargas al mar, ya que de manera localizada o difusa las salidas al mar se han estimado que pueden estar entre 64 y 175 hm³/año. El conocimiento previo sobre el acuífero identifica la zona más cercana a la costa como la más favo-

rable desde el punto de vista hidrodinámico para la captación de agua subterránea.

Hay que apuntar que los estudios previos de caracterización del acuífero (Antón-Pacheco *et al.*, 2005) sugieren profundizar en la investigación de su compleja estructura hidrogeológica. Se destaca como línea de investigación principal diferenciar las formaciones carbonatadas del Cretácico y Jurásico, así como la profundidad del basamento rocoso Triásico. Esta información se considera fundamental para estimar con certidumbre las reservas de agua subterránea y plantear su explotación.

La zona Oriental Fallada está caracterizada por la alternancia de horst y graben paralelos a la costa. Las formaciones dominantes corresponden al Neógeno y Cuaternario, y los materiales que las constituyen rellenan las depresiones y las formaciones mesozoicas que conforman los relieves montañosos. Estos relieves presentan una fracturación principal NE-NNE. El corte geológico representativo de esta zona (Figura 9) diferencia el tramo somero y profundo.

Por otro lado, en la zona Central Subtabular predominan los materiales mesozoicos y su estructura es sencilla, con pliegues de amplio radio y grandes superficies de estratificación subhori-

