

## Procedimiento LU-IV para cartografiar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por nitrato de origen difuso: su aplicación al territorio de la Comunidad de La Rioja (España)

### LU-IV procedure for mapping groundwater vulnerability to nitrate pollution from diffuse sources: application to the territory of the Community of La Rioja (Spain)

Mercedes Arauzo<sup>1</sup>, María Valladolid<sup>2</sup>, Gema García<sup>1</sup>, David Molina<sup>3</sup>

1. Instituto de Ciencias Agrarias, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Serrano 115 dpdo. 28006 Madrid, España. mercedes.arauzo@csic.es

2. Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid, España

3. Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, Tulipán s/n 28933 Móstoles, España

Recibido: 22-junio-2017. Aceptado: 31-octubre-2017. Publicado en formato electrónico: 7-noviembre-2017.

**PALABRAS CLAVE:** Zonas Vulnerables a la Contaminación por Nitrato (ZVN), Factores hidrogeológicos, Usos del suelo, Sistemas de información geográfica (SIG)

**KEYWORDS:** Nitrate Vulnerable Zones (NVZ), Hydrogeological factors, Land use, Geographic information systems (GIS)

#### RESUMEN

El procedimiento LU-IV es una nueva herramienta que permite cartografiar la vulnerabilidad específica de las aguas subterráneas a la contaminación por nitrato y delimitar las Zonas Vulnerables a la Contaminación por Nitrato (ZVN; Directiva 91/676/CEE). Combina un mapa de vulnerabilidad intrínseca (a partir del índice IV, que estima los riesgos asociados a parámetros del medio físico) y un mapa de riesgos asociados a los usos del suelo (LU). El procedimiento ha sido aplicado al territorio de la Comunidad de La Rioja (España).

El mapa de vulnerabilidad específica reveló que una superficie de 483 km<sup>2</sup> presentaba niveles de vulnerabilidad de alto a extremo, mientras que otros 527 km<sup>2</sup> mostraban niveles medios. Centrándonos en los territorios aluviales (los más vulnerables, atendiendo a factores del medio físico), el 53,3% presentó una vulnerabilidad específica de alta a extrema, el 23,8% niveles medios y el 22,9% niveles bajos o inapreciables. De estos resultados se desprende la necesidad de una protección integral de la totalidad de los territorios aluviales de La Rioja mediante la ampliación de las designaciones de ZVN. Las zonas que presentaron niveles medios de vulnerabilidad en territorios no aluviales también deberían ser susceptibles de seguimiento, dada su amplia extensión.

#### ABSTRACT

Nitrate pollution from diffuse sources is the main cause of groundwater quality degradation. The Nitrates Directive of the European Union (EU; 91/676/EEC) establishes that water resources should be considered affected by nitrate pollution when their nitrate contents exceed 50 mg L<sup>-1</sup>. The Directive defines Nitrate Vulnerable Zones (NVZ) as the areas of land draining into waters affected by nitrate pollution. In these areas farmers are required to comply with the measures laid out in Action Programmes designed to improve water quality. However, one major obstacle to a more efficient implementation of EU environmental policies for nitrate pollution control is the lack of consensus on the criteria to be used for designating NVZ. In this regard, the use of inappropriate criteria for the designations can seriously reduce the effectiveness of the Action Programmes implemented in the NVZ.

Bearing all this in mind, the new LU-IV procedure (ARAUZO, 2017), for assessing and mapping groundwater vulnerability to nitrate pollution from diffuse sources, was applied to the territory of the Community of La Rioja (northern Spain; Fig. 1) in which, several aquifers (Table I) are chronically affected by nitrate pollution. More specifically, the study had the following objectives: (1) to analyse the distribution of nitrate contents in the 14 aquifers that, totally or partly, belong to the Community of La Rioja (Table I; Fig. 1), (2) to generate the thematic maps of the intrinsic groundwater vulnerability and the specific groundwater vulnerability to nitrate pollution, using the LU-IV procedure, and (3) to define the NVZ in the study area.

The LU-IV procedure combines a map of intrinsic vulnerability (based on the IV index) with a map of the risks associated with different land uses (using the Over tool from logical toolset of Spatial Analyst Tools in ArcGIS 10.3).

The most basic formulation of the IV index uses four environmental parameters that are commonly related to intrinsic groundwater vulnerability: lithology of the vadose zone, depth to groundwater table, topography slope and annual precipitation (Table II). This method stands out as it meets the following requirements: (1) it uses readily available parameters that provide enough data to feed the model, (2) it excludes redundant parameters, (3) it avoids the need to assign insufficiently contrasted weights to parameters, (4) it assesses the entire catchment area that potentially drains N-polluted waters into the receptor aquifer, (5) it is implementable within a GIS, and (6) it provides a multi-scale representation (ARAUZO, 2017).

The spatial modelling of nitrate contents in the 14 aquifers under study (Fig. 2) showed large nitrate polluted areas in all of the alluvial aquifers, which exhibited the worst conditions. It was observed that the alluvial aquifers located in first- and second-order basins (aquifers no 044, 045 and 047) showed significant negative correlations between nitrate concentration and water table elevation (Table I). This result was consistent with the existence of stagnant groundwater zones in the lower sections of these aquifers (Fig. 2), where nitrates tend to accumulate.

The map of the intrinsic groundwater vulnerability (based the IV index; Fig. 3) showed high to extreme levels of intrinsic vulnerability across 12.3% of the territory of La Rioja (617 km<sup>2</sup>) and moderate levels in 21.6 % (1.084 km<sup>2</sup>). All the alluvial areas were within the range of high to extreme intrinsic vulnerability.

The map of the specific groundwater vulnerability to nitrate pollution (according the LU-IV procedure; Fig. 4) showed high to extreme levels of specific vulnerability across 483 km<sup>2</sup> and moderate levels in 527 km<sup>2</sup>. To date, the Community of La Rioja has officially designated a total of three NVZ within the study area, jointly covering a surface of 124 km<sup>2</sup> (Fig. 1).

It was estimated that 53.3% of the alluvial areas in La Rioja exhibited high to extreme vulnerability to nitrate pollution, while 23.8% was subject to moderate risk (Fig. 4). This high vulnerability can be attributed to the combined effect of some typically alluvial characteristics, including: the shallow water table in the alluvial areas, the interconnections between rivers and alluvial aquifers, the permeability of the alluvial deposits and the typically high concentration of irrigated agriculture on the lower terraces and floodplains along river banks.

These results highlight the need to redefine what have been the officially designed NVZ in the study area until now. First of all, it seems necessary to ensure the effective protection of the alluvial aquifers, by extending the designations of the NVZ to all the alluvial areas (this high level of protection should be generalized for all the alluvial areas in Europe). On the other hand, territories with moderate vulnerability to nitrate pollution (beyond the alluvial areas) should also be monitored and controlled, given their wide extension. In other words, if we want to effectively implement Action Programmes designed to restore and protect water quality, in line with Directive 91/676/EEC, it is first necessary to review and redefine the current criteria for the designation of NVZ.

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación por nitrato proveniente de fuentes difusas es una de las principales causas del deterioro de la calidad de las aguas subterráneas. Se produce cuando una masa de agua recibe aguas de infiltración o escorrentía, cargadas de compuestos nitrogenados, generalmente de origen no natural. Los procesos de contaminación difusa están regulados por un conjunto de factores, entre los que destaca la topografía, la permeabilidad del sustrato, las condiciones climáticas, la hidrología de cuenca y los usos del suelo. Este conjunto de factores determina la cantidad de nitrógeno que puede traspasar la zona no saturada (mediante lixiviación) y condiciona su posterior transporte advectivo, tanto en la zona no saturada, como en la zona saturada (ARAUZO, 2017).

