



**Facultad de Ciencias Geológicas  
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
Curso 2023-2024**

**Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación de  
los acuíferos de la parte española de la Cuenca del  
Tajo**

*Analysis of the vulnerability to contamination of aquifers in the Spanish  
part of the Tagus Basin.*

MARÍA FERNÁNDEZ MARTÍNEZ

TUTORES DEL TRABAJO: PEDRO MARTÍNEZ SANTOS

VÍCTOR GÓMEZ-ESCALONILLA CANALES



**Facultad de Ciencias Geológicas  
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
Curso 2023-2024**

**Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación de  
los acuíferos de la parte española de la Cuenca del  
Tajo**

*Analysis of the vulnerability to contamination of aquifers in the Spanish  
part of the Tagus Basin.*

MARÍA FERNÁNDEZ MARTÍNEZ

TUTORES DEL TRABAJO:

PEDRO MARTÍNEZ SANTOS

Fdo.:

VÍCTOR GÓMEZ-ESCALONILLA

Fdo.:



# Facultad de Ciencias Geológicas

## Universidad Complutense de Madrid

### DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

María Fernández Martínez con DNI 04636744J, estudiante de Máster Universitario en Geología Ambiental en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2023-2024, como autora del trabajo de fin de máster titulado **Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la parte española de la Cuenca del Tajo** y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyos tutores son: Pedro Martínez Santos y Víctor Gómez-Escalonilla Canales.

**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 30 de julio de 2024

Fdo.:

Una firma manuscrita en tinta que parece decir 'María'.

## **Declaración Responsable sobre Autoría y Uso Ético de Herramientas de Inteligencia Artificial (IA)**

Yo, María Fernández Martínez

Con DNI: 04636744J

declaro de manera responsable que el presente:

- Trabajo de Fin de Máster (TFM)

**Titulado 'Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la parte española de la Cuenca del Tajo'**

es el resultado de mi trabajo intelectual personal y creativo, y ha sido elaborado de acuerdo con los principios éticos y las normas de integridad vigentes en la comunidad académica y, más específicamente, en la Universidad Complutense de Madrid.

Soy, pues, autor del material aquí incluido y, cuando no ha sido así y he tomado el material de otra fuente, lo he citado o bien he declarado su procedencia de forma clara -incluidas, en su caso, herramientas de inteligencia artificial-. Las ideas y aportaciones principales incluidas en este trabajo, y que acreditan la adquisición de competencias, son mías y no proceden de otras fuentes o han sido reescritas usando material de otras fuentes.

Asimismo, aseguro que los datos y recursos utilizados son legítimos, verificables y han sido obtenidos de fuentes confiables y autorizadas. Además, he tomado medidas para garantizar la confidencialidad y privacidad de los datos utilizados, evitando cualquier tipo de sesgo o discriminación injusta en el tratamiento de la información.

En Madrid, a 30 de julio de 2024



## **AGRADECIMIENTOS**

A Pedro Martínez, porque su gran dedicación y entusiasmo hacen que cualquiera tenga ganas de saber más sobre la hidrogeología.

A Víctor Gómez-Escalonilla, por tener siempre las mejores palabras y ser capaz de transmitir sus conocimientos con la mayor claridad y pasión.

A Miguel Ángel Sanz, por su paciencia, sus consejos y por dedicarme su tiempo siempre que lo he necesitado.

A Lucia De Stefano, por acompañarme durante el final de esta etapa y darme la oportunidad de comenzar una nueva etapa a su lado.

A mi madre y a mi padre, por su apoyo incondicional y por ser la base sobre la que he construido mis logros.

A Chema, por sostenerme, por todo su amor.

A mis abuelos, por ser mi lugar seguro siempre.

A la Abuelísima y a Marisa, por ser hogar durante estos últimos años.

A mis hermanos, Diego y Jorge, por sus palabras de ánimo y cariño.

A mi tío Vicente y a Juan Carlos, por su preocupación y motivación.

A Batula, Sofía, Andrea, Andrés, Eduardo, Víctor, Paula, Alex, María, David, Ruth, Raúl, Lucía y Teresa, por confiar siempre en mí y permanecer a mi lado.

A mis compañeros del máster, por ser fuente de respaldo y risas en este camino, Bárbara, Cora y Víctor, lo habéis hecho muy ameno.

A todos los profesores que han formado parte de mi aprendizaje académico durante mi época universitaria, os llevo conmigo.

A Manuel, Nikoletta, Nuria, Delia y Gabriel, por su gran empatía y ayuda estos dos últimos meses.

Gracias a todas las personas que han formado parte de este proceso tan importante para mí.

## ÍNDICE

<b>0. RESUMEN</b> .....	IV
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Antecedentes</b> .....	2
1.1.1. Métodos .....	3
<b>1.2. Objetivos</b> .....	5
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	6
<b>2.1. Zona de estudio</b> .....	6
2.1.1. Localización geográfica .....	6
2.1.2. Contexto geológico .....	7
2.1.3. Marco hidrogeológico .....	9
2.1.4. Usos del agua .....	10
<b>2.2. Método DRASTIC</b> .....	10
2.2.1. Parámetro D.....	11
2.2.1.1. Definición.....	11
2.2.1.2. Procesamiento de datos y mapa .....	11
2.2.2. Parámetro R.....	13
2.2.2.1. Definición.....	13
2.2.2.2. Procesamiento de datos y mapa .....	14
2.2.3. Parámetro A.....	15
2.2.3.1. Definición.....	15
2.2.3.2. Procesamiento de datos y mapa .....	16
2.2.4. Parámetro S.....	18
2.2.4.1. Definición.....	18
2.2.4.2. Procesamiento de datos y mapa .....	18
2.2.5. Parámetro T .....	20
2.2.5.1. Definición.....	20
2.2.5.2. Procesamiento de datos y mapa .....	20
2.2.6. Parámetro I .....	22
2.2.6.1. Definición.....	22
2.2.6.2. Procesamiento de datos y mapa .....	22
2.2.7. Parámetro C.....	25
2.2.7.1. Definición.....	25
2.2.7.2. Procesamiento de datos y mapa .....	25
<b>3. RESULTADOS</b> .....	28
<b>4. DISCUSIÓN</b> .....	33

<b>4.1. Evaluación de consistencia del mapa .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2. Comparación con datos conocidos de contaminación .....</b>	<b>35</b>
4.2.1. Contaminación por nitratos.....	35
<b>4.3. Discrepancias y limitaciones del método.....</b>	<b>40</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>42</b>
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>

## **0. RESUMEN**

La amenaza de contaminación sobre los acuíferos de la cuenca hidrográfica del Tajo ha aumentado en las últimas décadas. Para delimitar las zonas más vulnerables a la contaminación en la parte española de la cuenca, se propone el uso de la metodología DRASTIC. El sistema consiste en la combinación, mediante un SIG, de los siete parámetros hidrogeológicos que presentan mayor influencia en la vulnerabilidad intrínseca de las masas de agua subterránea. Los siete parámetros considerados son: la profundidad del nivel freático (D), la recarga neta (R), la litología del acuífero (A), el tipo de suelo (S), la topografía (T), la naturaleza de la zona vadosa (I) y la conductividad hidráulica del acuífero (C).

El mapa final del Índice DRASTIC señala como más vulnerables las masas de agua subterránea de Cabecera del Bornova, Sigüenza-Maranchón, Tajuña-Montes Universales, Molina de Aragón y Entrepeñas, situadas al este de la cuenca. La masa de Molina de Aragón precisa de una mayor atención por las presiones por nitratos existentes en la zona. La determinación de las zonas más sensibles a la contaminación permite el control y la protección de este recurso hídrico fundamental, así como la conservación de sus ecosistemas. Pese a las limitaciones existentes en el método DRASTIC, su resultado sirve como base de evaluación relativa de la vulnerabilidad de los acuíferos de la cuenca hidrográfica del Tajo.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los reservorios de agua subterránea son un recurso natural limitado, irremplazable y esencial para la vida y para las actividades de carácter económico y social. Cerca de un tercio de los recursos mundiales de agua dulce se almacenan en las aguas subterráneas. El 65% del agua potable en la Unión Europea es suministrada por las aguas subterráneas, existiendo una gran dependencia de los acuíferos que deriva en la necesidad de protegerlos frente a la contaminación y la sobreexplotación (EEA, 2022). Con el objetivo de alcanzar o mantener el buen estado químico y cuantitativo de las masas de agua subterránea antes de 2027, así como su sostenibilidad, la Directiva Marco del Agua, Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, demanda la gestión de este recurso (CE, 2000). Según el Reglamento de la Planificación Hidrológica (RPH), en el BOE (2007) se definen los objetivos medioambientales para las masas de agua subterránea (Art. 35):

- “Evitar o limitar la entrada de contaminantes en las aguas subterráneas y evitar el deterioro del estado de todas las masas de agua subterránea”.
- “Proteger, mejorar y regenerar las masas de agua subterránea y garantizar el equilibrio entre la extracción y la recarga a fin de conseguir el buen estado de las aguas subterráneas”.
- “Invertir las tendencias significativas y sostenidas en el aumento de la concentración de cualquier contaminante derivada de la actividad humana con el fin de reducir progresivamente la contaminación de las aguas subterráneas”.

Sin embargo, debido al crecimiento de la población en las últimas décadas y a la intensificación de las prácticas llevadas a cabo en el suelo, se ha producido un aumento de las amenazas sobre los 23696 km<sup>2</sup> de superficie que ocupan las masas de agua subterránea de la cuenca hidrográfica del Tajo. Este incremento en la cantidad de contaminantes que pueden alcanzar los acuíferos, degrada la calidad de las aguas subterráneas y dificulta el cumplimiento de los objetivos medioambientales para este recurso fundamental. La facilidad con la que se produce la llegada de los contaminantes al sistema subterráneo está condicionada por la vulnerabilidad intrínseca de cada uno de los acuíferos.

Las aguas subterráneas presentes en la cuenca aportan unos 48 hm<sup>3</sup>/año de media para el abastecimiento de las poblaciones, destacando Madrid, Toledo, Guadalajara, Cáceres y Talavera de la Reina como los municipios que necesitan mayores volúmenes de agua para este uso. Por todo ello, es necesario evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos de la cuenca hidrográfica del Tajo, con la finalidad de conseguir y mantener los objetivos medioambientales en las masas de agua subterránea (CHT, 2024a).

## **1.1. Antecedentes**

El riesgo a la contaminación de los acuíferos es el conjunto formado por la interacción entre la peligrosidad del contaminante, que representa el tipo y la cantidad de contaminantes presentes, la exposición, que hace referencia a la relación entre las fuentes de contaminación con los acuíferos vulnerables, y la vulnerabilidad del acuífero. La definición de vulnerabilidad es compleja debido a la cantidad de factores que entran en consideración. Este término necesario para el desarrollo del estudio ha experimentado variaciones a lo largo de los años.

Según Margat (1968), que define por primera vez el término, "La vulnerabilidad de los acuíferos es la posibilidad de percolación y difusión de contaminantes desde la superficie del suelo hacia reservorios naturales de nivel freático, en condiciones naturales".

Para Palmquist (1991), "La vulnerabilidad de las aguas subterráneas es una medida del riesgo que representan para ellas las actividades humanas y la presencia de contaminantes... Sin la presencia de contaminantes, incluso las aguas subterráneas más susceptibles no están en riesgo y, por lo tanto, no son vulnerables".

Conforme a lo señalado por Vrba y Zaporozec (1994), "La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de un sistema de aguas subterráneas que depende de la sensibilidad de dicho sistema a los impactos humanos y/o naturales".

Por último, para Majandang y Sarapirome (2013), "La vulnerabilidad de las aguas subterráneas se define como la tendencia o probabilidad de que los contaminantes lleguen al sistema de aguas subterráneas después de su introducción en la superficie y se basa en el concepto fundamental de que algunas áreas terrestres son más vulnerables a la contaminación de las aguas subterráneas que otras".

Al comparar las cuatro definiciones de vulnerabilidad (Margat, 1968; Palmquist, 1991; Vrba y Zaporozec, 1994; Majandang y Sarapirome, 2013), se considera que la definición que más se adapta al desarrollo y objetivo del estudio es la descrita por Vrba y Zaporozec (1994). Dicha descripción destaca la vulnerabilidad como una propiedad intrínseca del sistema dependiente de la sensibilidad, indistintamente de si los impactos sobre los acuíferos son naturales y/o antrópicos. Este enfoque se relaciona perfectamente con el estudio expuesto, donde únicamente se consideran las características hidrogeológicas de los acuíferos, descartando la influencia antrópica y los diferentes tipos de contaminantes existentes.

En consecuencia, las masas de agua subterránea más vulnerables son las más propensas a ser contaminadas, independientemente del contaminante externo. El término de ‘contaminación de un acuífero’ hace referencia a la entrada desde la superficie terrestre y a través de la zona vadosa, de una sustancia tóxica/contaminante en el sistema geológico subterráneo. Dicho contaminante puede tener distinta procedencia (agricultura, industria, urbanización...), y en función de sus características y el tiempo de residencia en el acuífero, provocará mayores o menores impactos en la composición y en la calidad de la masa de agua afectada.

### 1.1.1. Métodos

Para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos se distinguen tres tipos de métodos: métodos cuantitativos (Neukum y Azzam, 2009), métodos de carácter cualitativo fundamentados en el SIG (Taghavi *et al.*, 2022) y métodos estadísticos que incluyen técnicas de inteligencia artificial (Cardenas-Martinez *et al.*, 2021). Los métodos cuantitativos determinan la vulnerabilidad específica, mientras que los métodos cualitativos y estadísticos evalúan la vulnerabilidad intrínseca (Machiwal *et al.*, 2018a). Dentro de los métodos cualitativos se distinguen dos grandes categorías: ‘complejo hidrogeológico y métodos de ajuste’ y ‘sistema basado en parámetros’. El análisis se ha focalizado en los métodos de ‘sistema basado en parámetros’ más empleados en la literatura (Gogu y Dassargues, 2000) (Tabla 1). Estos métodos se apoyan en parámetros hidrogeológicos, en el tipo de suelo y en factores topográficos. Posteriormente, se someten a una ponderación (en el caso del subgrupo b), seguida por la generación de un mapa que representa cada uno de los aspectos considerados. Por último, estos mapas se superponen y combinan para producir un mapa final que refleje el índice de vulnerabilidad (Fusco *et al.*, 2020).

**Tabla 1.** Varios métodos de ‘sistema basado en parámetros’. Subgrupos (Pavlis *et al.*, 2010).

Método	GOD	a) Combina puntuaciones	Subgrupo (a y b)
	AVI	a) Combina puntuaciones	
	SINTACS	b) Combina puntuaciones y ponderaciones	
	DRASTIC	b) Combina puntuaciones y ponderaciones	

- Método GOD (Foster, 1987): para el cálculo del índice de vulnerabilidad se centra en tres parámetros: el tipo de acuífero (G), la litología suprayacente (O) y la profundidad del nivel freático (D). Se asigna valor 0 para no vulnerable y valor 1 para altamente vulnerable. Este método presenta el inconveniente de asumir la homogeneidad de la formación subterránea (Machiwal *et al.*, 2018b).

- Método AVI (Stempvoort *et al.*, 1993): para el cálculo del índice de vulnerabilidad se enfoca en la conductividad hidráulica y en el espesor de cada una de las capas situadas por encima del acuífero. Añadiendo datos de pozos de agua, relaciona los parámetros para estimar la resistencia hidráulica de la zona vadosa y se enlaza con el índice de vulnerabilidad (Bekesi y McConchie, 2000). Este método presenta el inconveniente de ignorar los procesos importantes que tienen lugar en el suelo, dando como resultado valores poco fiables (Ferreira y Oliveira, 2004).

- Método SINTACS (Civita y de Maio, 2004): para el cálculo del índice de vulnerabilidad vertical se apoya en la suma ponderada de la profundidad del nivel freático (S), la infiltración (I), el potencial de atenuación de la zona no saturada (N), la capacidad de atenuación del suelo (T), las características del acuífero (A), la conductividad hidráulica (C) y la pendiente del terreno (S). SINTACS es una derivación del método DRASTIC, y presenta el inconveniente de no ajustarse de manera adecuada a los entornos de aguas subterráneas poco profundas (Luoma *et al.*, 2017).

- Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987): para el cálculo del índice de vulnerabilidad combina siete parámetros: la profundidad del nivel freático (D), la recarga neta (R), la litología del acuífero (A), el tipo de suelo (S), la topografía (T), la naturaleza de la zona vadosa (I) y la conductividad hidráulica del acuífero (C). El método DRASTIC se detalla en profundidad en el apartado 2.2 de la memoria por ser el método seleccionado para el desarrollo de este estudio. La elección de esta metodología se ha realizado por comparación con las metodologías GOD, AVI y SINTACS. La metodología DRASTIC utiliza un mayor número de variables que los métodos GOD y AVI, siendo esperable una evaluación de la vulnerabilidad más fiable con DRASTIC. SINTACS presenta el inconveniente de generar zonas de muy alta vulnerabilidad en las superficies donde se produce la interacción con aguas superficiales (Rizka, 2018). A pesar de que SINTACS deriva de DRASTIC, el método DRASTIC ha sido mayormente utilizado, presenta gran facilidad en su utilización y los datos de los parámetros que requiere para su desarrollo son accesibles.

Además de los métodos mencionados anteriormente (GOD, AVI, SINTACS y DRASTIC), existen numerosos métodos más incluidos dentro del grupo de métodos de 'sistema basado en parámetros' (Machiwal *et al.*, 2018a) como: ISIS (Civita y De Regibus, 1995), GALDIT (Chachadi y Lobo Ferreira, 2001); EPIK (Doerfliger *et al.*, 1999) y PI (Goldscheider *et al.*, 2000) para acuíferos kársticos; y variaciones del método DRASTIC como DRASTIC-Fm (Denny *et al.*, 2007), DRASTIC-P (Ahmed, 2009), DRAV (Zhou *et al.*, 2010) para zonas áridas,

DRASTICA (Singh *et al.*, 2015) que incluye el factor antrópico, DRASTIC-P-LDLU (Jenifer y Jha, 2018), DRASTIC-N (Voutchkova *et al.*, 2021)...