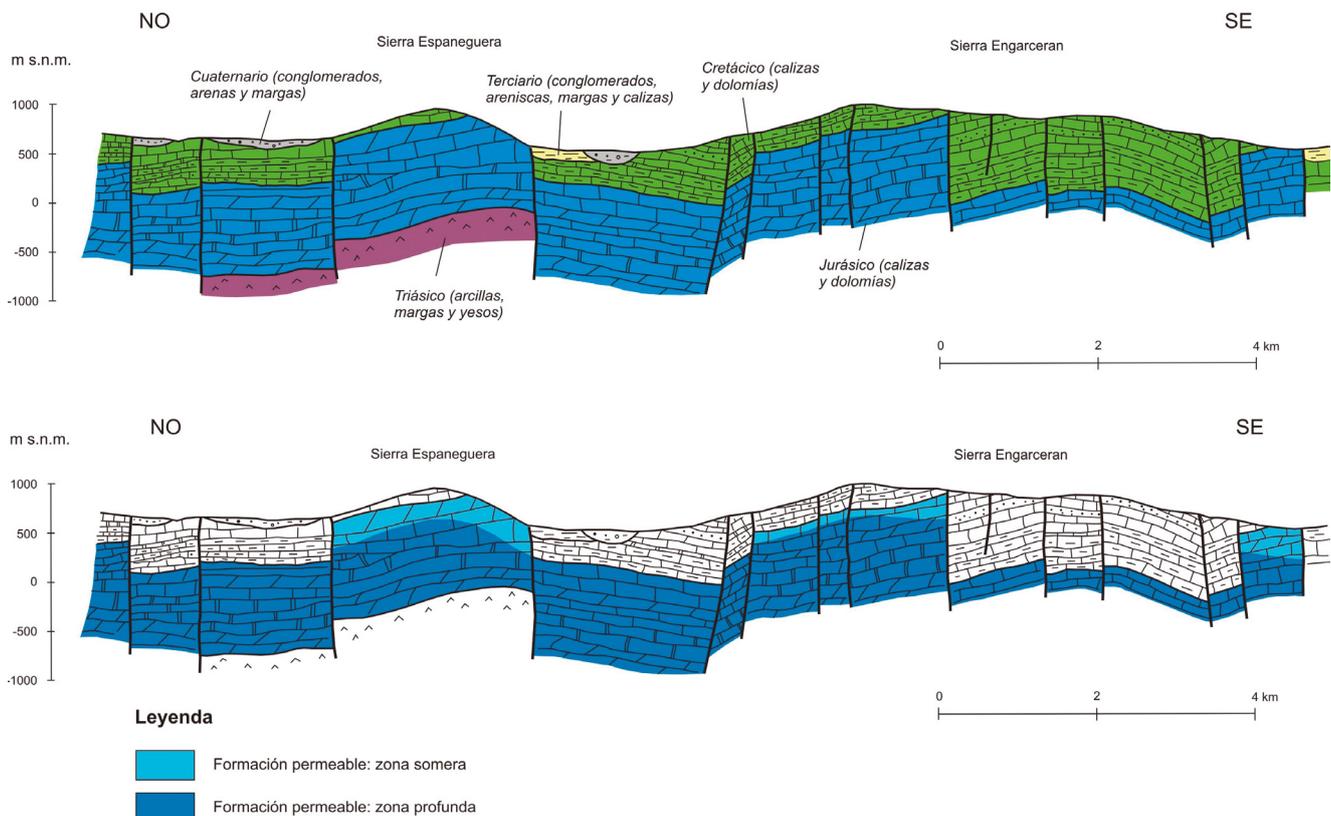


Figura 9. Perfil geológico e hidrogeológico del acuífero profundo El Maestrazgo. Zona Oriental Fallada.

Figure 9. Geological and hydrogeological section of the deep El Maestrazgo aquifer. Faulted Eastern Zone.

