Estudios Geológicos
enero-junio 2024, 80(1), 1071
ISSN-L: 0367-0449
https://doi.org/10.3989/egeol.45105.1071

Contaminación por nitrato en las aguas subterráneas de la Demarcación Hidrológica del Segura (España) y su particular incidencia en el área de captación del Mar Menor

Groundwater nitrate pollution in the Segura Hydrological District (Spain) and the way it affects the Mar Menor catchment area in particular

Mercedes Arauzo[1,*], María Valladolid[2], Delia M. Andries[3]

[1]Instituto de Ciencias Agrarias (ICA), CSIC, Serrano 115 dpdo. 28006 Madrid, España. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4113-8797
[2]Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN), CSIC, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid, España. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7405-1105
[3]Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, José Antonio Nováis 12, 28040 Madrid, España. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1833-9374
*Autora para la correspondencia: mercedes.arauzo@csic.es

RESUMEN

La investigación se centra en analizar el impacto de la contaminación por nitrato en las masas de aguas subterráneas de la Demarcación Hidrológica del Segura bajo un enfoque fuente-vía-receptor y su particular incidencia en el área de captación de la laguna litoral del Mar Menor, con los siguientes objetivos específicos: (1) valorar la eficacia de las zonas vulnerables a la contaminación por nitrato (ZVNs) mediante el análisis estadístico de los niveles de contaminación en sus masas de agua subterránea durante el periodo 2010-2021; (2) analizar la distribución actual del nitrato en las masas de agua subterránea para identificar las zonas contaminadas y en riesgo; (3) delimitar y caracterizar las áreas de captación de las zonas afectadas por la contaminación; y (4) explorar el papel del medio físico y de los usos del suelo en la distribución de las zonas contaminadas por nitrato mediante el análisis de componentes principales (ACP) de sus áreas de captación. Dado el grave estado de degradación ambiental del Mar Menor, se analiza con especial atención la incidencia de la contaminación por nitrato en las aguas subterráneas (receptoras primarias) que drenan a la laguna (receptora secundaria) y se identifican los territorios que conforman su área de captación. No se han observado diferencias interanuales estadísticamente significativas en los niveles de nitrato de las masas de agua subterránea afectadas por contaminación de nitrato durante el periodo 2010-2021, lo que sugiere que las ZVNs designadas en la Demarcación del Segura no parecen estar cumpliendo, por el momento, con las expectativas de reducir la contaminación. Utilizando el área de captación de las zonas contaminadas como unidad de análisis, el ACP evidenció la relación directa entre la extensión de las superficies contaminadas y la agricultura intensiva de cultivos de herbáceos en regadío, cítricos y frutales (grupos de cultivos que presentan los mayores excedentes anuales de N de la Demarcación). En contraposición, las áreas de montaña, con abundancia de bosques y escasa presencia agrícola, constituyen un claro elemento protector para los recursos hídricos frente a los procesos de contaminación por el nitrato procedente de fuentes difusas. La situación de emergencia ecológica del Mar Menor es consecuencia de su grave estado de eutrofización, al que contribuye el sobreexceso de N procedente de descargas subterráneas ricas en nitrato desde el acuífero Cuaternario de la masa de agua Campo de Cartagena. A la vista de los resultados y como paso previo al reforzamiento de los programas de acción de las ZVNs de la Demarcación del Segura, se propone analizar la idoneidad de las 89 ZVNs designadas en la Demarcación mediante validaciones frente a un mapa de vulnerabilidad específica a la contaminación por nitrato y revisarlas si procede.

Palabras clave: Contaminación difusa; zonas vulnerables a la contaminación por nitrato; análisis espacial; SIG; Mar Menor.

Recibido el 28 de junio de 2023; Aceptado el 21 de noviembre de 2023; Publicado online el 2 de octubre de 2024

Citation / Cómo citar este artículo: Arauzo, M. et al. (2024). Contaminación por nitrato en las aguas subterráneas de la Demarcación Hidrológica del Segura (España) y su particular incidencia en el área de captación del Mar Menor. Estudios Geológicos, 80(1), 1071. https://doi.org/10.3989/egeol.45105.1071

Copyright: ©2024 CSIC. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) License.

ABSTRACT

The research focuses on analysing the impact of nitrate pollution on the groundwater bodies of the Segura Hydrological District under a source-pathway-receptor approach and its particular incidence in the catchment area of the coastal lagoon of Mar Menor, with the following specific objectives: (1) to assess the effectiveness of Nitrate Vulnerable Zones (NVZs) by statistically analysing pollution levels in their groundwater bodies during the period 2010-2021; (2) to analyse the current distribution of nitrate in the groundwater bodies to identify contaminated and at-risk areas; (3) to delineate and characterising the catchment areas of the affected zones; and (4) to explore the role of the physical environment and land use in the distribution of nitrate-contaminated areas through principal component analysis (PCA) of their catchment areas. Given the severe environmental degradation of Mar Menor, special attention is given to the incidence of nitrate pollution in the groundwater (primary receptor) draining into the lagoon (secondary receptor), and the territories comprising its catchment area are identified. No statistically significant interannual differences have been observed in the nitrate levels of groundwater bodies affected by nitrate pollution during the period 2010-2021, suggesting that the designated NVZs in the Segura Hydrological District do not appear to meet the expectations of reducing pollution for the moment. Using the catchment area of contaminated zones as the unit of analysis, PCA revealed a direct relationship between the extent of contaminated areas and intensive agriculture of irrigated herbaceous crops and citrus and fruit trees (crop groups with the highest annual N surpluses in the District). In contrast, mountainous areas with abundant forests and limited agricultural presence act as clear protective elements for water resources against nitrate pollution from diffuse sources. The ecological emergency of Mar Menor is a consequence of its severe state of eutrophication, to which the excess N from groundwater discharges rich in nitrate from the Quaternary aquifer of the Campo de Cartagena water mass contributes. Based on the results and as a preliminary step before strengthening the action programs of NVZs in the Segura Hydrological District, we propose to analyse the suitability of the 89 designated NVZs in the District through validations against a map of specific vulnerability to nitrate pollution and to revise them if necessary.

Keywords: Diffuse pollution; nitrate vulnerable zone; spatial analysis; GIS; Mar Menor.

Introducción

La Directiva de Nitratos de la Unión Europea (91/676/EEC; Council of the European Communities, 1991) establece que las masas de agua deben considerarse contaminadas por nitrato cuando su concentración excede los 50 mg L^{-1}. Asimismo, requiere de los Estados miembros que actúen sobre las zonas cuya escorrentía y/o filtración sean susceptibles de generar contaminación por nitrato en las masas de agua, estando obligados a designarlas bajo la figura de protección de zona vulnerable a la contaminación por nitrato (ZVN). En las ZVNs designadas, es preceptivo implementar programas de acción orientados a la recuperación de la calidad del agua y a la prevención de la contaminación. Aun así, diferentes investigaciones relacionan designaciones excesivamente limitadas o incompletas, con resultados poco satisfactorios en las políticas para el control de la contaminación (Arauzo, 2017; Arauzo & Martínez-Bastida, 2015; Orellana-Macías et al., 2020; Richard et al., 2018; Worrall et al., 2009). En la Unión Europea se han observado resultados heterogéneos atribuibles a los diferentes criterios de designación de ZVNs aplicados en los distintos territorios (European Commission, 2013) por lo que interesaría establecer un marco metodológico común para las designaciones (Arauzo, 2017).

Arauzo et al. (2019, 2020, 2022) y Machiwal et al. (2018) sugieren minimizar la incertidumbre en la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por el nitrato procedente de fuentes difusas mediante el desarrollo de metodologías robustas que permitan analizar la vulnerabilidad bajo un enfoque fuente-vía-receptor. El origen difuso del nitrato (generado en amplias superficies cuyo control y detección son complicados) y su alta movilidad, requieren de la delimitación del área potencial de captación del contaminante para poder identificar el territorio-fuente y las posibles vías de transporte hasta el acuífero. El enfoque fuente-vía-receptor implica que, además de la infiltración vertical del nitrato a través el suelo, el soluto pueden ser transportado largas distancias a través de la zona no saturada (vía escorrentía superficial y/o subsuperficial) y de la zona saturada (por advección, dispersión y difusión), habiéndose observado que tiende a acumularse en aquellas zonas de los acuíferos receptores donde el flujo es muy escaso o prácticamente nulo (Arauzo et al., 2022). En este sentido, Arauzo & Martínez-Bastida (2015) inciden sobre la necesidad de diferenciar con claridad los conceptos de "ZVN" (superficie topográfica desde la que se genera la escorrentía y/o la lixiviación de compuestos nitrogenados susceptibles de contaminar la masa subterránea, que constituye su área de

captación) y "zona contaminada" (sector de la masa de agua donde la concentración de nitrato excede el límite establecido). Desafortunadamente, ambos conceptos han sido utilizados de forma indistinta en parte de la literatura científica y técnica (al no considerarse el transporte horizontal), lo que en ocasiones se ha traducido en designaciones excesivamente limitadas y por tanto ineficaces.

En esta investigación se analiza la contaminación por nitrato en las masas de aguas subterráneas de la Demarcación Hidrológica del Segura (S.E. de España) mediante un enfoque fuente-vía-receptor y su particular incidencia en el área de captación de la laguna litoral del Mar Menor (Fig. 1). El Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura 2022-2027 (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022a) informa de que la contaminación difusa debida a los excedentes de la fertilización agrícola es uno de los principales problemas para conseguir alcanzar el objetivo de buen estado en las masas de agua subterránea en la Demarcación, con presiones significativas por contaminación de nitrato en el 35% de las mismas (Tabla 1). Actualmente, el 33,6% de la superficie de la Demarcación del Segura se encuentra bajo la figura de protección de 89 ZVNs que han sido designadas a lo largo del periodo de 1998-2020 (Fig. 1; Confederación Hidrográfica del Segura 2022a; Asamblea Región de Murcia, 2019b).

Para la consecución del objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos: (1) valorar la eficacia de las ZVNs designadas en la Demarcación del Segura mediante el análisis estadístico de los niveles de contaminación por nitrato en las masas de agua subterránea durante el periodo 2010-2021; (2) analizar la distribución actual del nitrato en las masas de agua subterránea para identificar las zonas contaminadas (≥ 50 mg L^{-1} de nitrato) y en riesgo (25-49 mg L^{-1}; European Commission, 2000); (3) delimitar y caracterizar las áreas de captación de las zonas afectadas por la contaminación (análisis de la red de drenaje superficial, las cuenca hidrográficas y la dirección de los flujos superficial y subterráneo); y (4) explorar el papel del medio

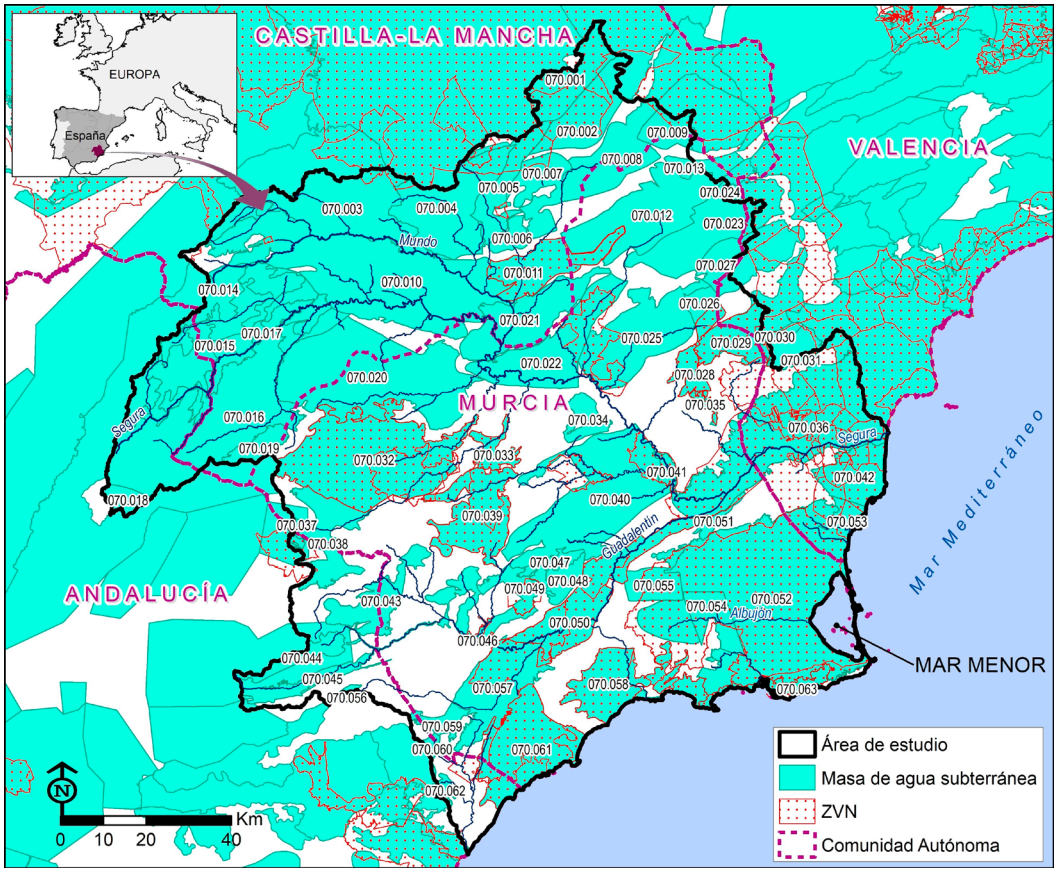


Figura. 1.— Área de estudio (territorio continental de la Demarcación Hidrológica del Segura; S.E. de España); se muestran las masas de agua subterránea etiquetadas con los códigos DHS (Tabla 1) y las ZVNs designadas por las Comunidades Autónomas de Murcia, Valencia, Castilla-La Mancha y Andalucía.

físico y de los usos del suelo en la distribución de las zonas contaminadas por nitrato mediante el análisis multivariante de sus áreas de captación. Dado el actual estado de degradación ambiental del Mar Menor (García et al., 2018; MITECO, 2021; Tudela, 2021), se analizará con especial atención la incidencia de la contaminación en las masas de agua subterránea (receptoras primarias del nitrato) que drenan a la laguna litoral (receptora secundaria) y se identificarán los territorios que constituyen su área potencial de captación.

Área de estudio

El área de estudio comprende el territorio continental de la Demarcación Hidrológica del Segura que, con una superficie de 19.025 km^2 (Fig. 1), presenta una gran variedad orográfica, con montañas por encima de los 2.000 m en las zonas de cabecera y extensas llanuras en las zonas de costa (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022a). El clima es mediterráneo semiárido, si bien, cada vez con mayor frecuencia, se dan episodios extremos de precipitación asociados a depresiones aisladas en niveles altos (DANAs) como consecuencia del calentamiento del mar Mediterráneo por el cambio climático (MedECC, 2020).

Hidrogeológicamente, en la Demarcación del Segura existen numerosos acuíferos de mediana y pequeña extensión con estructuras geológicas frecuentemente complejas. La red principal de drenaje está formada por el río Segura y sus afluentes. El resto corresponde a ramblas que drenan al mar Mediterráneo y al Mar Menor, con una respuesta hidrológica muy irregular. En el ámbito territorial de la Demarcación se han identificado 63 masas de agua subterránea (Tabla 1; Fig. 1) integradas aproximadamente por 244 acuíferos. Algunas masas presentan un único acuífero, mientras que otras están constituidas por varios (con frecuencia sistemas multicapa). La investigación se centra en los acuíferos más superficiales de las masas de agua, por ser los más vulnerables a la contaminación por nitrato desde la superficie topográfica. De las 63 masas de agua subterránea, actualmente 22 presentan contaminación por nitrato y 37 sobreexplotación (Tabla 1). Información más detallada sobre su geología y características puede consultarse en Confederación Hidrográfica del Segura (2022a, b).