La intensificación de la agricultura, la incorporación al suelo de residuos ganaderos, las filtraciones de aguas residuales desde las redes de saneamiento y el vertido de efluentes de depuradora (con un mayor o menor grado de tratamiento) a los cauces fluviales, han provocado un incremento de las cantidades de los compuestos nitrogenados que se dispersan en la biosfera, alterando el ciclo del nitrógeno a escala global y generando un grave deterioro en la calidad de los recursos hídricos (SUTTON *et al.*, 2011). En Europa, la Di-

rectiva Marco del Agua (2000/60/CE; EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 2000), la Directiva de Protección de las Aguas Subterráneas contra la Contaminación y el Deterioro (2006/118/CE; EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 2006) y la Directiva de Nitratos (91/676/CEE; COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 1991), además de otras normas que las implementan o modifican, proporcionan el marco legal para abordar la reducción y prevención de la contaminación de las aguas continentales. La Directiva de Nitratos establece que las aguas superficiales y subterráneas deben considerarse afectadas por la contaminación por nitrato cuando contienen más de 50 mg L<sup>-1</sup>. En la directiva también se definen como Zonas Vulnerables a la Contaminación por Nitrato (ZVN) a aquellas superficies territoriales cuya escorrentía o filtración afecte o pueda afectar a la contaminación por nitratos de las aguas. En las áreas designadas como ZVN, los agricultores están obligados desarrollar Programas de Acción, cuyo fin es mejorar la calidad del agua y prevenir su contaminación. Sin embargo, por el momento, nuestro actual marco normativo adolece de concreción en cuanto a cuál debería ser el procedimiento más adecuado para abordar el problema de la contaminación difusa por compuestos nitrogenados. La amplia disparidad de criterios para la designación de ZVN por parte de los diferentes países miembros de la Unión Europea (EUROPEAN

COMMISSION, 2013), con mayor o menor grado de acierto, hace patente la necesidad de consensuar un procedimiento para realizar las designaciones con mayor fiabilidad y precisión.

Previamente, convendría clarificar los conceptos asociados a expresiones como “ZVN” y “zonas afectadas por la contaminación” que, aunque relacionados, en ningún caso representan una misma cosa. Sin embargo, desafortunadamente, ambas expresiones han sido utilizadas de forma indistinta en gran número de publicaciones científicas y técnicas, con el consiguiente efecto pernicioso sobre la selección de los criterios para las designaciones de las ZVN (ARAUZO, 2017). Como indica la Directiva de Nitratos, las ZVN son áreas del territorio susceptibles de drenar agua contaminada por nitrato desde la superficie topográfica hacia las masas de agua, que resultan afectadas. Involucra, por tanto, principalmente a la zona no saturada, donde domina el transporte vertical de solutos (si bien, en zonas con pendiente, también cabe esperar transporte advectivo por escorrentía superficial y/o subsuperficial). Las zonas afectadas por la contaminación serían, sin embargo, aquellas áreas del acuífero que aparecen contaminadas por nitrato (en la zona saturada). Cuando no se ha producido transporte advectivo del contaminante, las ZVN y zonas afectadas por la contaminación pueden aparecer superpuestas. Pero es frecuente que las zonas afectadas de los acuíferos se encuentren a larga distancia del área donde se produjo la lixiviación del contaminante. De hecho, en los acuíferos aluviales es muy común la presencia de zonas sumidero, donde el nitrato se acumula en las partes bajas de la cuenca como consecuencia del flujo advectivo descendente (ARAUZO, 2017).

Partiendo de estas consideraciones previas, recientemente ha sido desarrollado y validado un nuevo procedimiento (LU-IV en ARAUZO, 2017), que permite cartografiar la vulnerabilidad específica de las aguas subterráneas a la contaminación por nitrato y delimitar con precisión las ZVN. El procedimiento LU-IV combina un mapa de vulnerabilidad intrínseca (índice IV en ARAUZO, 2017) y un mapa de riesgos asociados a los usos del suelo (LU en ARAUZO, 2017) para finalmente obtener un mapa de vulnerabilidad específica a la contaminación por nitrato, que permite delimitar las ZVN. Comparado con otros índices de vulnerabilidad al uso, como DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987) y GOD (FOSTER & HIRATA, 1991), el procedimiento LU-IV ha demostrado ser una herramienta de mayor precisión en la identificación y delimitación de las ZVN (ARAUZO, 2017).

El objetivo principal de este trabajo ha consistido en cartografiar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por nitrato en la superficie territorial de la Comunidad Autónoma de La Rioja, identificar sus ZVN y analizar los resultados a la vista de la distribución de las zonas contaminadas por nitrato en los acuíferos subyacentes. Todo ello, mediante la aplicación del nuevo procedimiento LU-IV.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la superficie territorial de la Comunidad Autónoma de La Rioja (España; Fig. 1). Con una extensión de 5.045 km<sup>2</sup>, se encuentra situada en la cuenca del río Ebro y cuenta con catorce masas de agua subterránea que se extienden, total o parcialmente, bajo su territorio (Tabla I; Fig. 1). La mayoría de estas masas de agua están formadas por un acuífero principal y varios acuíferos de menor entidad (MAGRAMA, 2005). En este estudio hemos analizado los 14 acuíferos principales. Cinco de ellos son del tipo detrítico aluvial, otros 2 detríticos no aluviales, 2 carbonatados y 5 mixtos (Fig. 1). Sus características principales se presentan en la Tabla I. En MAGRAMA (2005) puede consultarse información complementaria sobre los mismos.

El clima dominante es continental mediterráneo. Presenta una media de precipitación anual que varía entre 363 mm y 819 mm (BOTÉY *et al.*, 2013), dependiendo de la altitud, que a su vez varía entre 258 m y 2,270 m sobre el nivel del mar. Con relación a los usos del suelo, destaca el componente agrícola (MARM, 2009), que constituye una importante fuente exógena de compuestos nitrogenados susceptibles de generar contaminación difusa.

Hasta la actualidad, la Comunidad de La Rioja ha designado oficialmente como ZVN un total de 124 km<sup>2</sup>, repartidas en tres zonas: (1) Aluvial del Oja, áreas de arroyo Zamaca, Cuzcurrita, Casalarreina y Haro (94 km<sup>2</sup>; ZVN1, Fig. 1), (2) Aluvial bajo del Najerilla (21 km<sup>2</sup>; ZVN2, Fig. 1) y (3) parte del glacis de Aldeanueva de Ebro (9 km<sup>2</sup>; ZVN3, Fig. 1).

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración de la cartografía temática se utilizó el software ArcGIS 10.3 for Desktop (ESRI, Redlands, CA, USA) y el sistema de referencia espacial ETRS89 / UTM zona 30N.