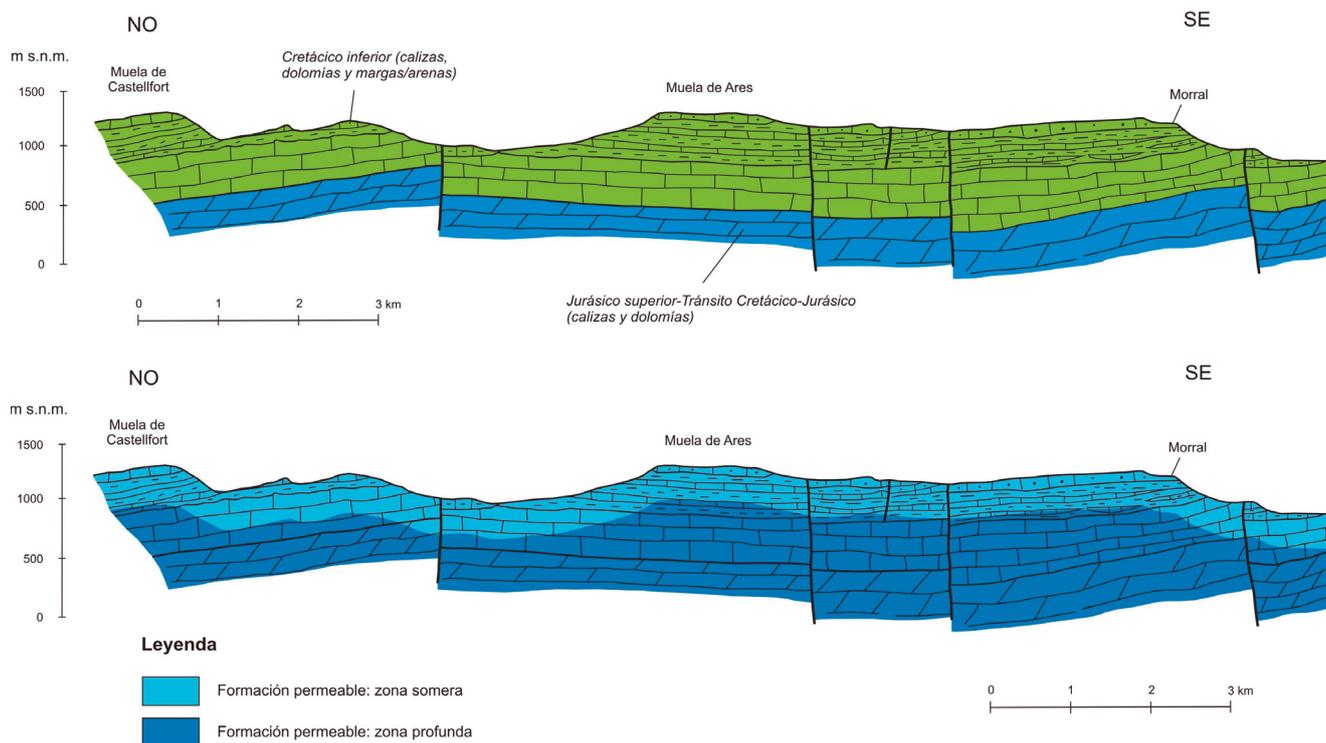


Figura 10. Perfil geológico e hidrogeológico del acuífero profundo El Maestrazgo. Zona Central Subtabular.

Figure 10. Geological and hydrogeological section of the deep El Maestrazgo aquifer. Central Subtabular Zone.

zonal y fracturación E-O. En la Figura 10 se muestra un corte geológico representativo diferenciando el tramo profundo susceptible de explotación del tramo somero.

5. Conclusiones

La hidrogeología de acuíferos profundos ha tenido tradicionalmente un tratamiento muy tangencial con respecto a la hidrogeología clásica, encaminada al aprovechamiento de los recursos disponibles para los principales usos consuntivos. No obstante, los estudios de prospección de hidrocarburos y, posteriormente, aproximadamente en las últimas tres décadas, el aprovechamiento de la energía geotérmica y el almacenamiento de residuos radiactivos o de CO₂ han supuesto un significativo avance en el desarrollo de metodologías y en la mejora del conocimiento de estos volúmenes de agua subterránea almacenados a profundidades superiores a las, en principio, consideradas como económicamente factibles.

En este artículo se presenta el primer inventario de acuíferos profundos de España y el primer paso orientado a la recopilación e interpretación de la información hidrogeológica existente de las formaciones acuíferas identificadas, un total de 64 acuíferos profundos en el territorio nacional

peninsular distribuidos en 13 demarcaciones hidrográficas. La distribución espacial de los acuíferos sugiere un amplio esquema de posibilidades de uso como potenciales reservas estratégicas temporales de agua subterránea en caso de emergencias hídricas ligadas a diferentes escenarios, como sequías extremas en relación con el cambio climático, contaminación de los niveles acuíferos más someros ante situaciones de escasa previsibilidad o disponibilidad extra de agua subterránea ante situaciones socioeconómicas extremas. La identificación y caracterización de estos acuíferos a escala nacional podría introducir escenarios de gestión alternativos en los próximos ciclos de planificación hidrológica, mejorando las posibilidades para satisfacer las demandas, contribuyendo a optimizar la regulación interanual y aportando beneficios socioeconómicos compatibles con el entorno medioambiental.

Así mismo, se proponen unas pautas generales en la metodología de investigación que deberían seguir los futuros estudios sobre este tipo de formaciones, resultando fundamental la homogeneización y la coherencia a la hora de catalogar una formación geológica permeable como acuífero profundo.

Las líneas metodológicas desarrolladas con el fin de valorar los acuíferos profundos identifica-

dos, se han basado principalmente en los rasgos estructurales y estratigráficos, la viabilidad de la explotación y las posibles afecciones y compatibilidad con los aprovechamientos someros en el marco de una gestión sostenible.

Resaltar que el estudio de los acuíferos profundos enfocado a la definición y evaluación de reservas estratégicas de agua, abre una línea de investigación emergente, innovadora y con una importante proyección de futuro dentro de la hidrogeología, poniendo en valor volúmenes de agua que hasta el momento no se han considerado desde el punto de vista de la planificación, ni de su utilidad medioambiental.

