

# Evaluación de la vulnerabilidad del medio humano ante la contaminación de las aguas en la masa de agua subterránea de Gallocanta (Aragón, España)

## Mapping assessment of social vulnerability to groundwater pollution at the Gallocanta Groundwater Body (Aragón, Spain)

JOSÉ MARÍA ORELLANA MACÍAS<sup>1</sup>  0000-0003-2695-2766

MARÍA JESÚS PERLES ROSELLÓ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España

<sup>2</sup>Departamento de Geografía, Universidad de Málaga

### Resumen

La vulnerabilidad del medio humano ante la contaminación de los recursos hídricos está relacionada con su dependencia de las aguas subterráneas para asegurar su abastecimiento y el de sus bienes y actividades productivas. La vulnerabilidad del medio humano introduce aspectos socioeconómicos claves para valorar el posible impacto de un evento de contaminación. En este estudio se analiza y cartografía la vulnerabilidad de la masa de agua subterránea de Gallocanta (Aragón, España). El análisis de los factores de vulnerabilidad ofrece una visión pormenorizada de la situación, y permite la utilización de los mapas como herramientas de apoyo para la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua en la zona. Los resultados muestran que la vulnerabilidad se ha clasificado como moderada. Además, se ha puesto de manifiesto la falta de alternativas de abastecimiento, lo que multiplica la dependencia de la población de los recursos subterráneos, haciendo que su papel sea aún más importante para el suministro de agua.

Palabras clave: análisis del riesgo; vulnerabilidad social; aguas subterráneas; riesgo de contaminación; Gallocanta

### Fechas • Dates

Recibido: 2021.07.14  
Aceptado: 2021.10.27  
Publicado: 2022.03.21

### Autor/a para correspondencia Corresponding Author

José María Orellana Macías  
[jm.orellana@igme.es](mailto:jm.orellana@igme.es)

## Abstract

Social vulnerability when facing pollution of groundwater resources is related to the population dependence on them to assure water supply. The analysis of social vulnerability includes key socio-economic factors in order to assess the potential impact of a pollution event in a certain area over population and assets. In the present study, social vulnerability of the Gallocanta Groundwater Body (Aragón, Spain) is analyzed and mapped. This analysis provides a detailed insight of the area and it allows the use of the resulting maps as supporting tools in the decision-making process, specially, related to water management. The results show that social vulnerability of the Gallocanta Groundwater Body is moderate, despite the low amount of inhabitants in the area. In addition, it has been highlighted the lack of alternative water sources, which significantly increases the population dependence of groundwater and enhances its key role as the main water supply source in the towns of the study area.

---

Keywords: risk assessment; social vulnerability; groundwater; pollution risk; Gallocanta

---

## 1. Introducción

La vulnerabilidad social o, de forma más precisa, vulnerabilidad del medio humano (Perles et al., 2004), puede definirse como la capacidad de la población y su medio (usos urbanos y rurales, actividades económicas y productivas, etc.) para afrontar un evento potencialmente peligroso, en base al nivel de exposición de la población y sus bienes, y las características de ambas para resistir y recuperarse de dicho evento.

En el caso concreto del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, la vulnerabilidad del medio humano está relacionada con la dependencia que la población y sus bienes tienen de dicho recurso, especialmente de la necesidad del suministro de agua para distintos usos productivos y de abastecimiento básico (agua potable, riego, otros usos urbanos, etc.). Dicho suministro puede verse comprometido por factores cuantitativos, es decir, cuando la cantidad de agua disponible no es suficiente para satisfacer la demanda; o bien por factores cualitativos, relacionados con la calidad del agua, que puede llegar a ser nociva para la salud. La calidad de las aguas subterráneas puede verse afectada por la presencia de contaminantes de origen químico, como, nutrientes o metales; o por la proliferación de microorganismos. Las zonas de emisión u origen de estos contaminantes se pueden considerar como fuentes potenciales del peligro, las cuales son objeto de análisis de los estudios de peligrosidad (Orellana-Macías y Perles, 2020). El tercer componente a considerar en la evaluación del riesgo de contaminación del recurso hídrico subterráneo es la vulnerabilidad intrínseca del medio acuífero y del entorno de los manantiales, condicionada esencialmente por sus características naturales, como la litología, la profundidad a la que se encuentra el acuífero, el espesor de la zona no saturada, la pendiente del terreno o la presencia de suelo. La peligrosidad del contaminante, la vulnerabilidad intrínseca natural del acuífero y vulnerabilidad del medio humano dependiente del acuífero definen, en resumen, el riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

Tradicionalmente, la vulnerabilidad del medio humano ha sido un componente incluido en la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. No obstante, la dificultad para cuantificar aspectos relacionadas con este tipo de vulnerabilidad, así como la complejidad para la correcta definición y parametrización de los aspectos que pueden ser incluidos como factores de vulnerabilidad social, son aspectos que dificultan su estudio. Los límites difusos de los conceptos de vulnerabilidad social o del medio humano contribuyen a dificultar la propuesta de métodos

estandarizables para su evaluación y cartografía. Durante los años finales del siglo pasado, y la primera década del siglo XXI, numerosos trabajos se centraron en la inclusión de la vulnerabilidad social dentro del estudio global del riesgo (Liverman, 1990; Dow y Downing, 1995; Cutter, 1996; Cutter et al., 2000; Delmonaco et al., 2005). Siguiendo el enfoque tradicional para la evaluación de los elementos del riesgo desde un punto de vista económico, se hace frente a la dificultad de cuantificar ciertos aspectos de la vulnerabilidad que no siempre tienen un valor material. Este aspecto otorga una nueva perspectiva al tratar de evaluar el grado de vulnerabilidad de la población ante un evento potencial de contaminación o pérdida de calidad para consumo (Massone y Sagua, 2005).

Para la evaluación del riesgo, y de los elementos que lo componen, el desarrollo y la utilización de índices que sirven para clasificar variables y comparar zonas es un método ampliamente utilizado. Massone y Sagua (2005) proponen la creación de un índice de vulnerabilidad contextual y un índice de vulnerabilidad específico, centrado en la contaminación por nitratos. Posteriormente Sagua et al., (2009) realizan una revisión de este índice con el objetivo de disminuir las variables a considerar. Perles et al., (2004) dan un paso hacia la conceptualización de la vulnerabilidad del medio humano y hacia la propuesta de indicadores para su evaluación cartográfica. Por otro lado, Vías (2005) desarrolla una propuesta metodológica completa para el análisis del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, en la que incluye una metodología específica para la vulnerabilidad del medio humano. Perles et al., (2009) aplican dicha propuesta, incluyendo una serie de variables relacionadas con la exposición de la población y la dependencia socio-económica que la población de la zona tiene de las aguas subterráneas en el territorio. En esta misma línea, Gáviria et al., (2011) proponen un índice de vulnerabilidad humana integrado por la exposición, la dependencia socioeconómica y el nivel de resiliencia de la población, mientras que Othax (2009) apuesta por un índice de vulnerabilidad socioeconómica que incluye, variables como la educación, el nivel de ingresos o la salud.