### 3.1. Mapa de la concentración de nitrato en las aguas subterráneas

Para elaborar el mapa de la concentración de nitrato en las aguas subterráneas se utilizaron las concentraciones promedio de nitrato correspondientes a un período de cinco años hidrológicos (de octubre de 2005 a septiembre de 2010) en un total de 223 puntos de muestreo (Fig. 2; principalmente pozos de riego, pero también sondeos y manantiales). Este período fue seleccionado porque era el que proporcionaba el conjunto de datos más completo, con frecuencias de muestreo estacionales o semestrales en la mayor parte de los puntos. Con ello se obtuvieron datos robustos, que absorbían la variabilidad estacional en cada punto y la posible variabilidad interanual (influida, en

Tabla I. Características de los acuíferos principales localizados, total o parcialmente, en el área de estudio. También se muestra la correlación de Pearson (r) entre el ráster de la concentración de nitrato y el ráster de elevación de nivel piezométrico, para cada acuífero (valor-p entre paréntesis).

— Characteristics of the main aquifers located, totally or partially, in the study area. Pearson's correlation (r) between the ráster of nitrate concentration and the ráster of water table elevation for each aquifer is shown (p-value between brackets).

Masas de agua subterránea <sup>a</sup>	Área (km <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Tipo	Geología dominante	r [NO <sub>3</sub> ] <sup>-</sup> vs. nivel piezométrico
Pancorbo-Conchas de Haro (006)	73		Libre <sup>b</sup>	Conjunto calcáreo del Cretácico superior	(ns)
Sierra de Cantabria (022)	252		Libre <sup>b</sup>	Terciario continental detrítico: conglomerados y calizas karstificadas en grado variable	0,19 (<0,01)
Aluvial del Tirón (044)	30		Libre	Depósitos aluviales	-0,92 (<0,0001)
Aluvial del Oja (045)	213	12	Libre	Depósitos aluviales	-0,45 (<0,0001)
Laguardia (046)	473		Semiconfinado	Areniscas del Mioceno, de media- baja permeabilidad	(ns)
Aluvial del Najerilla-Ebro (047)	117		Libre	Depósitos aluviales	-0,60 (<0,0001)
Aluvial de La Rioja-Mendavia (048)	188		Libre	Depósitos aluviales	(ns)
Aluvial Ebro-Aragón: Lodosa-Tudela (049)	643		Libre	Depósitos aluviales	(ns)
Pradoluengo-Anguiano (065)	248	40-200	Libre <sup>b</sup>	Carniolas, dolomías y calizas	(ns)
Fitero-Arnedillo (066)	97		Libre <sup>b</sup>	Formaciones carbonatadas del Jurásico y calizas del Cretácico	(ns)
Detrítico de Arnedo (067)	124		Libre	Conglomerados, arenas y glaciares cuaternario	(ns)
Mansilla-Neila (068)	199	40-50	Libre <sup>b</sup>	Calizas y calcarenitas	(ns)
Cameros (069)	1814	80-1100	Semiconfinado	Conglomerados, areniscas, limonitas, calizas arenosas, margas y yesos	0,41 (<0,0001)
Añavieja-Valdegatur (070)	416	340-1000	Libre <sup>b</sup>	Calizas margosas-arenosas y conglomerados	0,44 (<0,0001)

<sup>a</sup>: entre paréntesis se muestra el código de la masa de agua subterránea (asignado por la Confederación Hidrográfica del Ebro); ns: correlación no significativa; <sup>b</sup>: acuífero predominantemente libre (con algún semiconfinamiento local).

algunos puntos, por la carencia de datos durante determinados periodos).

El mapa general se compuso a partir de los mapas individuales de cada acuífero. Para elaborar cada mapa individual se aplicó la herramienta de interpolación *Spline Interpolation (Spatial Analyst Tools* de ArcGIS 10.3) a los *shapefiles* de los puntos de muestreo. Posteriormente, los 14 rásteres resultantes se fusionaron mediante *Mosaic to New Raster (Data Management Tools* de ArcGIS 10.3).

La Confederación Hidrográfica del Ebro facilitó la mayor parte la información hidroquímica (CHE, 2015), que fue completada con datos propios (ARAUZO *et al.*, 2011).

### 3.2. Mapa de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por nitrato de origen difuso (procedimiento LU-IV)

El procedimiento LU-IV (ARAUZO, 2017) permite cartografiar la vulnerabilidad específica de las aguas subterráneas a la contaminación por nitrato y delimitar las ZVN. Sus características de mayor interés son las siguientes: (1) evalúa la totalidad de la superficie topográfica y, por tanto, la totalidad del área que potencialmente puede drenar agua contaminada a un acuífero receptor, (2) utiliza parámetros sencillos y fácilmente disponibles, (3) excluye parámetros redundantes, (4) evita asignar pesos insuficientemente contrastados a los

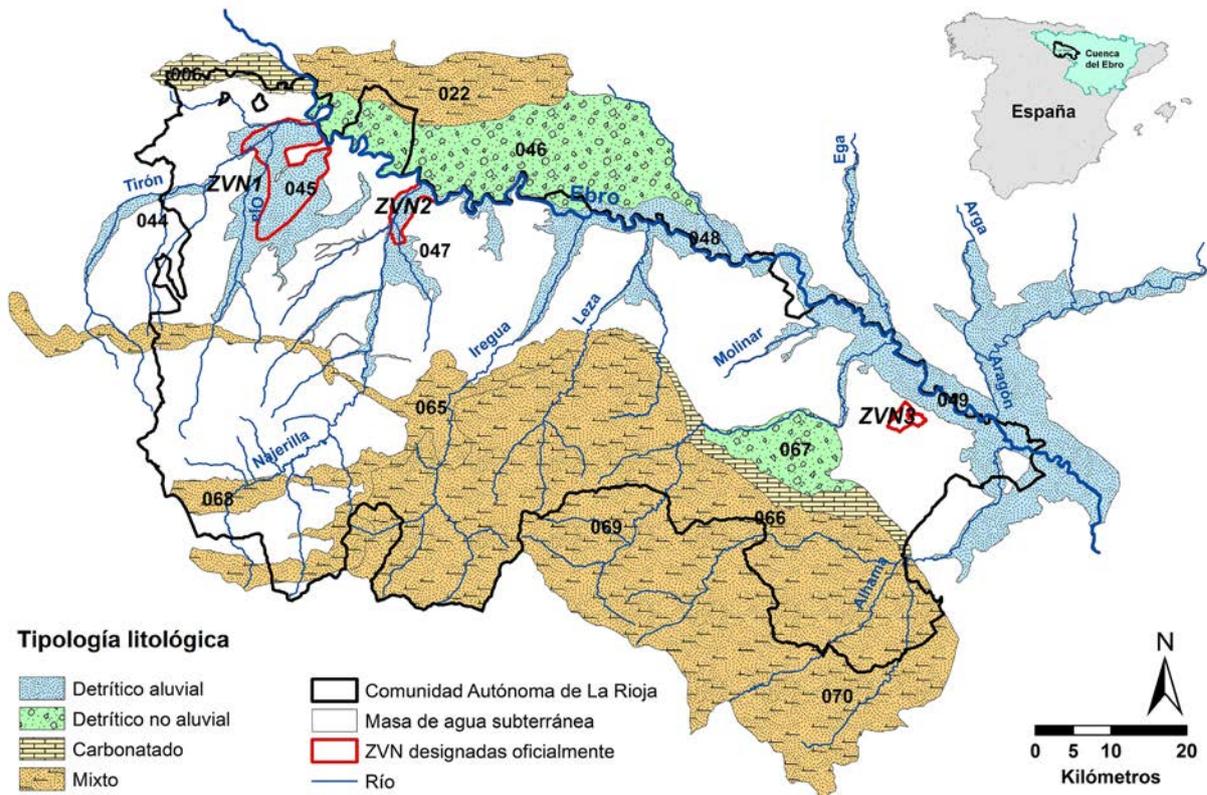


Figura 1. Comunidad de La Rioja (área de estudio); se representan las 14 masas de agua subterránea (que pertenecen, total o parcialmente, al área de estudio) con su código de identificación y las características litológicas de sus acuíferos principales; también se muestran las tres Zonas Vulnerables a la Contaminación por Nitrato (ZVN) oficialmente designadas hasta hoy en La Rioja.