## **1.2. Objetivos**

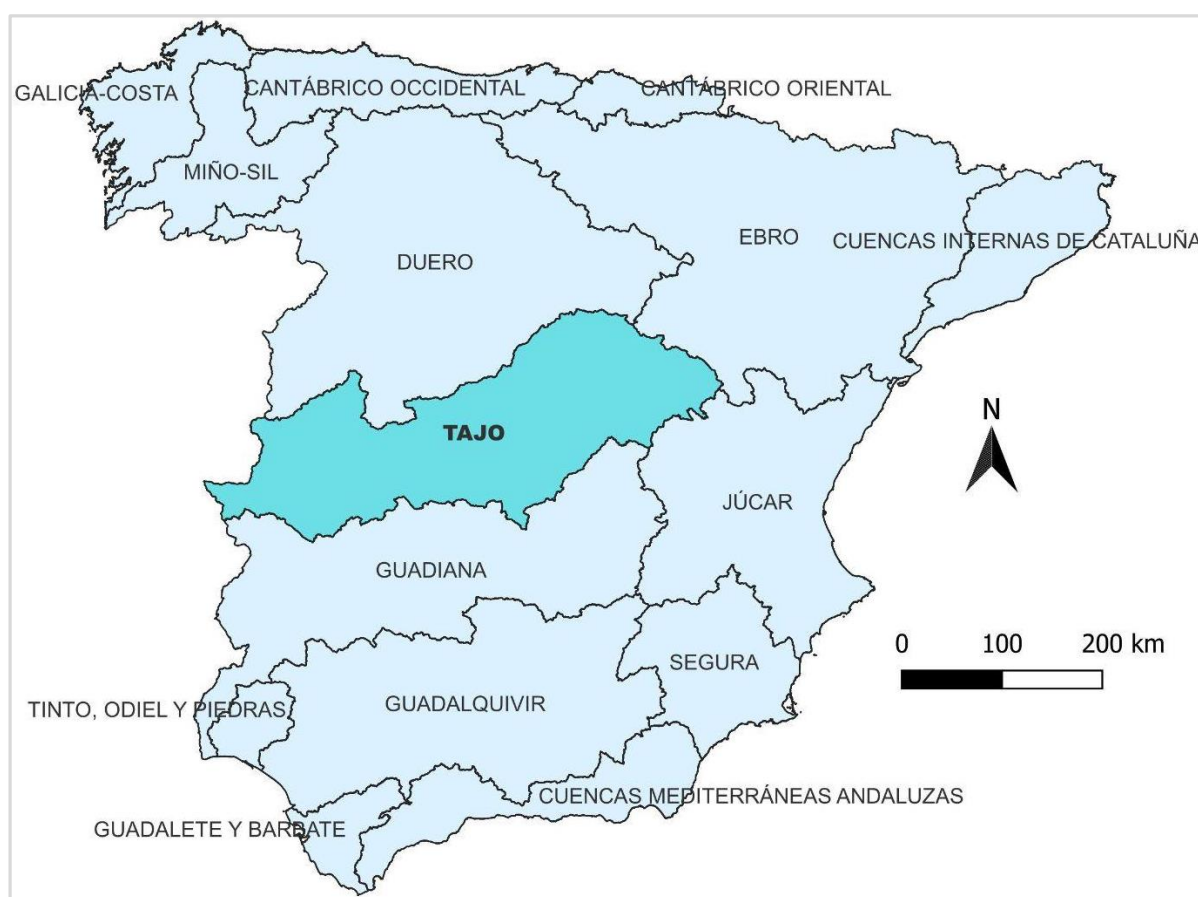
El presente trabajo tiene como objetivo definir un mapa con las zonas de masas de agua subterránea mayormente vulnerables a la contaminación, independientemente del contaminante y de la intervención antrópica, en la parte española de la cuenca hidrográfica del Tajo. Para esta delimitación se aplica el método de determinación de la vulnerabilidad relativa de los acuíferos a la contaminación DRASTIC (Aller *et al.*, 1987). La ubicación y mejora de conocimiento acerca de las zonas más sensibles al proceso de contaminación y que precisan de una mayor protección, permite su planificación, gestión y control para garantizar la disponibilidad de este recurso hídrico fundamental, la preservación de su calidad y la conservación de sus ecosistemas.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Zona de estudio

#### 2.1.1. Localización geográfica

El río Tajo es el más largo de la península Ibérica, y su cuenca ocupa el tercer lugar en tamaño y aportaciones, precedida solo por las cuencas del Ebro y del Duero. Dicha demarcación es compartida entre Portugal y España, abarcando dentro del territorio español una superficie de 55779 km<sup>2</sup> (CHT, 2023a), limitando al norte con la Demarcación del Duero, al este con las demarcaciones del Ebro y el Júcar, al sur con la del Guadiana y al oeste continúa la cuenca hidrográfica del Tajo en el territorio portugués (Fig. 1).



**Figura 1.** Ubicación y limitación de la cuenca hidrográfica del Tajo con otras demarcaciones. Modificado de MITECO (2024a).

La población perteneciente a la Demarcación del Tajo, 8134212 habitantes en 2022 según CHT (2023a), se distribuye a lo largo de cinco Comunidades Autónomas: Castilla-La Mancha, Extremadura, Comunidad de Madrid, Castilla y León y Aragón, incluyendo superficies de las provincias de Guadalajara, Toledo, Cuenca y Ciudad Real, Cáceres y Badajoz, Madrid, Ávila, Salamanca, Soria y Segovia, y Teruel, respectivamente (Fig. 2).

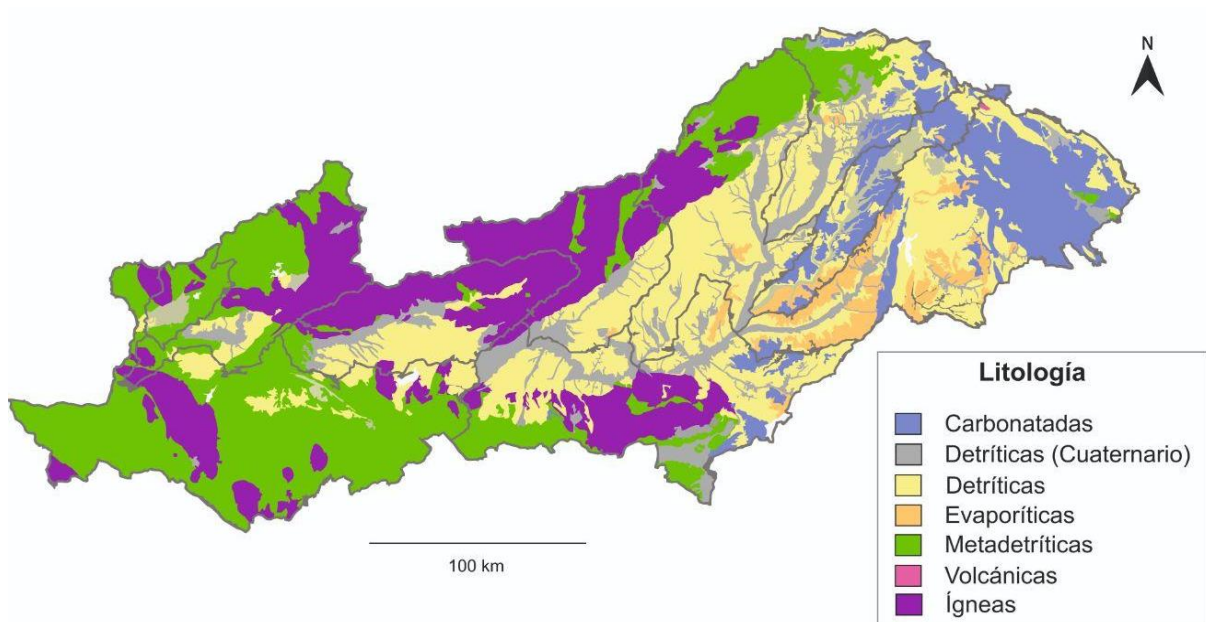


**Figura 2.** Distribución de la cuenca hidrográfica del Tajo en diferentes provincias y en la Comunidad de Madrid. Modificado de CHT (2024b).

La zona se caracteriza a grandes rasgos por un clima ‘mediterráneo’, pudiendo destacar según la clasificación de Köppen-Geiger (Kottek *et al.*, 2006): “Mediterráneo con verano cálido (Csa)” en la mayor parte de la cuenca, “Semiárido frío (BSk)” y “Oceánico mediterráneo con verano suave (Csb)”, y en pequeñas zonas puntuales “Oceánico con verano suave (Cfb)” y “Hemiboreal mediterráneo con invierno frío y verano suave (Dsb)”. La precipitación media anual durante el periodo de 1940-2017 es de 630 mm (MAGRAMA, 2018), con precipitaciones máximas en otoño y primavera (> 77 mm/mes) y precipitaciones mínimas en verano (<12 mm/mes). Durante los veranos secos se alcanzan las máximas temperaturas, cercanas a los 25°C. Por el contrario, en el mes de enero se registran las mínimas temperaturas, próximas a los 5°C (CHT, 2022).

### 2.1.2. Contexto geológico

La cuenca hidrográfica del Tajo se desarrolla sobre la Cuenca del Tajo, una de las depresiones cenozoicas presentes en la península Ibérica. Topográficamente, las altitudes varían entre los 200 m s.n.m. en las zonas más bajas y más de 2000 m s.n.m. en las zonas montañosas (CHT, 2024c). En cuanto a los materiales geológicos, se pueden diferenciar cuatro grandes grupos: las rocas carbonatadas de edad mesozoica situadas en la zona de cabecera (Cordillera Ibérica), las rocas detríticas del Cenozoico del centro de la cuenca, las rocas evaporíticas de la misma edad que ocupan la gran depresión del Tajo, y las rocas ígneas y metadetríticas del Precámbrico y Paleozoico situadas en las zonas de borde de la cuenca (Sistema Central y Montes de Toledo). La disposición de las distintas litologías mencionadas se puede observar en la Figura 3.



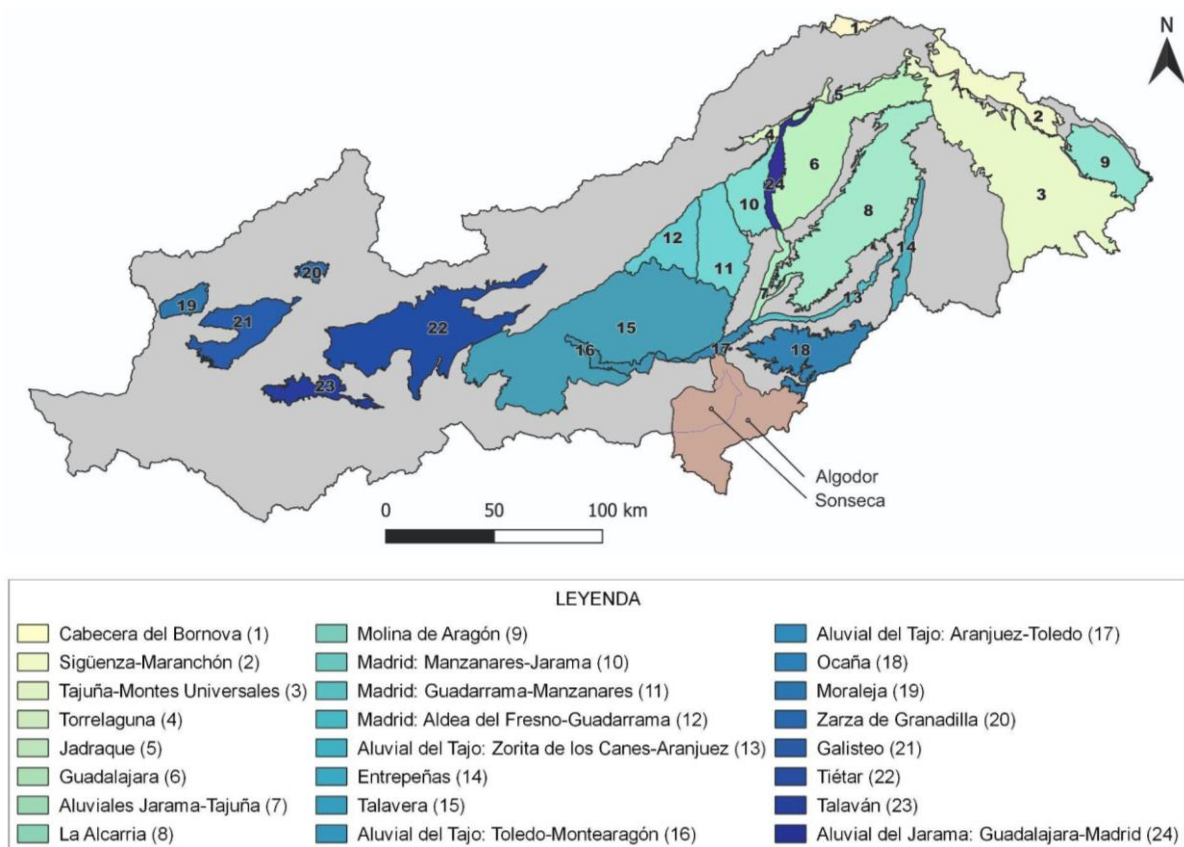
**Figura 3.** Litologías identificadas en la cuenca hidrográfica del Tajo. Modificado de CHT (2024c).

La reactivación de antiguas fracturas tardías que se produce durante la Orogenia Alpina da lugar a la Cuenca cenozoica del Tajo. La Cuenca del Tajo limita al norte con el Sistema Central mediante una falla. Este margen está constituido por el basamento de tipo granítico y las rocas metamórficas pertenecientes al Sistema Central. Por el sur, la cuenca limita con otra falla que levanta los Montes de Toledo. En este margen se diferencian rocas metamórficas y granitos, y el contacto con los materiales terciarios. Por el este, el basamento se sitúa bajo la Sierra de Altomira. Tanto la Sierra de Altomira como la Cordillera Ibérica forman parte del margen oriental de la cuenca y se caracterizan por materiales mesozoicos (Alonso-Zarza *et al.*, 2004). La tectónica de bloques existente en el basamento, genera la división en cuatro subcuencas, de oeste a este: la Cuenca occidental del Tajo, el Borde meridional de Guadarrama y Somosierra, la Cuenca de Madrid y la Depresión intermedia (CHT, 2024c).

El levantamiento de la Sierra de Altomira comenzó al final del Paleógeno, dejando al este la Depresión Intermedia y al oeste la Cuenca de Madrid. En este periodo, se produce, en una parte de la cuenca, de carácter endorreico, la sedimentación de materiales conglomeráticos. Seguidamente, en el Mioceno, se depositan sedimentos detríticos finos y de tipo evaporítico en el centro de la cuenca, y sedimentos detríticos gruesos en los bordes de la misma. A finales de esta época, se produce la instauración de la red fluvial y una sedimentación posterior de tipo lacustre. Finalmente, durante el Plioceno, se origina un basculamiento hacia el suroeste. Esta inclinación provoca el cambio de la cuenca, pasando de ser una cuenca endorreica a ser una cuenca exorreica (CHT, 2024c).

### 2.1.3. Marco hidrogeológico

En la cuenca hidrográfica del Tajo se identifican 26 masas de agua subterránea. Dos de las masas fueron propuestas en el último plan hidrológico de la cuenca en el año 2023 (Fig. 4). Cada año se extraen alrededor de 189 hm<sup>3</sup> de agua subterránea para distintos usos y se calcula que los recursos disponibles son aproximadamente 1366 hm<sup>3</sup>/año (CHT, 2022). Sin embargo, una gran cantidad de estas masas se encuentran sometidas a presiones significativas (suelos contaminados por diferentes usos, fuentes puntuales y difusas, extracciones, alteración del flujo...), y se enfrentan a amenazas que obstaculizan su capacidad para cumplir con los objetivos medioambientales (MAGRAMA, 2015).



**Figura 4.** Masas de agua subterránea de la cuenca hidrográfica del Tajo. Modificado de CHT (2023b).

La distribución de los recursos hídricos, disponibles en forma de masas de agua subterránea, está directamente relacionada con la geología mostrada en la Figura 3. Se han podido diferenciar dos grupos en función a la permeabilidad de las litologías mencionadas. Por un lado, los materiales ígneos y metadetríticos se caracterizan por su baja permeabilidad. Tras comparar la Figura 3 y la Figura 4, se puede observar la ausencia de masas de agua subterránea en las zonas donde se localizan dichos materiales. Esto es debido a la dificultad que presentan para transmitir el agua y formar acuíferos significativos. Por otro lado, se destaca el grupo formado por las rocas carbonatadas y los materiales detríticos. Este conjunto

de litologías presenta una mayor permeabilidad, permitiendo almacenar y transmitir grandes volúmenes de agua, lo que da lugar a la formación de acuíferos significativos.

#### **2.1.4. Usos del agua**

De los 189 hm<sup>3</sup> de agua subterránea que se extraen al año para distintos usos, 124 hm<sup>3</sup> son destinados para la agricultura. Este es el principal uso para el que se extrae agua subterránea en la cuenca hidrográfica del Tajo, a excepción de las masas de Madrid, Entrepeñas y Torrelaguna, donde el abastecimiento es prioritario (CHT, 2022). La cuenca hidrográfica del Tajo ha destinado un conjunto de 1784 captaciones de agua subterránea para abastecimiento, a diferencia de las 204 captaciones que se registraban en el plan anterior (MAGRAMA, 2015). En cuanto al volumen total de las masas de agua subterránea, alrededor de 30 hm<sup>3</sup> son dirigidos para abastecimiento, unos 27 hm<sup>3</sup> para uso industrial y los 8 hm<sup>3</sup> restantes para otros usos. La concesión se puede aumentar hasta 227 hm<sup>3</sup> en casos excepcionales de sequía (CHT, 2022).

#### **2.2. Método DRASTIC**

En la década de los 80, Aller *et al.* (1987), desarrollan la metodología DRASTIC para estimar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en los Estados Unidos. Para la determinación del potencial de contaminación, se tienen en cuenta los factores hidrogeológicos, descartando los contaminantes, por la gran variedad existente, y la influencia antrópica. Asimismo, se busca elaborar un sistema que posibilite una representación clara y sencilla, en forma de mapa, de las zonas más o menos vulnerables a la contaminación. Este método opera como una herramienta de evaluación relativa que debe ser contrastada con otros criterios.

La primera parte del sistema se basa en la delimitación del entorno hidrogeológico, en este caso, se corresponde con la parte española de la cuenca hidrográfica del Tajo. Las propiedades físicas que influyen en el potencial de contaminación de las aguas subterráneas, son propias de cada entorno hidrogeológico. Seguidamente, la segunda parte, consiste en la clasificación de los parámetros hidrogeológicos mediante el método DRASTIC. Dicho método compara diferentes factores, que han de ser cartografiables, y determina que los siete factores que más afectan al potencial de contaminación de las aguas subterráneas son: la profundidad del nivel freático (D), la recarga neta (R), la litología del acuífero (A), el tipo de suelo (S), la topografía (T), la naturaleza de la zona vadosa (I) y la conductividad hidráulica del acuífero (C) (Aller *et al.*, 1987).