La problemática relacionada con el futuro impacto que tendrá la falta de agua en el modelo de desarrollo socioeconómico de muchos países, justifica la inversión en medios humanos y técnicos para el estudio de estas formaciones geológicas y su análisis de idoneidad en diferentes contextos de crecimiento y adaptación a las futuras condiciones hidrológicas. En el proceso de identificación de este tipo de formaciones permeables profundas es importante considerar su situación estratégica dentro del esquema hidrológico general de la cuenca hidrográfica y las posibilidades de transferir los volúmenes de agua extraídos a las zonas de demanda. En situaciones de déficit hídrico, y como paso previo a la gestión y la gobernanza de los recursos disponibles, es oportuno buscar nuevas fuentes de suministro, por tanto, se recomienda que la investigación y el aprovechamiento sostenible de los acuíferos profundos se convierta en una actuación a escala global.

A corto y medio plazo, y tomando como base el inventario y la metodología presentados, se debería focalizar la investigación en aquellas formaciones profundas permeables ubicadas en zonas con un mayor índice de aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos someros o con unas previsiones de crecimiento que puedan llevar los recursos convencionales al límite de su aprovechamiento sostenible, con caracterizaciones hidrogeológicas de detalle y estudios socioeconómicos sobre la conveniencia, o no, de aprovechar estos acuíferos profundos.

Referencias

- Abbott, B. W., Bishop, K., Zarnetske, J. P., Minaudo, C., Chapin, F. S., Krause, S., Hannah, D. M., Conner, L., Ellison, D., Godsey, S. E., Plont, S., Marçais, J., Kolbe, T., Huebner, A., Frei, R. J., Hampton, T., Gu, S., Buhman, M., Sayedi, S. S., Ursache, O., Chapin, M., Henderson, K. D., and Pinay, G. (2019). Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, 12(7), 533-540. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0374-y>
- Alcalde, J., Martí, D., Calahorrano, A., Marzan, I., Ayarza, P., Carbonell, R., Juhlin, C., and Pérez-Estaún, A. (2013). Active seismic characterization experiments of the Hontomín research facility for geological storage of CO₂, Spain. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, 785-795. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.01.039>
- Alley, W. M. (2007). Another Water Budget Myth: The Significance of Recoverable Ground Water in Storage. *Ground Water*, 45(3), 251-251. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00274.x>
- Alley, W. M., Bair, S. E., and Wireman, M. (2013). Deep groundwater. *Ground Water*, 51, 653-654. <https://doi.org/10.1111/gwat.12098>
- Antón-Pacheco, C., Araguás, L., Ballesteros, B., Barnolas, A., Casas, A., Gil, I., Gumiel, J. C., López-Gutiérrez, J., Mejías, M., Plata, J. L., Samsó, J. M., Jiménez, I., Marina, M., Mediato, J., and Núñez, I. (2005). Investigación sobre el comportamiento hidrogeológico de formaciones acuíferas profundas. Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07, (El Maestrazgo). Desarrollo metodológico. Recopilación y síntesis de la información: Informe preliminar. Centro de documentación del IGME: H1-002-05, 535 págs.
- Bachu, S. (2015). Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 188-202. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.01.007>
- Cadavid, S. (1977). Mapa estructural del techo del basamento del borde meridional de la Sierra de Guadarrama. *Boletín Geológico y Minero*, LXXXVII (VI), 494-496.
- Canérot, J. (1974). Recherches géologiques aux confins des chaînes ibérique et catalane (Espagne). *Géologie des confins Ibéro-Catalans*. Doctoral thesis, Toulouse University, 517 pp.
- Custodio, E. (2015). Aspectos hidrológicos, ambientales, económicos, sociales y éticos del consumo de reservas de agua subterránea en España: minería del agua subterránea en España. UPC/Aqualogy, Barcelona, 488 pp. <http://hdl.handle.net/2117/111272>
- Custodio, E., Andreu-Rodes, J. M., Aragón, R., Estrella, T., Ferrer, J., García-Aróstegui, J. L., Manzano, M., Rodríguez-Hernández, L., Sahuquillo, A., and del Villar, A. (2016). Groundwater intensive use and mining in south-eastern peninsular Spain: Hydrogeological, economic and social aspects. *Science of the Total Environment*, 559, 302-316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.107>