— Community of La Rioja (study area); the 14 groundwater bodies and their lithological characteristics are represented; Nitrate Vulnerable Zones (NVZ) officially designated within the study area are also shown.

parámetros, (5) está ideado para ser implementado en un SIG y (6) proporciona una representación multiescala de precisión.

El modelo se desarrolla en dos pasos: (paso 1) cartografía de la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas y (paso 2) cartografía de la vulnerabilidad específica a la contaminación por nitrato de las aguas subterráneas. El paso 1 emplea un algoritmo para evaluar la vulnerabilidad intrínseca (índice IV en ARAUZO, 2017), que representa los riesgos asociados a factores del medio físico. El paso 2 desarrolla el procedimiento LU-IV, que combina el mapa previo de vulnerabilidad intrínseca (basado en el índice IV) con el mapa de evaluación de los riesgos asociados a los usos del suelo, mediante la herramienta lógica *Over* (*Spatial Analyst Tools*).

Paso 1:

La expresión más sencilla del índice IV utiliza cuatro parámetros ambientales relacionados con la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas, combinados mediante el siguiente algoritmo:

$$IV = (L + D + T + P) / 4$$

Donde,  $L$  es el valor del riesgo asociado a la litología de la zona no saturada (*Lithology of the vadose zone*),  $D$  es el valor del riesgo asociado a la profundidad del nivel freático (*Depth to groundwater table*),  $T$  es el valor del riesgo asociado a la pendiente topográfica (*Topography*) y  $P$  es el valor del riesgo asociado a la precipitación media anual (*Precipitation*). El modelo IV utiliza una escala única de 1 a 10 para todos los parámetros, con los siguientes rangos de vulnerabilidad: inapreciable: 1-2; baja: 3-4; media o moderada: 5-6; alta: 7-8; extrema: 9-10 (Tabla II).

Para elaborar los cuatro rasters temáticos ( $L$ ,  $D$ ,  $T$  y  $P$ ) se siguieron las especificaciones metodológicas descritas por ARAUZO (2017). Los datos de partida para elaborar los rasters  $L$  y  $P$  proceden de IGME (2015) y BOTEY *et al.* (2013), respectivamente. El raster  $D$  se creó a partir de datos de la profundidad del nivel freático de 499 puntos de muestreo (datos facilitados por la Confederación Hidrográfica del Ebro en formato Excel). El raster  $T$  se obtuvo del mapa de la pendiente topográfica, generado a su vez a partir de un modelo

Tabla II. Valores de los riesgos asociados a los parámetros ambientales relacionados con la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por nitrato (procedimiento LU-IV).

— Ratings for risks associated with environmental parameters related to groundwater vulnerability to nitrate pollution (LU-IV procedure).

Litología de la zona no saturada ( <i>L</i> )		Profundidad del nivel freático ( <i>D</i> )			
Clase	Valor	Clase	Valor		
Calizas kársticas, calcretas; gravas	10	Todas las profundidades: para calizas, lavas volcánicas recientes y gravas	10		
Caliza de Creta, calcarenitas	9	0 – 5 m	9		
Arenas aluviales y fluvio-glaciares; lavas volcánicas recientes	7-8	>5 – 10 m	8		
Tobas volcánicas; formaciones ígneas/metamórficas; formaciones volcánicas antiguas; areniscas, conglomerados	5-6	>10 – 20 m	6		
Limos aluviales, loess, margas; lutitas; pizarras	3-4	>20 – 50 m	4		
Arcillas; suelos residuales	1-2	> 50 m	2		
		Sin presencia de acuífero	1		
Precipitación anual ( <i>P</i> )		Pendiente topográfica ( <i>T</i> )		Usos del Suelo ( <i>LU</i> )	
Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor
>900 mm	10	0 – 2 %	10	Cultivo de hortícolas; herbáceas forrajeras en regadío; cultivo de cítricos	10
>800-900 mm	9	>2 – 3 %	9	Herbáceas forrajeras en secano; cultivo de frutales (no cítricos)	9
>700-800 mm	8	>3 – 4 %	8	Piscifactoría <sup>a</sup>	8
>600-700 mm	7	>4 – 5 %	7	Cultivo de cereales en regadío; cultivo de almendros; área urbana; granja <sup>a</sup>	7
>500-600 mm	6	>5 – 6 %	6	Cereales en secano; leguminosas (grano) en regadío; viñedo; prados en regadío	6
>400-500 mm	5	>6 – 9 %	5	Prados en secano; pastizales naturales; leguminosas (grano) en secano; cultivos industriales en regadío; cultivo de otras leñosas	5
>300-400 mm	4	>9 – 12 %	4	Cultivos industriales en secano	4
>200-300 mm	3	>12 – 15 %	3	Olivar; matorral	3
>100-200 mm	2	>15 – 18 %	2	Terreno no productivo	2
0-100 mm	1	>18 %	1	Bosque y área natural	1

<sup>a</sup>: uso no incluido en el mapa de los riesgos asociados a los usos del suelo (*LU*).

digital de elevación del terreno (de resolución 10 m) mediante la herramienta *Slope (Spatial Analyst Tools)*. Los rasters finales de *L*, *D*, *T* y *P* se obtuvieron a partir de mapas de los parámetros de partida (en formato vectorial o raster), asignando (a polígonos o a celdas) valores entre 1 y 10, de acuerdo a los valores que se presentan en la Tabla II para los diferentes niveles de riesgo asociados a cada parámetro. En ARAUZO (2017) puede consultarse la procedencia de los valores de referencia.

Para obtener el mapa de vulnerabilidad intrínseca (*IV*), los rasters de los cuatro parámetros se combinaron según el algoritmo del índice *IV* utilizando la herramienta *Map Algebra (Spatial Analyst Tools)*.

Paso 2:

Mediante la herramienta *Reclass (Spatial Analyst Tools)*, reclassificamos el ráster de vulne-

rabilidad intrínseca (*IV*) asignando a los rangos de vulnerabilidad extremo, alto y medio (valores de 5-10) el valor “0”, y a los rangos bajo e inapreciable (valores de 1-4) el valor “1”. Obtuvimos así un nuevo raster, que denominamos “vulnerabilidad intrínseca 0-1”, que representa el territorio intrínsecamente vulnerable (valor=0), frente al territorio no vulnerable o escasamente vulnerable (valor=1). Este ráster se asignará como primera entrada de la herramienta lógica *Over (Logical toolset, Spatial Analyst Tools)*.