Administrativamente, el territorio depende de las Comunidades Autónomas de la Región de Murcia (58,8% de la superficie), Castilla-La Mancha (25,0%), Andalucía (9,4%) y Comunitat Valenciana (6,8%), que ostentan las competencias para designar ZVNs y para elaborar los programas de acción a implementar en las mismas (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022a). Las ZVNs oficialmente designadas en la Demarcación del Segura comprenden un territorio de 6.396 km^2 (Fig. 1; Confederación Hidrográfica del Segura 2022a; Asamblea Región de Murcia, 2019b). La mayoría de las designaciones corresponden a la Región de Murcia, seguida de la Comunitat Valenciana, Castilla-La Mancha y Andalucía (Fig. 1). El 56% de la superficie fue designada con posterioridad a 2010, principalmente en 2018 y 2019, mientras que las designaciones anteriores se realizaron mayoritariamente en 2001, 2004 y 2009.

El Mar Menor es una laguna litoral situada al S.E. de la Demarcación del Segura. Presenta una superficie de 135 km^2 y está separada del mar Mediterráneo por un cordón de tierra de 22 km. Constituye un ecosistema de agua salada único en la cuenca mediterránea, si bien la laguna se encuentra afectada por un severo estado de eutrofización que ha desembocado en una grave crisis ecológica (Tragsatec, 2019). Son varios los excesos, prolongados en el tiempo, que han degradado el ecosistema y la calidad de sus aguas, hasta alcanzar un alto grado de eutrofización. Desde comienzos de los años sesenta el urbanismo descontrolado y los vertidos de aguas residuales urbanas sin depurar, o escasamente depuradas, han generado entradas masivas de N y P a la laguna. Desde hace décadas, también se viene produciendo una entrada incontrolada de nitrato, asociada a la descarga de aguas subterráneas que reciben retornos de riego procedentes de la agricultura intensiva (Asamblea Regional de Murcia, 2020), que contribuye al colapso periódico de la laguna. Aun contando con el trasvase Tajo-Segura, activo desde 1979, la intensa demanda de agua para los regadíos ha venido provocando la extracción de agua subterránea de mala calidad de pozos (muchos de ellos ilegales). Este agua se trata en casi un millar de pequeñas plantas desalobradoras, casi todas también ilegales, terminando gran parte del concentrado de nitrato en la rambla del Albujón, que es la principal entrada de agua superficial al Mar Menor (García et al., 2018; Tudela, 2021). La paradoja del Mar Menor es que es un paraje natural que cuenta con normativas de protección específicas [Decreto 259/2019, de declaración de Zonas Especiales de Conservación y de aprobación del Plan de

Tabla 1.— Caracterización de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrológica del Segura (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022a, b, c).

Masa de agua	Código DHS	Área (km^2)	Nº de acuíferos	Tipo	Grado de confinamiento	Permeabilidad / porosidad	Espesor (m)	Recursos tot. (hm^3 $año^{-1}$)	Riesgos asociados
Corral Rubio[a]	070.001[a]	188	2	Detrítico; carbonatado	Libre; semiconfinado	Muy alta (intergr.); media (fisurado)	5-27; 150	3,9	Nitrato; Sobreexplotación
Sinclinal de la Higuera	070.002	209	1	Carbonatado	Confinado	Media	200-300	2,8	Nitrato; Sobreexplotación
Alcadozo	070.003	455	4	Carbonatado			187	9,0	
Boquerón	070.004	357	3	Carbonatado	Libre; semiconfinado	Media (fisurado)	300	7,8	Nitrato; Sobreexplotación
Tobarra-Tedera-Pinilla	070.005	145	2	Detrítico; carbonatado		Muy alta (fisurado)	17; 300-350	5,8	Nitrato; Sobreexplotación
Pino	070.006	48	1	Carbonatado			300	1,0	Sobreexplotación
Conejeros-Albatana	070.007	157	1	Carbonatado	Libre; semiconfinado	Muy alta (fisurado)	250-300	2,7	Nitrato; Sobreexplotación
Ontur	070.008	248	2	Detrítico; carbonatado		Muy alta (intergr.); media (fisurado)	120; 40-140	3,5	Sobreexplotación
Sierra de la Oliva	070.009	88	2	Carbonatado	Libre	Media (fisurado y karstificado)	640; 100-150	1,2	Sobreexplotación
Pliegues Jurásic. del Mundo	070.010	965	23	Detrítico; carbonatado				75,7	
Cuchillos-Cabras	070.011	207	5	Detrítico; carbonatado	Libre; semiconfinado	Muy alta (intergr.); media (fisurado y karstificado)	120; 400-760	5,7	Nitrato; Sobreexplotación
Cingla	070.012	378	2	Carbonatado	Libre; semiconfinado	Alta (karstificado)	260-350; 260-800	8,7	Sobreexplotación
Moratilla	070.013	27	1	Carbonatado			200	0,5	Sobreexplotación
Calar del Mundo	070.014	99	1	Carbonatado	Semiconfinado	Muy alta (karstificado)	700	12,7	
Segura-Madera-Tus	070.015	295	26	Carbonatado			300	37,4	
Fuente Segura-Fuensanta	070.016	804	17	Carbonatado				107,4	
Acuíf. Inferiores de S. de Segura	070.017	1586	1	Carbonatado	Confinado (2º horizonte)			0,0	
Machada	070.018	49	3	Carbonatado				0,5	
Taibilla	007.019	68	1	Carbonatado	Colgado	Muy alta (karstificado)	200-350	9,5	
Anticlinal de Socovos	070.020	751	1	Carbonatado; detrítico			300-700	50,0	
El Molar	070.021	289	4	Carbonatado	Semiconfinado	Media; muy alta	25; 200-250	3,1	Sobreexplotación
Sinclinal de Calasparra	070.022	334	>1	Carbonatado	Semiconfinado		150-200; 460-600	5,1	
Jumilla-Villena Segura	070.023	259	>1	Carbonatado; detrítico	Libre	Media (fisurado y karstificado)	550	15,3	Sobreexplotación
Lácera	070.024	8	1	Carbonatado	Semiconfinado	Media	280	1,7	Sobreexplotación
Ascoy-Sopalmo	070.025	380	>1	Carbonatado	Libre	Media (fisurado)	120; 350	1,6	Sobreexplotación
El Cantal-Viña Pe	070.026	40	2	Carbonatado	Semiconfinado	Baja	350	0,1	Sobreexplotación
Serral-Salinas Segura	070.027	97	2	Carbonatado	Libre	Media (fisurado y karstificado)	85; 500	3,2	Sobreexplotación
Baños de Fortuna	070.028	85	4	Carbonatado	Semiconfinado		250-300	2,0	Nitrato; Intrusión salina

Masa de agua	Código DHS	Área (km^2)	Nº de acuíferos	Tipo	Grado de confinamiento	Permeabilidad / porosidad	Espesor (m)	Recursos tot. (hm^3 $año^{-1}$)	Riesgos asociados
Quíbas Segura	070.029	138	>1	Carbonatado			200-250	2,7	Sobreexplotación
Sierra del Argallet	070.030	8	1	Carbonatado			350-450	0,2	Sobreexplotación
Sierra Crevillente Segura	070.031	24	4	Carbonatado; detrítico	Semiconfinado	Media (fisurado y karstificado)	200-500	1,5	Sobreexplotación
Caravaca	070.032	676	9	Carbonatado; detrítico	Libre; semiconfinado	Alta (fisurado y karstificado)	50-650	41,6	Nitrato[c]
Bajo Quípar	070.033	61	5	Carbonatado; detrítico		Muy alta; media	30-50; 150-300	3,5	Nitrato; Pesticidas
Oro-Ricote	070.034	66	2	Carbonatado	Libre	Alta (fisurado)	125-250	1,3	
Cuaternario de Fortuna	070.035	15	1	Detrítico	Libre	Alta (intergranular)	50	0,4	Nitrato; Sobreexplotación
Vega Media y Baja del Segura	070.036	752	2	Detrítico	Libre	Alta (intergranular)	0-30; 50-200	30,4	Nitrato
Sierra de la Zarza[a]	070.037[a]	17	2	Carbonatado	Libre; semiconfinado	Alta (fisurado y karstificado)	0-150; 350-500	0,2	Nitrato
Alto Quípar	070.038	181	9	Carbonatado; Detrítico			80-100; 250	3,3	
Bullas	070.039	279	8	Carbonatado	Semiconfinado	(fisurado)	200-300	10,6	Nitrato; Sobreexplotación
Sierra Espuña	070.040	629	3	Carbonatado; detrítico	Libre; semiconfinado	Muy alta; media	100-300	12,7	Sobreexplotación
Vega Alta del Segura	070.041	27	1	Detrítico	Libre	Alta (intergranular)	70-200	8,9	Nitrato
Terciario de Torrevieja	070.042	169	>1	Carbonatado; detrítico			46	1,2	Nitrato; Sobreexplotación
Valdeinfierno	070.043	168	3	Carbonatado		Alta (fisurado y karstificado)	700	4,7	
Vélez Blanco-María	070.044	72	2	Carbonatado		(fisurado)	500-700	5,3	
Detrític. Chiriviel-Maláguide	070.045	94	2	Detrítico; carbonatado		Muy alta (intergr.); media (fisurado)	10-30; 300	3,1	Sobreexplotación
Puentes	070.046	121	6	Detrítico; carbonatado	Libre; semiconfinado		10-50; 200	2,0	
Triás. Maláguide de Sierra Espuña	070.047	50	1	Carbonatado			150-200	0,4	Sobreexplotación
Santa-Yéchar	070.048	59	2	Carbonatado			150	2,4	Sobreexplotación
Aledo	070.049	70	3	Carbonatado	Libre; semiconfinado	(fisurado)	40; 150	1,8	Sobreexplotación
Bajo Guadalentín	070.050	322	1	Detrítico	Semiconfinado	Media (intergranular)	100-300	11,0	Nitrato; Pestic.; Sobreexplotación
Cresta del Gallo	070.051	25	3	Carbonatado	Libre; semiconf.	Media (fisurado)	200	0,7	Sobreexplotación
Campo de Cartagena[b]	070.052	1239	4	Detrítico; carbonatado	Libre; semiconf.; confinado	Media	50-150; 6-110; 125	67,0	Nitrato; Sobreexplotación
Cabo Roig	070.053	61	1	Detrítico	Libre	Media (intergranular)	15-100	1,4	Nitrato; Sobreexplotación
Triásico de Los Victoria	070.054	110	1	Mármoles	Semiconfinado	Media (fisurado)	50-300	3,3	Sobreexplotación; Intrusión salina
Triásico de Carrascoy	070.055	108	1	Carbonatado	Libre	Media (fisurado e intergranular)	200-250	3,9	Sobreexplotación
Saliente	070.056	7	2	Carbonatado			300	0,2	Sobreexplotación

Masa de agua	Código DHS	Área (km^2)	Nº de acuíferos	Tipo	Grado de confinamiento	Permeabilidad / porosidad	Espesor (m)	Recursos tot. (hm^3 $año^{-1}$)	Riesgos asociados
Alto Guadalentín	070.057	275	1	Detrítico	Libre	Media (intergranular)	100-300	11,5	Nitrato; Sobreex.; Intrusión salina
Mazarrón	070.058	277	20	Carbonatado; detrítico	Semiconfinado	Media (fisurado)	50-100	3,5	Nitrato; Sobreex.; Intrusión salina
Enmedio-Cabezo de Jara	070.059	50	2	Detrítico; carbonatado	Libre; semiconf.; confinado	Alta (intergranular); media (fisurado)	200; 300	0,5	Sobreexplotación
Las Norias	070.060	18	1	Detrítico		Alta (intergranular)	150-300	0,2	Sobreexplotación
Águilas	070.061	378	19	Detrítico; carbonatado	Libre	Alta (intergranular)	50-200	7,2	Nitrato; Sobreex.; Intrusión salina
Sierra de Almagro	070.062	20	1	Carbonatado		Alta	50-200	1,1	
Sierra de Cartagena	070.063	66	>1	Carbonatado	Semiconfinado	Media (fisurado)	200	0,6	Nitrato

[a] Masa técnicamente no perteneciente a la cuenca del Segura (véase Fig. 6B).
[b] Acuífero multicapa; el cuaternario descarga lateralmente hacia el Mar Menor.
[c] Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura (2022d).

gestión integral de los espacios protegidos del Mar Menor y la franja litoral mediterránea de la Región de Murcia (Asamblea Regional de Murcia, 2019a); Ley 3/2020, de recuperación y protección del Mar Menor (Asamblea Regional de Murcia, 2020); Plan para la Protección del Borde Litoral del Mar Menor (MITECO, 2021)], que amplían otras previas o de carácter general (Directiva Marco del Agua; Directiva de Nitratos) y que se complementan con medidas y actuaciones derivadas de los sucesivos planes hidrológicos de cuenca (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022a).

Metodología

Datos de partida

Para analizar los niveles de nitrato en las 63 masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrológica del Segura durante el periodo 2010-2021 se utilizaron conjuntos de datos sobre la concentración de nitrato en 387 estaciones de muestreo (pozos, sondeos y manantiales) correspondientes a acuíferos superficiales, obtenidos de las Redes de Control de Calidad en Agua Subterráneas de la Confederación Hidrográfica del Segura (2022d) y completados con algunos puntos de la Red de Control de Aguas Afectadas por Nitratos del MITECO (2022a). Los acuíferos confinados en horizontes inferiores (Acuíferos Inferiores de Sierra de Segura; Tabla 1) y los acuíferos inferiores de sistemas multicapa no fueron incluidos en el estudio, al encontrarse menos expuestos que los más superficiales a los procesos de lixiviación de solutos desde la zona no saturada (además de no disponerse de información suficiente sobre los mismos).

Los datos de profundidad del nivel freático en los acuíferos afectados por contaminación de nitrato correspondientes al periodo 2010-2021 se obtuvieron de la Red de Control Piezométrico de la Confederación Hidrográfica del Segura (2022e) sobre un total de 211 puntos de control.

Las capas vectoriales de las masas de agua subterránea, la red hidrográfica y los límites de la Demarcación del Segura se obtuvieron del servicio de descarga de mapas de la Confederación Hidrográfica del Segura (2020). La capa de las ZVNs se descargó desde la Infraestructura de Datos Espaciales del MITECO (2022b) y fue actualizada con las ZVNs declaradas en la Orden 8097 de 23 de diciembre de 2019 (Asamblea Región de Murcia, 2019b). El modelo digital del terreno (MDT) de 25 m de resolución se obtuvo del centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (España; IGN, 2020).