En zonas rurales, el peligro de contaminación de las aguas subterráneas suele venir dado por la presencia de fuentes difusas, como los cultivos, o también puntuales, relacionadas con actividades del sector primario y secundario, mientras que los factores asociados a la vulnerabilidad y la exposición suelen tener menos peso desde un punto de vista cuantitativo. No obstante, aunque el volumen de población expuesta en estas áreas sea menor en comparación con zonas urbanas densamente pobladas, el consumo de agua para riego y para el sector primario es alto en muchas zonas, y la dependencia de la población es, en muchos casos, mayor que en las zonas urbanas, dada la menor frecuencia de suministro alternativo.

En el caso de la masa de agua subterránea de Gallocanta, perteneciente a la cuenca hidrológica del Ebro, la sensibilidad y preocupación por la preservación del paraje natural, y su coexistencia con el entorno cultivado, frente a la contaminación por nutrientes ha centrado la atención en las cartografías de riesgo de contaminación. La laguna de Gallocanta es un humedal de reconocido interés internacional, incluido en la lista RAMSAR de humedales protegidos (Ramsar Convention Secretariat, 2010), además, la zona tiene un reconocido valor natural, estando reconocida como Zona de Especial Protección para las Aves, Zona de Especial Conservación, y está constituida como Reserva Natural Dirigida (Ley 11/2006 del Gobierno de Aragón) con su correspondiente plan de gestión. Por otro lado, la principal actividad económica de la zona es la agricultura, de la cual depende un alto porcentaje de la población de forma directa o indirecta.

Las fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas en la masa de agua han sido evaluadas y cartografiadas en etapas anteriores de investigación (Orellana-Macías y Perles, 2020; Orellana-Macías et al. 2021). Orellana-Macías y Perles (2020) aplicaron varios índices generales de peligrosidad a la zona de estudio, obteniéndose una cartografía detallada de las posibles fuentes de emisión de contaminantes en la zona, mientras que en Orellana-Macías et al. (2021), el objetivo se centró en la evaluación de la peligrosidad ante la contaminación por nitratos de origen agrario, ya que dicho contaminante puede considerarse como la principal fuente de contaminación de las aguas subterráneas en la zona de estudio.

Junto a estos antecedentes, la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) ha elaborado y publicado una cartografía de vulnerabilidad intrínseca de las masas de agua dentro de la cuenca del Ebro, entre las que se encuentra la masa de agua de Gallocanta. Para la evaluación de la vulnerabilidad, en este caso, se utilizó el método DRASTIC Reducido (DGOHCA e IGME, 2002), derivado del método DRASTIC (Aller et al., 1987), ampliamente aceptado por la comunidad científica internacional, y utilizado en numerosos estudios de vulnerabilidad de las aguas subterráneas (Antonakos y Lambrakis 2007; Arauzao et al., 2015; Ghazavi y Ebrahimi, 2015)

El estado de la cuestión en la zona muestra que para abordar un análisis integral del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la masa de agua de Gallocanta, el estudio de la vulnerabilidad del medio humano frente a un episodio de contaminación sigue siendo la asignatura pendiente. Únicamente a partir de una visión integrada de los componentes de peligrosidad, vulnerabilidad intrínseca (natural) y vulnerabilidad del medio humano será posible obtener una idea conjunta de las repercusiones reales que el problema de la contaminación produce en la población y sus bienes. En este contexto, el objetivo del presente trabajo es, a partir de los antecedentes previos, evaluar la vulnerabilidad del medio humano ante el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la masa de agua de Gallocanta. Un objetivo derivado es la obtención de una cartografía que permita la evaluación conjunta en el marco del análisis integral del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, para generar una cartografía predictiva de utilidad aplicada en esta zona de alto valor natural y ecológico, así como evaluar la idoneidad del método aplicado a la particularidad de la casuística en entornos rurales (con valores agrícolas y naturales, baja densidad de población, núcleos de población distantes, predominio del sector primario) del que es representativa la zona de estudio.

## 2. Metodología

### 2.1. Área de estudio

Para definir el área de estudio, la evaluación y cartografía de la vulnerabilidad social presenta una peculiaridad, y es que las consecuencias de la contaminación de un acuífero no tienen por qué limitarse a los usos, actividades y población situada en la extensión superficial de dicho acuífero. Cualquiera de estos elementos expuestos puede localizarse geográficamente fuera de los límites de un acuífero, pero verse afectados si el recurso hídrico del acuífero sufre un evento de contaminación. Por este motivo, en la investigación, la zona de estudio incluye los términos municipales de las localidades que dependen directamente de los recursos subterráneos de la masa de agua de Gallocanta (denominada como masa de agua subterránea nº087 Gallocanta por la Confederación Hidrográfica del Ebro), estén o no situados sobre el acuífero. En el caso que nos ocupa, existe población y bienes (actividades agropecuarias y otras actividades productivas) dependientes del

recurso hídrico del acuífero en los siguientes municipios: Santed, Gallocanta, Las Cuerlas y Berrueco, en la provincia de Zaragoza, y Castejón de Tornos, Tornos, Bello y Torralba de los Sisones en la provincia de Teruel.

La masa de agua subterránea de Gallocanta (MAS Gallocanta) tiene una extensión de 223 km<sup>2</sup> y forma parte de la cuenca hidrográfica del Ebro. Se encuentra en el límite suroccidental de dicha cuenca, y superficialmente se asocia a la cuenca endorreica de Gallocanta, la cual tiene una extensión superficial de 540 km<sup>2</sup> (Figura 1). La masa de agua de Gallocanta está compuesta por dos acuíferos principales, uno mesozoico, y otro detrítico, con diferentes características hidrodinámicas, mineralización (mayor salinidad en el cuaternario) y extensión horizontal y vertical. El acuífero mesozoico se extiende por la mitad occidental de la zona de estudio y engloba varios niveles de características hidráulicas diferentes, desde calizas y dolomías cretácicas a arenas de Utrillas (CHE, 2016). Por su parte, el acuífero detrítico o cuaternario está compuesto por arenas del cuaternario perilagunar, glaciares y abanicos de sedimentos cuaternarios. Este acuífero se solapa parcialmente con el acuífero mesozoico en la parte central de la cuenca y conecta la laguna de Gallocanta con el acuífero mesozoico.

Figura 1. Localización de la Masa de Agua Subterránea de Gallocanta



Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista del recurso hídrico, el acuífero cuaternario tiene poco espesor y una permeabilidad media (CHE, 2003), siendo su explotación principal el riego de cultivos, aunque existen pequeños manantiales de abastecimiento en localidades como Tornos, Castejón de Tornos y Berruero. En cambio, el acuífero mesozoico presenta grandes espesores y mejores parámetros hidrodinámicos, siendo explotado tanto para regadío como para el abastecimiento de los núcleos urbanos que se localizan sobre el mismo (Las Cuerlas, Bello y Torralba de los Sisones). En el caso de las localidades situadas en el sector oriental, los abastecimientos urbanos se toman de acuíferos locales de pequeña extensión sobre materiales triásicos (Gallocanta), así como desde manantiales de los materiales paleozoicos que componen la Sierra de Santa Cruz (Santed y Berruero).