El ráster *LU* representa los riesgos asociados a los usos del suelo (*Land Use*) y se generó a partir de la versión digital del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de España 2000-2009 (MARM, 2009), escala 1:50.000. Los valores asignados a los diferentes usos agrícolas del suelo como fuentes potenciales de nitrógeno excedente (Tabla II), se basaron en información sobre los excedentes

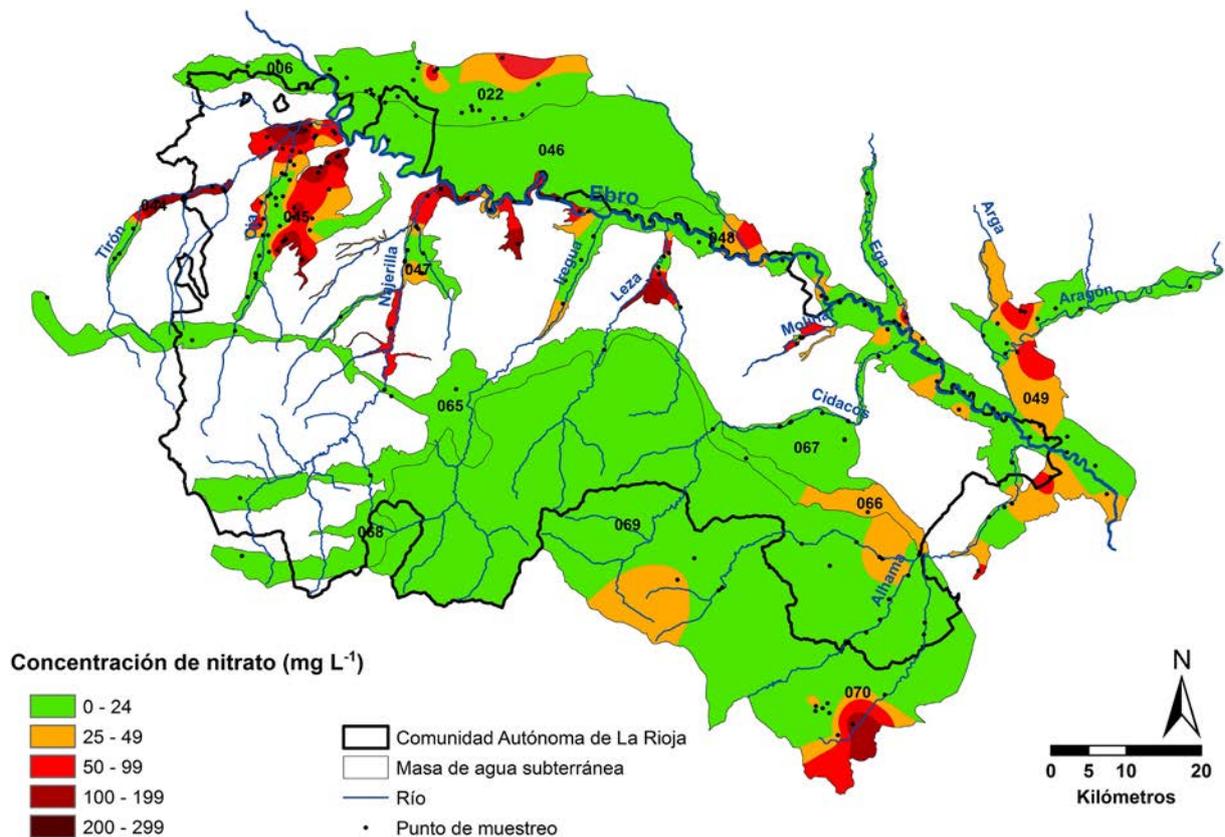


Figura 2. Mapa de la concentración de nitrato en los 14 acuíferos. Se muestran los puntos de muestreo.  
— Map of the nitrate concentration in the 14 aquifers. Sampling points are shown.

netos anuales de nitrógeno en los diferentes tipos de cultivo, que aparecen en los informes sobre balances de nitrógeno en la agricultura española de 2011 a 2014 (MAPAMA, 2013, -2015a, -2016); también se utilizó el informe sobre regadíos en España (MAPAMA, 2015b) y el informe sobre el estado de los bosques europeos (FOREST EUROPE, 2015); las valoraciones sobre usos no agrícolas se hicieron de acuerdo a LERNER (2000) y SECUNA *et al.* (1998). Los criterios de asignación de valores de riesgo para los diferentes usos agrícolas (a partir de los datos de excedentes de nitrógeno y tipos de riego) se encuentran pendientes de publicación.

Mediante la herramienta lógica *Over*, cruzamos la información de la capa “vulnerabilidad intrínseca 0-1” (primera entrada de *Over*) y la capa de riesgos asociados a los usos del suelo (segunda entrada). *Over* opera de manera que, para los valores de celda en la primera entrada que son igual a 1 (territorios intrínsecamente no vulnerables), el valor de salida será el mismo, es decir 1 (correspondería a territorios en los que no hay que aplicar restricciones de uso). Por otra parte, para los valores de celda que en la primera entrada son igual a 0 (territorios intrínsecamente vulnerables), la salida será la de la celda del ráster de la segunda entrada.

Así obtendremos el mapa de la vulnerabilidad específica de las aguas subterráneas a la contaminación por nitrato mediante el procedimiento

LU-IV. A partir del mismo, es posible contabilizar las ZVN y trazar con precisión los polígonos que las delimitan.

Informaciones complementarias sobre el diseño, aplicabilidad y validaciones del índice IV y del procedimiento LU-IV pueden consultarse en ARAUZO (2017).

### 3.3 Análisis estadísticos

En cada uno de los acuíferos afectados por la contaminación, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (herramienta *Band Collection Statistics* de *Spatial Analyst Tools*) para analizar la relación entre el ráster de concentración del nitrato y el ráster de elevación del nivel piezométrico. Para obtener el ráster de elevación del nivel piezométrico de cada acuífero (con relación al nivel del mar), se partió de un modelo de elevación del terreno (de resolución 10 metros) al que se le restó el ráster de profundidades del nivel freático. Para ello se utilizó la herramienta *Map Algebra* (*Spatial Analyst Tools*). Dado que el agua circula desde los puntos con mayor potencial hidráulico a los puntos con menor potencial, y que los contaminantes disueltos, en general, son transportados por el flujo subterráneo siguiendo tales pautas, las relaciones entre la distribución del nitrato y el mapa piezométrico podrían explicar la mayor o menor