La caracterización de las áreas de captación de las zonas afectadas por contaminación de nitrato (y de otras cuencas libres de contaminación) se elaboró a partir de información de diferentes fuentes, en formato numérico o vectorial, sobre variables hidrológicas, topográficas, climáticas, de calidad del agua y de usos del suelo. Los datos de precipitación anual (valores promedio para el periodo 2010-2019) se obtuvieron de las estaciones agroclimáticas de Mur-

cia (SIAM, 2022), Albacete (SIAR, 2022a), Alicante (RiegosIVIA, 2022) y Almería (SIAR, 2022b), de Datosclima (2022) y de la Confederación Hidrográfica del Segura (2022a). A partir de ellos se generó una capa de puntos de la precipitación anual. Los excedentes medios anuales de N correspondientes a la Región de Murcia se extrajeron de los balances anuales de N en la agricultura española por grupos de cultivo y CCAA, para el periodo 2013-2019 (MAPAMA, 2015, 2016, 2017, 2018, 2021) y se utilizaron para elaborar el mapa de excedentes de N. Las superficies de cultivos herbáceos en regadío, cultivos herbáceos en secano, cítricos y frutales, y bosques y áreas naturales, se extrajeron del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de España 2000-2010 (MARM, 2009; formato vectorial); la vigencia de los datos de superficies regables y cultivos leñosos fue verificada a partir del Censo Agrario 2020 (INE, 2022a, b). El Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de España 2000-2010 se utilizó para elaborar el mapa de usos del suelo.

Cartografía temática digital

La confección de la cartografía temática se realizó mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS 10.3 for Desktop (ESRI, Redlands, CA, EE. UU.; ESRI, 2015), utilizando el sistema de referencia ETRS89 en proyección UTM Zona 30N.

El análisis espacial de la distribución del nitrato se hizo acuífero por acuífero, utilizando el método de interpolación de Distancia Inversa Ponderada (IDW) de las herramientas de Análisis Espacial de ArcGIS. Las capas vectoriales de puntos para las interpolaciones se elaboraron a partir de las concentraciones medias anuales de nitrato para el año 2021 (últimos datos disponibles). Se usaron un total de 387 puntos de muestreo (fuentes: Confederación Hidrográfica del Segura, 2022d; MITECO 2022a).

La red de drenaje superficial de la Demarcación del Segura, las cuencas hidrográficas que drenan al mar Mediterráneo y a la laguna litoral del Mar Menor (incluyendo las ramblas litorales menores) y las direcciones del flujo superficial (escorrentía) se generaron a partir del MDT de 25 m, utilizando las herramientas de Hidrología del módulo de Análisis Espacial y las herramientas Gestión de Datos y Conversión de ArcGIS. Para la extracción de las cuencas hidrográficas se utilizó como punto de descarga el punto de elevación más bajo de cada una de las mismas. El punto de descarga de cada cuenca se estableció a partir de la red de drenaje superficial y corresponde a la celda de mayor acumulación de flujo.

El mapa de la elevación del nivel freático (sobre el nivel del mar) se generó mediante interpolaciones IDW sobre cada una de las capas de puntos de la elevación del nivel freático de los acuíferos afectados por la contaminación. Las capas de puntos de la elevación del nivel freático se obtuvieron sustrayendo, en cada punto, la profundidad media del nivel freático para el periodo 2010-2021, de la elevación del terreno (extraída del MDT de 25 m) en un total de 155 puntos de control (fuente: Confederación Hidrográfica del Segura, 2022e). Se optó por la utilización de los valores medios de la profundidad del nivel freático durante un periodo largo (12 años) a fin de aportar mayor robustez a los datos (al quedar atenuados los efectos de la variabilidad estacional y de otros factores como extracciones, sequías, etc.), ya que el mapa iba a ser utilizado posteriormente para el trazado de las direcciones del flujo subterráneo. Sólo se realizaron las interpolaciones en las 22 masas de agua afectadas por contaminación de nitrato (Tabla 1), debido a la escasa disponibilidad de datos en algunas zonas y a la complejidad de los acuíferos, como para poder interpretar las direcciones del flujo subterráneo (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022b). A partir del mapa de elevación del nivel freático se generó la capa de direcciones del flujo subterráneo utilizando las herramientas de Hidrología, Gestión de Datos y Conversión de ArcGIS.

A partir del mapa digital de la distribución del nitrato en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrológica del Segura durante 2021, se identificaron y caracterizaron todas las zonas afectadas por la contaminación. Para establecer el área de captación de cada una de las zonas afectadas, se determinaron los conjuntos de cuencas hidrológicas que constituyen la superficie territorial desde las que podrían generarse aportaciones de agua (pluvial, fluvial, retornos de riego, etc.) hasta las zonas contaminadas, teniendo en cuenta los posibles aportes por infiltración a través de la zona no saturada (infiltración vertical sobre el acuífero y/o infiltración procedente de escorrentías en áreas de pendiente) y los procesos advectivos en la zona saturada, de acuerdo al enfoque fuente-vía-receptor. Par ello analizamos las direcciones de los flujos superficial y subterráneo y la información disponible sobre flujos subterráneos laterales entre acuíferos colindantes (Con-

federación Hidrográfica del Segura, 2022b). Así se generó la capa vectorial de polígonos que representa las áreas de captación de las zonas afectadas por contaminación de nitrato.

El mapa de la pendiente topográfica se elaboró a partir del MDT de 25 m, mediante la herramienta *Surface/Slope* del módulo de Análisis Espacial de ArcGIS.

El mapa de precipitación anual se generó a partir de la capa vectorial de puntos de precipitación anual, utilizando el método de interpolación IDW. Par ello se usaron los valores promedio de precipitación anual, en cada punto, correspondientes al periodo 2010-2019.

El mapa de usos del suelo se generó a partir del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de España 2000-2010, extrayendo las superficies de cultivos herbáceos en regadío y en secano, de cítricos y frutales, de bosques y áreas naturales, etc. La selección de los grupos de cultivos se realizó atendiendo a su potencial contaminante, de acuerdo a la información disponible de excedentes anuales de N para cada grupo.

El mapa de los excedentes anuales de N, que ofrece una estimación de los excedentes medios anuales de N por unidad de superficie para los distintos grupos de cultivos (obtenidos de los balances anuales de N para el periodo 2013-2019), se generó mediante la asignación de los excedentes medios anuales de N a cada grupo de cultivo representado por su correspondiente polígono en el mapa de usos del suelo.

Los valores de las variables ambientales que caracterizan las áreas de captación de las zonas contaminadas por nitrato (y de otras cuencas libres de contaminación) incluidas en el análisis de componentes principales (p. ej. extensión contaminada por nitrato, superficies de los diferentes grupos de cultivo, excedente de N por unidad de superficie, superficie designada ZVN, etc.) se extrajeron de los correspondientes mapas temáticos mediante la herramienta *Extract/Clip* del módulo de Análisis Espacial de ArcGIS y posterior selección por atributos. Para las extracciones se usaron las capas vectoriales de las distintas áreas de captación analizadas.

Análisis estadísticos

Mediante la aplicación de análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA MR; modelo lineal general para medidas repetidas), se ha estudiado el efecto del factor tiempo sobre la concentración de nitrato en las masas de agua subterránea afectadas por contaminación de nitrato en la Demarcación del Segura durante el periodo 2010-2021. Para ello se utilizó el software de IBM SPSS Statistics 27.0 (IBM Corp., 2020). Se realizaron un total de 17 ANOVAs MR, correspondientes a 17 masas de agua, a fin de detectar posibles cambios significativos en los valores medios anuales de nitrato a lo largo del tiempo. No se pudieron analizar la totalidad de las 22 masas afectadas por la contaminación (Tabla 1) al no contarse con datos suficientes para el estudio estadístico en cinco de ellas. En los ANOVAs MR se incluyeron únicamente los puntos de muestreo con valores medios anuales de nitrato ≥ 50 mg L^{-1} durante al menos una anualidad del período 2010-2021. El factor intra-sujetos (tiempo) presenta un número distinto de niveles (años) en cada análisis, tantos como anualidades con datos disponibles dentro del periodo analizado en cada masa de agua. Previamente, se comprobó la hipótesis de esfericidad (prueba de Mauchly) y se seleccionó el modelo de esfericidad asumida para los ANOVAs MR. En el caso de existir valores de F significativos ($p<0,05$) la separación de medias se realizó mediante la prueba post-hoc de Bonferroni.

Se usó el análisis de componentes principales (ACP) para explorar el papel del medio físico y de los usos del suelo sobre la incidencia de la contaminación por el nitrato procedente de fuentes difusas en el área de estudio, analizando posibles relaciones entre variables ambientales que caracterizan las áreas de captación de las zonas contaminadas por nitrato y de zonas libres de contaminación. Utilizando como unidad de análisis el área de captación, se examinaron las siguientes variables que potencialmente podrían relacionarse con los procesos de contaminación por nitrato de fuentes difusas a escala de cuenca (Arauzo et al., 2022): la superficie del área de captación, su altitud media, el porcentaje de cobertura de aguas subterráneas, la profundidad media del nivel freático, los porcentajes de cobertura de las áreas contaminadas por nitrato y en riesgo, los porcentajes de cobertura de áreas con pendiente topográfica ≥10% y con precipitación ≥600 mm $año^{-1}$, los porcentajes de cobertura de cultivos herbáceos en regadío, herbáceos en secano, cítricos y frutales, y bosques y áreas naturales, y los valores de excedentes de N por unidad de superficie. Esta variables se extrajeron para las áreas de capta-

ción de todas las zonas identificadas como contaminadas por nitrato y para las áreas de captación dos zonas libres de contaminación, correspondientes a las cuencas altas de los ríos Mundo y Segura (incluidas en el ACP por su valor como elemento de contraste respecto a las áreas de captación de zonas contaminadas). El ACP es un método de análisis multivariante que permite reducir la dimensionalidad de manera que el conjunto de datos analizados sea más fácil de visualizar e interpretar, explorando vínculos entre las variables. Cada componente principal resultante representa una combinación lineal de las variables originales, explicando una parte de la varianza de la muestra original. Se usó el método de rotación Varimax con normalización de Kaiser. Previamente, se realizó la medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin y el test de esfericidad de Bartlett para comprobar la idoneidad de los datos.

Resultados y discusión

Contaminación por nitrato durante el periodo 2010-2021 y eficacia de las ZVNs

Los ANOVAs MR para examinar el efecto del factor tiempo sobre los niveles de concentración de nitrato en las masas de agua subterránea afectadas por contaminación de nitrato en la Demarcación del Segura durante el periodo 2010-2021 (Objetivo 1) no mostraron diferencias interanuales estadísticamente significativas (Tabla 2), salvo para el Campo de Cartagena (070.072), con valores superiores en 2020 respecto a 2018 y 2019. Los niveles más altos de contaminación por nitrato se observaron en Bajo Quípar (070.033) y Águilas (070.061), con concentraciones medias anuales por encima de 200 mg L^{-1}. Ambas masas de agua cuentan con ZVNs designadas desde 2019 (Tabla 2; Fig. 1). Asimismo, Cuaternario de Fortuna (070.035), Campo de Cartagena (070.052), Alto Guadalentín (070.057) y Mazarrón (070.058) mostraron valores de nitrato por encima de 100 mg L^{-1}. En estos casos las designaciones corresponden a 2019, 2001-2019, 2009 y 2019, respectivamente (Tabla 2; Fig. 1). El resto de las masas analizadas presentaron valores ente 50 y 100 mg L^{-1}, con designaciones de ZVNs desde 2001 a 2019.

A la vista de los resultados de los ANOVAs MR, las ZVNs (Fig. 1) no parecen estar cumpliendo, por el momento, con las expectativas de reducir la contaminación por nitrato de las aguas subterráneas, lo que en principio sugiere la necesidad de revisarlas y/o adoptar medidas adicionales y acciones reforzadas (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022a). La ausencia de mejoras significativas en las áreas contaminadas podría explicarse a partir de tres supuestos, no excluyentes entre sí: (1) que las ZVNs no estén correctamente delimitadas (incompletas, demasiado reducidas, erróneamente ubicadas); (2) que no haya pasado suficiente tiempo desde las designaciones como para que se aprecien mejoras en los niveles de contaminación (dependencia de las fechas de designación y de los tiempos de tránsito); y (3) que los programas de acción para la recuperación de la calidad del agua en las ZVNs no estén siendo aplicados, o sean ineficaces. La idoneidad de las 89 ZVNs designadas total o parcialmente en el territorio de la Demarcación del Segura (Fig. 1) podría ser evaluada mediante el análisis de su grado de coincidencia con las zonas de riesgo extraídas de un mapa de vulnerabilidad específica a la contaminación por nitrato (Arauzo, 2017; Arauzo et al., 2019), aún en fase de elaboración para la Demarcación del Segura (publicación prevista en 2024). No obstante, de la distribución actual de ZVNs (Fig. 1) se desprende que al menos el territorio de influencia del Mar Menor cuenta con una amplia cobertura de protección, con designaciones vigentes desde hace más de dos décadas (Campo de Cartagena; Tabla 2), por lo que la ausencia de mejoras en los niveles de nitrato más bien cabría atribuirlas a la falta de aplicación o a la ineficacia de los programas de acción (Tragsatec, 2019), si bien carecemos de modelos hidrogeológicos que lo confirmen.

Análisis espacial de la distribución del nitrato

La distribución del nitrato en las aguas subterráneas viene determinada por su alta solubilidad y movilidad en las zonas no saturada y saturada, siendo las características del medio físico (hidrología, topografía, litología, suelos, condiciones climáticas) y los usos del suelo (agricultura como factor de riesgo, áreas naturales como factor de protección) los elementos que modulan la dispersión y transporte de los compuestos nitrogenados a través de las cuencas hidrológicas (Arauzo et al., 2022).

El análisis espacial del nitrato en las aguas subterráneas de la Demarcación del Segura para el año 2021 (Objetivo 2) permitió estimar que el 20% de la superficie acuífera presenta contaminación

por nitrato (≥50 mg L^{-1}), mientras que el 16% se encuentra en situación de riesgo (25-49 mg L^{-1}) (Fig. 2). Analizando masa por masa, el estado de calidad del agua con relación a la presencia de nitrato es heterogéneo, con 22 masas de agua subterránea contaminadas (35% del total) y 41 libres de contaminación (Tabla 1; Fig. 2). De las masas contaminadas, el 50% presentó concentraciones de nitrato superiores a 50 mg L-1 en el 50-98% de su superficie (Tabla 3; Fig. 2), si bien, contabilizando conjuntamente las zonas contaminadas y en riesgo, se estima que el 64% estaría afectado en el 80-100% de su superficie (Tabla 3; Fig. 2). Estudios similares en la cuenca del Ebro mostraron que el 37% de las masas de agua subterránea presentaba contaminación por nitrato (Arauzo, 2017), valor próximo al de la Demarcación del Segura (35%). De estas, sin embargo, la proporción de masas con un grado de afectación severo (80-100% de su superficie) fue 3,8 veces superior en la Demarcación del Segura (64%) respecto a la observada en la cuenca del Ebro (17%; Arauzo, 2017).

El análisis mediante interpolación espacial de las concentraciones de nitrato en un SIG es una herramienta útil para estimar su distribución en las masas de agua subterránea, siempre y cuando se parta de datos suficientemente robustos y se tenga en cuenta el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos. Asimismo, deben considerarse posibles limitaciones de partida, como la escasa disponibilidad de estaciones de muestreo (pozos, sondeos) en algunos territorios, como áreas de montaña, y las características particulares de cada acuífero. Sin embargo, aunque las áreas de montaña están generalmente peor representadas en este tipo de mapa temático, no suelen constituir un problema para la interpretación de las

Tabla 2.— ANOVAs MR para estudiar el efecto del factor tiempo sobre la concentración de nitrato en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrológica del Segura afectadas por contaminación de nitrato durante el periodo 2010-2021. El factor intra-sujetos (tiempo) presenta un número distinto de niveles (años) en cada análisis, según la disponibilidad de datos. En el caso de existir diferencias entre los grupos con valores de F significativos (p<0,05) las diferencias entre medias se evaluaron mediante la prueba post-hoc de Bonferroni. Se muestran las fechas de designación de ZVNs para cada masa de agua.