En lo que se refiere al medio humano del entorno del acuífero y dependiente de él (abastecimiento urbano y regadío, otras actividades económicas, etc.) se localizan ocho núcleos de población que utilizan directamente los recursos de los acuíferos que componen la masa de agua subterránea de Gallocanta: Santed, Gallocanta, Las Cuerlas y Berruero, en Zaragoza; y Tornos, Castejón de Tornos, Bello y Torralba de los Sisones, en Teruel. La densidad de población de la zona de estudio es de 4,15 hab/km<sup>2</sup>, y la población total de estos municipios es alrededor de 1000 habitantes, siendo Bello la localidad más poblada (224 habitantes), y Berruero la menos poblada (34 habitantes), según datos del Padrón Municipal para el año 2019.

## 2.2. Evaluación de la vulnerabilidad del medio humano

El método utilizado para la evaluación de la vulnerabilidad social se fundamenta en el propuesto por Perles et al. (2004) y Vías (2005). Desde una perspectiva de análisis integrado del riesgo, esta propuesta metodológica considera factores de exposición y resistencia de la población y de la actividad económica, distinguiendo en este último caso entre la vulnerabilidad de la actividad agropecuaria y el resto de actividades productivas. La exposición tanto de población como de los bienes dependientes del recurso hídrico del acuífero se matiza en razón de un coeficiente indicativo de la existencia o no de recursos alternativos en caso de evento de contaminación grave. El análisis de los factores se realiza en dos fases. En la primera, se estima la vulnerabilidad de cada factor (población expuesta ( $V_p$ ), actividad agropecuaria ( $V_{ag}$ ) y otras actividades productivas ( $V_{st}$ ) de forma independiente, obteniéndose mapas de vulnerabilidad para cada factor; en la segunda, se unen cada uno de los elementos, obteniéndose un índice numérico ( $V_h$ ) que engloba los valores de  $V_p$ ,  $V_{ag}$ , y  $V_{st}$  con el objetivo de obtener un único mapa de vulnerabilidad del medio humano. Se incluye en el análisis, por lo tanto, aspectos económicos y estructurales para el cálculo de la vulnerabilidad. El resultado puede ser combinado con los índices de peligrosidad y vulnerabilidad intrínseca del acuífero, permitiendo, por lo tanto, la evaluación integral del riesgo y la comparación de los resultados obtenidos con otras zonas.

### 2.2.1. Exposición y vulnerabilidad de la población ( $V_p$ )

La vulnerabilidad de la población se ha determinado en base a factores de exposición ( $E_p$ ) y resistencia, siendo estos la tipología de la infraestructura de abastecimiento ( $R_{ip}$ ) y el número de personas especialmente vulnerables ( $R_{2p}$ ). Los factores de resistencia se han desarrollado para reducir  $E_p$  en función de que la población sea más o menos vulnerable. Mientras el factor  $E_p$  hace referencia al número de habitantes que depende de los recursos hídricos, el factor  $R_{ip}$  se centra en la capacidad de resistir un evento de contaminación por parte de la población en función del tipo de sistema de abastecimiento existente. De esta forma, se distinguen tres tipos de infraestructuras de abastecimiento: básica, cuando el abastecimiento se realiza en un único punto; compleja,

cuando el abastecimiento se realiza en varios puntos de un mismo acuífero; externa cuando el abastecimiento se realiza desde otra masa de agua distinta a la de estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Puntuaciones factor  $R_{1p}$ 

FUNCIÓN DEL ACUÍFERO	TIPO DE INFRAESTRUCTURA Y ORDEN DE UTILIZACIÓN	FACTOR R1P	GRADO DE VULNERABILIDAD
Exclusiva	1. Infraestructura de abastecimiento básica	1	Alto
	1. Infraestructura de abastecimiento compleja	0,9	
	1. Infraestructura de abastecimiento básica 2. Infraestructura de abastecimiento compleja	0,8	
Complementaria	1. Infraestructura de abastecimiento básica 2. Infraestructura de abastecimiento externa	0,6	
	1. Infraestructura de abastecimiento compleja 2. Infraestructura de abastecimiento externa	0,5	
	1. Infraestructura de abastecimiento básica 2. Infraestructura de abastecimiento compleja 3. Infraestructura de abastecimiento externa	0,4	
Alternativa	1. Infraestructura de abastecimiento externa 2. Infraestructura de abastecimiento básica	0,2	Bajo
	1. Infraestructura de abastecimiento externa 2. Infraestructura de abastecimiento compleja	0,15	
	1. Infraestructura de abastecimiento externa 2. Infraestructura de abastecimiento compleja 3. Infraestructura de abastecimiento básica	0,1	
	1. Infraestructura de abastecimiento externa	0,05	

Fuente: Perles et al. (2009)

Al mismo tiempo, un acuífero puede actuar de diferentes formas como fuente de abastecimiento: exclusivo, cuando es la única fuente de abastecimiento; complementario, cuando se combina con otra fuente de abastecimiento; y alternativo, cuando su papel en el abastecimiento es secundario o eventual. El resultado de las combinaciones posibles en base a los tipos de infraestructuras y las funciones del acuífero se muestra en la Tabla 1, donde se recogen las puntuaciones del factor  $R_{1p}$ . La puntuación del factor varía entre 0,05 y 1, siendo 1 el grado de menor resistencia (mayor vulnerabilidad).

Por otro lado, el factor  $R_{2p}$  hace referencia a los grupos de edad de la población, siendo esta determinante del grado de afección efectiva que un evento de contaminación puede llegar a tener sobre la población. Dada la mayor fragilidad de la población en los grupos infantil y anciano frente a la potencial intoxicación, se ha considerado que los niños (menores de 15 años) y los ancianos (mayores de 65), son los grupos más vulnerables. Este factor se obtiene calculando el cociente entre población vulnerable y población total, variando entre 0 y 1, y siendo 1 el valor de menor resistencia (mayor vulnerabilidad).

Finalmente, el índice de vulnerabilidad de la población se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$V_p = E_p \times R_{1p} \times \sqrt[3]{R_{2p}} \quad \text{Ec. 1}$$

Para evitar que el factor  $R_{2p}$  reduzca demasiado el valor de  $V_p$ , el índice prevé que la ponderación del factor se realice a través de una reducción no lineal de la exposición, utilizándose la raíz cúbica. De esta forma, el valor de la exposición puede ser reducido aproximadamente a la mitad como máximo. El límite inferior de  $V_p$  es cero, mientras que el superior está abierto, y cuanto mayor sea el valor, mayor es la vulnerabilidad.

Los datos de población por grupo de edad se han obtenido de los datos publicados del Padrón Municipal para el año 2019, mientras que la información para el cálculo del factor  $R_{1p}$  se ha obtenido a partir de la información publicada por la Confederación Hidrográfica del Ebro, complementada con trabajo de campo.

Exposición y vulnerabilidad de la actividad agropecuaria ( $V_{AG}$ )

La estimación de la vulnerabilidad de las actividades agrícolas ha seguido el mismo esquema que el factor  $V_p$  basado en factores de exposición ( $E_{AG}$ ) y resistencia ( $R_{1AG}$  y  $R_{2AG}$ ). El factor  $E_{AG}$  hace referencia a la superficie regada por cada tipo de cultivo o al tamaño de la cabaña ganadera, por lo que la unidad de análisis es la hectárea o la cabeza de ganado por explotación, respectivamente.