A cada uno de los siete parámetros se le asigna un peso en función de su importancia relativa. El valor del peso varía entre 1 y 5, siendo 1 los menos significativos y 5 los más significativos (Tabla 2).

**Tabla 2.** Peso relativo de cada uno de los parámetros del método DRASTIC. Aller *et al.* (1987).

Parámetro	D	R	A	S	T	I	C
Peso (p)	5	4	3	2	1	5	3

## 2.2.1. Parámetro D

### 2.2.1.1. Definición

El parámetro D representa, en un acuífero libre, la profundidad del nivel freático, equivaliendo al espesor de la zona no saturada, es decir, la distancia entre la superficie terrestre y el nivel freático. En un acuífero confinado, el parámetro D, refleja la profundidad del techo del acuífero. Su papel es muy importante (peso 5, según el método DRASTIC), debido a que indica la cantidad de material que el contaminante debe atravesar hasta ponerse en contacto con el acuífero. Generalmente, si el nivel freático se encuentra a gran profundidad, existen más posibilidades de que se produzca la atenuación del contaminante, debido a mayores tiempos de recorrido en contacto con el medio (Aller *et al.*, 1987).

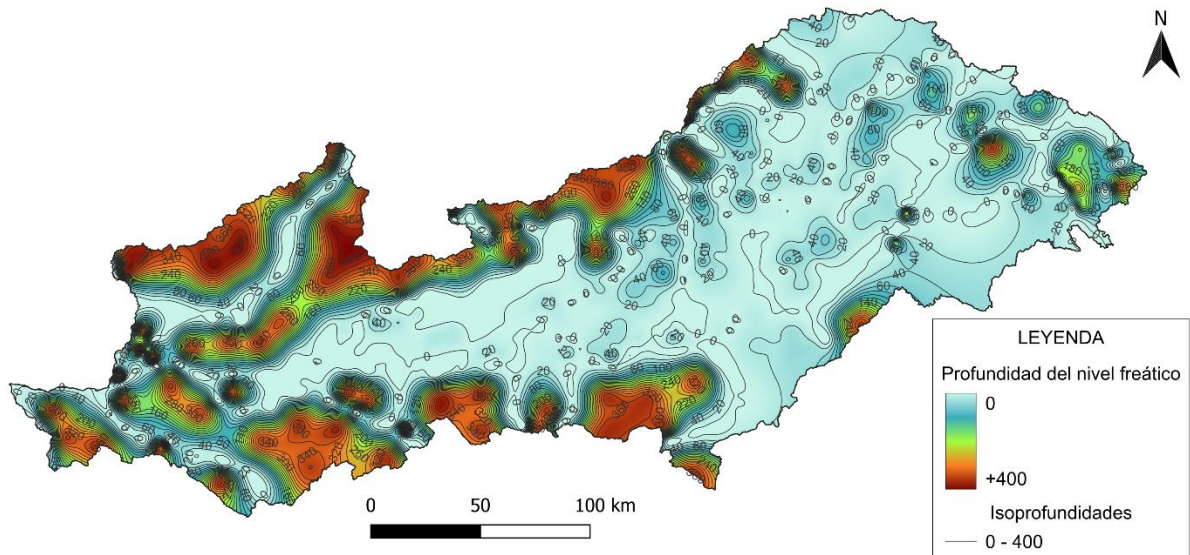
### 2.2.1.2. Procesamiento de datos y mapa

Los datos de la profundidad del nivel freático se han obtenido de MITECO (2024b), teniendo en cuenta las cotas de nivel más altas durante el año 2017. La elección del año 2017 se realiza para aumentar la representatividad de los datos, debido a que es el año más completo. Por otro lado, la elección de la cota más alta se ha realizado para simular el escenario más desfavorable, ya que, con niveles freáticos más altos en todos los piezómetros, la zona no saturada es menos profunda. Se han recogido un total de 182 datos de piezómetros sobre la profundidad del nivel freático en distintos puntos de la cuenca hidrográfica del Tajo. Posteriormente, estos datos, se han combinado con una capa que representa la hidrografía de la cuenca. De esta capa, extraída de CHT (2024b), se ha obtenido el curso de los ríos más importantes. Se ha dado una mayor importancia a los principales afluentes del Tajo (Jarama, Tiétar, Alberche...), a los ríos que presentan mayor longitud (Alagón, Tajuña...), al propio río Tajo y a los ríos que atraviesan la Comunidad de Madrid (Henares, Guadarrama, Manzanares...). Sobre dichos cauces, manteniendo un espaciado constante, se ha atribuido un valor de profundidad igual a 0, debido a que el nivel freático define la superficie del río, encontrándose sobre el nivel del suelo.

Una vez unidas las dos fuentes de datos, se cuenta con un total de 476 puntos de medición en la cuenca, para los cuales se dispone de información sobre la profundidad del nivel freático (Tabla 3). La distribución de los datos de la Tabla 3 se muestra en la Figura 5.

**Tabla 3.** Nº de datos en función al rango de profundidades definido por Aller *et al.* (1987).

Prof. nivel freático (m)	0 – 1.5	1.5 – 4.6	4.6 – 9.1	9.1 – 15.2	15.2 – 22.9	22.9 – 30.5	+30.5
Nº datos	302	21	19	19	27	15	73



**Figura 5.** Mapa de isopropundades de la cuenca hidrográfica del Tajo. Mapa sintético del nivel freático menos profundo en todos los piezómetros de la cuenca en 2017. Realizado con el *software* QGIS (2024).

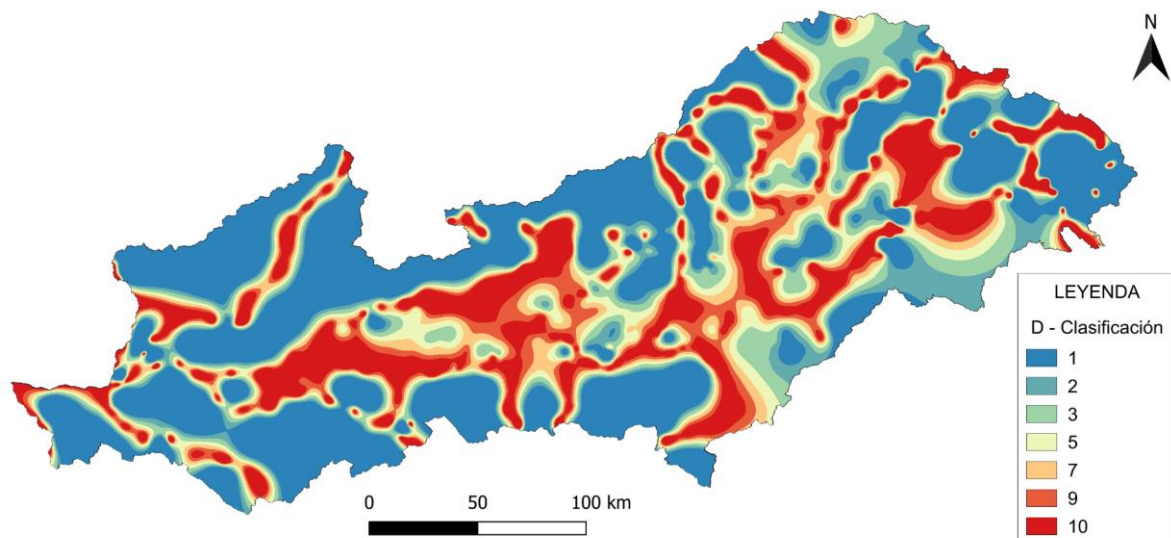
Además, debido a la escasez de medidas a lo largo de toda el área, se ha tenido que realizar un forzado sobre los valores pertenecientes a los bordes norte, oeste, y suroeste de la cuenca hidrográfica del Tajo. En estas zonas, donde las litologías son rocas ígneas y metadetríticas, y el nivel freático se encuentra a mayores profundidades, se han añadido un total de 75 puntos con nivel freático superior al valor de 30.5 m.

Posteriormente, a partir del *software* QGIS (2024), se realiza la interpolación de la capa con los datos mediante el método '*Multilevel b-spline interpolation*', dando como resultado una capa ráster. La reclasificación del ráster se realiza en base a los rangos o intervalos de la profundidad del nivel freático (Tabla 3), determinados y considerados en el sistema DRASTIC. A su vez, estos rangos de profundidades son clasificados con valores del 1 al 10 (Tabla 4), en función de su relevancia para condicionar el potencial de contaminación. Una clasificación igual a 1 implica mínima vulnerabilidad y una clasificación igual a 10 implica máxima vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987).

**Tabla 4.** Clasificación del parámetro D según el rango de profundidades. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

D	
Rango (m)	Clasificación (c)
0 – 1.5	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
+ 30.5	1

Por último, de acuerdo con los rangos de profundidades detallados anteriormente, se lleva a cabo la representación del mapa de clasificación (1-10) del parámetro D (Fig. 6).



**Figura 6.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo clasificado en función del parámetro D. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

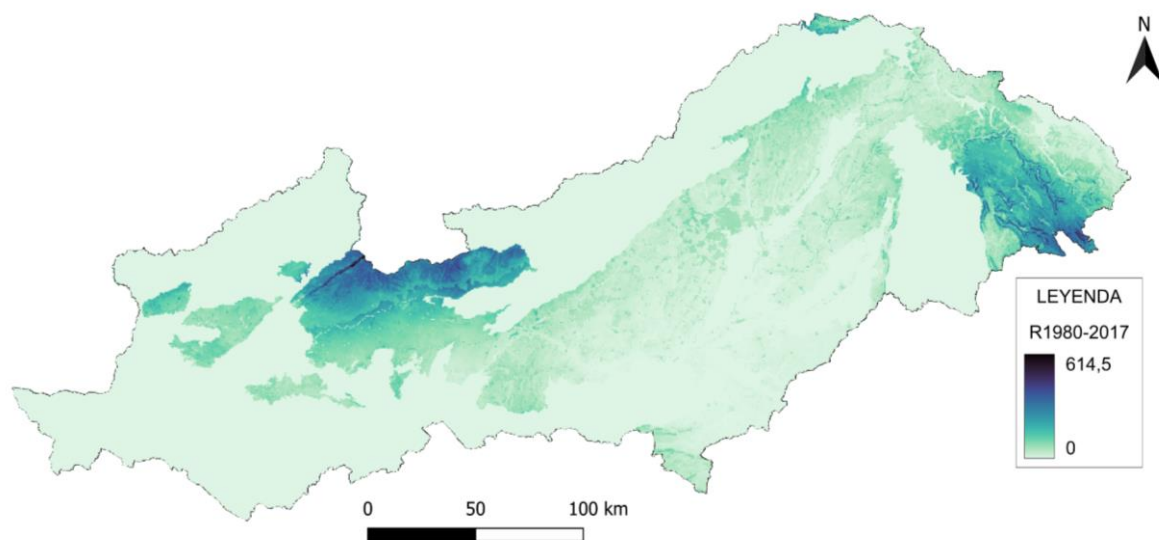
## 2.2.2. Parámetro R

### 2.2.2.1. Definición

El parámetro R representa la recarga neta que llega al acuífero. Durante las precipitaciones, el agua se infiltra a través del suelo. Una parte del volumen de agua infiltrado es capaz de alcanzar la masa de agua subterránea. Su papel es muy importante (peso 4, según el método DRASTIC), debido a que facilita el transporte del contaminante, dentro del acuífero y desde el suelo hasta ponerse en contacto con el acuífero. Generalmente, si se produce una gran recarga, existen más posibilidades de que se produzca la llegada del contaminante al acuífero (Aller *et al.*, 1987).

### 2.2.2.2. Procesamiento de datos y mapa

Los datos de la recarga neta se han obtenido de MITECO (2024c). Debido a la dificultad existente a la hora de encontrar series de datos completas disponibles, se ha seleccionado la capa ráster del promedio anual, en mm, para el periodo de 1980-2017. La recarga neta media de este periodo se sitúa entre los 0 mm y los 600 mm anuales, en función de la zona de la cuenca hidrográfica del Tajo (Fig. 7). Los sectores donde la influencia de la infiltración es mayor se corresponden con la zona de Tajuña, situada al sureste de la cuenca, y con la zona situada al norte de Tiétar y al este de Zarza de Granadilla.



**Figura 7.** Mapa de la recarga neta promedio en la cuenca hidrográfica del Tajo para el periodo de 1980-2017. Modificado de MITECO (2024c).

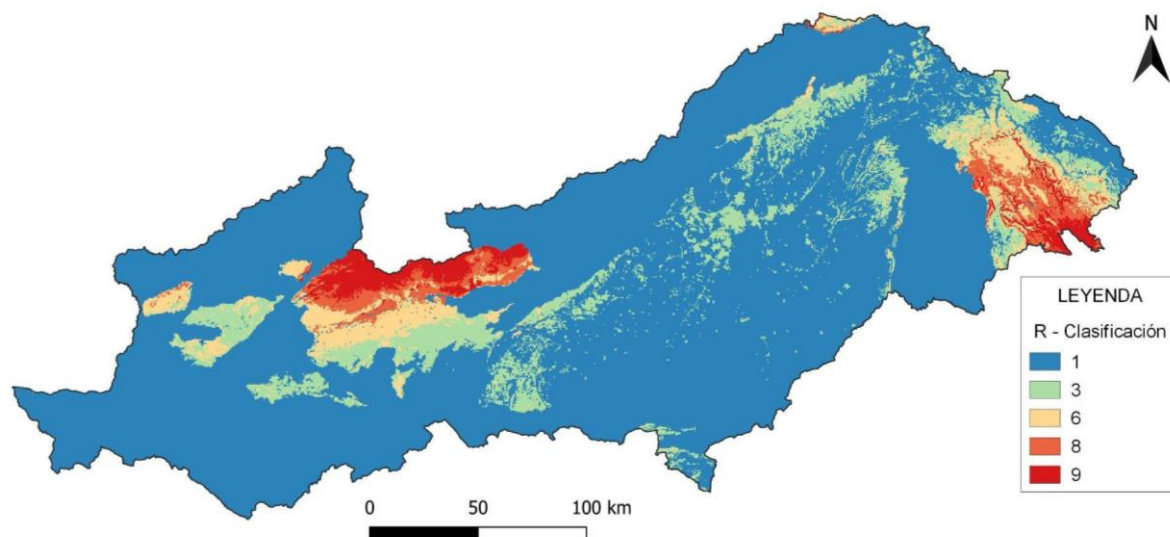
Posteriormente, mediante el *software* QGIS (2024), se realiza la reclasificación del ráster en base a los rangos o intervalos de la recarga neta (Tabla 5), determinados y considerados en el sistema DRASTIC. A su vez, estos rangos de recarga neta, son clasificados con valores del 1 al 9 (Tabla 5), en función de su relevancia para condicionar el potencial de contaminación. Una clasificación igual a 1 implica mínima vulnerabilidad y una clasificación igual a 9 implica máxima vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987).

**Tabla 5.** Clasificación del parámetro R según el rango de recarga neta. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

R	
Rango (mm)	Clasificación (c)
0 – 50.8	1
50.8 – 101.6	3
101.6 – 177.8	6

177.8 – 254	8
+ 255	9

Por último, de acuerdo con los rangos de recarga neta detallados anteriormente, se lleva a cabo la representación del mapa de clasificación (1-9) del parámetro R (Fig. 8).



**Figura 8.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo clasificado en función del parámetro R. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

### 2.2.3. Parámetro A

#### 2.2.3.1. Definición

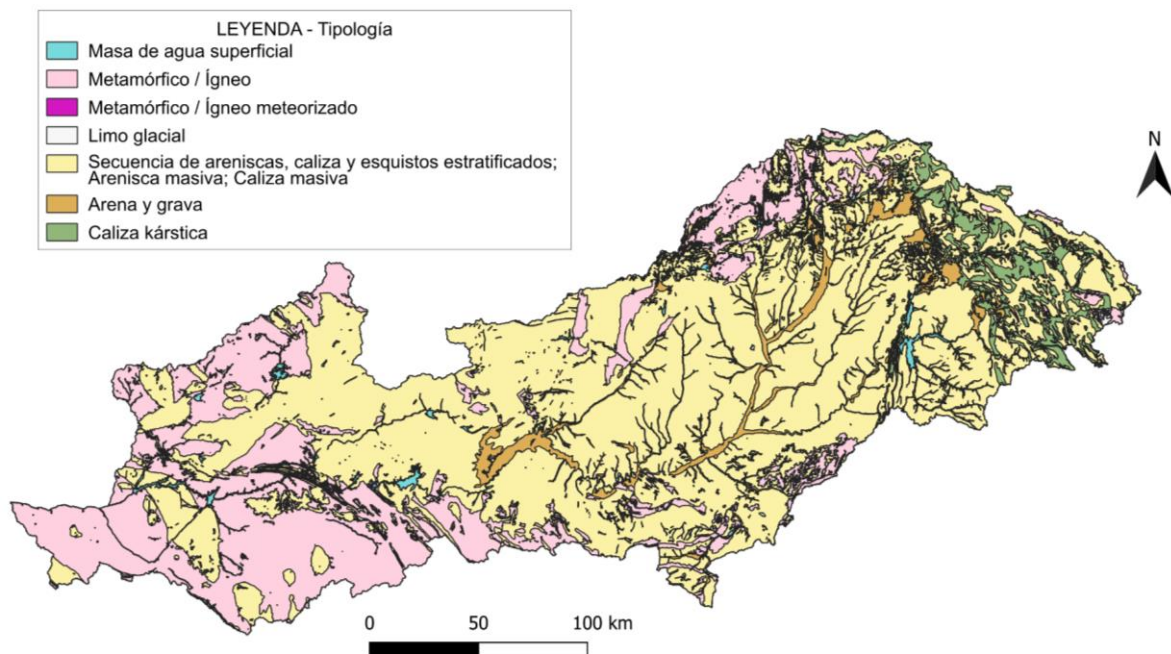
El parámetro A representa la litología que caracteriza al acuífero. Los materiales que dan lugar a la formación del acuífero pueden ser consolidados o no consolidados, y deben ser capaces de albergar grandes volúmenes de agua. En las rocas clásticas y en las granulares, el agua se encuentra relleno de los poros, formando la porosidad primaria. Mientras que, en las rocas no granulares y no clásticas, el agua queda retenida en las fracturas y en las cavidades formadas por la disolución de minerales, representando la porosidad secundaria. Su papel es importante (peso 3, según el método DRASTIC), debido a que controla el flujo del interior del acuífero y la superficie efectiva de las rocas, con las que el contaminante puede interactuar. Generalmente, si el material que conforma el acuífero presenta alta permeabilidad y porosidad, existen más posibilidades de que se produzca una rápida migración del contaminante. Este movimiento dificulta los procesos de atenuación del contaminante en el acuífero (Aller *et al.*, 1987).