ANOVA MR de un factor Efectos intra-sujetos (esfericidad asumida)				
Masa de agua (código DHS; fecha de designación de las ZVNs)	*gl*	*F*	valor-*P*	Nitrato medio anual (mg L^{-1})
Corral Rubio (070.001; 2003, 2011)	5	2,63	0,07	2010:62; 2012:65; 2018:62; 2019:68; 2020:73; 2021:70
Sinclinal de la Higuera (070.002; 2003, 2011)	2	0,69	0,59	2018:70; 2020:68; 2021:68
Boquerón (070.004; 2003)	2	2,77	0,18	2019:59; 2020:69; 2021:59
Tobarra-Tedera-Pinilla (070.005; 2003, 2020)	3	3,04	0,19	2018:74; 2019:73; 2020:82; 2021:72
Cuchillos-Cabras (070.011; 2019)	4	30,25	0,11	2010:50; 2012:51; 2018:55; 2020:62; 2021:43
Caravaca (070.032; 2019)	3	3,53	0,16	2018:42; 2019:43; 2020:44; 2021:50
Bajo Quípar (070.033; 2019)	4	2,62	0,19	2012:268; 2018:277; 2019:237; 2020:265; 2021:270
Cuaternario de Fortuna (070.035; 2019)	5	2,43	0,18	2011:103; 2012:104; 2018:105; 2019:113; 2020:131; 2021:112
Vega Media y Baja del Segura (070.036; 2004, 2009, 2018)	2	2,39	0,14	2019:80; 2020:83; 2021:80
Vega Alta del Segura (070.041; 2004)	2	0,09	0,91	2019:42; 2020:43; 2021:47
Terciario de Torrevieja (070.042; 2018)	3	1,49	0,37	2018:60; 2019:49; 2020:68; 2021:92
Bajo Guadalentín (070.050; 2009, 2019)	3	2,21	0,19	2010:93; 2019:92; 2020:99; 2021:110
Campo de Cartagena (070.052; 2001, 2004, 2009, 2018, 2019)	3	8,48	<0,001	2018:166[a]; 2019:159[a] ; 2020:213[b] ; 2021:181[ab]
Alto Guadalentín (070.057; 2009)	4	0,90	0,54	2012:105; 2018:109; 2019:106; 2020:121; 2021:130
Mazarrón (070.058; 2019)	3	0,65	0,64	2018:106; 2019:106; 2020:103; 2021:92
Águilas (070.061; 2019)	2	0,77	0,50	2019:215; 2020:241; 2021:233
Sierra de Cartagena (070.063; 2019)	3	3,19	0,06	2017:70; 2019:68; 2020:67; 2021:81

gl: grados de libertad

zonas contaminadas por nitrato, al encontrarse habitualmente libres de contaminación (Arauzo, 2017) por el efecto protector de bosques y áreas naturales (usos del suelo más comunes en las cabeceras de cuenca; Martínez-Bastida et al., 2010). Respecto a las características de los acuíferos, los de porosidad intergranular (detríticos), más homogéneos y con menores contrastes en los valores de conductividad hidráulica que los acuíferos fisurados y/o karstificados, se adecúan mejor a la interpolación espacial que estos últimos, que pueden ser altamente anisótropos. De las 22 masas afectadas por contaminación de nitrato en la Demarcación del Segura el 68% son de tipo detrítico o detrítico-carbonatado (de permeabilidad alta a muy alta), mientras el 32% restante son carbonatadas (de permeabilidades media y alta) (Tabla 1).

Cuencas, flujos y áreas de captación de las zonas contaminadas

La cuenca hidrográfica, o área de captación, es la unidad territorial básica en la que el drenaje superficial fluye hacia un mismo punto de descarga. En el caso de las aguas subterráneas la situación es algo más compleja: el acuífero puede recibir aportes desde una o varias cuencas hidrográficas superficiales, por infiltración difusa a través de la zona no saturada (precipitación atmosférica, retornos de riego) e infiltración permanente o esporádica de aguas superficiales (ríos, humedales, lagos, etc.), y desde otros acuíferos (Custodio, 2021).

A partir de la red de drenaje superficial y el MDT fueron extraídas, mediante ArcGIS, un total de 84 cuencas hidrográficas en la Demarcación del Segura (Fig. 3). De éstas, 57 cuencas drenan al mar Mediterráneo, siendo la principal la cuenca del Segura (cuenca nº 1; 15.488 km^2 de superficie; Fig. 3), mientras que las 56 cuencas restantes corresponden a ramblas litorales con superficies entre 380 y 0,5 km^2 (cuencas nº 2-18 y 46-84; en conjunto ocupan 1.833 km^2; Fig. 3). Las otras 27 cuencas drenan directamente a la lagua litoral del Mar Menor, siendo la principal la cuenca del Albujón (cuenca nº 25; 993 km^2 de superficie; Fig. 3); las 26 restantes son ramblas de menor entidad con superficies entre 65 y 0,3 km^2 (cuencas nº 19-24 y 26-45; en conjunto ocupan 231 km^2; Fig. 3). Las cuencas hidrográficas extraídas se usarán posteriormente para la estimación del área potencial de captación de cada una de las zonas afectadas por contaminación de nitrato (Objetivo 3).

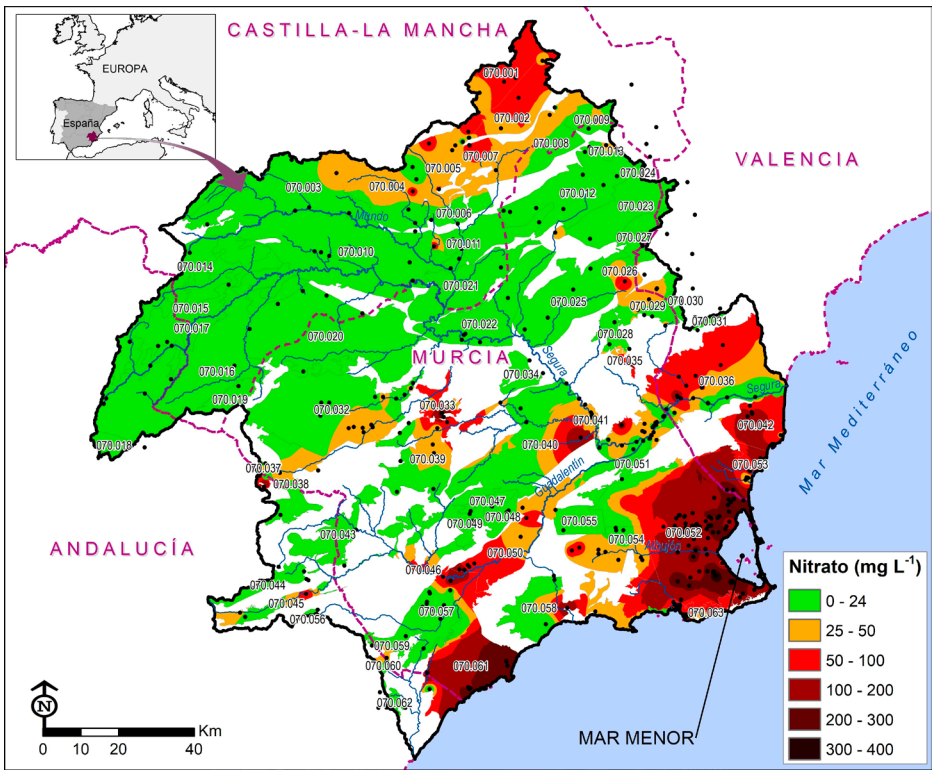


Figura 2.— Distribución espacial de las concentraciones medias anuales de nitrato en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrológica del Segura durante 2021; se muestran las estaciones de muestreo utilizadas para las interpolaciones.

Tabla 3.— Porcentajes de cobertura de las zonas contaminadas por nitrato (≥ 50 mg L^{-1}) y de las zonas en riesgo (25-49 mg L^{-1}), relativos a la superficie total de cada masa de agua subterránea afectada. Datos estimados a partir del modelo digital de la distribución del nitrato en las masas de agua de la Demarcación del Segura para el año 2021 (Fig. 2).

Masa de agua (código DHS)	Área contaminada (%) ($[NO_3^-] \geq 50$ mg L^{-1})	Área en riesgo (%) ($25 \leq [NO_3^-] \leq 49$ mg L^{-1})
Corral Rubio (070.001)	80	20
Sinclinal de la Higuera (070.002)	69	31
Boquerón (070.004)	6	5
Tobarra-Tedera-Pinilla (070.005)	18	69
Conejeros-Albatana (70.007)	24	60
Cuchillos-Cabras (070.011)	2	4
Baños de Fortuna (70.028)	11	26
Caravaca (070.032)	0	24
Bajo Quípar (070.033)	79	14
Cuaternario de Fortuna (070.035)	69	28
Vega Media y Baja del Segura (070.036)	45	33
Sierra de la Zarza (70.037)	61	35
Bullas (70.039)	10	34
Vega Alta del Segura (070.041)	3	93
Terciario de Torrevieja (070.042)	98	2
Bajo Guadalentín (070.050)	50	40
Campo de Cartagena (070.052)	81	12
Cabo Roig (70.053)	91	6
Alto Guadalentín (070.057)	26	7
Mazarrón (070.058)	15	33
Águilas (070.061)	88	5
Sierra de Cartagena (070.063)	61	31

El análisis de la dirección del flujo superficial (escorrentía) a escala regional reveló flujos dominantes hacia el E, SE y S en el 53% de las celdas del raster (Fig. 4). Por otra parte, el análisis de la dirección del flujo subterráneo en las masas de agua afectadas por la contaminación (Fig. 5) mostró, igualmente, flujos dominantes hacia el E, SE y S en el 58% de las celdas, si bien cada masa presenta algunas variaciones respecto a las observaciones a escala regional. La orientación preferencial E, SE y S de los flujos superficial y subterráneo (Fig. 4 y 5) resulta coherente con la distribución de las zonas más afectadas por la contaminación, que se sitúan mayoritariamente a lo largo del área suroriental de la Demarcación (Fig. 2), en territorios llanos o de escasa pendiente, con las cotas piezométricas más bajas del área de estudio (Fig. 4 y 5). Se observó, además, que las zonas más contaminadas (Fig. 2) corresponden generalmente a zonas de convergencia del flujo subterráneo (Fig. 5). Estos hallazgos son similares a los observados en acuíferos detríticos y en gran parte de los acuíferos carbonatados de la Demarcación del Ebro (Arauzo, 2017), donde se comprobó que las zonas contaminadas tendían a distribuirse en las cotas piezométricas más bajas, territorios llanos y de flujo muy lento. Tales resultados evidencian que el soluto puede ser transportado largas distancias, desde cotas de mayor elevación

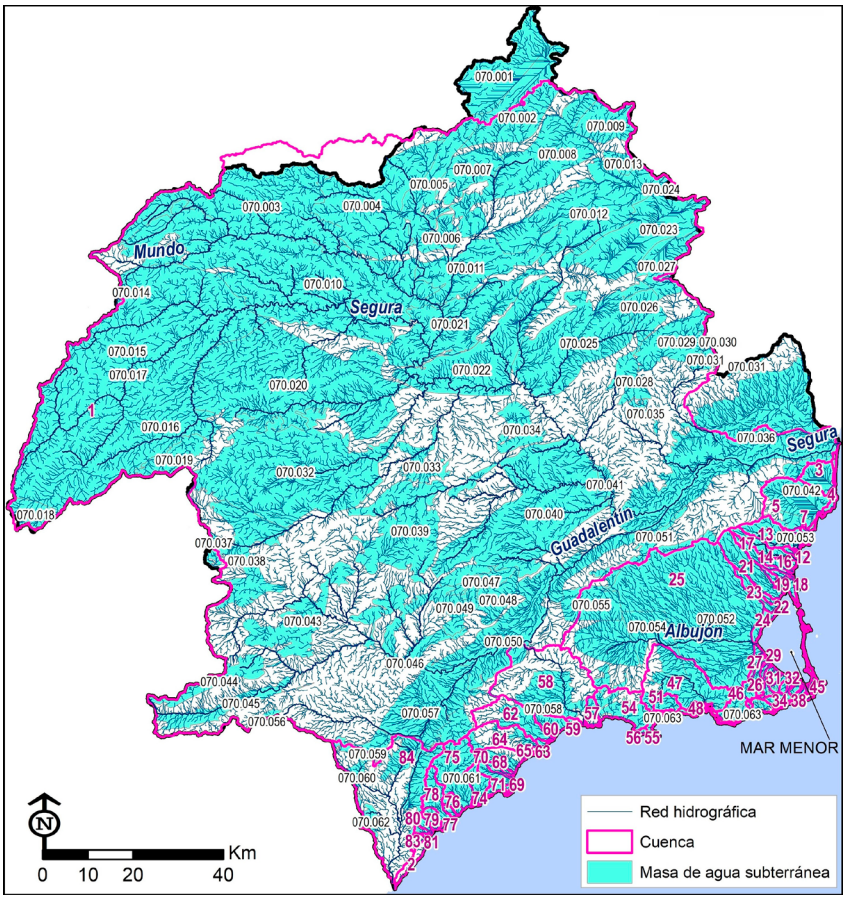


Figura 3.— Red de drenaje superficial de la Demarcación Hidrológica del Segura; se muestran las cuencas hidrográficas que drenan al mar Mediterráneo y a la laguna litoral del Mar Menor, incluyendo las ramblas litorales menores; las cuencas aparecen numeradas del 1 (cuenca del Segura) al 84.

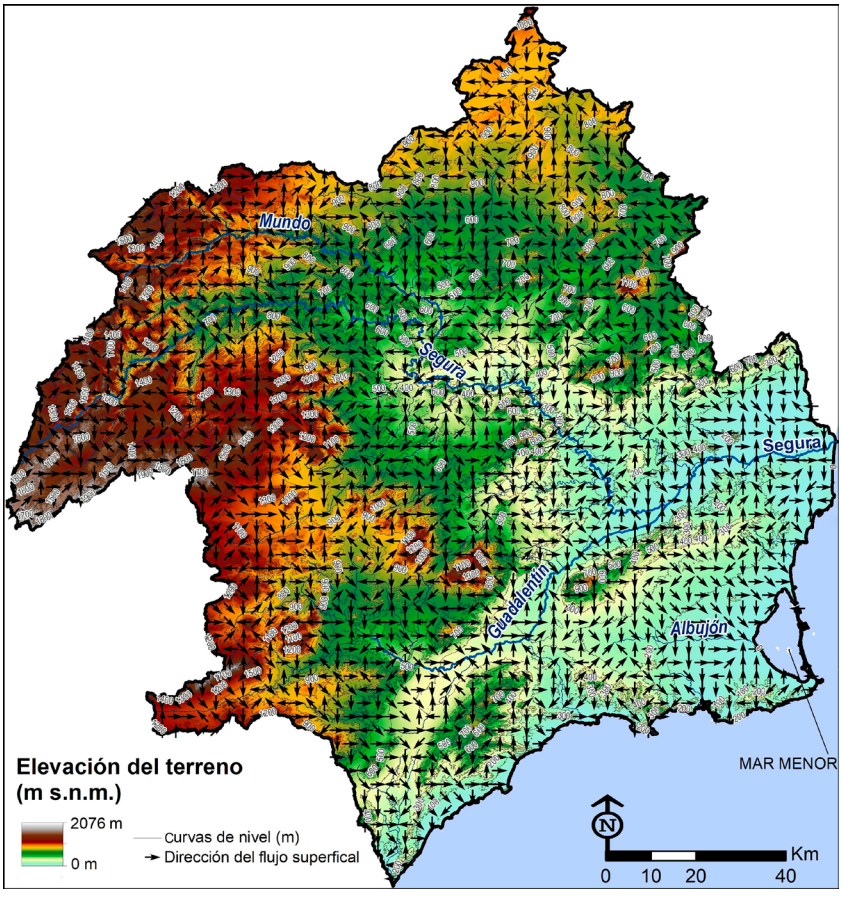


Figura 4.— Mapa de elevación del terreno sobre el nivel del mar (formatos raster y vectorial); las flechas negras muestran las direcciones de flujo de la escorrentía.

hasta las cotas más bajas (Arauzo et al., 2019, 2020, 2022; Zahid et al., 2015), siguiendo la secuencia fuente-vía-receptor.