Por su parte, el factor  $R_{1AG}$  es similar al factor  $R_{1p}$  utilizado para la estimación de la vulnerabilidad de la población, por lo que se basa en el tipo de la infraestructura de abastecimiento y en la función del acuífero. En relación al factor  $R_{2AG}$ , este analiza la vulnerabilidad desde una perspectiva socioeconómica, ya que considera la rentabilidad económica de los productos y su influencia en el empleo de la población local. En el caso de los cultivos, la rentabilidad económica del producto se ha estimado en base a la productividad de cada cultivo (kg/ha) multiplicada por su precio de mercado (€/kg), y se expresa en €/ha. En el caso de las actividades ganaderas, la unidad de referencia es la cabeza de ganado. Finalmente, el aspecto social de la vulnerabilidad se ha considerado en base al número de empleos y a la cantidad de jornales necesarios para conseguir una determinada producción. De esta forma, el factor  $R_{2AG}$  se calcula siguiendo la siguiente ecuación:

$$R_{2AG} = (\epsilon) \times (1 + (j/500)) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $\epsilon$  es el precio de mercado por hectárea de cultivo o cabeza de ganado, y  $j$  es el número de jornales por hectárea o empleos por explotación ganadera. El valor de 500 es una constante obtenida del número máximo de jornales para los distintos tipos de cultivo (DAP, 1997).

El valor final de la vulnerabilidad de la actividad agropecuaria se calcula siguiendo la siguiente ecuación:

$$V_{AG} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{AG} \times R_{1AG} \times R_{2AG}}{10000} \quad \text{Ec. 3}$$

Siendo cada tipo de cultivo o especie de ganado. Al integrar en un sumatorio las variables de exposición y resistencia ya explicadas, se tratan las características de cada zona de regadío o explotación ganadera en relación al tipo de cultivo o de ganado, el número de empleos asociados, los beneficios económicos potenciales y el tipo de abastecimiento. Además, se introduce una constante, igual a 10000, que sirve para facilitar la comprensión y lectura del valor final de vulnerabilidad.



La obtención de la información relativa a la localización de las parcelas en regadío, así como del número de animales a escala municipal, y la rentabilidad económica de cada producto se han obtenido de las Estadísticas Agrarias y Ganaderas publicadas por el Gobierno de Aragón para el año 2019. Por otra parte, el sueldo de los empleados se ha obtenido de los datos económicos por sectores publicados por el Gobierno de Aragón, mientras que el número de empleados por explotación se ha realizado a partir de trabajo de campo. En los casos en los que la información no ha podido ser obtenida, se ha estimado en función del tamaño y la titularidad de la explotación.

El análisis de la actividad ganadera y la vulnerabilidad de cada una de las granjas y factorías localizadas en la zona se ha estimado a partir de los datos publicados por el Gobierno de Aragón y la Confederación Hidrográfica del Ebro.

#### Exposición y vulnerabilidad de otras actividades productivas ( $V_{ST}$ )

El tercer factor para el análisis de la vulnerabilidad del medio humano es la vulnerabilidad socioeconómica de otras actividades productivas dependientes de forma directa de los recursos hídricos subterráneos. Siguiendo el mismo esquema que en los casos anteriores, este elemento se compone de factores de exposición y resistencia: la exposición de la actividad productiva ( $E_{ST}$ ), es decir, el número de establecimientos dependientes; el tipo de infraestructura de abastecimiento ( $R_{1ST}$ ) y la rentabilidad socioeconómica de las actividades productivas ( $R_{2ST}$ ).

Para calcular el factor  $R_{2ST}$  se ha utilizado el número de empleados por rama productiva, y el salario medio de cada empleado en una actividad productiva dependiente. Para el cálculo se utiliza la Ec. 2, siendo  $\epsilon$  es la suma de los salarios recibidos en cada empresa y  $j$  el número de empleados en la actividad.

Finalmente, el índice de vulnerabilidad  $V_{ST}$  se calcula con la ecuación siguiente:

$$V_{ST} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{ST} \times R_{1ST} \times R_{2ST}}{10000} \text{ Ec. 4}$$

Donde es cada una de las actividades productivas dependientes según el tipo de abastecimiento, y la sumatoria incluye aspectos socioeconómicos y de tipología de abastecimiento.

Los datos relativos al número de establecimientos por municipio y la información necesaria para el cálculo del factor  $R_{2ST}$ , se ha obtenido a partir de los datos de empleo y los sueldos medios por sectores publicados por el Gobierno de Aragón a nivel municipal para el año 2019.

#### Vulnerabilidad del medio humano ( $V_H$ )

El índice de vulnerabilidad del medio humano es el resultado de la suma ponderada de los factores de vulnerabilidad ya explicados, relacionados con la población y las actividades económicas. Dicha ponderación se hace en base a la importancia de cada factor, y sigue la siguiente ecuación:

$$V_H = 3V'_P + 2V'_{AG} + V'_{ST} \text{ Ec. 5}$$

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Vulnerabilidad de la población

Todas las localidades se abastecen íntegramente de los acuíferos que componen el sistema de Gallocanta, utilizando en la mayoría de los casos un único punto de agua como fuente de abastecimiento para la localidad, por lo que los valores de  $R_{ip}$  oscilan entre 0,9 y 1 (Tabla 1), según lo establecido por Perles et al. (2009). En los municipios en los que el valor de  $R_{ip}$  es 0,9, existe más de un punto de abastecimiento para la población.

En relación a la resistencia de la población en función de la edad, Berrueco, Torralba de los Sisonos y Santed se clasifican entre los niveles moderado (porcentaje de población especialmente vulnerable entre el 30 % y el 45 %), y bajo (porcentaje de población especialmente vulnerable entre el 45 % y el 60 %) en Gallocanta, Tornos, Las Cuerlas, Bello y Castejón de Tornos. Es decir, en estas últimas localidades, el porcentaje de población más vulnerable (menores de 15 años y mayores de 65) es mayor.

Figura 2. Vulnerabilidad de la población



Fuente: Elaboración propia

Los altos porcentajes de población especialmente vulnerable son similares a los observados por Perles et al. (2009) en zonas rurales de Málaga, y este criterio también es utilizado por Lima et al. (2019) en zonas rurales de Argentina para definir factores a analizar en el análisis del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, aunque en dicho trabajo, los porcentajes de población especialmente vulnerable eran mucho menores.

Finalmente, a pesar de los valores altos de los factores  $R_{1p}$  y  $R_{2p}$ , la vulnerabilidad de la población en la masa de agua subterránea de Gallocanta se ha clasificado como muy baja, debido precisamente a que la cantidad de población expuesta es baja, limitando la influencia de los factores  $R_{1p}$  y  $R_{2p}$  sobre la vulnerabilidad resultante (Figura 2).

### 3.2. Vulnerabilidad de la actividad agropecuaria

Las características de los acuíferos que componen la masa de agua de Gallocanta (dirección preferencial del flujo local subterráneo hacia la laguna) y las características físicas del territorio (terrenos prácticamente planos, espesor de la zona no saturada (CHE, 2003), etc.) hacen que la mayoría de las áreas de cultivo en regadío se localicen en la zona baja de la cuenca, en el entorno de la laguna. La superficie total de regadío en la zona de estudio en 2019 es de 270 ha, según los datos obtenidos del Departamento de Agricultura del Gobierno de Aragón, estando la mayor parte de la zona arable destinada a cultivos de secano.