### 2.2.3.2. Procesamiento de datos y mapa

Los datos de las litologías de los acuíferos de la cuenca hidrográfica del Tajo se han obtenido del mapa hidrogeológico a escala 1:200 000 (del Pozo Gómez, 2009). En la capa se diferencian un total de 97 unidades litológicas que presentan una descripción detallada. Debido a esta descripción y la necesidad de agruparlas en grupos más generales, se realiza una nueva categorización de las mismas (Tabla 6). Para ello, se usa la tipología definida en el método DRASTIC para el parámetro A (Aller *et al.*, 1987). El resultado de la categorización de las litologías de los acuíferos se muestra en la Figura 9.

**Tabla 6.** Nº de unidades en función a la tipología del acuífero definida por Aller *et al.* (1987).

Tipología	Metamórfico / Ígneo	Metamórfico / Ígneo meteorizado	Limo glacial	Secuencia de areniscas, caliza y esquistos estratificados
Nº unidades	24	1	2	34
Tipología	Arenisca masiva	Caliza masiva	Arena y grava	Caliza kárstica
Nº unidades	4	21	8	3



**Figura 9.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo categorizado en función a las tipologías de los acuíferos definidas por Aller *et al.* (1987).

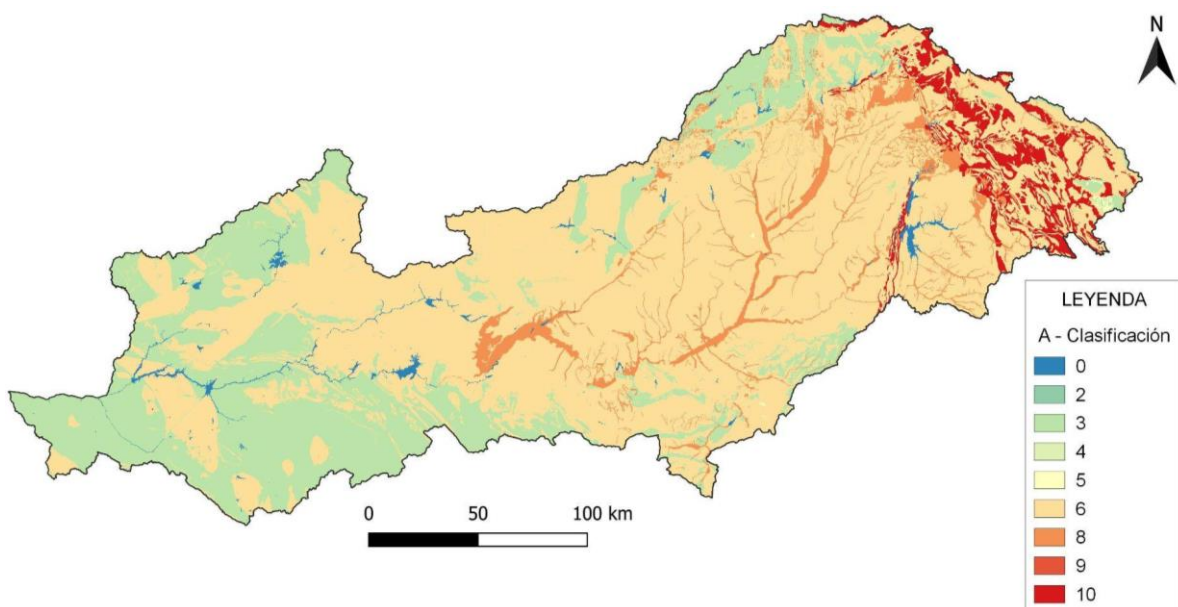
Posteriormente, a partir del *software* QGIS (2024), se realiza la rasterización de la capa en base a la tipología del acuífero (Tabla 6), determinada y considerada en el sistema DRASTIC.

A su vez, esta categoría, es clasificada con valores del 2 al 10 (Tabla 7), en función de su relevancia para condicionar el potencial de contaminación. Existe un intervalo de clasificación según las propiedades de cada tipología (columna clasificación), sin embargo, se eligen los valores de la clasificación típica (c). Una clasificación igual a 2 implica mínima vulnerabilidad y una clasificación igual a 10 implica máxima vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987).

**Tabla 7.** Clasificación del parámetro A según la litología del acuífero. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

A		
Tipología	Clasificación	Clasificación típica (c)
Esquisto masivo	1 – 3	2
Metamórfico / Ígneo	2 – 5	3
Metamórfico / Ígneo meteorizado	3 – 5	4
Limo glacial	4 – 6	5
Secuencia de areniscas, caliza y esquistos estratificados	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena y grava	4 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	9 – 10	10

Por último, de acuerdo con las tipologías de acuíferos detalladas anteriormente, se lleva a cabo la representación del mapa de clasificación (2-10) del parámetro A (Fig. 10). Los valores igual a 0 en el mapa se corresponden con masas de agua superficial.



**Figura 10.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo clasificado en función del parámetro A. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

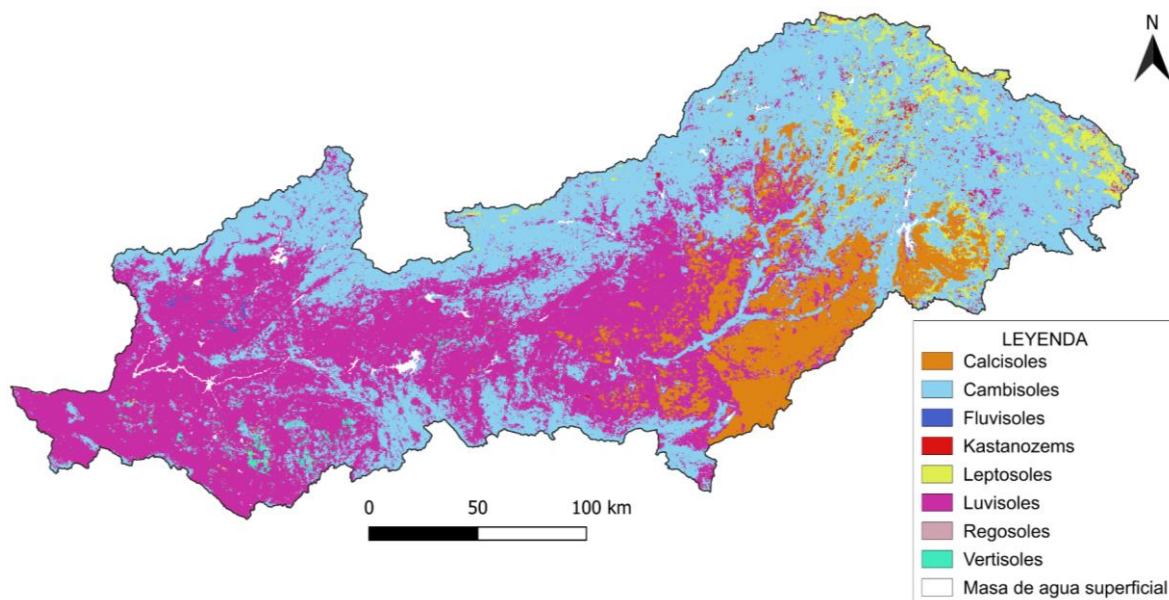
## 2.2.4. Parámetro S

### 2.2.4.1. Definición

El parámetro S representa el tipo de suelo que se sitúa sobre la zona vadosa. Para caracterizar el suelo se considera una profundidad menor a dos metros desde la superficie. Su papel es algo menos importante que los parámetros descritos anteriormente (peso 3, según el método DRASTIC). Sin embargo, el tamaño de grano y la textura del suelo, controlan el volumen de recarga que puede infiltrarse hacia zonas más profundas. El contenido en materia orgánica y las características de las arcillas, como la expansividad y contracción, también influyen en la capacidad de contaminación. Generalmente, si el material presente en el suelo posee textura fina, su permeabilidad es baja y no se contrae ni se hincha, existen más posibilidades de que se produzca una lenta migración del contaminante (Aller *et al.*, 1987).

### 2.2.4.2. Procesamiento de datos y mapa

Los datos del tipo de suelo se han obtenido de ISRIC (2024), usando la 'Base de referencia mundial' (FAO, 2006) para la clasificación de suelos. Los tipos de suelos obtenidos para la cuenca hidrográfica del Tajo se muestran en la Figura 11.



**Figura 11.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo categorizado en función a las clases de suelo disponibles en ISRIC (2024).

Para poder aplicar la metodología del sistema DRASTIC, se ha tenido que hacer una nueva categorización de los tipos de suelos mostrado en la Figura 11. Para ello, se usa la tipología definida en el método DRASTIC para el parámetro S (Aller *et al.*, 1987). El resultado de la categorización de los suelos se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Categorización de los suelos según los tipos de suelos definidos por Aller *et al.* (1987).

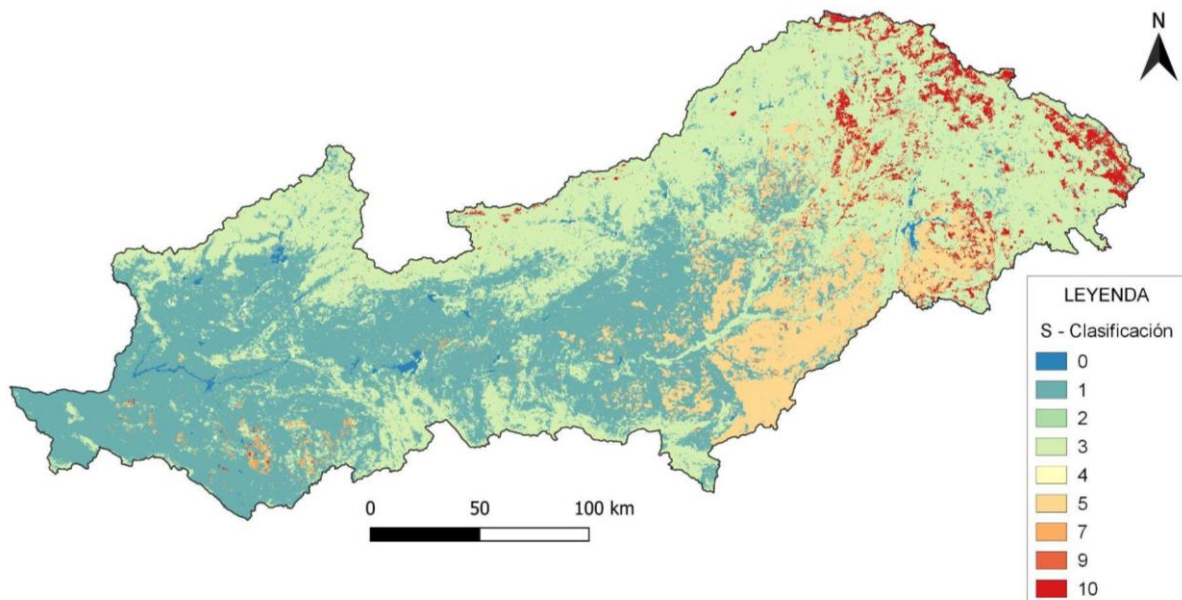
Soilgrids	Calcisoles	Cambisoles	Fluvisoles	Kastanozems
DRASTIC	Marga	Franco arcilloso	Franco limoso	Materia orgánica
Descripción	Debido a su contenido en carbonatos.	Acumulación de arcillas	Material flúvico	Ricos en materia orgánica
Soilgrids	Leptosoles	Luvisoles	Regosoles	Vertisoles
DRASTIC	Grava	Arcilla sin contracción ni agregación	Arena	Arcilla retraída y/o agregada
Descripción	Abundantes gravas	Lavado de arcilla	Depósitos de arena reciente	Minerales de arcilla expansiva

Posteriormente, mediante el *software* QGIS (2024), se realiza la rasterización de la capa en base al tipo de suelo (Tabla 8), determinados y considerados en el sistema DRASTIC. A su vez, esta categoría, es clasificada con valores del 1 al 10 (Tabla 9), en función de su relevancia para condicionar el potencial de contaminación. Una clasificación igual a 1 implica mínima vulnerabilidad y una clasificación igual a 10 implica máxima vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987).

**Tabla 9.** Clasificación del parámetro S según el tipo de suelo. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

<b>S</b>	
Tipología	Clasificación (c)
Fino o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Turba	8
Arcilla retraída y/o agregada	7
Franco arenoso	6
Marga	5
Franco limoso	4
Franco arcilloso	3
Materia orgánica	2
Arcilla sin contracción ni agregación	1

Por último, de acuerdo con las tipologías de suelos detalladas anteriormente, se lleva a cabo la representación del mapa de clasificación (1-10) del parámetro S (Fig. 12). Los valores igual a 0 en el mapa se corresponden con masas de agua superficial.



**Figura 12.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo clasificado en función del parámetro S. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

## 2.2.5. Parámetro T

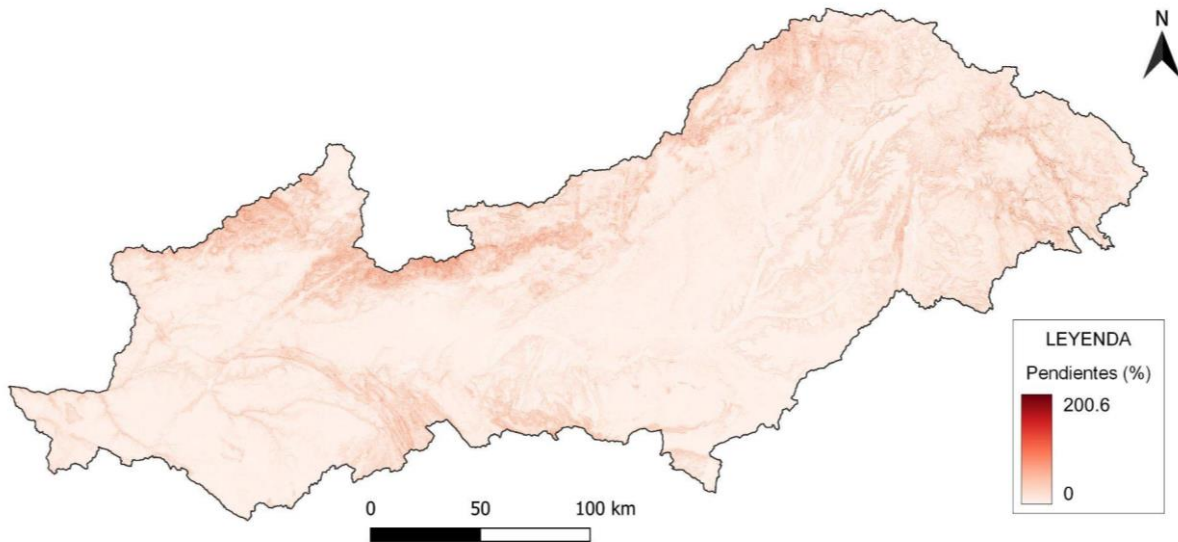
### 2.2.5.1. Definición

El parámetro T representa la pendiente topográfica de la zona. Su papel es el menos importante (peso 1, según el método DRASTIC), sin embargo, la topografía condiciona el proceso de infiltración, señala las zonas más propensas a concentrar contaminantes y ayuda a deducir la dirección del flujo de las aguas subterráneas. Generalmente, si la pendiente es mayor, existen más posibilidades de que los contaminantes se deslicen, reduciendo el tiempo disponible para que se infiltren y alcancen el acuífero (Aller *et al.*, 1987).

### 2.2.5.2. Procesamiento de datos y mapa

Los datos de las pendientes de la cuenca hidrográfica del Tajo se han obtenido del modelo de elevación digital, 'SRTM 1 arc-second global' con una resolución de píxel de 30 m, extraído de USGS (2024).

En primer lugar, a partir del *software* QGIS (2024), se calculan las pendientes de la capa ráster y se realiza una conversión desde grados a porcentajes. El porcentaje de la pendiente se sitúa entre 0 y 200 en función de la zona de la cuenca (Fig. 13). Las zonas con mayor pendiente se localizan principalmente en el borde norte de la cuenca, coincidiendo con los relieves del Sistema Central.



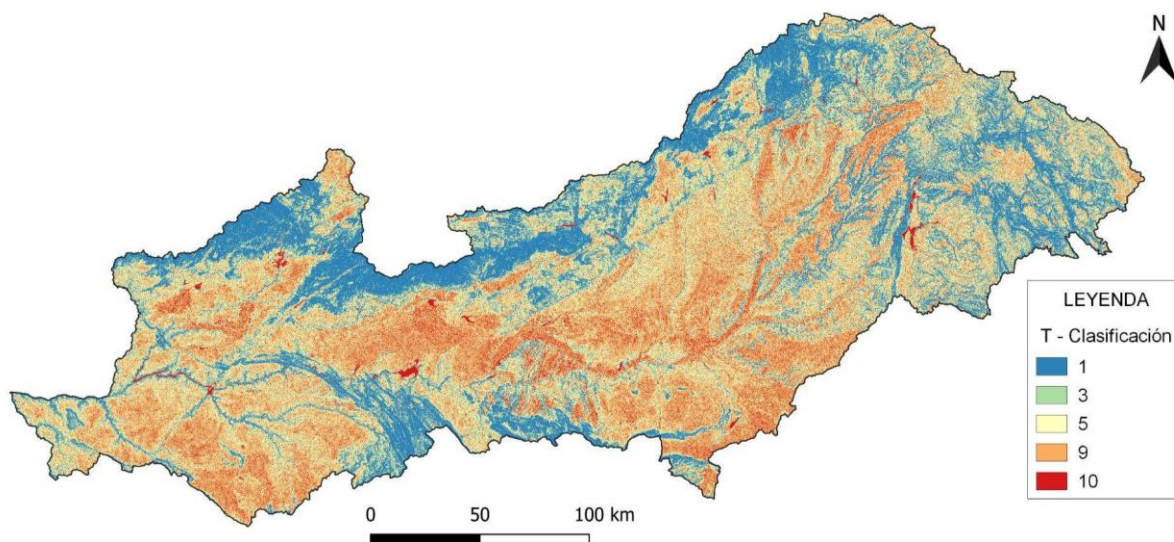
**Figura 13.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo categorizado en función del % de las pendientes. Modelo base extraído de USGS (2024).