En la Figura 6A se identifican 11 zonas principales que agrupan las áreas afectadas por contaminación de nitrato en las masas de agua subterránea de la Demarcación del Segura (Zonas 1, 2, 3 y Zonas 4.1 a 4.8). La mayoría de ellas comprende entre dos y ocho masas de agua subterránea colindantes, si bien las Zonas 2, 3 y 4.6 corresponden a una única masa (Tabla 4). Las superficies contaminadas ($[NO_3^-] \geq 50$ mg L^{-1}) y en riesgo ($25 \leq [NO_3^-] < 49$ mg L^{-1}) varían desde el 93% del área total de las masas, en las Zonas 1 y 3, a sólo el 5% en la Zona 4.6. La Zona 1 [Campo de Cartagena (070.052), Cabo Roig (070.053), Terciario de Torrevieja (070.042), Triásico de Los Victoria (070.054) y Sierra de Cartagena (070.063)] y la Zona 3 [Águilas (070.061)] son las que presentan una mayor superficie relativa con niveles de nitrato por encima de 50 mg L^{-1} (75% en la Zona 1 y 88% en la Zona 3; Tabla 4). Todas las zonas vierten al Mar Mediterráneo, si bien la Zona 1 también descarga agua contaminada por nitrato a lo largo del perímetro de la laguna del Mar Menor (Fig. 5), lo que contribuye a agravar sus elevados niveles de eutrofia (Asamblea Regional de Murcia, 2020; Grupo Tragsa, 2020). La mayor parte de las zonas afectadas por contaminación (salvo Zonas 4.4 y 4.6) presentan flujos subterráneos laterales entre acuíferos colindantes (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022b) (Fig. 5 y Tabla 4).

Para determinar las áreas de captación (Fig. 6B) de las zonas afectadas por contaminación de nitrato (Fig. 6A), se identificaron los conjuntos de cuencas hidrológicas (Fig. 3) desde las que podrían generarse aportaciones de agua (pluvial, fluvial, retornos de riego, etc.) hasta las zonas contaminadas. En las determinaciones se tuvieron en cuenta los aportes que, potencialmente, podrían producirse por infiltración a través de la zona no saturada (infiltración vertical sobre el acuífero y/o infiltración procedente de escorrentías en áreas de pendiente) y los procesos advectivos en la zona saturada (enfoque fuente-vía-receptor). Para ello superpusimos en un SIG el mapa de cuencas hidrográficas (Fig. 3) y el mapa zonas contaminadas (Fig. 6A) y analizamos las direcciones de los flujos superficial (Fig. 4) y subterráneo (Fig. 5) y la información disponible sobre flujos subterráneos laterales entre acuíferos colindan-

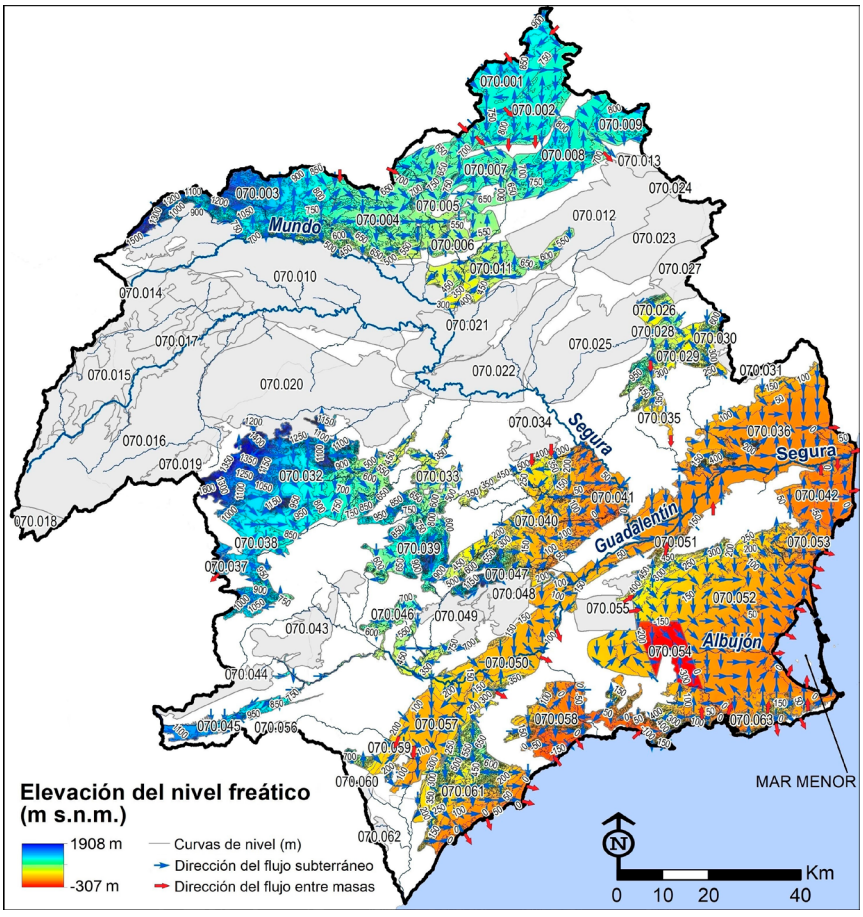


Figura 5.— Mapa de elevación del nivel freático sobre el nivel del mar (sólo para las masas de agua subterránea afectadas por la contaminación); formatos raster y vectorial; las flechas azules indican la dirección del flujo subterráneo; las flechas rojas muestran los flujos subterráneos laterales entre masas colindantes (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022b).

Tabla 4.— Zonas afectadas por la contaminación durante 2021 (Fig. 6A).

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4.1	Zona 4.2	Zona 4.3	Zona 4.4	Zona 4.5	Zona 4.6	Zona 4.7	Zona 4.8
Código DHS de las masas de agua afectadas	070.042 070.052 070.053 070.054 070.063	070.058	070.061	070.045 070.046 070.050 070.057	070.036	070.040 070.041	070.033 070.039 070.040	070.026 070.028 070.029 070.035	070.011	070.001[a] 070.002 070.003 070.004 070.005 070.007 070.008	070.032 070.037[a] 070.038
Área total de las masas de agua (km^2)	1643	276	378	810	751	656	339	274	206	1755	874
Área con $[NO_3^-] \geq 50$ mg L^{-1} (km^2) (% del área total)	1288 (75%)	41 (15%)	330 (88%)	240 (39%)	338 (45%)	98 (15%)	77 (23%)	25 (9%)	3 (2%)	377 (21%)	11 (1%)
Área con $[NO_3^-] \geq 25$ mg L^{-1} (km^2) (% del área total)	1527 (93%)	131 (48%)	350 (93%)	470 (58%)	588 (78%)	240 (37%)	188 (56%)	152 (55%)	11 (5%)	1128 (64%)	257 (29%)
Dirección dominante del flujo subterráneo (%)[b]	S, SE, E (61%)	S, E, O (66%)	E, S, O (71%)	S, E, N (53%)	S, E, N (71%)	E, SE, N (60%)	E, N, NE (62%)	S, SE, SO (58%)	S, SO, SE (55%)	S, SO, SE (56%)	E, SE, S (55%)
Flujos subterráneos laterales entre masas colindantes[c]	Terciario de Torrevieja (070.042): flujo de entrada y salida con Vega Media y Baja del Segura (070.036) Cabo Roig (070.053): flujo al Mar Mediterráneo. Campo de Cartagena (070.052): flujo al Mar Mediterráneo y al Mar Menor; recarga desde Triásico de Carrascoy (070.055); recarga escasa desde Sierra de Cartagena (070.063). Sierra de Cartagena (070.063): flujo al Mar Mediterráneo.	Mazarrón (070.058): flujo de entrada-salida (según sector) al Mar Mediterráneo.	Águilas (070.061): flujo al Mar Mediterráneo.	Bajo Guadalentín (070.050): abierto al SE. Alto Guadalentín Sur (070.057): flujo de salida a Sierra de Enmedio (070.059).	Vega Media y Baja del Segura (070.036): flujo de entrada-salida con Terciario de Torrevieja (070.042) y salida al Mar Mediterráneo; recarga desde Cresta del Gallo (070.051).	Vega Alta del Segura (070.041): flujo de entrada desde el N.	No se conocen flujos laterales.	Cuaternario de Fortuna (070.035): flujo de entrada por el N y de salida por el S.	No se conocen flujos laterales.	Corral Rubio (070.001)[a]: abierto al NO, NE y SO. Sinclinal de la Higuera (070.002): flujo de salida al S. Boquerón (070.004): flujo de entrada al N. Tobarra-Tedera-Pinilla (070.005): flujo de entrada al N. Ontur (070.008): cerrado y abierto al E, (flujos nulo y de salida al E).	Sierra de la Zarza (070.037)[a]: flujo de salida a Pliocuatern. de los Llanos de la Puebla (051.004, Demarc. del Guadalquivir).

[a] Masa técnicamente no perteneciente a la cuenca del Segura (véase Fig. 6B).
[b] Extracción a partir del mapa de direcciones del flujo subterráneo (Fig. 5).
[c] Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura (2022b); véase Figura 5.

tes (Fig. 5; Confederación Hidrográfica del Segura, 2022b). Así se identificaron las cuencas hidrológicas que potencialmente realizan aportes a las zonas contaminadas y se generó la capa vectorial de polígonos que representa las áreas de captación de las zonas afectadas por contaminación de nitrato (Fig. 6B). Se establecieron cuatro áreas de captación principales (Fig. 6B): (1) área de captación de la Zona 1 (en verde); (2) área de captación de la Zona 2 (en azul); (3) área de captación de la Zona 3 (en amarillo); y (4) área de captación del Segura (Zona 4, en malva). Las tres primeras son las áreas de captación naturales de las zonas contaminadas 1, 2 y 3; la cuarta, sin embargo, corresponde al área de captación del Segura (cuenca nº 1) e incluye las ocho zonas contaminadas (4.1 a 4.8) localizadas en su territorio. En la Tabla 5 se describen las variables ambientales que caracterizan estas cuatro áreas de captación de zonas contaminadas, además de las de otras dos áreas de captación libres de contaminación, correspondientes a las cuencas altas de los ríos Mundo y Segura (Zonas A y B; Fig. 6B).

ACP de las áreas de captación

La exploración mediante ACP (Objetivo 4) de posibles relaciones entre variables ambientales que caracterizan las áreas de captación de zonas contaminadas por nitrato y de zonas libres de contaminación (Tabla 5; Fig. 6B) permitió explicar el 88% de la varianza total con los dos primeros componentes principales (Fig. 8).

El componente 1, que explicó el 65% de la varianza, representa el papel del medio físico (llanura *vs*. montaña) y de los uso del suelo (agricultura intensiva *vs*. áreas naturales) en la distribución de la contaminación por nitrato en las masas de agua subterránea de las cuencas analizadas (Fig. 8). El componente 1 se correlaciona positivamente con las variables del grupo A y negativamente con las del grupo B. El grupo A muestra la clara relación entre la extensión de las superficies contaminadas ($[NO_3^-] \geq 50$ mg L^{-1}) y en riesgo ($25 \leq [NO_3^-] < 49$ mg L^{-1}) y la agricultura intensiva, representada por cultivos de herbáceos en regadío, cítricos y frutales (Fig. 7C). Estos tres grupos de cultivos son los que anualmente generan los mayores excedentes de N en la Demarcación del Segura (Fig. 7D; MAPAMA, 2015, 2016, 2017, 2018, 2021). Los territorios representados por el grupo A se encuentran a poca altitud (Fig. 4), son llanos o de escasa pendiente (Fig. 7A) y presentan una pobre cobertura de bosques y áreas naturales (Fig. 7C) y una baja precipitación (Fig. 7B; generalmente por debajo de 300 mm anuales, salvo cuando se producen episodios extremos de precipitación asociados a DANAs; MedECC, 2020). La variable que representa el porcentaje de cobertura de ZVNs

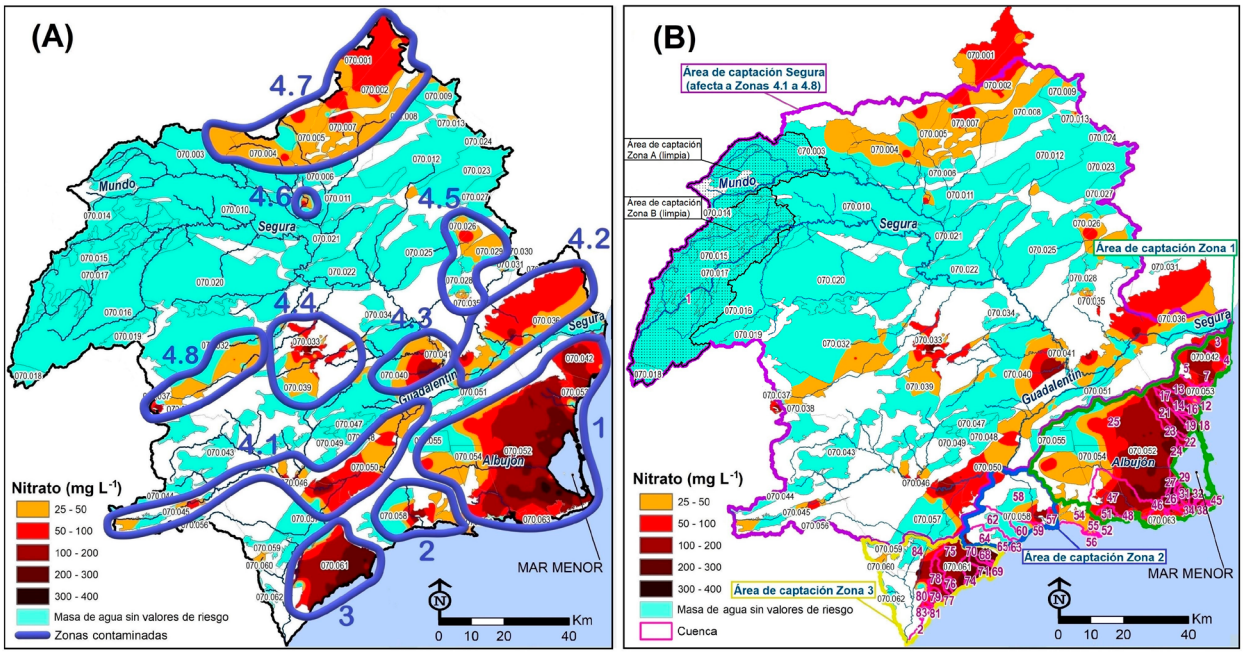


Figura 6.— (A) Zonas afectadas por contaminación de nitrato durante 2021; (B) Áreas de captación de las zonas afectadas por contaminación de nitrato; en trama de puntos también se muestran dos áreas de captación de zonas libres de contaminación, correspondientes a las cuencas altas de los ríos Mundo y Segura (Zonas A y B).