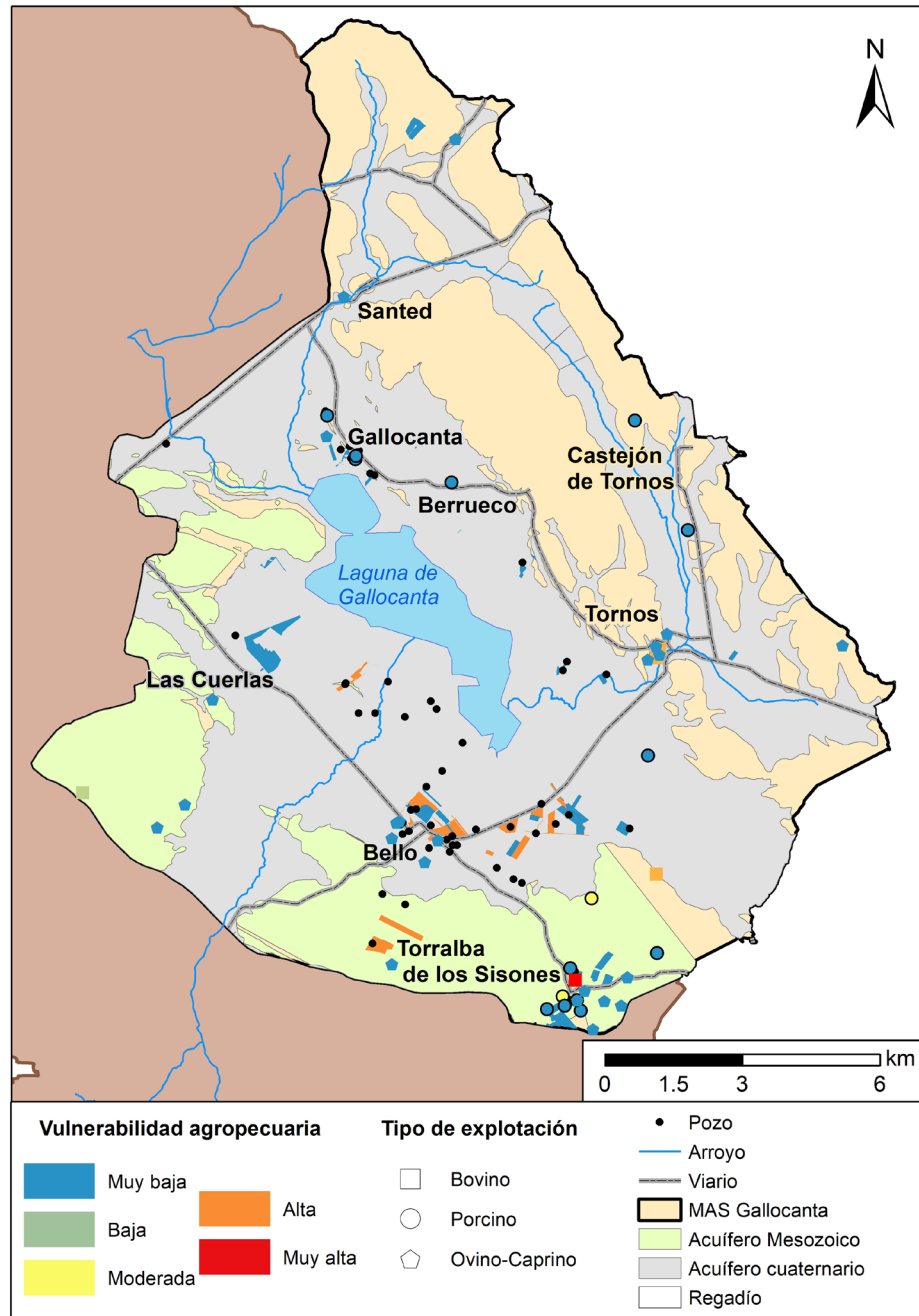
Además, las condiciones climáticas y la altitud reducen significativamente la variedad de cultivos de los que se puede obtener rendimiento. Los cultivos más extendidos en la zona son los cereales de invierno, especialmente trigo y cebada, así como leguminosas forrajeras (alfalfa), girasol, maíz y patata.

Como se muestra en la Figura 3, la mayor exposición tiene lugar en el sector suroccidental de la laguna, siendo la cebada el cultivo mayoritario. Aunque la mayor rentabilidad se obtiene en cultivos como el maíz o la patata, la exposición de estos es mucho menor, dadas sus necesidades hídricas, y se limita a los alrededores del núcleo urbano de Bello, al suroeste de la laguna.

Respecto al uso de las aguas subterráneas para riego, existe una amplia red de pozos que suministran agua, desde los acuíferos carbonatados del cretácico en la mitad occidental de la cuenca, y desde pequeños acuíferos locales y de pequeño espesor en materiales carbonatados del triásico y en depósitos cuaternarios. El carácter regional de los acuíferos cretácicos garantiza el suministro de agua de forma cuasi-permanente, mientras que los pozos que explotan acuíferos locales y superficiales del cuaternario están sujetos a los comportamientos cíclicos del nivel freático, de forma que el caudal puede reducirse en periodos de sequía. En cualquier caso, la única fuente de agua para el riego en toda la zona de estudio proviene de las aguas subterráneas, por lo que la dependencia de este recurso es total.

El resultado final de la vulnerabilidad de la agricultura muestra que las zonas de mayor vulnerabilidad (Alta) son las relacionadas con cultivos de cebada, y con cultivos de mayor rentabilidad económica, como el maíz o la patata (Figura 3). Estas zonas se localizan de forma exclusiva en el cuadrante suroeste de la zona de estudio. Por otra parte, el resto de cultivos de la zona, especialmente el trigo y el girasol, presentan una vulnerabilidad muy baja, bien por su baja exposición, bien por su escasa rentabilidad económica.

Figura 3. Vulnerabilidad de las actividades agropecuarias



Fuente: Elaboración propia

En relación a las actividades ganaderas, se han localizado un total de 46 instalaciones de explotación ganadera. La exposición total de la cabaña ganadera ante un evento potencial de contaminación es alta, contabilizándose unas 35000 cabezas de ganado entre ganado porcino, bovino, caprino y ovino. Aunque las explotaciones ganaderas se localizan en la mayor parte del área de estudio, su concentración es considerablemente mayor en torno a los núcleos de población del sur y el este de la laguna, como Bello, Torralba de los Sisonos y Tornos.