Posteriormente, se realiza la reclasificación del ráster en base a los rangos o intervalos de la pendiente (Tabla 10), determinados y considerados en el sistema DRASTIC. A su vez, estos rangos de pendiente, son clasificados con valores del 1 al 10 (Tabla 10), en función de su relevancia para condicionar el potencial de contaminación. Una clasificación igual a 1 implica mínima vulnerabilidad y una clasificación igual a 10 implica máxima vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987).

**Tabla 10.** Clasificación del parámetro T según el rango de la pendiente. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

T	
Rango (%)	Clasificación (c)
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
+ 18	1

Por último, de acuerdo con los rangos de pendientes detallados anteriormente, se lleva a cabo la representación del mapa de clasificación (1-10) del parámetro T (Fig. 14).



**Figura 14.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo clasificado en función del parámetro T. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

## 2.2.6. Parámetro I

### 2.2.6.1. Definición

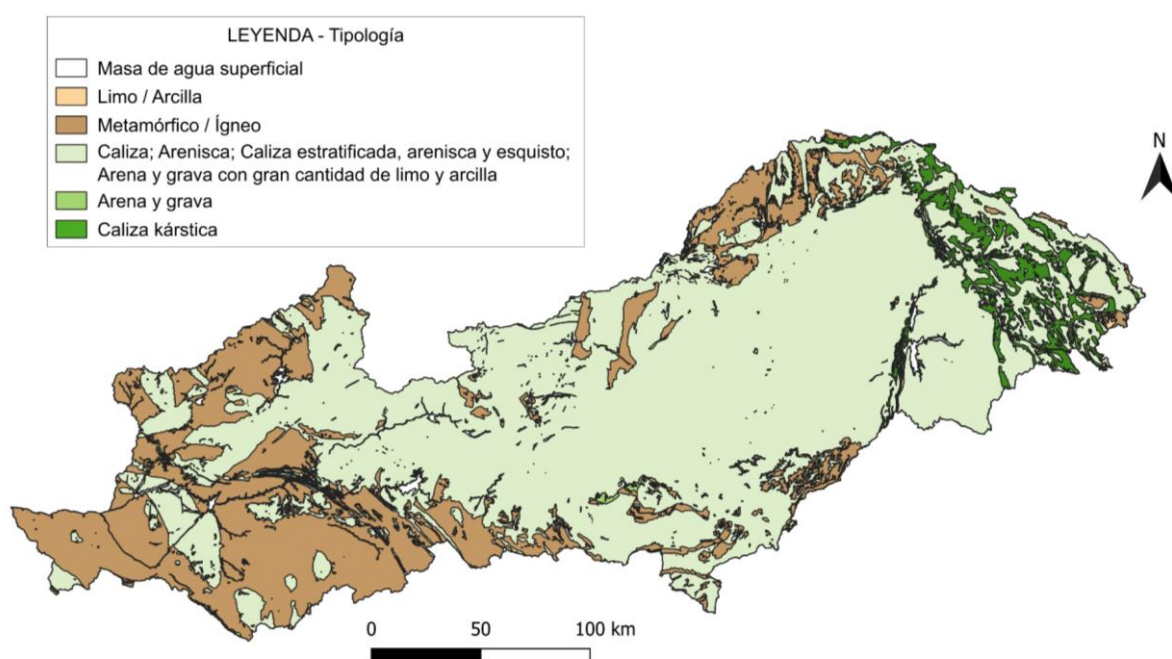
El parámetro I representa la litología que caracteriza a la zona no saturada. La zona no saturada o zona vadosa se sitúa por encima del nivel freático y por debajo del suelo. La litología de esta zona condiciona el recorrido y la dirección del contaminante. Su papel es muy importante (peso 5, según el método DRASTIC), debido a que controla el flujo desde el suelo hasta la lámina de agua. Generalmente, si el material que conforma la zona no saturada presenta baja porosidad y permeabilidad, existen más posibilidades de que se produzca una rápida atenuación del contaminante. Esta zona se caracteriza por procesos de atenuación de contaminantes, como la volatilización, la dispersión y la biodegradación (Aller *et al.*, 1987).

### 2.2.6.2. Procesamiento de datos y mapa

Los datos de las litologías de la zona no saturada de la cuenca hidrográfica del Tajo se han obtenido del mapa litoestratigráfico a escala 1:200 000 (del Pozo Gómez, 2009). En la capa se diferencian un total de 97 litologías que presentan una descripción detallada. Debido a esta descripción y la necesidad de agruparlas en grupos más generales, se realiza una nueva categorización de las mismas (Tabla 11). Para ello, se usa la tipología definida en el método DRASTIC para el parámetro I (Aller *et al.*, 1987). El resultado de la categorización de las litologías de la zona no saturada se muestra en la Figura 15.

**Tabla 11.** Nº de unidades en función a la tipología de la zona no saturada definida por Aller *et al.* (1987).

Tipología	Limo / Arcilla	Caliza	Arenisca	Caliza estratificada, arenisca y esquisto
Nº unidades	3	20	2	24
Tipología	Arena y grava con gran cantidad de limo y arcilla	Metamórfico / Ígneo	Arena y grava	Caliza kárstica
Nº unidades	17	25	3	3



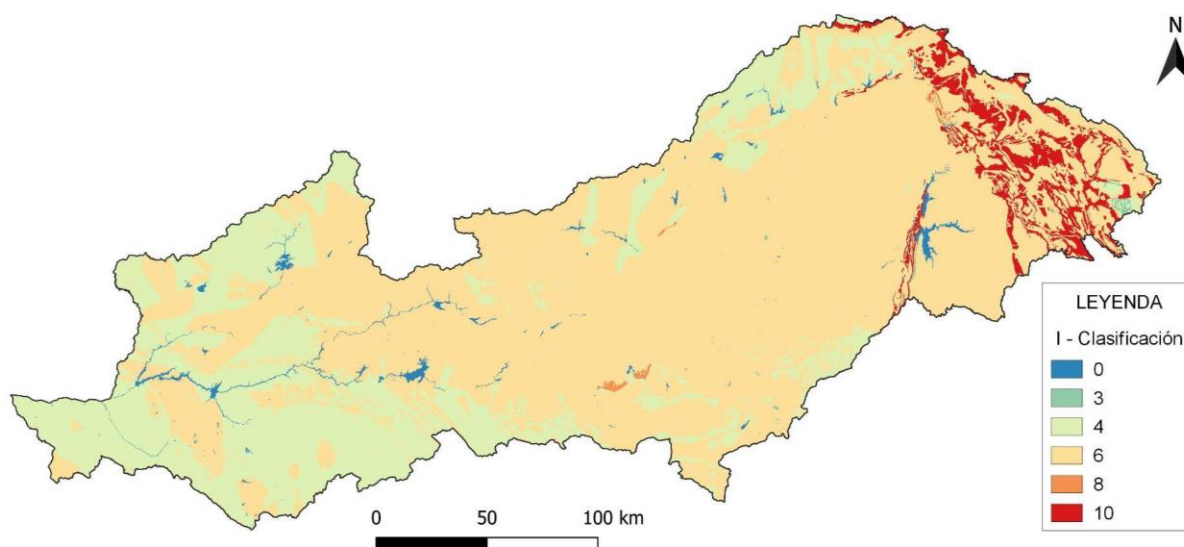
**Figura 15.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo categorizado en función a las tipologías de la zona no saturada definidas por Aller *et al.* (1987).

Posteriormente, mediante el *software* QGIS (2024), se realiza la rasterización de la capa en base a la tipología de la zona no saturada (Tabla 11), determinada y considerada en el sistema DRASTIC. A su vez, esta categoría, es clasificada con valores del 1 al 10 (Tabla 12), en función de su relevancia para condicionar el potencial de contaminación. Existe un intervalo de clasificación según las propiedades de cada tipología (columna clasificación), sin embargo, se eligen los valores de la clasificación típica (c). Una clasificación igual a 1 implica mínima vulnerabilidad y una clasificación igual a 10 implica máxima vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987).

**Tabla 12.** Clasificación del parámetro I según la litología de la zona no saturada. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

I		
Tipología	Clasificación	Clasificación típica (c)
Capa de confinamiento	1	1
Limo / Arcilla	2 – 6	3
Esquisto	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Caliza estratificada, arenisca, esquisto	4 – 8	6
Arena y grava con gran cantidad de limo y arcilla	4 – 8	6
Metamórfico / Ígneo	2 – 8	4
Arena y grava	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	8 – 10	10

Por último, de acuerdo con las tipologías de la zona no saturada descritas anteriormente, se lleva a cabo la representación del mapa de clasificación (1-10) del parámetro I (Fig. 16). Los valores igual a 0 en el mapa se corresponden con masas de agua superficial.



**Figura 16.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo clasificado en función del parámetro I. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

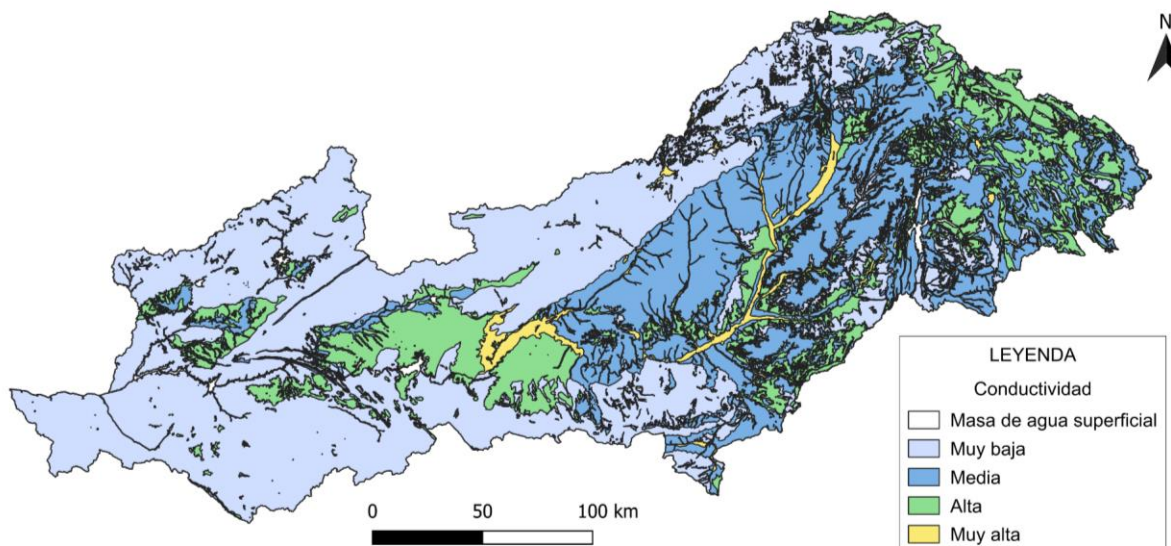
## 2.2.7. Parámetro C

### 2.2.7.1. Definición

El parámetro C representa la conductividad hidráulica del acuífero. La conductividad hidráulica es la capacidad que presentan los materiales del acuífero para permitir el movimiento del agua a través de ellos. Su papel es importante (peso 3, según el método DRASTIC), debido a que controla la velocidad a la que fluye el agua subterránea y, en consecuencia, la velocidad del contaminante. Generalmente, si el material que conforma el acuífero presenta una alta porosidad interconectada, existen más posibilidades de que el contaminante fluya sin que se produzca su atenuación (Aller *et al.*, 1987).

### 2.2.7.2. Procesamiento de datos y mapa

Los datos de la conductividad hidráulica de los acuíferos de la cuenca hidrográfica del Tajo se han obtenido del mapa de permeabilidades a escala 1:200 000 (del Pozo Gómez, 2009). En la capa se reconocen un total de cuatro grupos de formaciones agrupados según su permeabilidad (Fig. 17). Se considera que la permeabilidad es lo mismo que la conductividad hidráulica.



**Figura 17.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo categorizado en función a la conductividad hidráulica de los acuíferos. Capa extraída de del Pozo Gómez (2009).

En el primer grupo, de permeabilidad muy baja, se distinguen las 'Formaciones generalmente impermeables o de muy baja permeabilidad y formaciones metadetríticas, ígneas y evaporíticas de permeabilidad baja y media'. En el segundo grupo, de permeabilidad media,

se diferencian 'Formaciones carbonatadas y volcánicas de permeabilidad media' y 'Formaciones detríticas y cuaternarias de permeabilidad media. Formaciones volcánicas de alta permeabilidad'. En el tercer grupo, de alta permeabilidad, se identifican 'Formaciones carbonatadas de permeabilidad alta o muy alta' y 'Formaciones evaporíticas, ígneas y metadetríticas de alta o muy alta permeabilidad. Formaciones detríticas, volcánicas, carbonatadas y cuaternarias de permeabilidad baja'. El último grupo, de permeabilidad muy alta, incluye 'Formaciones detríticas y cuaternarias de permeabilidad alta o muy alta, así como formaciones volcánicas de permeabilidad muy alta'.

Para poder aplicar la metodología del sistema DRASTIC, se ha tenido que hacer una nueva categorización de la conductividad hidráulica mostrada en la Figura 17. Para ello, se usa el rango definido en el método DRASTIC para el parámetro C (Aller *et al.*, 1987). El resultado de la correlación de la conductividad hidráulica se muestra en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Categorización de la conductividad hidráulica según los rangos definidos por Aller *et al.* (1987).

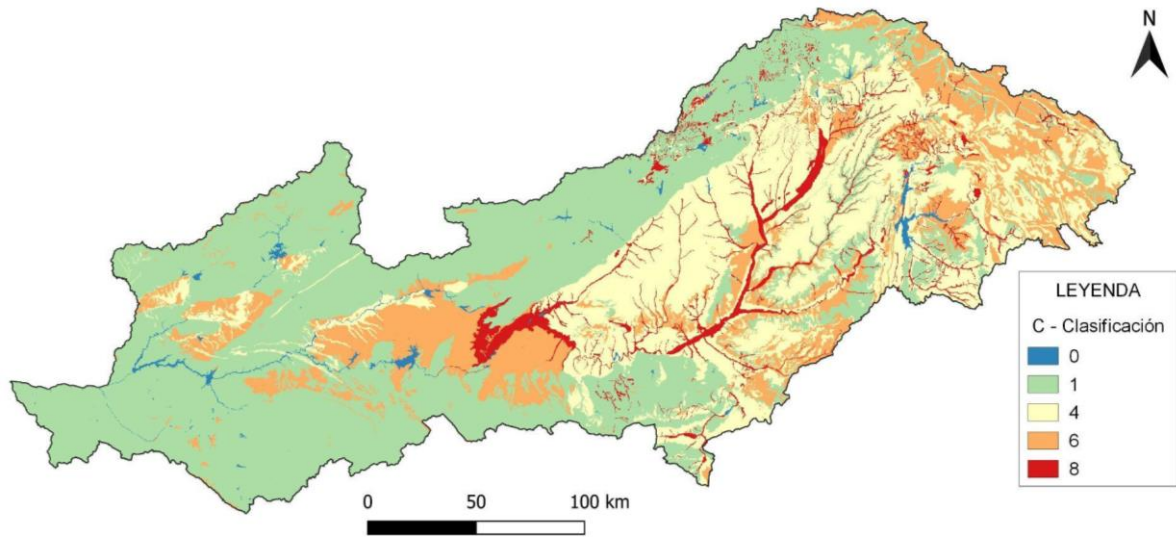
Conductividad (m/d)	Muy baja	Media	Alta	Muy alta
DRASTIC	0.05 – 4.89	14.68 – 34.25	34.25 – 48.94	48.94 – 97.87

Posteriormente, a partir del *software* QGIS (2024), se realiza la rasterización de la capa en base a los rangos o intervalos de la conductividad hidráulica (Tabla 14), determinados y considerados en el sistema DRASTIC. A su vez, esta categoría, es clasificada con valores del 1 al 10 (Tabla 14), en función de su relevancia para condicionar el potencial de contaminación. Una clasificación igual a 1 implica mínima vulnerabilidad y una clasificación igual a 10 implica máxima vulnerabilidad (Aller *et al.*, 1987).

**Tabla 14.** Clasificación del parámetro C según el rango de la conductividad hidráulica. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

C	
Rango (m/d)	Clasificación (c)
0.05 – 4.89	1
4.89 – 14.68	2
14.68 – 34.25	4
34.25 – 48.94	6
48.94 – 97.87	8
+ 97.87	10

Por último, de acuerdo con los rangos de conductividad hidráulica descritos anteriormente, se lleva a cabo la representación del mapa de clasificación (1-8) del parámetro C (Fig. 18).



**Figura 18.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo clasificado en función del parámetro C. Método DRASTIC (Aler *et al.*, 1987).

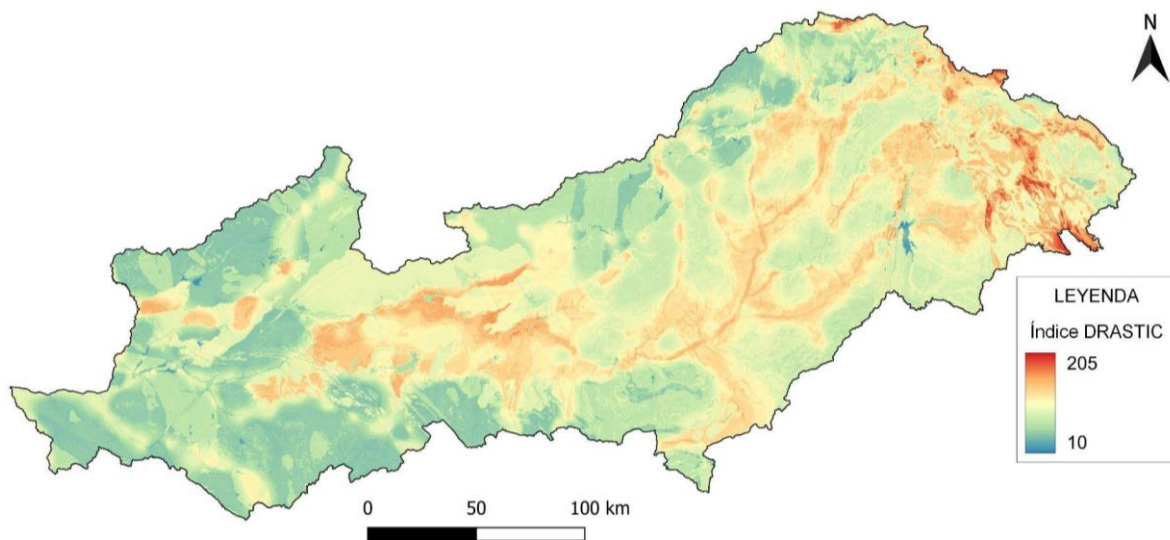
### 3. RESULTADOS

Tras obtener los mapas que influyen en la vulnerabilidad de los acuíferos de la cuenca hidrográfica del Tajo, clasificados en función de cada uno de los siete parámetros que considera el método DRASTIC, se calcula el Índice DRASTIC para valorar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.