Tabla 5.— Variables ambientales que caracterizan las áreas de captación de las zonas afectadas por contaminación de nitrato (Zonas 1-4; Fig. 6B) y de otras zonas libres de contaminación (Zonas A y B; Fig. 6B).

	Área de captación de la Zona 1	Área de captación de la Zona 2	Área de captación de la Zona 3	Área de captación de la Zona 4[a]	Área de captación de la Zona A	Área de captación de la Zona B
Zona afectada (Fig. 6A,B)	Zona 1 (contaminada)	Zonas 2 (contaminada)	Zona 3 (contaminada)	Zonas 4.1 a 4.8 (contaminadas)	Zona A: cuenca alta del río Mundo (no contaminada)	Zona B: cuenca alta del río Segura (no contaminada)
Masas receptoras primarias del contaminante	070.042, 070.052, 070.053, 070.054, 070.063	070.058	070.061	070.045, 070.046, 070.050, 070.057, 070.036, 070.040, 070.041, 070.033, 070.039, 070.026, 070.028, 070.029, 070.035, 070.011, 070.002, 070.003, 070.004, 070.005, 070.007, 070.008, 070.032, 070.038	070.003, 070.010, 070.014, 070.015, 070.017	070.014, 070.015, 070.016, 070.017, 070.018
Masas receptoras secundarias del contaminante	Mar Mediterráneo; Mar Menor	Mar Mediterráneo	Mar Mediterráneo	Mar Mediterráneo	-	-
Cuencas hidrográficas que la componen	Cuencas nº 3-51	Cuencas nº 57-65	Cuencas nº 68-84	Cuenca del Segura (nº 1)	Cuenca alta del río Mundo	Cuenca alta del río Segura
Superficie total (km^2)	1812	463	684	15488	541	1244
Altitud máx.-media-mín. (msnm)	1063-529-0	883-441-0	1243-613-0	2069-1031-0	1780-1167-579	2061-1284-507
Extensión de las aguas subterráneas (%)[b]	92%	50%	63%	71%	90%	100%
Profundidad máx.-media-min. del nivel freático (m)	400-62-0	348-182-24	282-191-13	336-167-0	070.017 masa profunda confinada (datos escasos)	070.017masa profunda confinada (datos escasos)
Extensión contaminada: $[NO_3^-] \geq 50$ mg L^{-1} (km^2) (%)[b]	1251; 69%	56; 12%	312; 46%	737; 5%	0; 0%	0; 0%
Extensión contaminada o en riesgo: $[NO_3^-] \geq 25$ mg L^{-1} (km^2) (%)[b]	1490; 82%	88; 19%	337; 49%	2564;17%	0; 0%	0; 0%
Superficie con pendiente topográfica ≥10% (%)[b, c]	18%	56%	50%	53%	89%	90%
Superficie con precipitación ≥ 600 mm $año^{-1}$ (%)[b, d]	0%	0%	0%	10%	79%	87%
Superficie de bosques y áreas naturales (%)[b, e]	10%	3%	2%	25%	70%	55%
Superficie de cultivos herbáceos en regadío (%)[b, e]	30%	16%	19%	6%	1%	1%
Superficie de cultivos herbáceos en secano (%)[b, e]	7%	9%	8%	15%	4%	4%
Superficie de cítricos y frutales (%)[b, e]	28%	13%	13%	13%	0%	1%
Excedente de N por área de captación (t $año^{-1}$) [f]	12.355	1.796	2.874	50.222	546	994
Excedente de N por unidad de superficie (kg N ha^{-1} $año^{-1}$) [f]	682	388	420	324	101	80
Superficie designada ZVN (%)[b]	93%	50%	53%	22%	2%	0%

[a] Debido a la incertidumbre que afecta a la extracción de las áreas de captación de las ocho zonas contaminadas en la cuenca del Segura (nº 1), éstas fueron tratadas de forma conjunta como "área de captación de la Zona 4".
[b] Porcentaje de cobertura respecto a la superficie total del área de captación.
[c] Valores extraídos a partir de mapa de la pendiente topográfica (Fig. 7A).
[d] Valores extraídos del mapa de precipitación anual (Fig. 7B).
[e] Valores extraídos a partir mapa de usos del suelo (Fig. 7C).
[f] Valores extraídos a partir mapa de excedentes anuales de N (Fig. 7D).

en las área de captación también aparece en el grupo A, lo que *a priori* apuntaría a una disposición coherente de las mismas (Fig. 1; Fig. 6B). Tal es el caso de las ZVNs designadas en el área de captación de la Zona 1, que cubren el 93% de la superficie total de la misma (Tabla 5). Las ZVNs designadas en las áreas de captación de las Zonas 2, 3 y 4 presentan, sin embargo, coberturas muy inferiores (6%, 19% y 15%, respectivamente; Tabla 5), por lo que deberían desarrollarse evaluaciones más precisas de la vulnerabilidad específica de las aguas subterráneas a la contaminación por nitrato en esos territorios, a fin validar la distribución y extensión de las ZVNs designadas. En el lado negativo del componente 1, el grupo B asocia variables representativas de las áreas de montaña (cuencas altas del Mundo y el Segura), constituidas por territorios con fuertes pendientes, abundante precipitación (Fig. 4; Fig. 7A y B) y acuíferos profundos (Fig. 5) que no presentan contaminación por nitrato. En estas zonas dominan los bosques y áreas naturales (Fig. 7C), usos del territorio que han demostrado ofrecer un efecto protector para los recursos hídricos frente a los procesos de contaminación difusa (Arauzo, 2017; Martínez-Bastida et al., 2010). Arauzo et al. (2022) observaron resultados similares en los acuíferos aluviales de la Demarcación del Ebro.

El componente 2, que explicó el 23% de la varianza, muestra la influencia del tamaño de la cuenca en la distribución de algunas variables hidrológicas y de usos del suelo, si bien no parece relevante respecto a los procesos de contaminación por nitrato. Se correlaciona positivamente con las variables del grupo C y negativamente con las variables del grupo D. El grupo C representa a aquellas áreas de captación de menor tamaño, cobertura vegetal boscosa y alta precipitación, donde casi la totalidad del territorio presenta masas de agua subterránea subyacentes (profundas, confinadas y de buena calidad química), descripción que se ajusta a las áreas de cabecera de los ríos Mundo y Segura (Fig. 6B; Tabla 5). En el lado negativo del componente 2, el grupo B representa a las áreas de captación de mayor tamaño, representada por la cuenca del Segura (Fig. 6B), donde se concentra la mayor parte de los cultivos herbáceos en secano (Fig. 7C; Tabla 5).

Área de captación del Mar Menor

La situación de emergencia ecológica del Mar Menor es consecuencia de su grave estado de eutrofización derivado de la expansión de la agricultura intensiva, la presión urbano-turística (todavía existen efluentes urbanos escasamente depurados) y el crecimiento de las explotaciones porcinas (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022a), pero también del incumplimiento de la amplia normativa que ya existe para mejorar la sostenibilidad ambiental de su entorno.

La eutrofización de los sistemas leníticos se produce por el aporte en exceso de N y P (macronutrientes limitantes de la productividad primaria) que genera proliferaciones masivas de fitoplancton, cuya posterior descomposición provoca condiciones anóxicas, con detrimento de la calidad del agua, desequilibrio del ecosistema y empobrecimiento de la biodiversidad. El nitrato y el ortofosfato son generalmente las formas más comunes de N y P en las aguas subterráneas y en la solución del suelo, pero al ser el nitrato mucho más soluble y móvil (más lixiviable) que el ortofosfato, su impacto contaminante sobre sobre las masas de agua subterránea es muy superior al del P (Arauzo et al., 2022). El P, debido a su baja solubilidad, tiende a quedarse inmovilizado en el suelo, por lo que se considera que la escorrentía superficial es su ruta preferencial de transporte (Yaron et al., 1996). En consecuencia, las vías principales de entrada de N al Mar Menor son las descargas subterráneas ricas en nitrato a lo largo del perímetro de la laguna, los aportes desde cauces y conducciones (ramblas que desaguan concentrados de desalobradoras, efluentes urbanos pobremente depurados, etc.) y los arrastres por escorrentía superficial (generalmente consecuencia de eventos de precipitación extrema asociada a DANAs). Las vías de entrada de P son esencialmente superficiales, por escorrentía y aportes desde cauces y canales. La elevada relación N/P en las aguas del Mar Menor, comparada con el cociente 16/1 de Redfield (1958), señala al P como nutriente limitante de la producción primaria (Velasco et al., 2006). El sobreexceso de N en la laguna podría explicarse, por tanto, por las descargas subterráneas ricas en nitrato y prácticamente libres de P (Arauzo et al., 2022). Pero la entrada de macronutrientes a la laguna no es más que una parte del problema. Aun llegándose a alcanzar el ansiado vertido cero, otro grave inconveniente se encuentra en la propia laguna, en sus sedimentos, donde N y P han venido acumulándose durante décadas. En las lagunas eutrofizadas de estas latitudes parte de los sedimentos son generalmente resuspendidos cada año durante la mez-

cla térmica de sus aguas (que se suele dar desde el otoño al inicio de la primavera), liberando nutrientes biodisponibles que, con el ascenso de la temperatura, generan nuevos crecimientos masivos de algas fitoplanctónicas susceptibles de desequilibrar el ecosistema de forma recurrente. Por otra parte, el análisis de Senent-Aparicio et al. (2021) sobre la hidrología de la laguna del Mar Menor mostró que durante el verano se produce una entrada considerable de agua desde el mar Mediterráneo, mientras que en otoño e invierno se da el proceso inverso, habiéndose estimado una entrada neta de agua a la laguna de 82 hm^3 $año^{-1}$ desde el mar Mediterráneo. El intercambio de aguas a través de las golas de la Manga del Mar Menor (canales ampliados artificialmente que comunican la laguna con el mar Mediterráneo) favorecería el arrastre hacia el Mediterráneo de parte de los sedimentos resuspendidos durante las mezclas térmicas de la laguna en otoño-invierno, contribuyendo a una reducción lenta, pero paulatina, de los nutrientes acumulados en el Mar Menor. En contrapartida, la apertura de las golas al tráfico de embarcaciones ha supuesto una grave alteración de las condiciones naturales de la laguna, con entrada neta de agua desde el mar Mediterráneo que provoca la disminución de la salinidad y afecta a sus condiciones térmicas, colonización de especies invasoras y cambios en la hidrología lagunar y en sus comunidades biológicas (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022a).

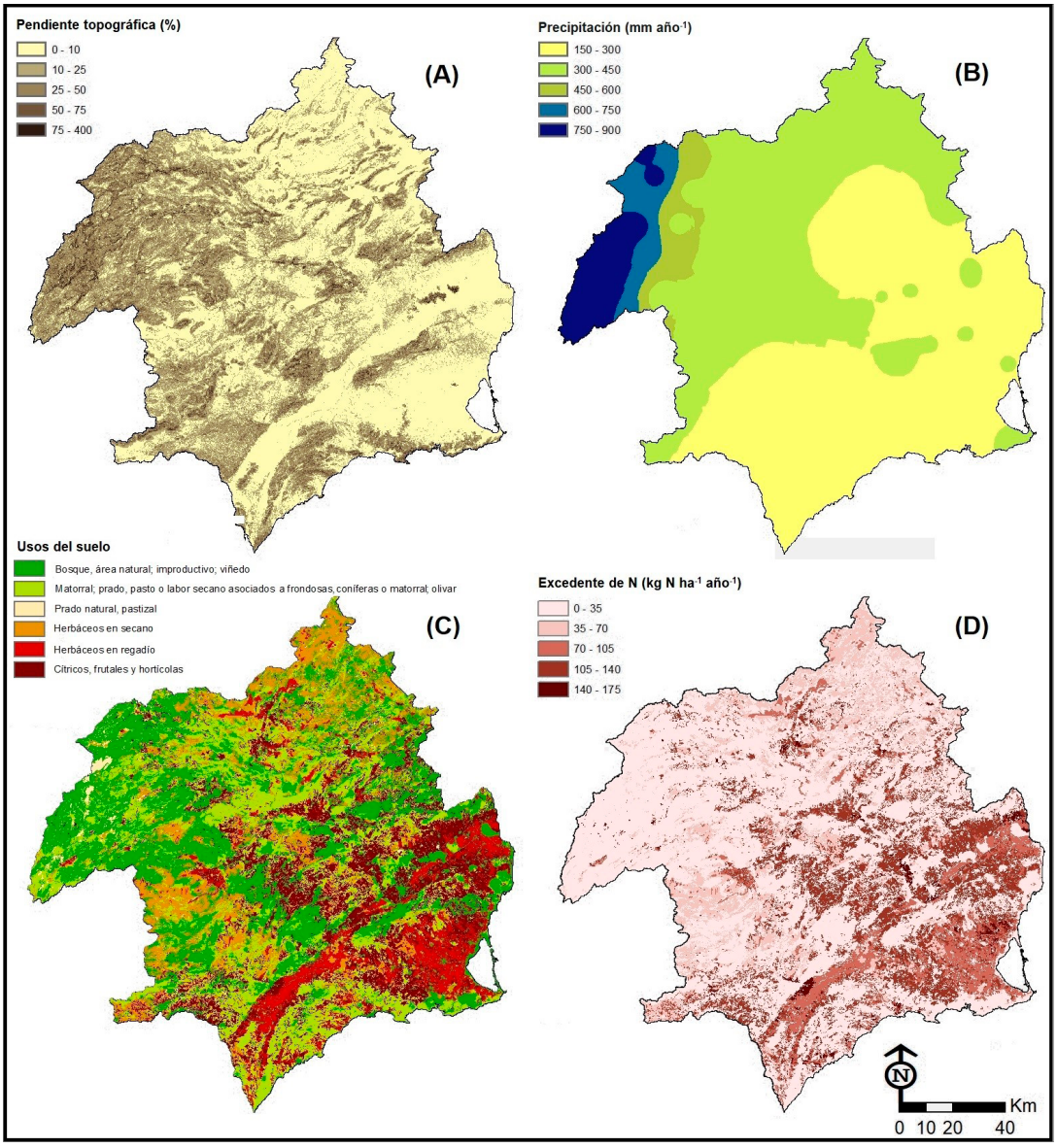
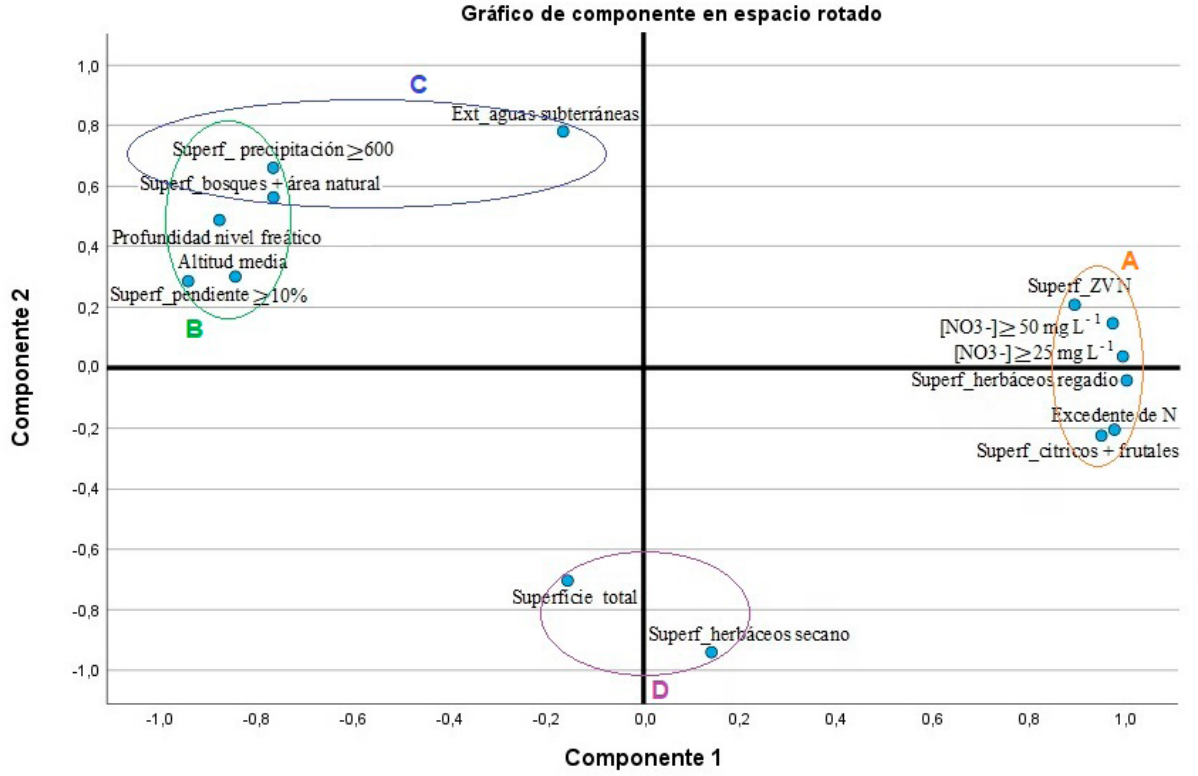


Figura 7.— (A) Pendiente topográfica; (B) Precipitación anual (valores promedio para el periodo 2010-2019); (C) Usos de suelo; (D) Excedentes anuales de N (valores promedio para el periodo 2013-2019).