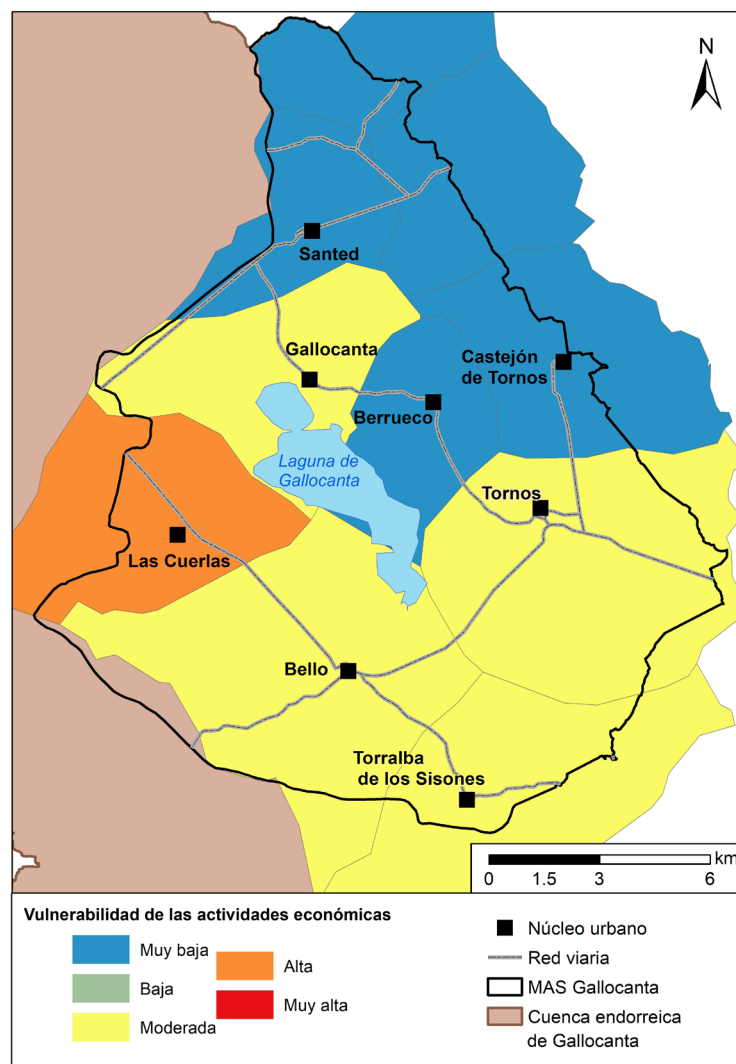
La vulnerabilidad de dichas explotaciones varía entre muy baja y muy alta, dependiendo del tipo de animal y el tamaño de la explotación. Desde un punto de vista socioeconómico, la mayor parte

de las granjas emplean a menos de 3 personas, lo que repercute directamente en que su vulnerabilidad se menor. Únicamente las granjas con un mayor número de empleados, o con especies con una mayor rentabilidad económica, como el ganado bovino, alcanzan niveles de vulnerabilidad que varían entre moderados y muy altos.

### 3.3. Vulnerabilidad de otras actividades económicas ( $V_{ST}$ )

Al igual que ocurre en los factores  $V_p$  y  $V_{AG}$ , en el factor  $V_{ST}$  la existencia de una red de abastecimiento que depende exclusivamente de los recursos hídricos del acuífero hace que los valores de  $R_{IST}$  sean muy altos.

Figura 4. Vulnerabilidad por municipio de otras actividades económicas



Fuente: Elaboración propia

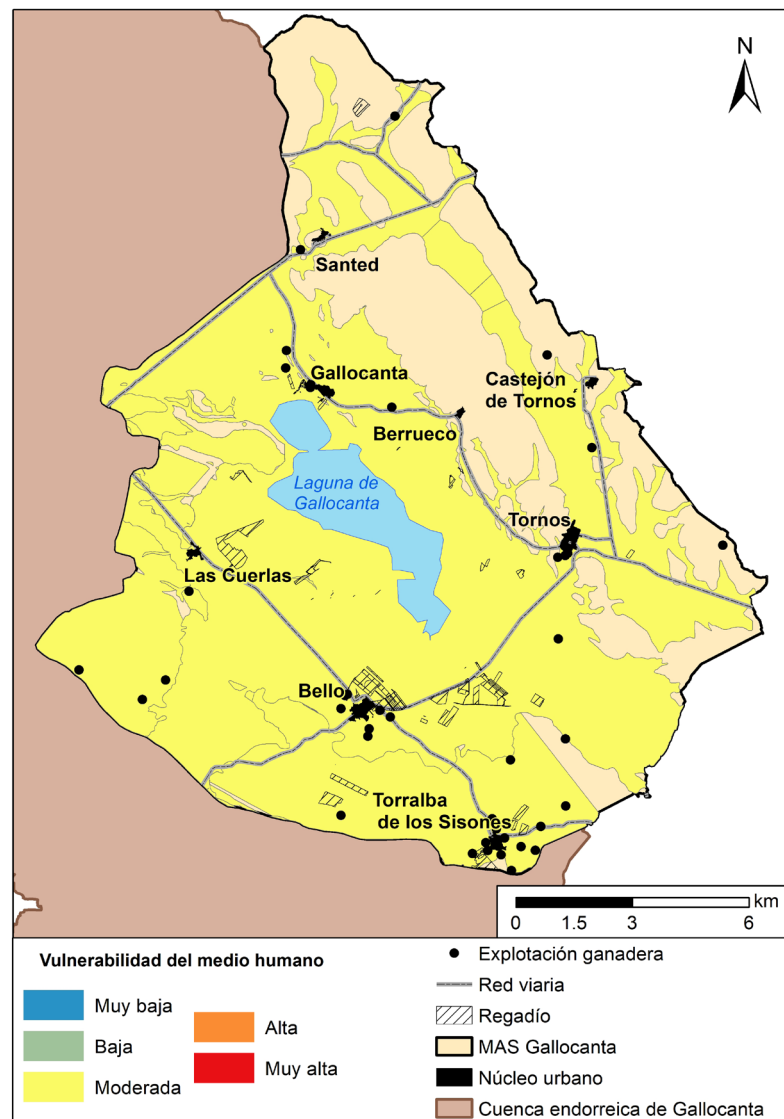
La vulnerabilidad de las actividades productivas dependientes del agua subterránea es moderada en la mayor parte de los municipios de la zona de estudio (Figura 4). En este grupo se incluyen actividades del sector servicios (hoteles, restaurantes y comercios) e industrias de pequeño tamaño (industrias manufactureras y alimenticias). El municipio con una mayor vulnerabilidad es

Las Cuerlas, debido principalmente a un mayor número de población empleada en actividades dependientes, y, por lo tanto, una mayor exposición. De forma inversa, los municipios de Berrueco, Santed, y Castejón de Tornos tienen una vulnerabilidad muy baja por la baja exposición de la población en este tipo de actividades.

### 3.4. Vulnerabilidad del medio humano

El valor final de la vulnerabilidad del medio humano se muestra en la Figura 5. La vulnerabilidad se ha clasificado como moderada en toda la zona de estudio. Este resultado es consecuencia de la vulnerabilidad muy baja con la que se clasifica el factor  $V_p$  fundamentalmente por la escasa población expuesta, y por el mayor peso que tiene este sub-factor en el valor final de la vulnerabilidad. El valor bajo de la puntuación en el valor población contrasta con el más elevado obtenido en el subfactor  $V_{AG}$ , que le proporciona una vulnerabilidad media, y la alta vulnerabilidad del factor  $V_{ST}$  esencialmente motivada por la inexistencia de alternativas al suministro en caso de contaminación.

Figura 5. Vulnerabilidad del medio humano



Fuente: Elaboración propia

El entorno de la laguna de Gallocanta es una zona eminentemente rural, con una población baja y una actividad económica basada en la agricultura y en un sector servicios de carácter local. Si bien la dependencia del agua del acuífero en la zona es muy alta, las consecuencias de no poder disponer de ella son moderadas desde un punto de vista socioeconómico. En la Tabla 2 se recogen las puntuaciones de cada factor a nivel municipal.