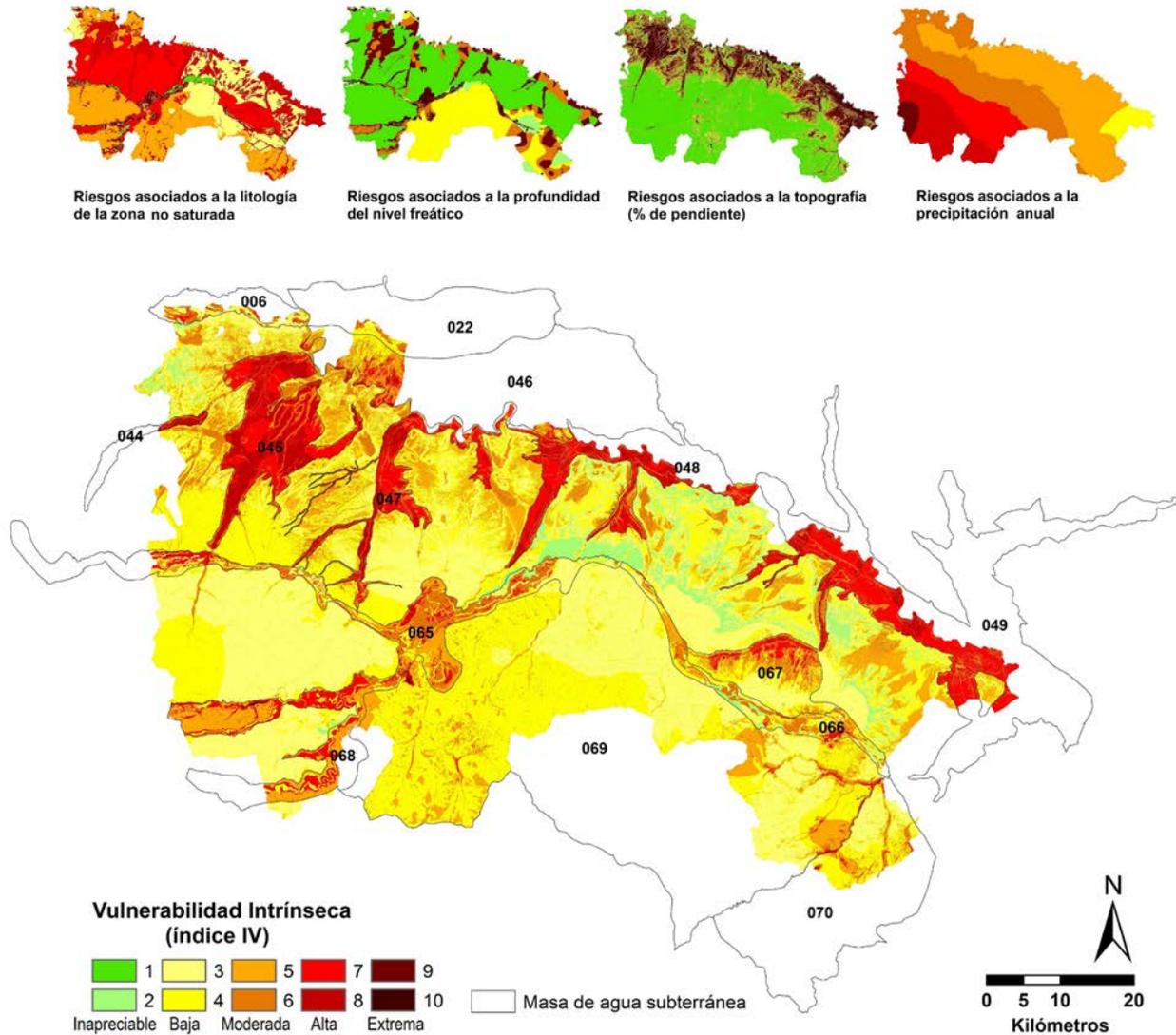


Figura 3. Mapa de la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas a partir del índice IV; los mapas de los riesgos asociados a los parámetros ambientales que conforman el índice se muestran en la parte alta de la figura.

— Map of the intrinsic groundwater vulnerability based on the IV index; maps of the risks associated with the environmental parameters that make up the IV index are shown above.

importancia del transporte advectivo en la zona saturada, sobre la localización de los núcleos de contaminación en los acuíferos afectados.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La modelización espacial de las concentraciones de nitrato en los 14 acuíferos (Fig. 2) reveló que siete de ellos presentaban zonas afectadas por contaminación de nitrato (concentraciones superiores a  $50 \text{ mg L}^{-1}$ ), dos mostraban zonas en riesgo (concentraciones entre  $25$  y  $50 \text{ mg L}^{-1}$ ) y, los cinco restantes, niveles inferiores a  $25 \text{ mg L}^{-1}$ .

Todos los acuíferos aluviales presentaron áreas contaminadas y en riesgo de contaminación

(masas subterráneas 044, 045, 047, 048 y 049). A ello contribuyeron los factores de riesgo propios del medio físico aluvial (ARAUZO *et al.*, 2011) y la amplia disponibilidad de excedentes de nitrógeno procedentes de la agricultura intensiva (MARM, 2009; MAPAMA, 2013, -2015a, -2016).

De los cinco acuíferos aluviales en estudio, los aluviales del Tirón (044), el Oja (045) y el Najerilla-Ebro (047) mostraron correlaciones negativas significativas entre el ráster de concentración de nitrato y el de elevación del nivel piezométrico (Tabla I). Estos resultados son consistentes con la presencia de lo que podríamos considerar “zonas sumidero” en las cotas bajas de las cuencas aluviales (Fig. 2), donde el nitrato tiende a acumu-