Para el cálculo del Índice DRASTIC, se combina el peso relativo de cada uno de los parámetros (Tabla 2) y la clasificación de cada uno de ellos (Figs. 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 18). La fórmula para calcular el Índice DRASTIC se muestra a continuación, siendo (p) el peso relativo y (c) la clasificación de los parámetros:

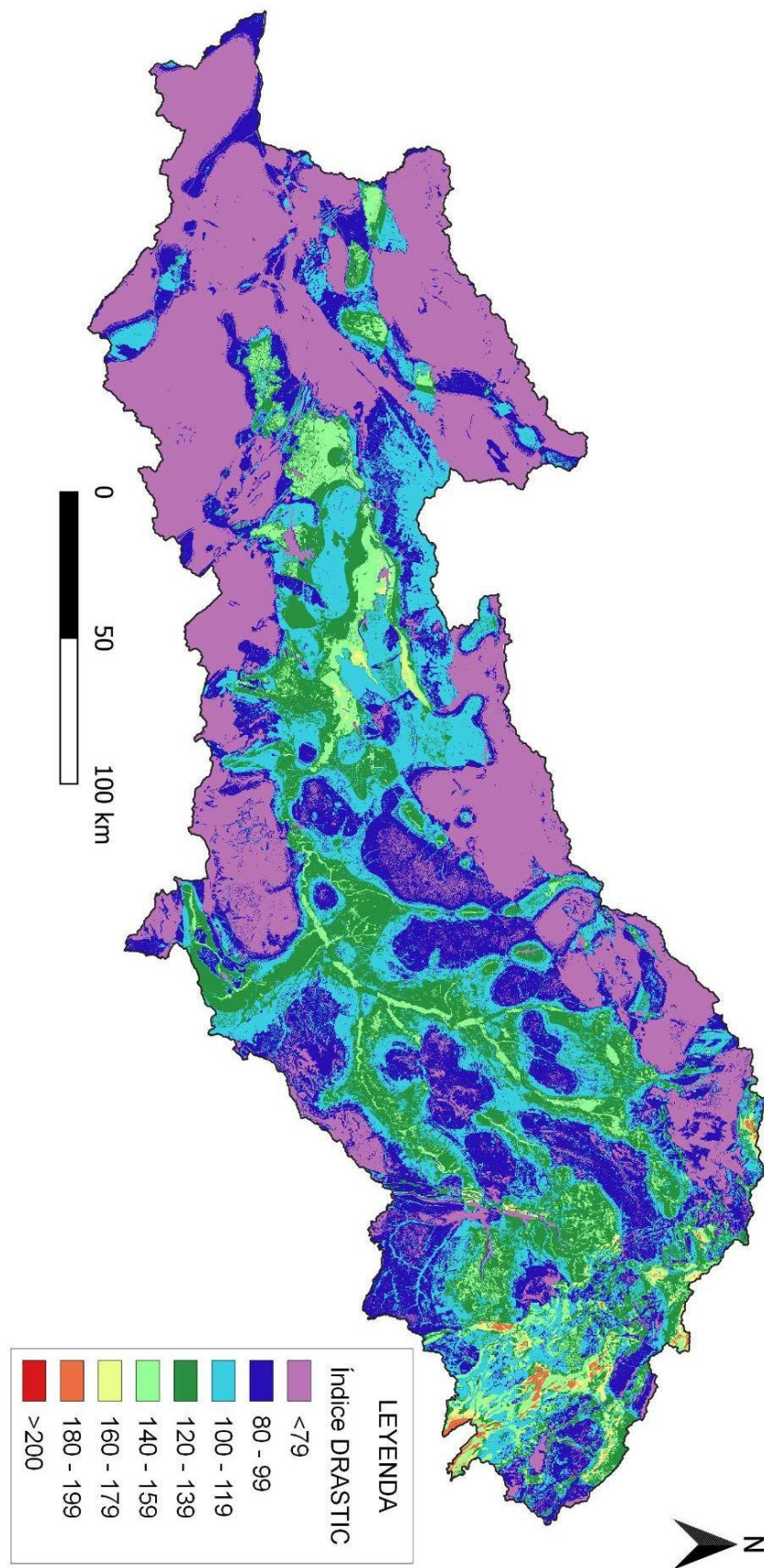
$$\text{Índice de vulnerabilidad} = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c$$

Mediante el uso de la calculadora ráster del *software* QGIS (2024), se obtiene el mapa que muestra el Índice DRASTIC en cada uno de los puntos de la cuenca (Fig. 19).



**Figura 19.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo clasificado en función al resultado del Índice DRASTIC. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Para una mejor comprensión de la distribución del Índice DRASTIC en la cuenca, se realiza la clasificación de sus rangos por colores (Fig. 20; Tabla 15). A su vez, cada uno de los rangos del Índice DRASTIC, se cualifica según su relación con la intensidad del potencial de contaminación de los acuíferos. En la Tabla 15 se muestra la relación entre los rangos del Índice DRASTIC y el potencial de contaminación que presenta cada uno de los rangos establecidos por el método.



**Figura 20.** Mapa de la cuenca hidrográfica del Tajo clasificado en función a los colores del Índice DRASTIC. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

**Tabla 15.** Clasificación de los rangos del Índice DRASTIC por colores y evaluación de los rangos del Índice DRASTIC según la intensidad del potencial de contaminación. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Índice DRASTIC	Color	Potencial de contaminación
< 79	Morado	Mínimo
80 – 99	Azul intenso	Muy bajo
100 – 119	Azul	Bajo
120 – 139	Verde oscuro	Medio bajo
140 – 159	Verde claro	Medio alto
160 – 179	Amarillo	Alto
180 – 199	Naranja	Muy alto
> 200	Rojo	Máximo

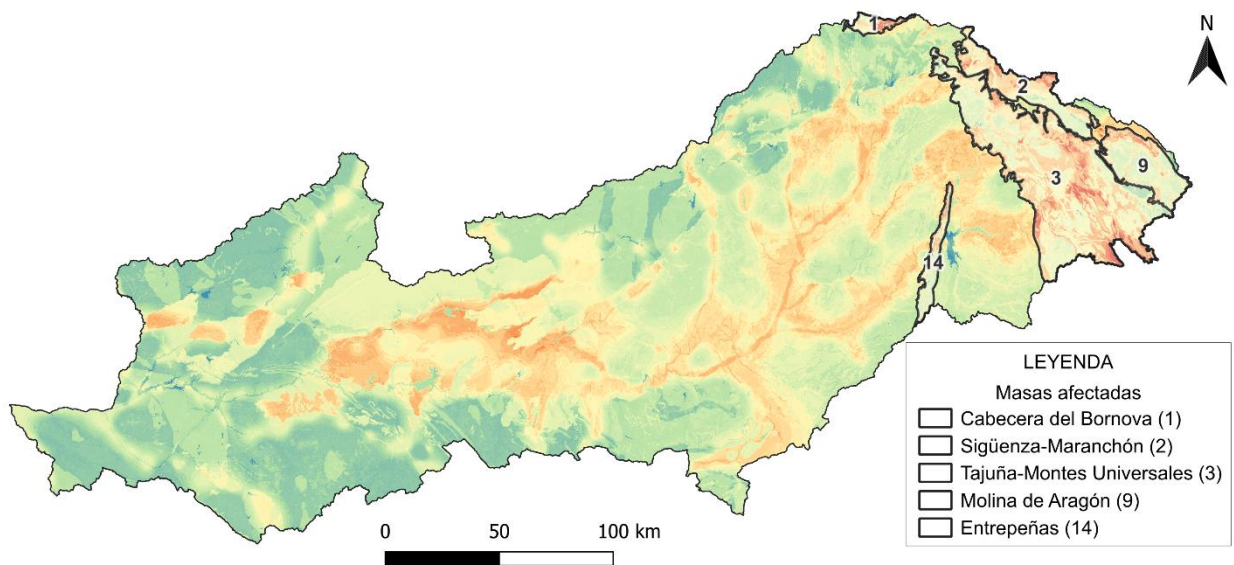
Con el propósito de estimar el potencial de contaminación general, se calcula el porcentaje que representa cada uno de los rangos del Índice DRASTIC en el total de la superficie de la cuenca hidrográfica del Tajo (Tabla 16).

**Tabla 16.** Porcentaje de cada rango del Índice DRASTIC en la cuenca hidrográfica del Tajo.

Índice DRASTIC	Potencial de contaminación	Superficie (%)
< 79	Mínimo	35.08
80 – 99	Muy bajo	22.80
100 – 119	Bajo	20.17
120 – 139	Medio bajo	15.29
140 – 159	Medio alto	5.55
160 – 179	Alto	0.78
180 – 199	Muy alto	0.33
> 200	Máximo	0.01

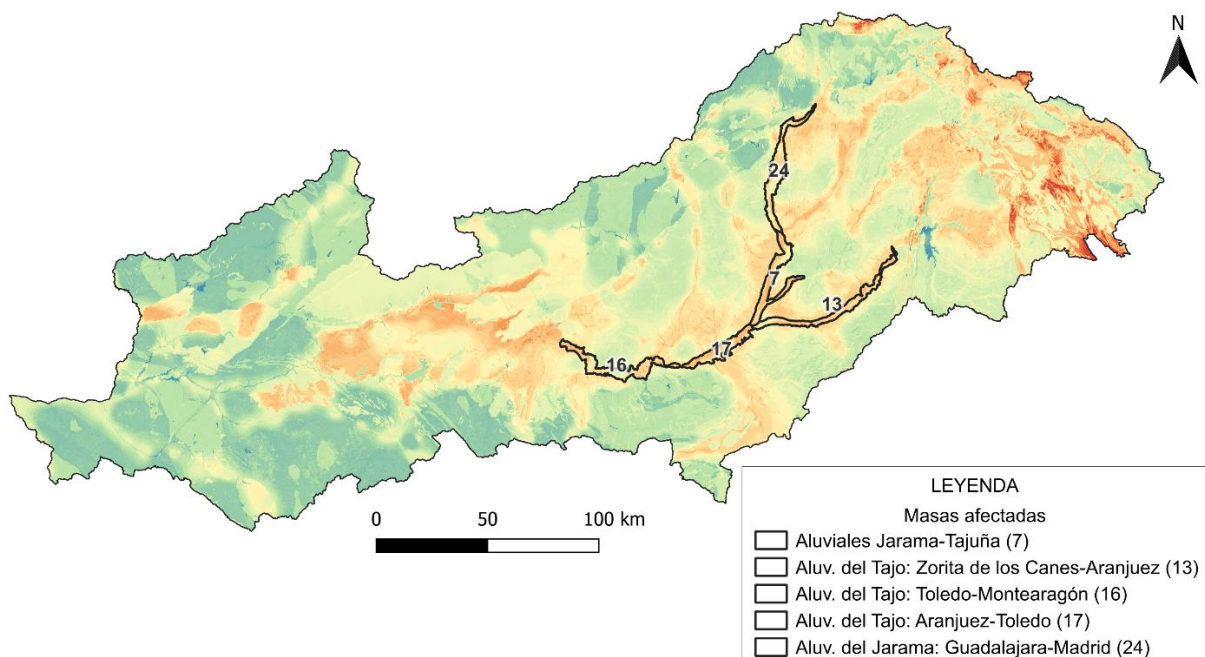
Así, de los 55779 km<sup>2</sup> de área de la cuenca en el territorio español, un 0.01% muestra un potencial de contaminación máximo y un 0.33% tiene un potencial de contaminación muy alto. Mientras que, cerca del 58% de la superficie de la cuenca presenta una vulnerabilidad mínima o muy baja a la contaminación.

Las zonas con mayor Índice DRASTIC (>180), presentan una mayor vulnerabilidad o un potencial de contaminación de las aguas subterráneas más elevado. Por ello, como se muestra en la Figura 19, la zona más vulnerable a la contaminación dentro de la cuenca hidrográfica del Tajo coincide con el sector más oriental de la cuenca, abarcando parte de las provincias de Guadalajara, Cuenca, Teruel y Soria. En esta zona, se localizan las masas de Cabecera del Bornova, Sigüenza-Maranchón, Tajuña-Montes Universales, Molina de Aragón y Entrepeñas. La ubicación de las masas de agua sobre el mapa de la cuenca en función del Índice DRASTIC se muestra en la Figura 21.



**Figura 21.** Masas de agua subterránea de la cuenca hidrográfica del Tago que coinciden con un Índice DRASTIC muy elevado. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

En la parte central de la cuenca, las zonas asociadas o cercanas a los cauces fluviales presentan valores medios o altos, de 120 a 179, del Índice DRASTIC. Estas regiones comprenden parte de las provincias de Cuenca, Toledo, Guadalajara y la Comunidad de Madrid, y se corresponden principalmente con las masas de agua subterránea de Aluviales Jarama-Tajuña, Aluvial del Tajo: Zorita de los Canes-Aranjuez, Aluvial del Tajo: Toledo-Montearagón, Aluvial del Tajo: Aranjuez-Toledo y Aluvial del Jarama: Guadalajara-Madrid. La ubicación de las masas de agua sobre el mapa de la cuenca en función del Índice DRASTIC se muestra en la Figura 22.



**Figura 22.** Masas de agua subterránea de la cuenca hidrográfica del Tago que coinciden con un Índice DRASTIC medio/alto. Método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987).

Por el contrario, las zonas con menor Índice DRASTIC (<119), presentan un potencial de contaminación de las aguas subterráneas más bajo. Por ello, como se muestra en la Figura 19, las zonas menos vulnerables a la contaminación dentro de la cuenca hidrográfica del Tajo coinciden principalmente con los bordes norte, oeste y sur de la cuenca, situándose en parte de las provincias de Guadalajara, Segovia, Ávila, Salamanca, Cáceres, Badajoz, Toledo, Ciudad Real, Cuenca, Teruel y la Comunidad de Madrid. La mayor parte de la zona de borde de cuenca destaca por la ausencia de masas de agua subterránea definidas. Dicha ausencia se relaciona con las litologías ígneas y metamórficas de la zona, las cuales presentan mayor dificultad para formar acuíferos significativos. En esta zona se localizan las masas de Ocaña, Sonseca y Algodor, ambas definidas en el último plan hidrológico de la cuenca.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Evaluación de consistencia del mapa

La zona evaluada como más vulnerable, con Índice DRASTIC superior a 180, se sitúa al este de la cuenca hidrográfica del Tajo (Fig. 20).

La recarga neta media de la zona durante el periodo de 1980-2017 presenta valores muy variables, desde 200 hasta unos 360 mm/año, alcanzando los 380 mm/año (Fig. 7). A pesar de la alta recarga en la masa de Tajuña-Montes Universales, no es la zona donde se encuentren los mayores valores de recarga neta de la cuenca. Por su lado, la pendiente de la zona presenta porcentajes muy diversos, encontrando superficies horizontales y laderas de hasta 18% de inclinación (Fig. 13). Los parámetros mencionados (R y T), no son indicadores directos de la vulnerabilidad que presentan las masas de Tajuña-Montes Universales, Molina de Aragón, Sigüenza-Maranchón, Cabecera del Bornova y Entrepeñas.

Sin embargo, aparece una estrecha relación de esta vulnerabilidad con los parámetros D, A, S, I y C. El nivel freático de esta región, en 2017, se localiza a profundidades menores de 1.5 m (Fig. 5). Estas profundidades del nivel freático se muestran en la mitad de la cuenca. No obstante, en ese mismo entorno, las zonas más profundas disminuyen considerablemente su vulnerabilidad. Por otra parte, los acuíferos presentes en la zona se caracterizan por su tipología de caliza kárstica (Fig. 9). Esta litología se encuentra únicamente en la parte este de la cuenca. Además, los tipos de suelo presentes son de tipología grava y franco arcilloso (Fig. 11; Tabla 8), destacando una estrecha relación con los de tipo grava. Igualmente, como ocurre en el tipo de acuífero, la litología de la zona no saturada se corresponde con caliza kárstica en su totalidad (Fig. 15). Por último, la conductividad hidráulica de la zona más vulnerable se corresponde con valores de entre 34.25 – 48.94 m/d (Fig. 17; Tabla 13). Estos valores de conductividad más alta se relacionan directamente con la litología existente.

Comparando los valores de profundidad del nivel freático, recarga neta, pendiente y conductividad hidráulica, y las tipologías del acuífero, zona no saturada y el suelo, de la zona más vulnerable con el resto de la cuenca hidrográfica, se visualiza la clara asociación existente entre la profundidad del nivel freático y la litología de la zona no saturada (Figs. 5 y 15), con la elevada vulnerabilidad presente en la zona más oriental de la cuenca (Fig. 19).

Igualmente, la conductividad hidráulica del acuífero está condicionada por la litología del mismo. Además, se puede destacar, aunque en menor medida, la relación de esta zona mayormente vulnerable con la tipología 'grava' que presenta el suelo. Los suelos de grava

presentan tamaños de grano mayor a 2 mm. En este tipo de suelos, la permeabilidad es elevada y el riesgo de contaminación es alto.

Las calizas kársticas que forman el medio del acuífero y de la zona no saturada, presentan cavidades y fracturas formadas por la disolución de minerales. Esta porosidad secundaria, deriva en la facilidad de infiltración y dispersión de los contaminantes hacia el acuífero, dificultando los procesos de atenuación del contaminante en el acuífero. Debido a que la conductividad del acuífero es 'alta', el transporte del contaminante se produce rápidamente. En función del número de cavidades y fracturas que presente la roca en el área de infiltración, el potencial de contaminación será mayor o menor.

Por su lado, las masas de agua subterránea que coinciden con un Índice DRASTIC medio/alto, situadas mayoritariamente en las zonas asociadas o cercanas a los cauces fluviales del centro de la cuenca, presentan una estrecha relación, que aumenta su vulnerabilidad, con los parámetros D, A, T y C. El nivel freático de esta región, en 2017, se localiza a profundidades menores de 1.5 m (Fig. 5). Además, los acuíferos presentes en la zona se caracterizan por su tipología de arena y grava (Fig. 9). Por otra parte, la zona destaca por su horizontalidad o baja pendiente, en su mayoría entre el 0 y el 2% de inclinación (Fig. 13). La región, debido a la litología presente, se caracteriza por una conductividad hidráulica muy alta, con valores de entre 48.94 – 97.87 m/d (Fig. 17; Tabla 13).