Con relación a las aguas subterráneas que drenan al Mar Menor, vehículo de las entradas subterráneas de nitrato, la masa de agua Campo de Cartagena (070.052; Fig. 1; Tabla 1) es la receptora primaria de los excedentes de N procedentes de la agricultura intensiva de la comarca de Campo de Cartagena (Fig. 7D). La masa se caracteriza geomorfológicamente por su amplia llanura, con cierta inclinación hacia el sureste y sentido del flujo hacia el Mar Menor y el Mar Mediterráneo (receptores secundarios del contaminante). Está rodeada por elevaciones montañosas, a excepción de la zona del litoral (Fig. 4). Presenta 4 niveles acuíferos principales: Cuaternario (gravas, arenas, limos, arcillas y caliches; libre), Plioceno (areniscas y margas; semiconfinado), Andaluciense (calizas, areniscas y arenas;



Matriz de componente rotado
Método de extracción: Análisis de Componentes Principales
Método de rotación: Varimax con Normalización Kaiser

Parámetro [a]	Etiqueta en el gráfico	Componente 1 (65% de la varianza) [b]	Componente 2 (23% de la varianza) [b]
Superficie de cultivos herbáceos en regadío (%)	Superf_herbáceos regadio	0,992	-0,037
Extensión contaminada o en riesgo: [NO3-]≥25 mg L^{-1} (%)	[NO3-]≥ 25 mg L^{-1}	0,981	0,052
Excedente de N por unidad de superficie (kg N ha^{-1} $año^{-1}$)	Excedente de N	0,975	-0,205
Extensión contaminada: [NO3-]≥ 50 mg L^{-1} (%)	[NO3-]≥ 50 mg L^{-1}	0,960	0,161
Superficie de cítricos y frutales (%)	Superf_cítricos + frutales	0,948	-0,225
Superficie con pendiente topográfica ≥10% (%)	Superf_pendiente ≥10%	-0,944	0,282
Superficie designada ZVN (%)	Superf_ZVN	0,893	0,208
Profundidad media del nivel freático (m)	Profundidad nivel freático	-0,871	0,471
Altitud media (msnm)	Altitud media	-0,825	0,297
Superficie con precipitación≥ 600 mm $año^{-1}$ (%)	Superf_ precipitación≥600	-0,761	0,633
Superficie de bosques y áreas naturales (%)	Superf_bosques + área natural	-0,761	0,535
Superficie de cultivos herbáceos en secano (%)	Superf_herbáceos secano	0,141	0,940
Extensión de las aguas subterráneas (%)	Ext_aguas subterráneas	-0,167	0,781
Superficie total del área de captación (km^2)	Superficie total	-0,166	-0,704

[a] Referencias de los parámetros en la Tabla 5.
[b] Varianza explicada.

Figura 8.— Análisis de componentes principales (ACP) de las variables ambientales que caracterizan las áreas de captación de las zonas afectadas por contaminación de nitrato (Zonas 1 a 4) y de las zonas libres de contaminación (Zona A -cuenca alta del río Mundo- y Zona B -cuenca alta del río Segura-) (Fig. 6B); las variables relacionadas entre sí aparecen agrupadas en diferentes colores; se muestra la matriz de componente rotado para los dos primeros componentes, que explican el 88% de la varianza total.

confinado), Tortoniense (de menor entidad; conglomerados y areniscas; semiconfinado). El sistema multicapa presenta interconexiones entre acuíferos, tanto naturales como debidas a sondeos deficientemente construidos, con una infiltración media estimada de 40 hm^3 $año^{-1}$ (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022b). Campo de Cartagena pertenece a la misma unidad hidrogeológica que Cabo Roig (070.053; Fig. 1; Tabla 1) y Triásico de Los Victorias (070.054; Fig. 1; Tabla 1), si bien las tres masas fueron separadas para facilitar la gestión administrativa (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022b). La recarga principal procede de la infiltración del agua de lluvia y de los retornos del riego provenientes de su área de captación, a la que se suman recargas laterales de escasa magnitud desde masas subterráneas colindantes (Fig. 5). La descarga se realiza por bombeos, fundamentalmente desde los acuíferos Andaluciense y Plioceno, y salidas laterales hacia el Mar Menor y el mar Mediterráneo a través del acuífero Cuaternario (Fig. 5; Confederación Hidrográfica del Segura, 2022b).

Los retornos de riego han provocado la subida del nivel freático del acuífero Cuaternario, dejándolo más expuesto a la lixiviación de nitrato (Tragsatec, 2019) y aumentando las descargas de agua ricas en nitrato al Mar Menor y al Mediterráneo (Fig.5). Se estima una acumulación de nitrato en el Cuaternario que alcanzaría 300.000 t (Tragsatec, 2019), con amplias zonas mostrando niveles de 100-300 mg L^{-1} y superiores (Fig. 2). Mientras tanto, los acuíferos inferiores están sobrexplotados por las extracciones para riego (muchas ilegales), de las que se saca agua de mala calidad que se trata en plantas desalobradoras cuyo concentrado alcanza la rambla del Albujón, principal entrada de agua al Mar Menor por la vía superficial (García et al., 2018; Tudela, 2021). El caudal del Albujón se nutre, además, del drenaje de los cultivos de regadío, de la escorrentía superficial tras las fuertes lluvias y, ocasionalmente, del vertido de estaciones depuradoras de aguas residuales insuficientemente tratadas (después de tormentas y en los meses estivales por el aumento de la población turística), con unas descargas a la laguna (desde el cauce principal y el efluente de drenaje anexo) estimadas en 27,4 hm^3 $año^{-1}$ que aportan 2.010 t $año^{-1}$ de N inorgánico disuelto y 178 t $año^{-1}$ de P reactivo soluble (Velasco et al.; 2006; incluyendo el flujo base y un muestreo después de fuertes lluvias). Se ha estimado una infiltración en torno a 40 hm^3 $año^{-1}$ desde el Cuaternario a los acuífero inferiores (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022b) que contribuye a su recarga, pero que también afecta a sus niveles de nitrato. Grupo Tragsa (2020) ha estimado descargas subterráneas desde el acuífero Cuaternario al Mar Menor comprendidas entre 5 y 10 hm^3 $año^{-1}$ (para condiciones climáticas de año seco y año muy húmedo), con unas cargas asociadas de nitrato de 950 y 1.880 t $año^{-1}$, respectivamente. Senent-Aparicio et al. (2021) estimaron descargas subterráneas del mismo orden de magnitud (en torno a 11 hm^3 $año^{-1}$), mientras que su estimación de los aportes a la laguna por la escorrentía superficial fue altamente variable, entre 8 y 202 hm^3 $año^{-1}$ (variabilidad asociada a la incertidumbre de los eventos de pluviometría extrema asociados a DANAs). En momentos puntuales de torrencialidad se han estimado descargas a la laguna por escorrentía superficial a través de las ramblas de 0,5-4,8 t $día^{-1}$ de nitrato (Tragsatec, 2019). La Asamblea Regional de Murcia (2020) alerta, además, de que los vertidos insuficientemente depurados de algunas estaciones de tratamiento aguas residuales pueden sufrir desbordamientos por efecto de las DANAs y alcanzar la laguna.

Las aguas subterráneas contaminadas que drenan al Mar Menor pertenecen a la denominada Zona 1 (Fig. 6A), el área contaminada por nitrato más extensa de la Demarcación. De las 5 masas subterráneas representadas en la Zona 1 (Tabla 4), la única que alcanza directamente al Mar Menor es Campo de Cartagena (070.052), a través su acuífero Cuaternario. Campo de Cartagena comparte unidad hidrogeológica con Cabo Roig (070.053) y Triásico de Los Victoria (070.054) (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022b) y recibe, además, recargas laterales de escasa magnitud desde Triásico de Carrascoy (070.055) y Sierra de Cartagena (070.063) (Fig. 5; Tabla 4). El territorio que constituye el área de captación superficial del Mar Menor corresponde a las 27 cuencas hidrológicas que drenan directamente a la laguna, cuencas nº 19 a 45 (1.224 km^2), de las que la rambla del Albujón (nº 25) es la más extensa (993 km^2). Sin embargo, si examinamos el área de captación de las aguas subterráneas que drenan al Mar Menor la superficie es algo más amplia, considerando que Campo de Cartagena comparte unidad hidrogeológica con Cabo Roig y Triásico de Los Victoria y que, además, Triásico de Carrascoy y Sierra de Cartagena pueden aportarle recargas laterales. Teniendo en cuenta estas interacciones, el área de captación de las aguas subterráneas que drenan al Mar Menor comprende las cuencas nº 5 a 55

(Fig. 9), con una extensión de 1.810 km^2. La buena noticia, si puede decirse así, es que el 90% de esta superficie (1.621 km^2) se encuentra teóricamente bajo la protección de ZVNs. Sin embargo, dado que la mayor parte de ese territorio fue designado ZVN hace 22 años (1.228 km^2; Tabla 2), la ausencia de mejoras significativas en los niveles de nitrato en la masa subterránea Campo de Cartagena (Tabla 2) no cabe atribuirla a designaciones incompletas o excesivamente recientes, sino más bien a la falta de aplicación o al fracaso de los programas de acción para la recuperación de la calidad del agua en las ZVNs (Tragsatec, 2019).

Conclusiones

No se han observado diferencias interanuales estadísticamente significativas en los niveles de nitrato de las masas de agua subterránea afectadas por contaminación de nitrato en la Demarcación Hidrológica del Segura durante el periodo 2010-2021, lo que sugiere que las ZVNs designadas en su territorio no parecen estar cumpliendo, por el momento, con las expectativas de reducir la contaminación. Así pues, como paso previo al reforzamiento de los programas de acción en las ZVNs, parece necesario evaluar la idoneidad de las 89 zonas designadas en la Demarcación mediante validaciones frente a un mapa de vulnerabilidad específica a la contaminación por nitrato y revisarlas, si procede. No obstante, debe concederse un margen temporal para la mejora en aquellas ZVNs de reciente designación de acuerdo a los tiempos de tránsito en los acuíferos afectados.

La orientación preferencial E, SE y S de los flujos superficial y subterráneo resultó coherente con la distribución de las zonas más afectadas por la contaminación a lo largo del área suroriental de la Demarcación, en territorios llanos o de escasa pendiente, cotas piezométricas bajas y, con frecuencia, flujos subterráneos convergentes. Tales resultados respaldan la idea que el nitrato puede ser transportado largas distancias, desde cotas de mayor elevación hasta las cotas más bajas, de acuerdo a la secuencia fuente-vía-receptor.

A partir del análisis espacial de la distribución del nitrato en las aguas subterráneas de la Demarcación del Segura para el año 2021 se estimó que el 20% de la superficie acuífera se encuentra contaminada por nitrato ($\geq$50 mg L^{-1}) y el 16% en situación de riesgo (25-49 mg L^{-1}). El 35% de las masas de agua subterráneas de la Demarcación presentó áreas contaminadas por nitrato, de las que el 64% mostraba un grado de afectación severo por su extensión. Las áreas afectadas fueron clasificadas en 11 zonas principales (bajo la denominación de Zonas 1, 2, 3 y 4.1-4.8) y se identificaron y tipificaron sus correspondientes áreas de captación.

La exploración, mediante ACP, de posibles relaciones entre variables ambientales que caracterizan las áreas de captación de las zonas contaminadas por nitrato y de otras zonas libres de contaminación, permitió explicar el 88% de la varianza total con los dos primeros componentes principales. El ACP evidenció la relación directa entre la extensión de las superficies contaminadas o en riesgo, y la agricultura intensiva de cultivos de herbáceos en regadío, cítricos y frutales. Estos tres grupos de cultivos son los que presentan los mayores excedentes anuales de N de la Demarcación. En contraposición, las áreas de montaña, con riqueza de bosques y muy escasa presencia agrícola, constituyen un elemento protector para los recursos hídricos frente a los procesos de contaminación por el nitrato procedente de fuentes difusas.

La situación de emergencia ecológica del Mar Menor es consecuencia de su grave estado de eutrofización derivado de la expansión de la agricultura intensiva y la cabaña porcina y de la presión urbano-turística, pero también del incumplimiento de la amplia normativa que ya existe para mejorar la sostenibilidad ambiental de su entorno. La masa de agua subterránea Campo de Cartagena (sistema multicapa que recibe los excedentes de N procedentes de la comarca de Campo de Cartagena) es la única masa que drena directamente al Mar Menor, y lo hace a través su acuífero Cuaternario que, además, ha aumentado las descargas debido al ascenso del nivel freático por los retornos de riego. La masa Campo de Cartagena comparte unidad hidrogeológica con Cabo Roig y Triásico de Los Victoria y recibe recargas laterales desde Triásico de Carrascoy y Sierra de Cartagena. Teniendo en cuenta estas interacciones, la extensión del área de captación de las aguas subterráneas que drenan al Mar Menor se estima en 1.810 km^2. El 90% de esta superficie se encuentra bajo la protección de ZVNs. Sin embargo, dado que la mayor parte de ese territorio fue designado ZVN hace 22 años, cabe atribuir la ausencia de mejoras en los niveles de nitrato de la masa subterránea Campo de Cartagena a la falta de aplicación o al fracaso de los programas de acción para la recuperación de la calidad del agua en las ZVNs.