Tabla 2. Puntuaciones factores de vulnerabilidad por municipio.

Función del acuífero	V <sub>p</sub>	V <sub>AG</sub> *	V <sub>ST</sub>
Bello	162.4	23.2	409.9
Castejón de Tornos	45.5	1.1	2
Tornos	147.6	2.2	281.5
Torralba de los Sisonos	113	4.1	367.1
Berrueco	24.7	0.4	90.7
Las Cuerlas	32.8	7.6	679.9
Gallocanta	106.6	1.3	295
Santed	48.1	-	20.3

Fuente: Elaboración propia Los datos del factor V<sub>AG</sub> únicamente hacen referencia a las zonas de regadío.

Al interpretar estos resultados desde una perspectiva de evaluación integral del riesgo, se ofrece una perspectiva de conjunto, con el objetivo de establecer una gradación del mismo que permita priorizar posibles actuaciones en unos municipios u otros. Por lo tanto, debe comprenderse que la contaminación de los recursos subterráneos tendría consecuencias negativas sobre la población, al tener una gran dependencia de dichos recursos, pero en términos económicos absolutos, alcanzarían una gran cantidad, dado la baja exposición. Estos resultados están en línea con los expuestos por Perles et al. (2009) y Vías (2005) en zonas rurales de características similares, pero muestran ciertas diferencias con la vulnerabilidad social observada en otras zonas eminentemente mineras de Bolivia (French et al., 2017), ya que en dichas zonas el impacto económico incluso tiene consecuencias demográficas, trasladando población desde las poblaciones rurales.

En relación a la idoneidad del método para su aplicación en zonas eminentemente rurales, cabe señalar que el propio desarrollo metodológico del método trata de ser suficientemente versátil como para reflejar todos los matices de la vulnerabilidad del medio humano, incluyendo factores sociales y económicos, así como factores de ponderación. En general, en el desarrollo de metodologías enfocadas en la evaluación de la vulnerabilidad en el medio humano, la posibilidad de que el autor pueda incluir unos factores a analizar u otros, en función de su criterio, hace que este tipo de índices sean muy dispares y dispersos entre sí (Dwyer et al., 2004; Con, 2009; Birkmann, 2014). Además, en ocasiones, la redundancia de factores que son similares potencia ciertos resultados, y le resta, por tanto, validez a la metodología, a los resultados obtenidos, y a la cartografía de vulnerabilidad.

La separación de la metodología en tres subfactores facilita la interpretación de los resultados, al ser rápida e intuitiva la búsqueda de las causas en el aumento o descenso de la vulnerabilidad. A diferencia de lo que ocurre con otros índices (Cutter et al., 2003; Álvarez, 2006), el método, aunque es sintético, no llega a esconder valores dispares de los índices bajo el uso de valores medios. No obstante, en la unión de factores en un valor sintético final es inevitable cierta tendencia a la homogeneización y enmascaramiento de los resultados

En un medio rural como el que se presenta en este trabajo, el modelo territorial y la forma en la que el índice pondera cada uno de los factores puede condicionar los resultados, ya que la amplitud de escenarios para los que está pensada la aplicación del índice puede tender a la homogeneización, tal y como ocurre en otros índices de peligrosidad (De Ketelaere et al., 2004) y vulnerabilidad (Álvarez, 2006). Dado que el índice otorga un peso mayor al volumen de población frente a las actividades agropecuarias y económicas en un entorno eminentemente despoblado, hace que el valor de este subfactor sea siempre muy bajo. Este hecho plantea la posibilidad de modificar la ponderación del índice, o de sus subfactores, de forma que se diera menor ponderación a la población, y mayor importancia a factores como la dependencia exclusiva de un acuífero, o el consumo hídrico para actividades agrícolas, que en entornos rurales suele superar a los volúmenes de abastecimiento a la población. De hecho, en el caso de la zona de estudio, es precisamente esta dependencia exclusiva el aspecto de mayor relevancia para incrementar el grado de vulnerabilidad de la población, viéndose en cambio el resultado del subfactor y del índice final de vulnerabilidad del medio humano superado por la mayor ponderación del volumen de población.

En este sentido, también es necesario plantearse si el peso de la puntuación de cada factor (es decir, cuando la vulnerabilidad es mayor), debe recaer sobre la vulnerabilidad frente al peligro (vulnerabilidad frente al efecto directo de la intoxicación por consumo y/o uso de aguas contaminadas), o sobre la vulnerabilidad frente al impacto o pérdida económica (vulnerabilidad frente a la pérdida económica en el sector agrario y las actividades económicas dependientes). Siendo este un dilema esencial a la hora de abordar la gestión de la vulnerabilidad de la población frente a diferentes tipos de riesgo.

#### 4. Conclusiones

El estudio de la vulnerabilidad del medio humano debe ser considerado como un elemento más en el análisis integral del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, ya que, sin una valoración del mismo, no es posible evaluar de forma realista y comparada las repercusiones de un evento de contaminación sobre una zona. La metodología aplicada incluye diferentes aspectos socioeconómicos y estructurales para la estimación de la vulnerabilidad, la cual permite su integración en un análisis más profundo del riesgo, incluyendo una evaluación de la peligrosidad y la vulnerabilidad intrínseca. Para ello, se han identificado y analizado individualmente factores de exposición y resistencia.

En la aplicación a la zona de estudio, se han obtenido una serie de mapas de vulnerabilidad, sintetizados en un mapa final que muestra la vulnerabilidad del medio humano. Dado el carácter eminentemente rural de la zona de estudio y el bajo volumen de población que en ella se encuentra, se ha observado que la vulnerabilidad de la población es baja, mientras que la vulnerabilidad de las actividades agrícolas varía entre muy baja y alta, dependiendo de la tipología de cultivo y de las características de las explotaciones ganaderas. Por otra parte, la vulnerabilidad de otras actividades productivas varía entre muy baja y alta, dependiendo de las características de cada municipio. No obstante, el análisis ha puesto de relieve la total dependencia de la mayoría de los municipios de los recursos hídricos subterráneos, siendo estos la única fuente de abastecimiento en la mayoría de ellos. Finalmente, el valor de la vulnerabilidad del medio humano es moderado en toda la zona de estudio, debido principalmente a la relevancia de los factores de baja resistencia.



Los resultados del análisis de la vulnerabilidad del medio humano, el análisis espacial y los mapas resultantes permiten su utilización como parte del proceso de toma de decisiones a escala regional y local. Desde un punto de vista ambiental, el resultado permite analizar en conjunto la vulnerabilidad de la masa de agua de Gallocanta, mientras que, desde una perspectiva social, el trabajo refleja la situación y la tipología de las infraestructuras de abastecimiento, la dependencia de los recursos de agua subterránea en la zona, y la falta de alternativas.

## Conflicto de intereses

Los/as autores/as de este trabajo declaran que no existe ningún tipo de conflicto de intereses.