Por el contrario, los parámetros R, S e I disminuyen la vulnerabilidad que presentan las masas de Aluviales Jarama-Tajuña, Aluvial del Tajo: Zorita de los Canes-Aranjuez, Aluvial del Tajo: Toledo-Montearagón, Aluvial del Tajo: Aranjuez-Toledo y Aluvial del Jarama: Guadalajara-Madrid. La recarga neta media de la zona durante el periodo de 1980-2017 presenta valores bajos desde 0 hasta unos 60 mm/año, alcanzando los 90 mm/año en algún punto de la zona (Fig. 7). Además, los tipos de suelo presentes son de tipología franco arcilloso, arcilla sin contracción ni agregación y margas (Fig. 11; Tabla 8), destacando una estrecha relación con los de tipo franco arcilloso. Igualmente, como ocurre en el tipo de acuífero, la litología de la zona no saturada se corresponde con arena y grava con gran cantidad de limo y arcilla (Fig. 15).

El resultado de la vulnerabilidad medio/alta de dichas masas es la combinación entre los parámetros D, A, T y C, que aumentan la vulnerabilidad, y los parámetros R, S e I, que disminuyen la vulnerabilidad de la zona.

## **4.2. Comparación con datos conocidos de contaminación**

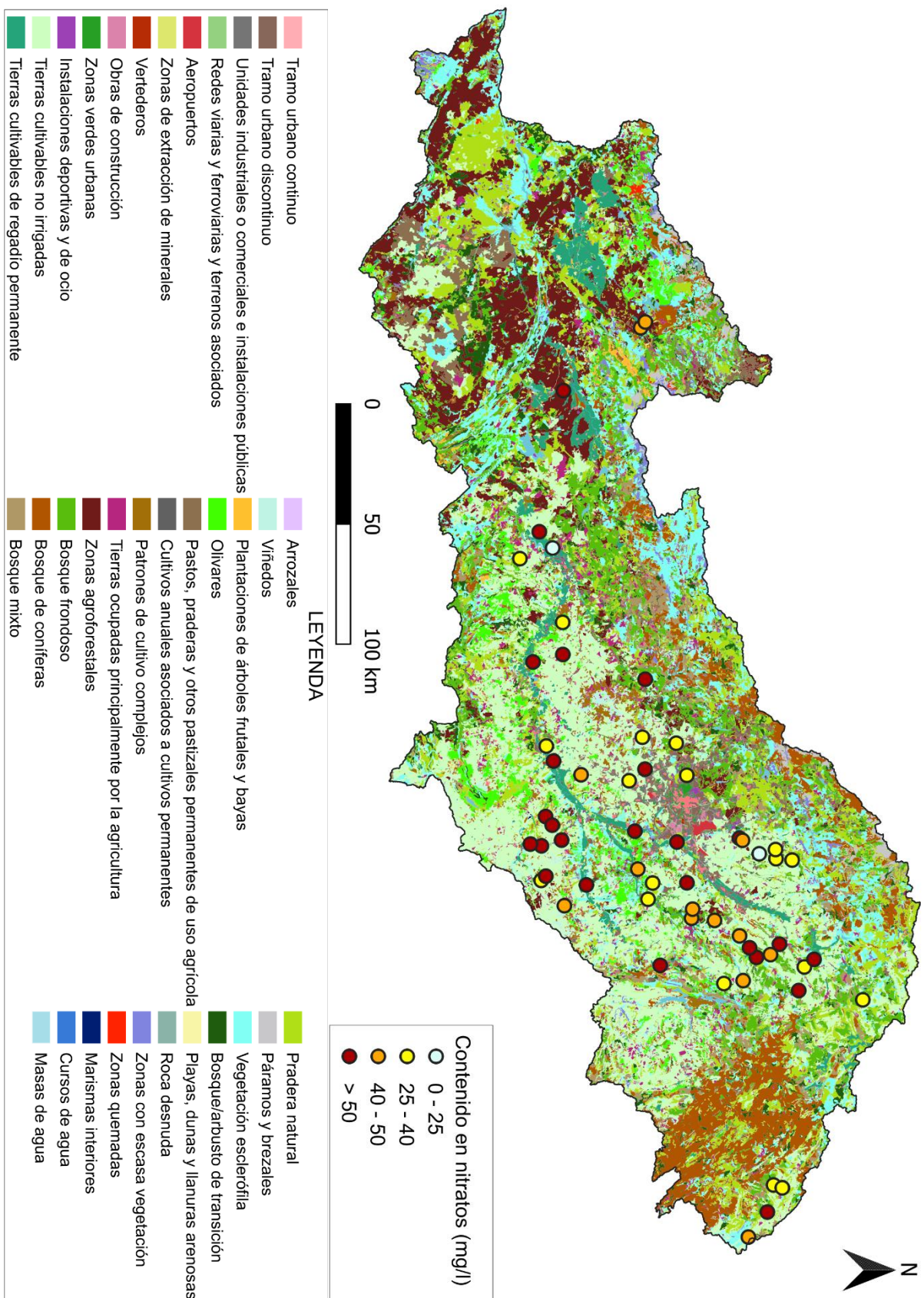
Dado que no hay estudios previos sobre la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos de la cuenca hidrográfica del Tajo, se realiza la comparación de los resultados obtenidos con la contaminación real de la cuenca recogida en el archivo de “Aguas afectadas RD 47/2022” (MITECO, 2024d).

### **4.2.1. Contaminación por nitratos**

El principal contaminante de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Tajo es el nitrato. Desde su nacimiento en la Sierra de Albarracín, a unos 1600 m de altitud, hasta llegar a la frontera con la parte portuguesa, el río Tajo atraviesa de este a oeste cerca de 800 km. Del conjunto de la cuenca que forma el río Tajo, aproximadamente 2370 km<sup>2</sup> pertenecen a superficies regables de cultivos (CHT, 2024a). El uso de fertilizantes nitrogenados por parte de la agricultura implica un gran impacto sobre la calidad del agua y sobre los ecosistemas. Cuando los elementos químicos se localizan en exceso, se infiltran a través del suelo y contaminan los acuíferos. El BOE (2022), designa una concentración de 37.5 mg/l de NO<sub>3</sub> como umbral para determinar la contaminación de las masas de agua subterránea afectadas. Según la Comisión Europea, durante los años comprendidos entre 2015 y 2019, España se posiciona como uno de los países europeos con mayor contaminación de las aguas por nitratos (MITECO, 2024e).

En función de los usos del suelo que se desarrollen en superficie, las masas de agua subterránea pueden encontrarse expuestas a un mayor riesgo de contaminación. En la Figura 23, se muestra la relación entre los distintos usos del suelo en la cuenca y el contenido de nitratos presente en las masas de agua subterránea durante el periodo de 2016-2018.

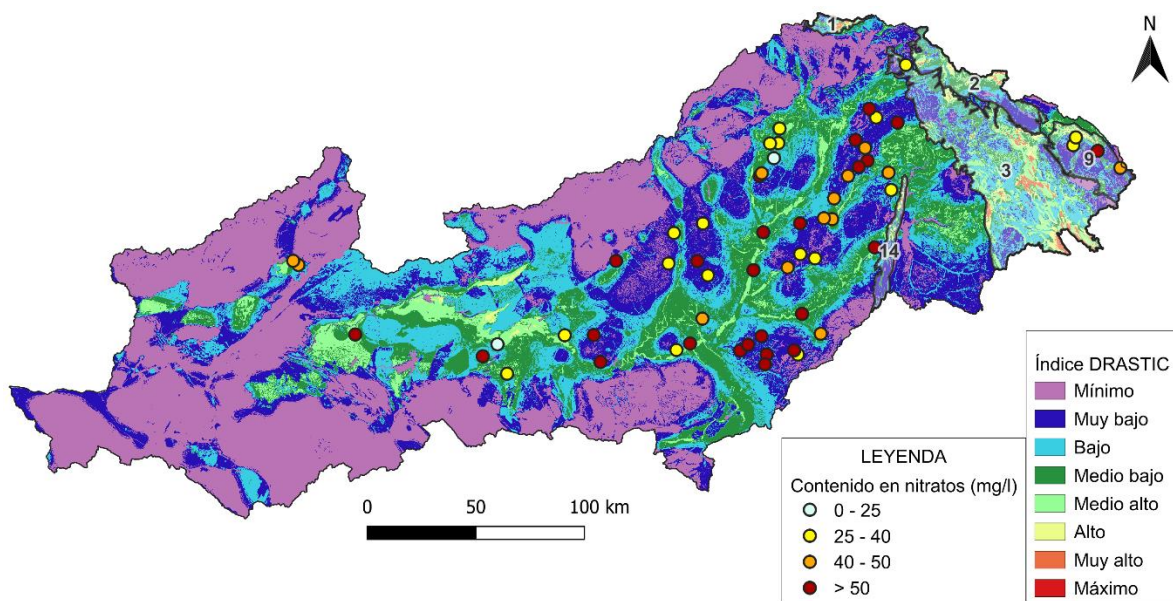
Cuando se comparan los puntos donde se encuentran las mayores concentraciones de nitratos (> 50 mg/l) con los usos del suelo según CLMS (2019) presentes en la cuenca, se observa una clara asociación entre los suelos destinados a las tierras cultivables no irrigadas (trigo, cebada...) y a las zonas de viñedo, con las áreas donde se registran las máximas concentraciones de nitratos. Este tipo de cultivos requieren fertilizantes nitrogenados para que su producción sea óptima. Por el contrario, según la clasificación de CLMS (2019), los usos del suelo (Fig. 23) presentes en las zonas denominadas de mayor vulnerabilidad según DRASTIC (Fig. 20), se corresponden con bosque de coníferas, pradera natural, vegetación esclerófila, bosque mixto y bosque/arbusto de transición.



**Figura 23.** Mapa de la ocupación del suelo en la cuenca hidrográfica del Tajo y su relación con el contenido en nitratos durante el periodo de 2016-2018 (MITECO, 2024d). Modificado de CLMS (2020).

Desde un punto de vista ambiental, el hecho de que las zonas más vulnerables a la contaminación coincidan con zonas donde los usos del suelo están destinados a la protección y conservación de las masas de agua subterránea, es favorable. Por este motivo, se produce una disminución del riesgo de contaminación de este recurso, que posteriormente se destina como agua de suministro. Una parte de las aguas que nacen en esta zona, se almacenan en los pantanos de Entrepeñas y Buendía. En momentos de necesidad, el agua almacenada en ambos embalses se destina como fuente de suministro de apoyo para Madrid. Además de este uso, las aguas reguladas en ambos embalses son transportadas desde la cabecera del Tajo hacia el río Segura para usos de regadío y abastecimiento. En este trasvase Tajo-Segura se permite canalizar un volumen máximo de 600 hm<sup>3</sup> al año (MITECO, 2024f).

Al comparar el contenido de nitratos presente en las masas de agua subterránea de la cuenca con las zonas más vulnerables a la contaminación (Fig. 24), se observa que las zonas definidas como mayormente vulnerables según el método DRASTIC, presentan concentraciones de nitratos por debajo del valor medio de 0 - 25 mg/l de NO<sub>3</sub>. Estas masas se representan en la Figura 24, siendo la masa (1) Cabecera del Bornova, la masa (2) Sigüenza-Maranchón, la masa (3) Tajuña-Montes Universales y la masa (14) Entrepeñas. Por el contrario, en la masa (9) Molina de Aragón, situada en la zona más oriental de la cuenca y definida como altamente vulnerable según el método DRASTIC, hay valores de 25 - 50 mg/l de NO<sub>3</sub>.

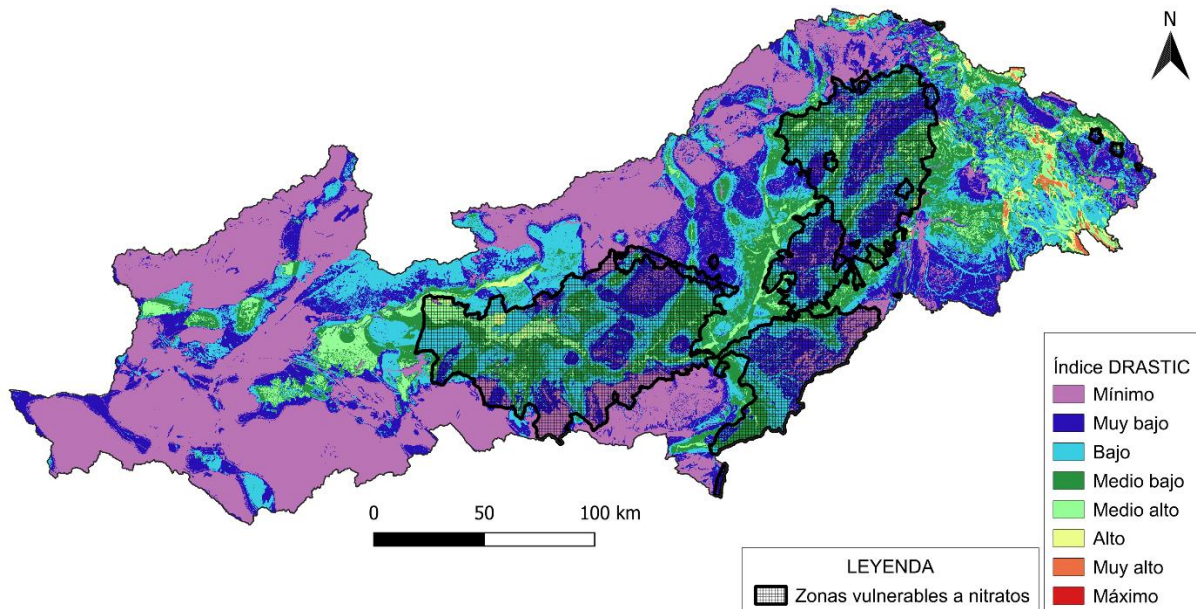


**Figura 24.** Contenido en nitratos de las masas de agua subterránea de la cuenca hidrográfica del Tajo y su relación con el Índice DRASTIC. Datos de nitratos extraídos de MITECO (2024d).

Además del contenido en nitratos, sobre la masa de agua subterránea de Molina de Aragón fluye el río Gallo. Un tramo de este río se caracteriza como río perdedor, contribuyendo a la recarga del acuífero. Esta transferencia de agua desde la masa de agua superficial hacia la

masa de agua subterránea, puede suponer un aumento en las amenazas de contaminación en la masa de Molina de Aragón, determinada como altamente vulnerable según el método DRASTIC.

Del mismo modo, según MAPA (2024), las áreas más vulnerables a nitratos durante el cuatrienio de 2016 a 2019, se muestran en la Figura 25.



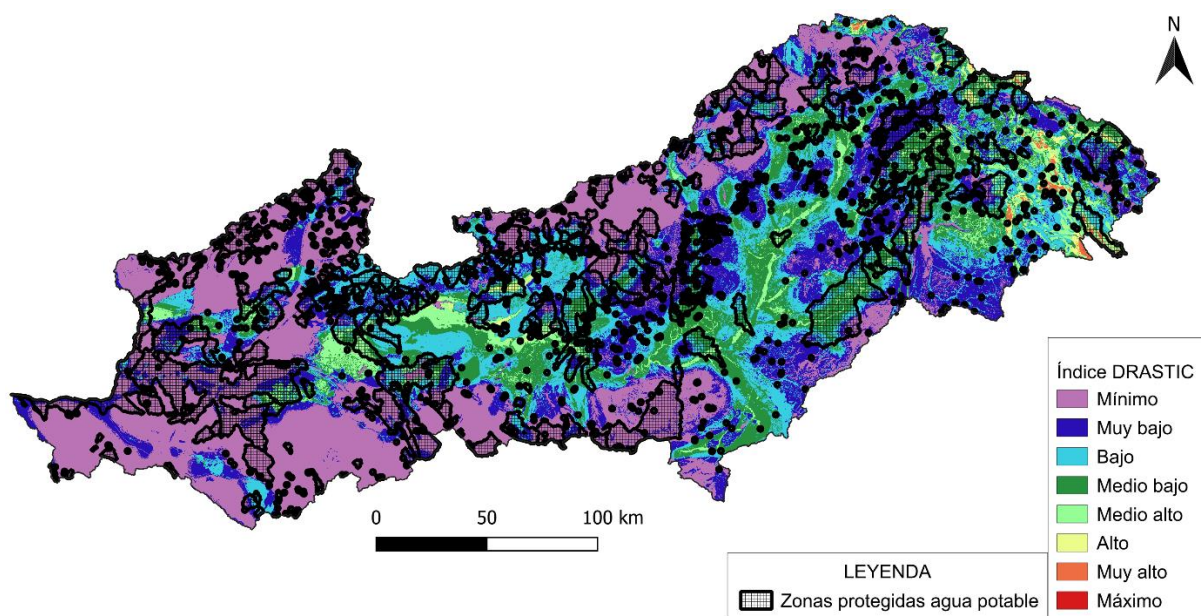
**Figura 25.** Zonas vulnerables a nitratos en la cuenca hidrográfica del Tajo y su relación con el Índice DRASTIC. Modificado de MAPA (2024).

Las zonas que presentan valores más elevados de  $\text{NO}_3$  (Fig. 24) coinciden con las zonas que han sido designadas como vulnerables a la contaminación por  $\text{NO}_3$  según MAPA (2024) (Fig. 25). Las masas de agua subterránea que se han visto afectadas por la entrada del contaminante y presentan un contenido mayor a 37.5 mg/l de  $\text{NO}_3$ , se definen como zonas contaminadas. Los altos niveles de este contaminante incrementan los riesgos para el ecosistema y para la salud humana. Las zonas señaladas como vulnerables a la contaminación por nitratos según MAPA (2024), son el resultado de la combinación de factores naturales y factores antrópicos. Dichos factores se asocian principalmente con las presiones puntuales y difusas que se producen por parte de las prácticas agrícolas sobre el terreno. Además, esta vulnerabilidad se incrementa en casos en los que existan tramos urbanos cercanos y masas superficiales conectadas al acuífero, facilitando la posible transferencia de los nitratos desde las zonas superficiales a las zonas subterráneas.

Existe una relación entre las zonas señaladas como vulnerables a la contaminación por nitratos y las zonas en las que realmente existen mediciones elevadas de este parámetro. Sin embargo, no se aprecia una estrecha correlación espacial entre las zonas vulnerables a nitratos y las zonas más vulnerables a la contaminación obtenidas mediante la metodología

DRASTIC. La discrepancia entre ambas delimitaciones está relacionada con el factor antrópico. Mientras que en el mapa de vulnerabilidad a los nitratos según MAPA (2024) se tiene en cuenta la fuente agraria, en el mapa obtenido en este trabajo por el método DRASTIC, solo se tienen en cuenta los factores hidrogeológicos, descartando los distintos tipos de contaminantes y la influencia antrópica.