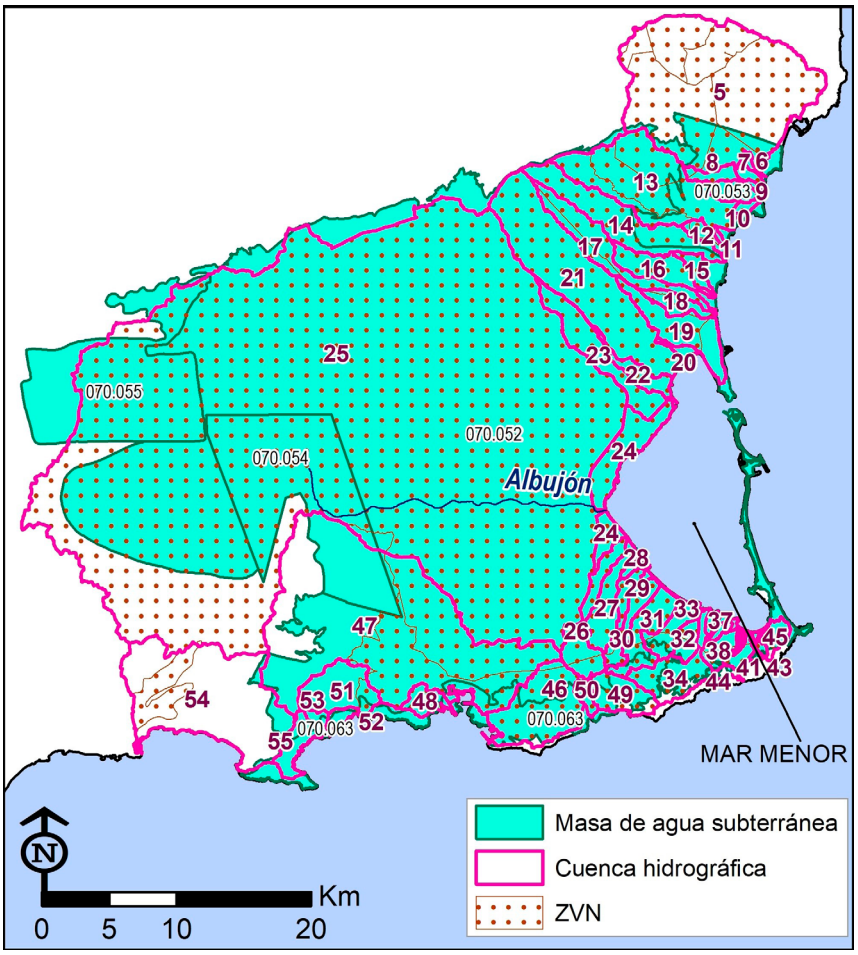


Figura 9.— Área potencial de captación de las aguas subterráneas que drenan al Mar Menor; se muestran las cuencas hidrográficas intervinientes y las ZVNs designadas en el territorio.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecemos el acceso libre y gratuito a los conjuntos de datos, cartografía básica y capas temáticas, facilitados por la Confederación Hidrográfica del Segura, el Instituto Geográfico Nacional, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, que nos ha permitido desarrollar esta investigación.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Las autoras de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo de investigación.

FINANCIACIÓN

Los datos de partida utilizados en el artículo son de acceso libre y gratuito, por lo que no ha sido necesaria ninguna financiación para el desarrollo del trabajo.

AUTORÍA CRediT

Mercedes Arauzo: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Recursos, Software, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición. **María Valladolid**: Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Recursos, Software, Validación, Visualización, Redacción – revisión y edición. **Delia M. Andries**: Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Recursos, Software, Validación, Visualización, Redacción – revisión y edición.

Referencias

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. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.139

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 Science*, 73, 8272-8286. https://doi.org/10.1007/s12665-014-3989-8

Arauzo, M., García, G. & Valladolid, M. (2019). Assessment of the risks of N-loss to groundwater from data on N-balance surplus in Spanish crops: An empirical basis to identify Nitrate Vulnerable Zones. *Science of the Total Environment*, 696, 133713. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133713

Arauzo, M., García, G. & Valladolid, M. (2020). Cartografía de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por nitratos de fuentes difusas en la cuenca del río Ebro (N.E. de España). *Estudios Geológicos*, 76, e132. https://doi.org/10.3989/egeol.43868.586

Arauzo, M., Valladolid, M., García, G. & Andries, D.M. (2022). N and P behaviour in alluvial aquifers and in the soil solution of their catchment areas: How land use and the physical environment contribute to diffuse pollution. *Science of the Total Environment*, 804, 150056. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150056

Asamblea Regional de Murcia (2019a, October 19). *Decreto 259/2019, de 10 de octubre, de declaración de Zonas Especiales de Conservación (ZEC), y de aprobación del Plan de gestión integral de los espacios protegidos del Mar Menor y la franja litoral mediterránea de la Región de Murcia*. Suplemento nº 7 del BORM nº 242. https://www.borm.es/#/home/anuncio/19-10-2019/6450

Asamblea Región de Murcia (2019b, December 27). *Orden 23 de diciembre de 2019, de la Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente, por la que se acuerda la designación de nuevas zonas vulnerables a la contaminación por nitratos de origen agrario en la Región de Murcia, ampliación de las existentes y la determinación de la masa de agua costera del Mar Menor como masa de agua afectada, o en riesgo de estarlo, por la contaminación por nitratos de origen agrario*. BORM nº 298. https://www.borm.es/services/anuncio/ano/2019/numero/8097/pdf?id=782214

Asamblea Regional de Murcia (2020, August 17). *Ley 3/2020, de 27 de julio, de recuperación y protección del Mar Menor*. BOE nº 221, de 17 de agosto de 2020, páginas 70878 a 70952. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=-BOE-A-2020-9793

Confederación Hidrográfica del Segura (2020, April 9). *Descarga de cartografía en formato SHP*. Retrieved April 9, 2020, from https://www.chsegura.es/es/cuenca/cartografia/descarga-de-cartografia-en-formato-shp/

Confederación Hidrográfica del Segura (2022a, June 1). *Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura (revisión de tercer ciclo: 2022-2027). Memoria*. Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. Retrieved June 1, 2022, from https://www.chsegura.es/export/sites/chs/descargas/planificacionydma/planificacion21-27/docsdescarga/docplan2227Consolidado/01_MEMORIA/Memoria_PHDS_2022-27VCAD.pdf

Confederación Hidrográfica del Segura (2022b, June 1). *Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura (revisión de tercer ciclo: 2022-2027). Anejo 12. Caracterización de las masas de agua de la Demarcación Hidrográfica del Segura; 44 anejos de caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2027*. Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. Retrieved June 1, 2022, from https://www.chsegura.es/export/sites/chs/descargas/planificacionydma/planificacion21-27/docsdescarga/docplan2227Consolidado/A12_caracterizacion_masas_de_agua/Anejo_12_Caracterizacion_masas_agua.pdf

Confederación Hidrográfica del Segura (2022c, June 1). *Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura (revisión de tercer ciclo: 2022-2027). Anejo 2. Inventario de recursos hídricos*. Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. Retrieved June 1, 2022, from https://www.chsegura.es/export/sites/chs/descargas/planificacionydma/planificacion21-27/docsdescarga/docplan2227BOE/A02_inventario_de_recursos/ANEJO_02_Recursos_hidricos.pdf

Confederación Hidrográfica del Segura (2022d, June 1). *Redes de control de las masas de agua subterráneas*. Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. Retrieved June 1, 2022, from https://www.chsegura.es/es/

cuenca/redes-de-control/calidad-en-aguas-subterraneas/acceso-a-los-datos/

Confederación Hidrográfica del Segura (2022e, June 1). *Consulta de series de piezometría.* Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. Retrieved June 1, 2022, from https://www.chsegura.es/es/cuenca/redes-de-control/piezometria/series-piezometria/

Council of the European Communities (1991, December 31). *Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources*. Official Journal of the European Communities, L 375, Volume 34, 31 December 1991, Brussels. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:1991:375:TOC

Custodio, E. (2021). Concepts on groundwater resources. *Boletín Geológico y Minero,* 132, 1-2. https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.1-2.014

Datosclima (2022). *Datosclima.es -Base de datos Meteorológica-. Datos AEMET -Open Data -/ Precipitación-Sol* [Data set]. Retrieved June 1, 2022, from https://datosclima.es/Aemethistorico/Lluviasol.php

ESRI (2015). *ArcGIS Desktop: Release 10.3*. Environmental Systems Research Institute. Redlands, CA, USA. https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/main/get-started/whats-new-in-arcgis.htm

European Commission (2000). Nitrates Directive (91/676/EEC): *Status and trends of aquatic environment and agricultural practice. Development guide for Member States' reports*. Directorate-General for Environment, Publications Office, Brussels. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/396b9f67-4615-4b0a-818d-d487fff0f4c8

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*. Commission Staff Working Document, Brussels. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0683&from=FR

García, P.; Ibarra, A.D. & Sánchez, J.M. (2018). *La burbuja del regadío: el caso del Mar menor. Evolución de los regadíos en el entorno del Mar Menor. Campo de Cartagena 1977-2017*. WWF/Adena y ANSE. https://wwfes.awsassets.panda.org/downloads/informe_final_junio_2018_ed1_final_viernes.pdf

Grupo Tragsa (2020). *Modelo de flujo del Acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena [Memoria final. Cuantificación, control de la calidad y seguimiento piezométrico de la descarga de agua subterránea del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena al Mar Menor (clave: 07.831-0070/0411)]*. Grupo Tragsa & Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. https://www.chsegura.es/es/cuenca/mar-menor/

IBM Corp. (2020). *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 27.0*. Armonk, NY:IBM Corp. https://www.ibm.com/spss

IGN (2020, May 13). *Modelo Digital del Terreno - MDT25* [Raster map]. Instituto Geográfico Nacional, Madrid. Retrieved May 13, 2020, from http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp

INE (2022a, June 8). *Censo Agrario 2020. Explotaciones con instalaciones de riego al aire libre (excluido huertos para consumo propio) por tamaño de la explotación según SAU*. Retrieved June 8, 2022, from https://www.ine.es/dynt3/inebase/es/index.htm?padre=8585&capsel=8587

INE (2022b, June 8). *Censo Agrario 2020. Distribución general de la superficie agrícola utilizada (SAU)*. Retrieved June 8, 2022, from https://www.ine.es/dynt3/inebase/es/index.htm?padre=8585&capsel=8587

Machiwal, D., Jha, M.K., Singh, V.P. & Mohan, C. (2018). Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, 185, 901-927. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009

MAPAMA (2015). *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.

MAPAMA (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.

MAPAMA (2017). *Balance del nitrógeno en la agricultura española, año 2015*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría General Agricultura y Alimentación, Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios, Madrid.

MAPAMA (2018). *Balance del nitrógeno en la agricultura española, año 2016*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría General Agricultura y Alimentación, Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios, Madrid.

MAPAMA (2021). *Balance del nitrógeno en la agricultura española, año 2019*. 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 2000-10*. Escala 1:50.000. [Vectorial map]. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino de España, Madrid.

Martínez-Bastida, J.J., Arauzo, M. & Valladolid, M. (2010). Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in Central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeology Journal*, 18, 681-698. https://doi.org/10.1007/s10040-009-0549-5

MedECC (2020). *Resumen de MedECC 2020 para los responsables de la formulación de políticas. Cambio climático y ambiental en la cuenca mediterránea: situación actual y riesgos para el futuro. Primer informe de evaluación del Mediterráneo* (Cramer W, Marini, K. & Guiot, J., eds.). Unión para el Mediterráneo, Plan Bleu, PNUMA/PAM, Marsella, Francia. https://www.medecc.org/wp-content/uploads/2021/05/MedECC_MAR1_SPM_SPA.pdf

MITECO (2021). *Plan para la protección del borde litoral del Mar Menor (Murcia) (E.S.T. 2017-2021/104). Informe técnico para Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Centro de Estudios de Puertos y Costas. Clave CEDEX: 22-417-5-001. https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/22-417-5-001_plan-borde-litoral-mar-menor_informe_2021final002_tcm30-529506.pdf (acceso el 12 de noviembre de 2021)

MITECO (2022a, April 3). *Red de Control de Aguas Afectadas por Nitratos* [Vectorial map]. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. Retrieved April 3, 2022, from https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/red-control-estado-quimico.aspx

MITECO (2022b, April 3). *Zonas vulnerables a contaminación por nitratos (junio 2021)*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Retrieved April 3, 2022, from https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/zonas-vulnerables.aspx

Orellana-*Macías, J.M., Merchán D. & Causapé, J. (2020). Evolution and assessment of a nitrate vulnerable zone over 20 years: Gallocanta groundwater body (Spain). Hydrogeology Journal, 28, 2207-2221.* https://doi.org/10.1007/s10040-020-02184-0

Redfield, A.C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. American Scientist, 46, 205-221. https://www.jstor.org/stable/27827150?seq=1#metadata_info_tab_contents

Richard, A., Casagrande, M., Jeuffroy, M.H. & David, C. (2018). An innovative method to assess suitability of nitrate directive measures for farm management. *Land Use* Policy, 72, 389-401. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.059

RiegosIVIA (2022). *Datos meteorológicos* [Data set]. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Retrieved November 30, 2022, from http://riegos.ivia.es/datos-meteorologicos

Senent-Aparicio, J., Lopez-Ballesteros, A., Nielsen, A. & Trolle, D. (2021). A holistic approach for determining the hydrology of the Mar Menor coastal lagoon by combining hydrological & hydrodynamic models. *Journal of Hydrology*, 603, 127150. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127150

SIAM (2022). *Agrometeorología. Informes Agrometeorológicos. Informes Regionales. Año Hidrológico* [Data set]. Sistema de Información Agrario de Murcia. http://siam.imida.es/apex/f?p=101:7:1082078199533179

SIAR (2022a, November 30). *Servicio integral de asesoramiento al regante de Castilla- La Mancha. Datos meteorológicos* [Data set]. Universidad de Castilla-La Mancha. https://crea.uclm.es/siar/datosMeteorologicos

SIAR (2022b, November 29). *Consulta de Datos. Sistema de Información Agroclimática para el Regadío* [Data set]. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. https://eportal.mapa.gob.es/websiar/SeleccionParametrosMap.aspx?dst=1

Tragsatec (2019). *Análisis de soluciones para el vertido cero al Mar Menor proveniente del Campo de Cartagena* (clave: 07.803-0177/0411). Ministerio para la Transición ecológica. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/resumen_ejecutivo_tcm30-489391.pdf

Tudela, S. (2021, December 5). El juez muestra que empresas agrícolas aceleraron los vertidos al Mar Menor a pesar de la 'sopa verde'. *Datadista*. https://www.datadista.com/mar-menor/el-rastro-del-agua-el-juez-del-mar-menor-prueba-como-se-sustituyo-agua-del-trasvase-por-agua-de-pozo-altamente-contaminada/amp/

Velasco, J., Lloret, J., Millán, A., Marín, A., Barahona, J., Abellán, P. & Sánchez-Fernández, D. (2006). Nutrient and particulate inputs into the Mar Menor lagoon (SE Spain) from an intensive agricultural watershed. *Water, Air, and Soil Pollution*, 176, 37-56. https://doi.org/10.1007/s11270-006-2859-8

Worrall, F., Spencer, E. & Burt, T.P. (2009). The effectiveness of nitrate vulnerable zones form limiting surface water nitrate concentrations. *Journal of Hydrology*, 370, 21-28. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.036

Yaron, B., Calvet, R., Prost, R. & Prost, R. (1996). Soil Pollution: Processes and Dynamics. Springer–Verlag, Berlin.

Zahid, A., Hassan, M.Q. & Ahmed, K.M.U. (2015). Simulation of flowpaths and travel time of groundwater through arsenic-contaminated zone in the multi-layered aquifer system of Bengal Basin. *Environmental Earth Sciences*, 73, 979-919. https://doi.org/10.1007/s12665-014-3447-7