- Diao, Y., Yang, Y., Li, X., Hu, L., Zheng, C., and Ma, X. (2021). Management on developing deep underground space for CO₂ geological storage. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 41(4), 1267-1273.
- García-Orellana, J., García-Solsona, E., Masqué, P., Ballesteros, B., López, J., Mejías, M., and Marina, M. (2006). Evaluación de la descarga de un manantial costero mediante isótopos del radio: La Fuente de Alcossebre (Castellón). In: *Las aguas subterráneas en los países mediterráneos*. IGME, Málaga. 301-309.
- Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E., and Cardenas, M. B. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, 9(2), 161-167. <https://doi.org/10.1038/ngeo2590>
- Goderniaux, P., Brouyere, S., Fowler, H. J., Blenkinsop, S., Therrien, R., Orban, P., and Dassargues, A. (2009). Large scale surface-subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology*, 373, 122-138. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.017>
- Goderniaux, P., Brouyere, S., Wildemeersch, S., Therrien, R., and Dassargues, A. (2015). Uncertainty of climate change impact on groundwater reserves - Application to a chalk aquifer. *Journal of Hydrology*, 528, 108-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.018>
- Godfrey, S., Hailemichael, G., and Serele, C. (2019). Deep groundwater as an alternative source of water in the Ogaden Jesoma sandstone aquifers of Somali region, Ethiopia. *Water*, 11(8), 1735. <https://doi.org/10.3390/w11081735>
- González-Ramón, A., Rodríguez-Arévalo, J., Martos-Rosillo, S., and Gollonet, J. (2013). Hydrogeological research on intensively exploited deep aquifers in the 'Loma de Úbeda' area (Jaén, southern Spain). *Hydrogeology Journal*, 21, 887-903. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-0957-4>
- Heredia, J., Pardo-Iguzquiza, E., and González-Ramón, A. (2014). Stochastic Modelling of the 3D Geometry of a Faulted and Folded Deep Carbonate Aquifer: Loma de Úbeda (Southern Spain). *Mathematics of Planet Earth*, 767-770.
- Hubbert, M. K. (1940). The Theory of Ground Water Motion. *Journal of Geology*, 48, 785-944. <https://www.jstor.org/stable/30057101>
- IGME (1980). Proyecto para la Investigación hidrogeológica de la cuenca del Duero. Sistemas nº 8 y 12. Estudio Hidrogeológico del Valle Amblés (Ávila). Informe Técnico, 58 págs.+19 págs. (anexos).
- IGME (1995). Mapa Geológico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias a escala 1:1.000.000 ([http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Geologica1MMapa.aspx?Id=Geologico1000_\(1994\)&language=es](http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Geologica1MMapa.aspx?Id=Geologico1000_(1994)&language=es))
- IGME-DGA (2009). Encomienda de Gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Actividad 2. Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. Demarcación Hidrográfica del Duero. Masa de agua subterránea 64 Valle de Amblés, 68 págs.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA, Cambridge University Press, 1-32.
- IPCC (2019): Resumen para responsables de políticas. In: *El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres* [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)]. En prensa.
- ITGE (1991). Mapa Hidrogeológico de España a escala 1:200.000. Hoja 44 - Ávila. Memoria y Mapa.
- ITGE (1998). Acuífero de Sierra Gorda y Polje de Zafarraya. Atlas hidrogeológico de Andalucía. Instituto Tecnológico Geominero de España, Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, Consejería de Trabajo e Industria de la Junta de Andalucía.
- Ivanov, V. K., Spirin, E. V., Menyajlo, A. N., Chekin, S. Y., Lovachev, S. S., Korelo, A. M., Tumanov, K. A., Solomatin, V. M., Lopatkin, A. V., and Adamov, E. O. (2020). Safety of radioactive waste from two-component nuclear energy system disposed in a deep geological repository for permanent storage: Radiological migration equivalence. *Radiation and Risk*, 29(4), 8-32. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-4-8-32>
- Jeziarski, H. J. (2013). Storage of radioactive and hazardous waste in deeply seated geological formations - summary of experiences and plans for the future - the leading topic of the 1st PURL. *Conference Przegląd Geologiczny*, 61(12), 731.
- Kang, M., Ayars, J., and Jackson, R. (2019). Deep groundwater quality in the southwestern United States. *Environmental Research Letters*, 14(3), 034004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae93c>