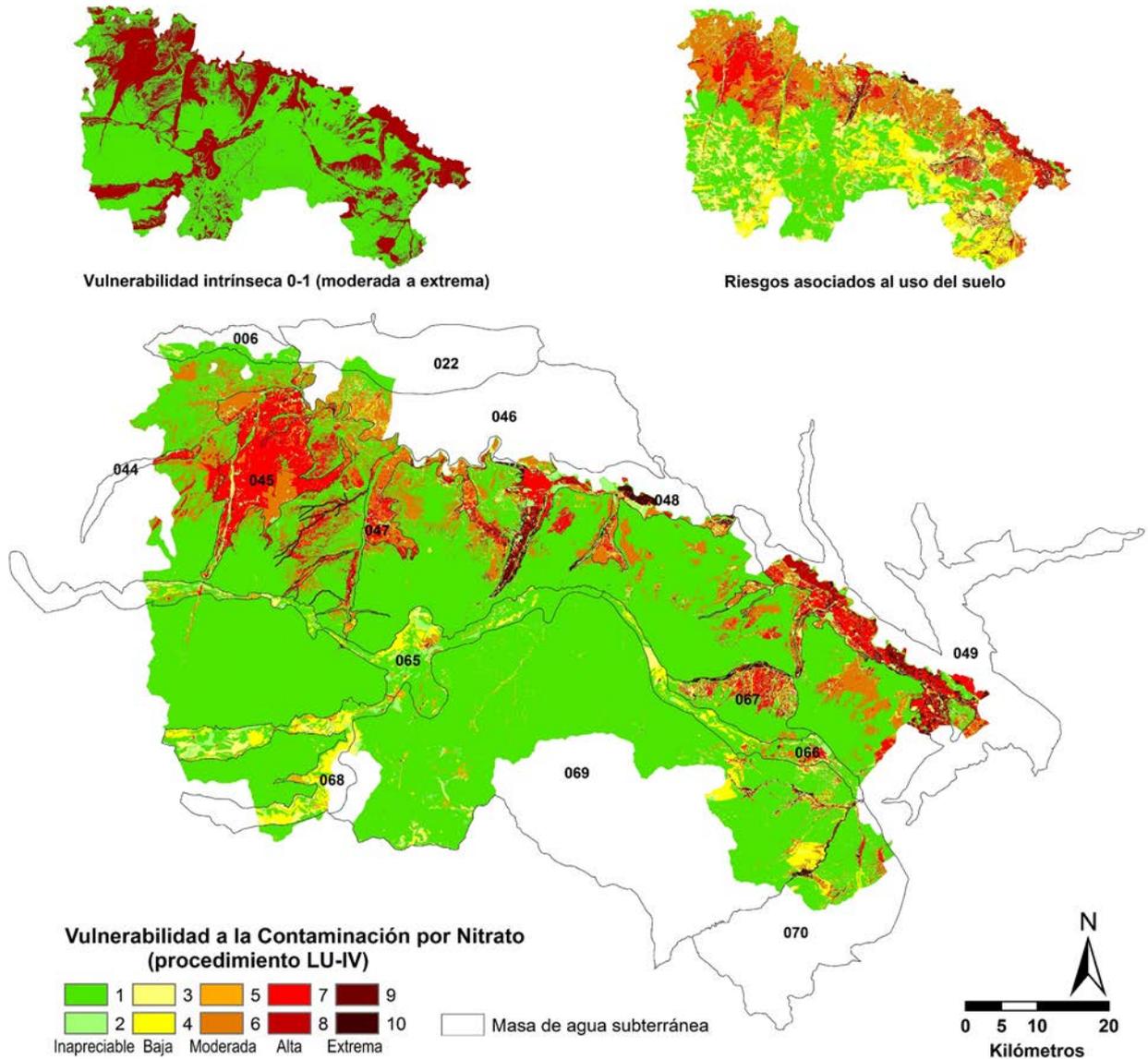


Figura 4. Mapa de la vulnerabilidad específica de las aguas subterráneas a la contaminación por nitrato a partir del procedimiento LU-IV; los mapas de vulnerabilidad intrínseca 0-1 (moderada a extrema) y de riesgos asociados a los usos del suelo, se muestran en la parte alta de la figura.

— Map of the specific groundwater vulnerability to nitrate pollution based on the LU-IV procedure; maps of the intrinsic vulnerability 1-0 (moderate to extreme) and the risks associated with land use are shown above.

larse como consecuencia del flujo advectivo descendente (nos da una idea del papel de los procesos advectivos en el transporte y distribución del nitrato en la zona saturada aluvial). Los acuíferos aluviales 044, 045 y 047, junto a sus respectivas cuencas fluviales asociadas, constituyen unidades hidrológicas naturales con un funcionamiento relativamente sencillo (dado que se trata de cuencas de cabecera de primer y segundo orden, en las que la zona de recarga corresponde a la totalidad de la superficie de cada cuenca). Lo que hemos denominado “zonas sumidero”, correspondería a zonas de estancamiento, con altas concentraciones nitrato, situadas en los sectores del acuífero con las cotas

piezométricas más bajas del área aluvial, donde el tiempo de tránsito del agua por el acuífero es muy lento. En estos tres aluviales se ha estimado que la superficie media afectada, o en riesgo, es del 68% (desviación estándar del 6%; Fig. 2).

A diferencia de los anteriores, los aluviales de La Rioja-Mendavia (048) y Ebro-Aragón: Lodosa-Tudela (049) no mostraron correlaciones significativas entre la concentración de nitrato y el mapa piezométrico. Este hecho se explica porque ambos territorios aluviales no constituyen unidades hidrogeológicas naturales en sí mismas, sino que son secciones del acuífero aluvial del Ebro, el aluvial del Arga-Aragón y otros aluviales de

menor entidad que drenan al Ebro (Figs. 1 y 2). En el caso de los aluviales 048 y 049, las concentraciones de nitrato en las aguas subterráneas vendrían determinadas por procesos hidrológicos de dilución-concentración bastante más complejos, dado que ambas secciones aluviales pueden recibir aportes de aguas no contaminadas (o con menor concentración de nitrato), que contribuyan a su dilución, o aguas más contaminadas, que aumenten la concentración. Todo ello depende de los niveles de calidad del agua de los tributarios (y acuíferos aluviales asociados) que drenan al Ebro en esos sectores. En las secciones aluviales 048 y 049 se ha estimado una superficie media afectada o en riesgo del 38% (desviación estándar del 2%; Fig. 2).

Con relación al resto de los acuíferos (carbonatados, mixtos y detríticos no aluviales), dos de ellos mostraron áreas afectadas (022 y 070), aunque fuera del perímetro territorial de La Rioja, otros dos presentaron áreas en riesgo (066, 069) y los cinco restantes (006, 046, 065, 067 y 068) no ofrecieron indicios de contaminación (Fig. 2). A diferencia de los aluviales, se dieron correlaciones positivas significativas entre los rasters de concentración de nitrato y de elevación del nivel piezométrico en los acuíferos 022, 069 y 070 (Tabla I). En estos casos, la distribución de las zonas afectadas podría explicarse por la lixiviación directa del nitrato desde la superficie topográfica, como consecuencia de usos locales del suelo potencialmente contaminantes (no apreciándose desplazamiento del contaminante hacia cotas más bajas). La implantación de usos del suelo que recoge el mapa de cultivos y aprovechamientos de España (MARM, 2009) permitió verificar la hipótesis, revelando un dominio de los cultivos herbáceos en regadío sobre la zona afectada de la masa 022, y de herbáceos en secano y regadío sobre las zonas afectadas de las masas 069 y 070 (estas tres áreas afectadas se encuentran fuera del territorio de la Comunidad de la Rioja; Fig. 2).

El mapa de vulnerabilidad intrínseca (asociada a factores del medio físico; Fig. 3) reveló un grado de vulnerabilidad de alto a extremo en 617 km<sup>2</sup> de la Comunidad de la Rioja (12,3% de su territorio). Otra superficie de 1.084 km<sup>2</sup> (21,6% del territorio) mostró una vulnerabilidad media o moderada. Centrando nuestra atención en los 616 km<sup>2</sup> de territorio aluvial de La Rioja, de la Figura 3 se desprende que el 79,1% del aluvial (487 km<sup>2</sup>) presentaba un grado de vulnerabilidad intrínseca de alto a extremo y el 20,2% (125 km<sup>2</sup>) mantenía niveles medios o moderados. Únicamente el 0,7% de los aluviales (4 km<sup>2</sup>) exhibió niveles bajos o inapreciables de vulnerabilidad intrínseca. En términos generales, a partir de la Figura 3 puede establecerse que la totalidad de los aluviales y una gran parte de los territorios situados sobre los acuíferos carbonatados y/o detríticos deberían considerarse vulnerables desde el punto de vista de los riesgos asociados a factores del medio físico.

El mapa de vulnerabilidad a la contaminación por nitrato de La Rioja (Fig. 4) reveló que una superficie de 483 km<sup>2</sup> presentaba un grado de vulnerabilidad específica de alto a extremo (8,6% del territorio), por lo que debería estudiarse la posibilidad de ampliar el territorio oficialmente designado como ZVN (hasta ahora está designada una superficie de 124 km<sup>2</sup>, que corresponde a un 2,5% del territorio; Fig. 1). Además, otra superficie de 527 km<sup>2</sup> presentaba un nivel moderado de vulnerabilidad específica (10,5% del territorio; Fig. 4). Dada su amplia extensión, la zona con niveles medios de vulnerabilidad específica también debería ser considerada al implementar los Programas de Acción, si lo que realmente pretendemos es abordar de forma definitiva el problema de la contaminación por nitrato de origen difuso en el área de estudio.

Finalmente, cabe destacar que el 53,3% de la superficie aluvial de La Rioja presentó una vulnerabilidad específica de alta a extrema, el 23,8% una vulnerabilidad media y sólo el 22,9% exhibió niveles bajos o inapreciables (Fig. 4). Este alto grado de vulnerabilidad en las zonas aluviales se explica por la interacción de un conjunto de factores ambientales característicos del espacio aluvial, tales como el nivel freático próximo a la superficie del terreno, la permeabilidad de los materiales, la íntima interconexión entre las aguas fluviales y sus acuíferos aluviales, y la amplia implantación de la agricultura de regadío en todas las áreas de vega (ARAUZO & VALLADOLID, 2013; ARAUZO *et al.*, 2011).