## Bibliografía

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R. & Hackett, G. (1987). DRASTIC: Standardized system for evaluating groundwater pollution potencial using hydrogeologic settings. *Journal of the Geological Society of India*, 29.
- Álvarez, I. & Cadena, E. (2006). Índice de Vulnerabilidad Social en los Países de la OCDE. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.
- Antonakos, A.K. & Lambrakis, N.J. (2007). Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of Hydrology*, 333 (2–4), 288–304. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.08.014.
- Arauzo, M., & Martínez-Bastida, J. J. (2015). Environmental factors affecting diffuse nitrate pollution in the major aquifers of central Spain: groundwater vulnerability vs. groundwater pollution. *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 8271–8286. doi: 10.1007/s12665-014-3989-8
- Birkmann, J., Cardona, O., Carreño, M., Barbat, A., Pelling, M., Schnei-Derbauer, S., ... & Welle, T. (2014). Theoretical and Conceptual Framework for the Assessment of Vulnerability to Natural Hazards and Climate Change in Europe. En J. Birkmann, S. Kienberger & D. E. Alexander (Coord.), *Assessment of Vulnerability to Natural Hazards. A European Perspective* (pp. 1-20). San Diego, EE. UU: Elsevier.
- CHE (Confederación Hidrográfica del Ebro) (2016). Informe sobre la determinación de las aguas afectadas o en riesgo de contaminación por nitratos de origen agrario en la demarcación del Ebro. Periodo (2012–2015). Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza, Spain.
- Con, M., Susini, S., Catalá, S. & Quinteros, S. (2009). Índice de vulnerabilidad social (IVS). Documento metodológico. Informes temáticos de la dirección de investigación y estadística del Ministerio de Educación del GCBA, Argentina. Recuperado de: [https://www.buenosaires.gov.ar/sites/gcaba/files/2011\\_-\\_indice\\_de\\_vulnerabilidad\\_social\\_.pdf](https://www.buenosaires.gov.ar/sites/gcaba/files/2011_-_indice_de_vulnerabilidad_social_.pdf)
- Cutter, S.L. (1996). Vulnerability to Environmental Hazards. *Progress in Human Geography*, 20, 529–539. doi: 10.1177/030913259602000407
- Cutter, S. L., Mitchell, J. T., & Scott, M. S. (2000). Revealing the vulnerability of people and places: A case study of Georgetown county, South carolina. *Annals of the Association of American Geographers*, 90(4), 713–737. doi: 10.4324/9781849771542
- Cutter, S., Boruff, B., & Shirley, W. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84 (2), 242-261.
- De Ketelaere, D., Hötzl, H., Neukum, C., Civita, M., & Sappa, G. (2004). Hazard Analysis and Mapping. En F. Zwahlen (Coord.), *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers (COST action 620)* Brussels: European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development; 2004. p 86-105.
- Delmonaco, G., Margottini, C., & Spizzichino, D. (2005). New methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk maps. Armonia project: applied multi-risk mapping of natural hazards for impact assessment. European Community.
- DGOHCA e IGME (2002). Cartografía de vulnerabilidad de acuíferos subterráneos a la contaminación en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir. Informe inédito. IGME, Madrid.
- Dow, K., & Downing T. (1995). Vulnerability research: where things stand. *Human Dimensions Quarterly*, 1, 3–5.

- Dwyer, A., Zoppou, C., Nielsen, O., Day, S., & Roberts, S. (2004). Quantifying social vulnerability: A methodology for identifying those at risk to natural hazards. *Geo-science Australia Record* 2004/14.
- French, M., Alem, N., Edwards, S. J., Blanco Coariti, E., Cauthin, H., Hudson-Edwards, K. A., ... Sánchez Miranda, O. (2017). Community exposure and vulnerability to water quality and availability: a case study in the mining-affected Pazña Municipality, Lake Poopó Basin, Bolivian Altiplano. *Environmental Management*, 60(4), 555–573. doi: 10.1007/s00267-017-0893-5
- Gaviria, J., Betancur, T. & Massone, H. (2011). El riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, una interacción entre el peligro y la vulnerabilidad humana. Actas del VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Salta, octubre de 2011.
- Ghazavi, R., & Ebrahimi, Z. (2015). Assessing groundwater vulnerability to contamination in an arid environment using DRASTIC and GOD models. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 2909–2918. doi: 10.1007/s13762-015-0813-2
- Lima, M. L., Romanelli, A., Calderon, G., & Massone, H. E. (2019). Multi-criteria decision model for assessing groundwater pollution risk in the urban-rural interface of Mar del Plata City (Argentina). *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(6), 1–21. doi: 10.1007/s10661-019-7485-1
- Liverman D. (1990). Vulnerability to global environmental change. En: Kasperson, R.E., Dow, K., Golding, D., Kasperson, J.X., (Coord.), *Understanding global environmental change: the contributions of risk analysis and management*. The Earth Transformed Program. Worcester, MA: Clark University; 1990. p. 27–44.
- Massone, H. & Sagua, W. (2005). “La integración de la vulnerabilidad social en la evaluación del riesgo de contaminación de acuíferos”. Actas del IV Congreso Argentino de Hidrogeología. Córdoba, 25, 26, 27 & 28 octubre de 2005.
- Orellana-Macías, J. M., & Perles Roselló, M. J. (2020). A comparative analysis of methods for mapping groundwater pollution hazard: application to the Gallocanta Hydrogeologic Unit (Spain). *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, (85). doi: 10.21138/bage.2885
- Orellana-Macías, J.M., Perles Roselló, M. J., & Causapé, J. (2021). A Methodology for Assessing Groundwater Pollution Hazard by Nitrates from Agricultural Sources : Application to the Gallocanta Groundwater Basin ( Spain ). *Sustainability*, 13(6321). doi: 10.3390/su13116321
- Otahx, N. (2009). Evaluación de los análisis de riesgo sanitario como herramienta de gestión de los recursos hídricos (Tesis de Maestría en Gestión Ambiental del Desarrollo urbano). Universidad Nacional del Mar del Plata, Mar del Plata.
- Perles, M., Vías, J., Andreo, B. (2004). Cartografía de vulnerabilidad y riesgo de contaminación en acuíferos carbonáticos. En: B. Andreo & J.J. Durán (Coord.), *Investigaciones en sistemas kársticos españoles. Contribución española al Proyecto 448 del PICG de la UNESCO, Correlación Mundial de Ecosistemas Kársticos* (pp. 247-273). Madrid, España: IGME, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas.
- Perles Roselló, M. J., Vías Martínez, J. M., & Andreo Navarro, B. (2009). Vulnerability of human environment to risk: Case of groundwater contamination risk. *Environment International*, 35(2), 325–335. doi: 10.1016/j.envint.2008.08.005
- Ramsar Convention Secretariat. (2010). Wise use of wetlands: Concepts and approaches for the wise use of wetlands. En: D. Pritchard, (Coord.). *Ramsar handbooks for the wise use of wetlands*. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat.
- Sagua, M., Massone, H., Tomás, M., Lima, L. & Romanelli, A. (2009). Social Vulnerability in the Risk Assessment of Groundwater Contamination in Periurban interface Areas. Mar del Plata-Balcarce Corridor. República Argentina. *Procc.TIES2010*, Venezuela.
- CHE. (2003). Establecimiento de las normas de explotación de la Unidad Hidrogeológica “Gallocanta” y delimitación de los perímetros de protección de la Laguna. Confederación Hidrográfica del Ebro: Zaragoza, España.
- Vías, J. M. (2005). Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del sur de España. Universidad de Málaga, Málaga.