- Kharaka, Y. K., Thordsen, J. J., Hovorka, S. D., Nance, H. S., Cole, D. R., Phelps, T. J., and Knauss, K. G. (2009). Potential environmental issues of CO₂ storage in deep saline aquifers: Geochemical results from the Frio-I Brine Pilot test, Texas, USA. *Applied Geochemistry*, 24, 1106-1112. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.02.010>
- Krawczyk, C. M., Stiller, M., Bauer, K., Norden, B., Herninges, J., Ivanova, A., and Huenges, E. (2019). 3-D seismic exploration across the deep geothermal research platform Groß Schönebeck north of Berlin/Germany. *Geotherm Energy*, 7(1), 1-18. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0131-x>
- Lapworth, D. J., Zahid, A., Taylor, R. G., Burgess, W. G., Shamsudduha, M., Ahmed, K. M., Mukherjee A., Goody D. C., Chatterjee, D., and MacDonald, A. M. (2018). Security of deep groundwater in the Coastal Bengal Basin revealed by tracers. *Geophysical Research Letters*, 45, 8241-8252. <https://doi.org/10.1029/2018GL078640>
- Li, Y., and Pang, Z. (2017). Hydrogeochemical characteristics of deep saline aquifers in sedimentary basins in China and implications for CO₂ geological storage with emphasis on total dissolved solids (TDS) and water type. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 7(1), 53-64. <https://doi.org/10.1002/ghg.1645>
- Llamas, M. R., Custodio, E., de la Hera, A., and Fornés, J. M. (2015). Groundwater in Spain: increasing role, evolution, present and future. *Environmental Earth Sciences*, 73, 2567-2578. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-4004-0>
- López Gutiérrez, J., García Menéndez, O., and Ballesteros Navarro, B. J. (2010). El origen del mercurio presente en el acuífero costero de la Plana de Castellón (Este de España). *Boletín Geológico y Minero*, 121(3), 279-298.
- López-Vera, F. (1977). Modelo de sedimentación de los materiales detríticos de la fosa de Madrid. XXXII Congreso Luso-español para el Progreso de la Ciencia, 42(4), 257-266.
- Marín Lechado, C., González Ramón, A., Ruiz Costán, A., Moreno Martínez, J. A., and Cifuentes Sánchez, V. J. (2018). El Modelo geológico 3D del acuífero de La Loma de Úbeda. SIAGA. Huelva, 24-27 de octubre de 2018.
- Martínez-Alfaro, P. E. (1980). Un primer análisis de la permeabilidad y el grado de anisotropía de los materiales detríticos de la fosa del Tajo. *Boletín Geológico y Minero*, 91, 645-648.
- Mejías, M., García-Orellana, J., Plata, J. L., Marina, M., García-Solsona, E., Ballesteros, B., Masqué, P., López, J., and Fernández-Arrojo, C. (2008). Methodology of hydrogeological characterization of deep carbonate aquifers as potential reservoirs of groundwater. Case of study: The Jurassic aquifer of El Maestrazgo (Castellón, Spain). *Environmental Geology*, 54(3), 521-536. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0845-0>
- Miró, J. J., Estrela, M. J., Olcina-Cantos, J., and Martín-Vide, J. (2021). Future Projection of Precipitation Changes in the Júcar and Segura River Basins (Iberian Peninsula) by CMIP5 GCMs Local Downscaling. *Atmosphere*, 12, 879. <https://doi.org/10.3390/atmos12070879>
- MITECO (2020). Informe de seguimiento de los planes hidrológicos de cuenca y de los recursos hídricos en España. 191 págs.
- Moutahir, H., Bellot, P., Monjo, R., Bellot, J., García, M., and Touhami, I. (2017). Likely effects of climate change on groundwater availability in a Mediterranean region of Southeastern Spain. *Hydrological Processes*, 31, 161-176. <https://doi.org/10.1002/hyp.10988>