Además, dentro de la cuenca hidrográfica del Tajo existen un conjunto de zonas protegidas cuya agua se utiliza para el consumo humano (MITECO, 2024g). En la Figura 26 se muestran las zonas protegidas de agua potable para el ciclo de planificación desde el año 2015 hasta el año 2021. Parte de estas áreas protegidas coinciden con la zona este de la cuenca, donde se localiza la masa de Molina de Aragón. Una sección de Molina de Aragón es denominada como vulnerable según DRASTIC (Índice DRASTIC mayor a 180), delimitada como vulnerable a nitratos según MAPA (2024) y en ella se localizan concentraciones de 25 - 50 mg/l de  $\text{NO}_3$  (MITECO, 2024d). Se trata, por tanto, de una región en la que habría que estrechar la vigilancia y mejorar la red de monitoreo de la calidad con el fin de evitar problemas de contaminación de aguas empleadas para abastecimiento.



**Figura 26.** Zonas protegidas para la captación de agua potable en la cuenca hidrográfica del Tajo y su relación con el Índice DRASTIC. Extraído de MITECO (2024g).

A su vez, las cinco masas de agua subterránea que muestran una mayor vulnerabilidad según el método DRASTIC, presentan una gran cantidad de zonas protegidas para agua potable. Debido a la declaración de estas zonas protegidas, existe un mayor control de la calidad de estas aguas denominadas como potencialmente vulnerables. El mantenimiento y el monitoreo de estas zonas protegidas es imprescindible para que en el caso de que se produzca la entrada de un contaminante en las masas de agua, la detección del mismo se produzca rápidamente.

### **4.3. Discrepancias y limitaciones del método**

Para el uso del método DRASTIC se tienen en cuenta cuatro fundamentos básicos. En primer lugar, se asume la introducción del contaminante a través del suelo. Una vez que se introduce, las precipitaciones arrastran este contaminante hacia las aguas subterráneas. Para que se realice este movimiento, se debe asumir una movilidad del contaminante igual a la movilidad que presenta el agua. Por último, el área considerada para la aplicación del método DRASTIC tiene que abarcar una superficie mayor o igual a 0.40 km<sup>2</sup> (Aller *et al.*, 1987).

Debido a que el método DRASTIC incluye siete parámetros hidrogeológicos que influyen en la vulnerabilidad, se obtiene una evaluación completa de la misma. Además, esta simple herramienta, se puede aplicar para distintos tipos de acuíferos mediante el uso de un SIG, dando como resultado un mapa de sencilla comprensión. Los datos necesarios para cada una de las diferentes capas del método suelen ser fácilmente accesibles (Fannakh y Farsang, 2022). Sin embargo, a pesar de ser uno de los métodos más utilizados para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación, presenta ciertas limitaciones en su aplicación.

Existe una subjetividad ligada a la rigidez del método que exige la clasificación en una determinada tipología litológica a pesar de que en la zona aparezcan agrupaciones o series geológicas compuestas por una mayor variabilidad de materiales. Esta misma problemática aplica a los tipos de suelo. Esto ocurre debido a la gran generalización que presenta la clasificación del método DRASTIC, pudiendo excluir zonas con características más particulares. Además, el método DRASTIC no tiene en cuenta la relación entre aguas superficiales y aguas subterráneas. Otra de las limitaciones de este método radica en la rigidez de los pesos y ponderaciones asignadas a los parámetros. El método DRASTIC aplica los mismos intervalos de reclasificación a las variables continuas como la recarga, la pendiente o la conductividad hidráulica sin tener en cuenta la localización y las características de la zona de estudio. Por lo tanto, la revisión de los pesos y ponderaciones de estos factores, para ajustarse mejor a los contextos climáticos, geológicos e hidrogeológicos de las regiones de estudio, se plantea como una estrategia adecuada para futuras investigaciones. También se debe considerar la posible ausencia de los datos requeridos para el desarrollo de este método. En último lugar, el método DRASTIC opera sin tener en cuenta las características de un contaminante concreto, por lo que se trata de una metodología aplicada a nivel general. Por lo tanto, en los casos en los que se pretenda estudiar un contaminante determinado es recomendable aplicar un método más específico.

Estas limitaciones pueden derivar en una sobreestimación o subestimación del potencial de contaminación, dando como resultado una evaluación relativa de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas que necesita ser contrastada con otro tipo de estudios.

## 5. CONCLUSIONES

La aplicación de la metodología DRASTIC y los resultados obtenidos para el índice de vulnerabilidad, muestran la gran variación existente dentro de la cuenca hidrográfica del Tajo. Las zonas con valores del Índice DRASTIC más bajo (<79), se corresponden principalmente con las litologías ígneas y metadetríticas, caracterizadas por su baja conductividad y la existencia de un nivel freático profundo. Por su lado, las zonas con mayor Índice DRASTIC (>180), coinciden con el sector oriental de la cuenca, donde se localizan las masas de agua subterránea de Cabecera del Bornova, Sigüenza-Maranchón, Tajuña-Montes Universales, Molina de Aragón y Entrepeñas. La mayor vulnerabilidad a la contaminación existente en estas masas, se relaciona fundamentalmente con la cercanía del nivel freático a la superficie y con la litología carbonatada que está presente en la zona no saturada. Pese a ello, las zonas que presentan una vulnerabilidad muy alta representan únicamente un 0.34% de la superficie total de la cuenca.

De las cinco masas de agua subterránea que presentan mayor vulnerabilidad según el método DRASTIC, cuatro de ellas (Cabecera del Bornova, Sigüenza-Maranchón, Tajuña-Montes Universales y Entrepeñas), no registran ningún punto de agua afectada por nitratos, el principal contaminante de las aguas subterráneas de la cuenca hidrográfica del Tajo. Dichas masas se encuentran bajo áreas donde los usos del suelo están orientados a preservar y mantener las masas de agua subterránea. No obstante, la masa de Molina de Aragón, posee unas concentraciones de entre 25 y 50 mg/l de NO<sub>3</sub>. A causa de la existencia de zonas protegidas para la extracción de agua dulce sobre esta masa de agua subterránea, el riesgo de una contaminación incontrolada por nitratos u otros contaminantes es improbable. Sin embargo, la presencia de un tramo perdedor del río Gallo podría aumentar la vulnerabilidad a la contaminación de esta masa de agua subterránea respecto a la señalada por el método DRASTIC.

A pesar de las limitaciones presentes en el estudio, la evaluación relativa mediante la metodología DRASTIC, ha mostrado ser eficaz para definir las zonas más vulnerables a la contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Tajo. El resultado del Índice DRASTIC obtenido para la tercera cuenca más extensa de la península, puede servir de base de apoyo en la toma de decisiones para posteriores investigaciones.

Debido a la delimitación de estas zonas más vulnerables, se pueden aplicar numerosas medidas de gestión y control de los acuíferos. Para ello, se propone un seguimiento constante del estado de las masas de agua subterránea, el aumento de la concienciación sobre la

importancia de las aguas subterráneas y la elusión de prácticas en el suelo que incrementen el riesgo de contaminación de los acuíferos.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, A.A. (2009). Using Generic and Pesticide DRASTIC GIS-based models for vulnerability assessment of the Quaternary aquifer at Sohag, Egypt. *Hydrogeol J* 17, 1203–1217. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0433-3>
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. Alley. USEPA, Washington, Doc. EPA/600/2-87/035. DC, p 622.
- Alonso-Zarza, A.M., Calvo, J.P., Silva, P.G., Torres, T. (2004). Cuenca del Tajo. En: *Geología de España* (J.A. Vera Ed.). SGE-IGME, Madrid, pp.556-561.
- Bekesi, G., McConchie, J. (2000). Empirical Assessment of the Influence of the Unsaturated Zone on Aquifer Vulnerability, Manawatu Region, New Zealand. *Groundwater*, 38: 193-199. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00330.x>
- Boletín Oficial del Estado (BOE) (2007). Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica. Artículo 35. Objetivos medioambientales. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-13182&tn=1&p=20211229#a35> Último acceso: 03/06/2024
- Boletín Oficial del Estado (BOE) (2022). Real Decreto 47/2022, de 18 de enero, sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias. Núm. 17, de 20 de enero de 2022, pp. 5664-5684. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2022-860> Último acceso: 20/06/2024
- Cardenas-Martinez, A., Rodriguez-Galiano, V.F., Luque-Espinar, J.A., Mendes, M.P. (2021). Predictive modelling benchmark of Nitrate Vulnerable Zones at a regional scale based on Machine Learning and Remote Sensing. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127092>
- Chachadi, A. G., Lobo Ferreira, J. P. C. (2001). Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method. Proc. Workshop on Modelling in Hydrogeology, Anna University, Chennai, pp. 143-156.
- Civita, M., de Maio, M. (2004). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach. *Geofísica Internacional*, 43(4), 513–532. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2004.43.4.776>
- Civita, M., De Regibus, C. (1995). Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. Atti 2° Conv. Naz. In *Titolo volume non avvalorato* (Vol. 3, pp. 63-72).
- Comunidad Europea (CE) (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial L*, 327, 1–73. <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>
- Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) (2022). Memoria. Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo. Revisión de tercer ciclo (2022-2027). [https://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/PlanHidrologico/Planif\\_2021-2027/Documents/PHT\\_2021-2027/PHT2227\\_Memoria\\_Dic22.pdf](https://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/PlanHidrologico/Planif_2021-2027/Documents/PHT_2021-2027/PHT2227_Memoria_Dic22.pdf)

Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) (2023a). Informe de seguimiento. Plan hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo 2015-2021. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. [https://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/PlanHidrologico/seguimiento/Documents/2023\\_Informe%20seguimiento%20PHT2015-2021.pdf](https://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/PlanHidrologico/seguimiento/Documents/2023_Informe%20seguimiento%20PHT2015-2021.pdf)

Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) (2023b). Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo 2023-2027. *Masas de agua*. Disponible en la web [https://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/PlanHidrologico/Planif\\_2021-2027/Paginas/PHT\\_2021-2027.aspx](https://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/PlanHidrologico/Planif_2021-2027/Paginas/PHT_2021-2027.aspx) Último acceso: 02/06/2024

Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) (2024a). *Usos y demandas*. Disponible en la web <https://www.chtajo.es/LaCuenca/UsosyDemandas/Paginas/default.aspx> Último acceso: 20/06/2024

Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) (2024b). *Descarga de capas*. Disponible en la web <https://www.chtajo.es/LaCuenca/Paginas/DescargaDCapas.aspx> Último acceso: 09/03/2024

Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) (2024c). *Contexto geológico y Geomorfológico*. Disponible en la web <https://www.chtajo.es/LaCuenca/MedioFisico/Paginas/ContextoGeol%c3%b3gico.aspx> Último acceso: 08/06/2024

Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) (2019). Updated CLC illustrated nomenclature guidelines. <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/clc-illustrated-nomenclature-guidelines/@@download/file>

Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) (2020). CORINE Land Cover 2018 (vector/raster 100 m), Europe, 6-yearly. Disponible en la web <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018> Último acceso: 21/06/2024

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. Madrid.

Denny, S. C., Allen, D. M., Journeay, J. M. (2007). DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal*, 15, 483-493. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0102-8>

Doerfliger, N., Jeannin, P. Y., Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental geology*, 39, 165-176. <https://doi.org/10.1007/s002540050446>

EEA (2022). *Europe's groundwater—A key resource under pressure—European Environment Agency* [Briefing]. <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-groundwater>

Fannakh, A., Farsang, A. (2022). DRASTIC, GOD, and SI approaches for assessing groundwater vulnerability to pollution: a review. *Environ Sci Eur* 34, 77. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00646-8>

FAO (2006). Guidelines for soil description. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fourth edition, Rome. <https://www.fao.org/4/a0541e/a0541e.pdf>

Ferreira, J. L., Oliveira, M. M. (2004). Groundwater vulnerability assessment in Portugal. *Geofísica internacional*, 43(4), 541-550.

Foster, S. S. D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy: International Conference, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied Scientific Research, 69-86.

Fusco, F., Allocca, V., Coda, S., Cusano, D., Tufano, R., De Vita, P. (2020). Quantitative assessment of specific vulnerability to nitrate pollution of shallow alluvial aquifers by process-based and empirical approaches. *Water*, 12(1), 269. <https://doi.org/10.3390/w12010269>

Gogu, R. C., Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental geology*, 39, 549-559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>

Goldscheider N., Klute M., Sturm S., Hötzl H. (2000). The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, 463: 157-166.

ISRIC (2024). World Soil Information. *SoilGrids*. Disponible en la web <https://soilgrids.org/> Último acceso: 08/03/2024

Jenifer, M. A., Jha, M. K. (2018). Comparative evaluation of GIS-based models for mapping aquifer vulnerability in hard-rock terrains. *Environmental earth sciences*, 77(19), 672. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7821-8>

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>

Luoma, S., Okkonen, J., Korkka-Niemi, K. (2017). Comparison of the AVI, modified SINTACS and GALDIT vulnerability methods under future climate-change scenarios for a shallow low-lying coastal aquifer in southern Finland. *Hydrogeology Journal*, 25(1), 203-222. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1471-2>

Machiwal, D., Jha, M.K., Singh, V.P., Mohan, C. (2018a). Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: current status and challenges. *Earth Sci. Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>

Machiwal, D., Cloutier, V., Güler, C., Kazakis, N. (2018b). A review of GIS-integrated statistical techniques for groundwater quality evaluation and protection. *Environ. Earth Sci.* 77. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7872-x>

Majandang, J., Sarapirome, S. (2013). Groundwater vulnerability assessment and sensitivity analysis in Nong Rua, Khon Kaen, Thailand, using a GIS-based SINTACS model. *Environmental earth sciences*, 68, 2025-2039. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1890-x>

Margat, J. (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution (Groundwater Vulnerability to Contamination). Bases de sa cartographie (Doc.) 68 SGL 198HYD, BRGM, Orleans.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) (2015). Plan hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo 2015-2021. [http://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/PlanHidrologico/Planif\\_2015-2021/Documents/PlanTajo/PHT2015-DB-Memoria.pdf](http://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/PlanHidrologico/Planif_2015-2021/Documents/PlanTajo/PHT2015-DB-Memoria.pdf)

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) (2018). Informe sobre la situación de sequía en la cuenca del Tajo a fecha 2 de marzo de 2018. [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/participacion-publica/informesituacionsequiatajo2marzo2018\\_tcm30-444124.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/participacion-publica/informesituacionsequiatajo2marzo2018_tcm30-444124.pdf)

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) (2024). *Catálogo de metadatos. Zonas vulnerables a contaminación por nitratos*. © Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en la web <https://www.mapama.gob.es/ide/metadatos/srv/spa/catalog.search#/metadata/a255a7fb-1240-4443-b759-62b76f721757> Último acceso: 18/06/2024

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2024a). *Demarcaciones hidrográficas y Organismos de cuenca*. © Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en la web <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/ddhh-oocc.html> Último acceso: 28/05/2024

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2024b). *Sistema de Información de Redes de seguimiento del estado e información hidrológica*. © Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en la web <https://sig.mapama.gob.es/redes-seguimiento/> Último acceso: 17/02/2024

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2024c). *Evaluación de recursos hídricos en régimen natural (SIMPA)*. © Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en la web <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/evaluacion-recursos-hidricos-regimen-natural.html> Último acceso: 27/02/2024

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2024d). *Aguas afectadas RD 47/2022*. © Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en la web [https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/aguas\\_afectadas.html](https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/aguas_afectadas.html) Último acceso: 20/06/2024

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2024e). *Impacto de los nitratos y pesticidas en el uso y calidad de las aguas*. © Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en la web <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/proteccion-nitratos-pesticidas/impacto-calidad-agua.html> Último acceso: 20/06/2024

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2024f). *Trasvase Tajo-Segura*. © Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en la web <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/trasvase-tajo-segura.html> Último acceso: 20/07/2024

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2024g). *Zonas protegidas aguas potables*. © Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en la web <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/zonas-protegidas-potables-phc-2015-2021.html> Último acceso: 07/06/2024

Neukum C, Azzam R. (2009). Quantitative assessment of intrinsic groundwater vulnerability to contamination using numerical simulations. *Sci Total Environ.* 408(2):245-54. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.046>

Palmquist, R. C. (1991). Groundwater vulnerability: a DRASTIC approach. Washington Department of Ecology, Olympia, WA 98504. Unpublished paper presented at the 84th Annual Meeting, Air and Waste Management Association, Vancouver, BC, Canada, 16–21 June, 1991, p 16.

Pavlis, M., Cummins, E., McDonnell, K. (2010). Groundwater Vulnerability Assessment of Plant Protection Products: A Review. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 16(3), 621–650. <https://doi.org/10.1080/10807031003788881>

QGIS (2024). QGIS Geographic Information System. *QGIS Association*. Disponible en la web <https://www.qgis.org/es/site/>

Rizka, M. (2018). Comparative studies of groundwater vulnerability assessment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 118. 012018. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012018>

Singh, A., Srivastav, S. K., Kumar, S., Chakrapani, G. J. (2015). A modified-DRASTIC model (DRASTICA) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in Lucknow, India. *Environmental earth sciences*, 74, 5475-5490. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4558-5>

Stempvoort, D.V., Ewert, L., Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index: a GIS - compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Can. Water Resour. J.* 18, 25–37. <https://doi.org/10.4296/cwrj1801025>.

Taghavi, N., Niven, R. K., Paull, D. J., Kramer, M. (2022). Groundwater vulnerability assessment: A review including new statistical and hybrid methods. *The Science of the total environment*, 822, 153486. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153486>

U.S. Geological Survey (USGS) (2024). *EarthExplorer*. Disponible en la web <https://earthexplorer.usgs.gov/> Último acceso: 29/01/2024

Voutchkova, D. D., Schullehner, J., Rasmussen, P., Hansen, B. (2021). A high-resolution nitrate vulnerability assessment of sandy aquifers (DRASTIC-N). *Journal of Environmental Management*, 277, 111330. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111330>

Vrba, J., Zaporozec, A. (1994). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability—IAH International Contributions to Hydrogeology, 16. FRG, Heise Publication, Hannover, p 131.

Zhou, J., Li, G., Liu, F., Wang, Y., Guo, X. (2010). DRAV model and its application in assessing groundwater vulnerability in arid area: a case study of pore phreatic water in Tarim Basin, Xinjiang, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 60, 1055-1063. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-009-0250-y>