## 5. CONCLUSIONES

La modelización espacial de las concentraciones de nitrato mostró que el principal problema de contaminación en las aguas subterráneas de la Comunidad de La Rioja se localiza en los acuíferos aluviales.

El mapa de vulnerabilidad específica a la contaminación por nitrato para el territorio de La Rioja reveló que una superficie de 483 km<sup>2</sup> presentaba un grado de vulnerabilidad de alto a extremo, mientras que otros 527 km<sup>2</sup> mostraban niveles medios de vulnerabilidad. A la vista de estos resultados, cabría revisar las ZVN designadas hasta la fecha (124 km<sup>2</sup>). En lo que se refiere al territorio aluvial, el 53,3% presentó un grado de vulnerabilidad específica de alto a extremo, el 23,8% un nivel medio y el 22,9% mantuvo niveles bajos o inapreciables. Teniendo en cuenta, además, que la vulnerabilidad intrínseca (asociada exclusivamente a factores del medio físico) era de media a extrema en el 99,3% de los aluviales, de estos resultados se desprende la necesidad de una protección integral para la totalidad de los territorios aluviales de La Rioja, mediante la posible ampliación de las designaciones de las ZVN. Esta recomendación se justifica porque los acuíferos aluviales comparten un conjunto de características

propias del medio aluvial que los hacen particularmente vulnerables a la contaminación por nitrato de origen difuso, tales como: (1) niveles freáticos muy próximos a la superficie del terreno, (2) depósitos aluviales generalmente muy permeables, (3) una íntima interconexión entre las aguas fluviales y sus acuíferos aluviales y (4) un alto grado de implantación de la agricultura de regadío en las áreas de vega. Por ello, esta propuesta de protección integral de los territorios aluviales debería generalizarse y hacerse extensiva a la totalidad de los aluviales del ámbito europeo, que comparten similares factores de riesgo. Por otra parte, las zonas que presentaron niveles moderados (alcanzando a veces valores altos) de vulnerabilidad a la contaminación por nitrato en el territorio no aluvial también deberían ser susceptibles de control y seguimiento, dada su amplia extensión.

El procedimiento LU-IV nos ha permitido analizar los diferentes tipos y niveles de vulnerabilidad para facilitarnos una adecuada identificación de las ZVN. Utiliza parámetros sencillos y fácilmente disponibles, no incluye parámetros redundantes y no asigna pesos insuficientemente contrastados a los parámetros. Evalúa la totalidad de la superficie topográfica susceptible de drenar aguas contaminadas hacia un acuífero receptor y ofrece una aproximación multiescala en un entorno de SIG. Por todo ello, su aplicación permitirá optimizar los recursos técnicos y económicos disponibles para combatir la contaminación por el nitrato de origen difuso y mejorar la eficacia de los Programas de Acción en las ZVN. La relativa sencillez del procedimiento LU-IV puede resultar particularmente interesante para territorios y comunidades con disponibilidad limitada de datos medioambientales.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado mediante los proyectos AGL2011-29861/AGR y CGL2016-81110-R (AEI/EU). La Confederación Hidrográfica del Ebro aportó gran parte de los datos hidroquímicos y de profundidades del nivel freático. El Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente proporcionó la versión digital del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de España 2000-2009. Agradecemos, tanto a los Editores como a los revisores, sus recomendaciones y correcciones que, sin duda, han contribuido a mejorar en gran medida la presentación final del manuscrito.

#### BIBLIOGRAFÍA

- ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H., & PETTY, R.J. 1987. *DRASTIC. A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. 622 págs. U.S. EPA Report 600/2-87-035. Ada.
- ARAUZO, M. 2017. Vulnerability of groundwater resources to nitrate pollution: a simple and effective procedure for delimiting Nitrate Vulnerable Zones. *Science of the Total Environment*, **575**: 799-812.
- ARAUZO, M. & VALLADOLID, M. 2013. Drainage and N-leaching in alluvial soils under agricultural land uses: Implications for the implementation of the EU Nitrates Directive. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **179**: 94-107.
- ARAUZO, M., VALLADOLID, M. & MARTÍNEZ-BASTIDA, J.J. 2011. Spatio-temporal dynamics of nitrogen in river-alluvial aquifer systems affected by diffuse pollution from agricultural sources: Implications for the implementation of the Nitrate Directive. *Journal of Hydrology*, **411**: 155-168.
- BOTEY, R., GUIJARRO, J.A. & JIMÉNEZ, A. 2013. *Valores normales de precipitación mensual 1981-2010*. 55 págs. Dirección de Producción e Infraestructuras, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.
- CHE 2015. *Estado y calidad de las aguas. Aguas subterráneas. Calidad. Consulta de datos analíticos. Panel de búsqueda* [en línea]. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza. <http://www.datossubterraneeas.chebro.es:81/WCAS/> [Consulta: 29-04-2015]
- COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITIES 1991. *Directive 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources*. 12 December 1991. Official Journal of the European Union L 375, 31/12/1991. Brussels.
- EUROPEAN COMMISSION 2013. *Report from the Commission to the Council and the European parliament on implementation of Council Directive 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources based on Member State reports for the period 2008-2011*. 13 págs. Commission Staff Working Document. Brussels.
- EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL 2000. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000*. Official Journal of the European Union L 327, 22/12/2000. Brussels.
- EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL 2006. *Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006, on the protection of groundwater against pollution and deterioration*. Official Journal of the European Union L 372/19, 27/12/2006. Brussels.
- FOREST EUROPE 2015. *State of Europe's forests 2015*. 312 págs. Ministerial Conference on Protection of Forests in Europe, Forest Europe. Madrid.
- FOSTER, S. & HIRATA, R. 1991. *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes*. 81 págs. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Lima.
- IGME 2015. *Mapa Geológico de España, escala 1:50.000, formato digital* [en línea]. Series MAGNA, Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. <http://iber.chebro.es/geoportale/> [Consulta: 02-02-2015].
- LERNER, D. 2000. *Guidelines for estimating urban loads of nitrogen to groundwater*. 21 págs. Defra Project Report, NT1845. Sheffield.

- MAGRAMA 2005. *Caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias. Tomo V*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.
- MAPAMA 2013. *Balance del nitrógeno en la agricultura española (año 2011)*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría General Agricultura y Alimentación, Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios. Madrid.
- 2015a. *Balance del nitrógeno en la agricultura española (año 2013)*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría General Agricultura y Alimentación, Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios. Madrid.
- 2015b. *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Informe sobre regadíos en España*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría General Técnica, Subdirección General de Estadística. Madrid.
- 2016. *Balance del nitrógeno en la agricultura española (año 2014)*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría General Agricultura y Alimentación, Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios. Madrid.
- MARM 2009. *Mapa de cultivos y aprovechamientos de España 2000-2009*, escala 1:50.000, formato digital. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Madrid.
- SECUNDA, S., COLLIN, M.L. & MELLOUL, A.J. 1998. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management*, **54**: 39-57.
- SUTTON, M.A., HOWARD, C.M., ERISMAN, J.W., BILLEN, G., BLEEKER, A., GRENNFELT, P., VAN GRISVEN, H. & GRIZZETTI, B. 2011. *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*. 664 págs. Cambridge University Press. Cambridge.