- Moutahir, H., Fernández-Mejuto, M., Andreu, J. M., Touhami, I., Ayanz, J., and Bellot, J. (2019). Observed and projected changes on aquifer recharge in a Mediterranean semi-arid area, SE Spain. *Environmental Earth Sciences*, 78(24), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8688-z>
- Pereira, N., Carneiro, J. F., Araujo, A., Bezzeghoud, M., and Borges, J. (2014). Seismic and structural geology constraints to the selection of CO₂ storage sites-The case of the onshore Lusitanian basin, Portugal. *Journal of Applied Geophysics*, 102, 21-38. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.12.001>
- Pérez Gago, M., Ballesteros Navarro, B. J., García Menéndez, O., Grima Olmedo, J., and López Gutiérrez, J. (2001). Contenido en nitratos de las aguas subterráneas en la plana de Valencia. Situación actual, evolución temporal y repercusión sobre La Albufera. In: A. Ballester Rodríguez, J. Grima Olmedo, J. A. López Geta, and L. Rodríguez Hernández (eds.), *Investigación, gestión y recuperación de acuíferos contaminados*, 119-129.
- Post, V., Groen, J., and Kooi, H. (2013). Offshore fresh groundwater reserves as a global phenomenon. *Nature*, 504, 71-78. <https://dx.doi.org/10.1038/nature12858>
- Renau-Pruñerosa, A., García-Menéndez, O., Ibáñez, M., Vázquez-Suñé, E., Boix, C., Ballesteros-Navarro, B. J., Hernández-García, M., Morrel, I., and Hernández, F. (2020). Identification of aquifer recharge sources as the origin of emerging contaminants in intensive agricultural areas. La Plana de Castellón, Spain. *Water*, 12, 731. <https://doi.org/10.3390/w12030731>
- Tarkowski, R., and Uliasz-Misiak, B. (2006). Possibilities of CO₂ Sequestration by Storage in Geological Media of Major Deep Aquifers in Poland. *Chemical Engineering Research and Design*, 84(9), 776-780. <https://doi.org/10.1205/cherd.05144>
- Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(4), 4565-4573. <https://doi.org/10.1029/JZ068i04p04565>

- sical Research, 68(16), 4795-4812. <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>
- Touhami, I., Chirino, E., Andreu, J. M., Sánchez, J. R., Moutahir, H., and Bellot, J. (2015). Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain. *Journal of Hydrology*, 527, 619-629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.012>
- Tsang, C. F., and Niemi, A. (2013). Deep hydrogeology: a discussion of issues and research needs. *Hydrogeology Journal*, 21(8), 1687-1690. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-0989-9>
- UNESCO (1985). Aguas subterráneas en rocas duras. Proyecto 8.6 del Programa Hidrológico Internacional. 305 págs.
- UNESCO, UN-Water (2020). United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change, Paris, UNESCO. 235 págs.
- Wawerzinek, B., Buness, H., von Hartmann, H., and Tanner, D. C. (2021). S-wave experiments for the exploration of a deep geothermal carbonate reservoir in the German Molasse Basin. *Geothermal Energy*, 9(6), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s40517-021-00189-w>
- Yuan, W., Chen, Z., Grasby, S. E., and Little, E. (2021). Closed-loop geothermal energy recovery from deep high enthalpy systems. *Renewable Energy*, 177, 976-991. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.028>