

# CIAS2024

del 25 al 27 de septiembre de 2024

La Coruña

## LIBRO DE RESÚMENES

J. Jaime Gómez-Hernández

Carolina Guardiola-Albert

Ricardo A. Juncosa Rivera

Editores

**Editores:**

J. Jaime Gómez-Hernández  
Carolina Guardiola-Albert  
Ricardo A. Juncosa Rivera

**Editorial:**

Asociación Internacional de Hidrogeólogos - Grupo Español  
ISBN: 978-84-128882-0-1

Esta obra está sujeta a la licencia de Creative Commons BY-NC-ND 4.0



El Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas (CIAS) celebró su quinta edición en La Coruña entre el 25 y el 27 de septiembre. Con más de un centenar de participantes, se habló de las aguas subterráneas, su problemática y su futuro. Este libro recoge los resúmenes de las casi noventa ponencias que allí se presentaron incluyendo tanto comunicaciones orales como pósteres.

J. Jaime Gómez-Hernández  
Carolina Guardiola-Albert  
Ricardo A. Juncosa Rivera  
Editores

## **Comité Organizador**

El comité organizador está formado por un comité local con miembros del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidade da Coruña y los miembros de la Junta Directiva del Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos.

### **Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidade da Coruña**

Ricardo A. Juncosa Rivera  
José Luis Cereijo Arango  
Jorge Delgado Martín  
Miguel Herbón Penabad  
Yan Li  
Francisco Padilla Benítez  
Gema Soriano Hoyuelos  
Rocío Barros Roel  
M<sup>a</sup> Carmen García García

### **Junta Directiva del Grupo Español de la AIH**

Carolina Guardiola Albert, presidenta, Instituto Geológico y Minero de España, CSIC  
Jaime Gómez Hernández, vicepresidente, Universitat Politècnica de València  
Ester Vilanova, secretaria, Amphos 21  
Concepción Pla, tesorera, Universidad de Alicante  
Josep Mas Pla, vocal, Universitat de Girona  
Esther Sánchez Sánchez, vocal, Canal de Isabel II  
Sergio Martos, vocal, Instituto Geológico y Minero de España, CSIC  
Nuria Naranjo, vocal, Universidad de Málaga  
Bartolomé Andreo Navarro, presidente anterior, Universidad de Málaga

## Comité Científico

Albert Folch Sancho	Universitat Politècnica de Catalunya
Albert Soler Gil	Universitat de Barcelona
Alfredo Pérez Paricio	Agència Catalana de l'Aigua
Alicia Sanz Prat	Universitat Politècnica de València
Ana Fernández Ayuso	Universidad Autónoma de Madrid
Ana Rebollo Baños	Tragsatec
Andrés González Quirós	British Geological Survey
Andrés Sahuquillo Herráiz	Real Academia de Ciencias
Ángela Vallejos Izquierdo	Universidad de Almería
Anna Menció Domingo	Universitat de Girona
António Chambel	Universidade de Évora
Antonio Pulido Bosch	Universidad de Almería
Antonio Vela Guzmán	Consejo de Seguridad Nuclear
Bartolomé Andreo Navarro	Universidad de Málaga
Carolina Guardiola Albert	Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
Cristina Valhondo González	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Eduardo Cassiraga	Universitat Politècnica de València
Enric Vázquez Suñé	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Ester Vilanova Muset	Amphos 21
Esther Sánchez Sánchez	Canal de Isabel II
Héctor Alonso Aguilera	Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
Helder I. Chaminé	Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Politécnico do Porto, Portugal
Iñaki Vadillo Pérez	Universidad de Málaga
Irene De Bustamante Gutiérrez	Universidad de Alcalá de Henares
Isabel Paiva	University of Coimbra
Javier Rodrigo Ilarri	Universitat Politècnica de València
Jorge Jódar Bermúdez	Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
Jorge Loredo Pérez	Universidad de Oviedo
José Angel Sánchez Navarro	Universidad de Zaragoza
José Miguel Andréu Rodes	Universidad de Alicante

Juan José Durán Balsero	Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
Jose Paulo Monteiro	Universidade do Algarve
José Virgilio Cruz	Universidade dos Açores
Josep Mas Plà	Universitat de Girona
Juan Antonio Barberá Fornell	Universidad de Málaga
Juan Antonio López Geta	Club del Agua Subterránea
Juan José Gómez Alday	Universidad Castilla La Mancha
Juan José Hidalgo	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Juan Vicente Giráldez Cervera	Universidad de Córdoba
Lucia di Stefano	UCM, Fundación Botín
Lurdes Martín Landa	Universitat Politècnica de Catalunya
M. Carmen Hidalgo Estévez	Universidad de Jaén
Manuel Olías Álvarez	Universidad de Huelva
Marco Dentz	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
María Almudena Ordóñez Alonso	Universidad de Oviedo
María del Mar García Alcaraz	Universidad Politécnica de Cartagena
Maria Elena Rodrigo Clavero	Universitat Politècnica de València
María Luisa Calvache Quesada	Universidad de Granada
María Paula Mendes	Técnico Lisboa
María Pool Ramírez	Amphos 21
Marisol Manzano Arellano	Universidad Politécnica de Cartagena
Matías Mudarra Martínez	Universidad de Málaga
Miguel Ángel Marazuela Calvo	Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
Miguel Rodríguez Rodríguez	Universidad Pablo de Olavide
Mireia Iglesias Carrera	Agència Catalana de l'Aigua
Natalia García Bravo	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas - CEDEX
Nuno Barreiras	Técnico Lisboa
Nuria Naranjo Fernández	Universidad de Málaga
Pedro Martínez Santos	Universidad Complutense de Madrid
Ricardo Juncosa Rivera	Universidad da Coruña
Rotman Criollo Manjarrez	Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, UIB-CSIC
Sergio Martos Rosillo	IGME-CSIC
Teresa Melo	Técnico Lisboa
Vanessa Almeida de Godoy	Universitat Politècnica de València
Vicente Navarro Gámir	Universidad de Castilla-La Mancha

Luis Moreno Merino Instituto Geológico y Minero de España - CSIC  
Sara Espinosa Martínez Centro Tecnológico del Agua CETAQUA  
Damián Sánchez Centro Tecnológico del Agua CETAQUA  
Sonia Valdivielso Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua  
- CSIC

## Organizan:



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



**Grupo de Ingeniería  
del Agua y del  
Medio Ambiente**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**Patrocinan:**



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



**Grupo de Ingeniería  
del Agua y del  
Medio Ambiente**

**sondeos  
martínez**



**testificación  
geofísica**

**AMPHOS<sup>21</sup>**

an **RSK** company



**COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS  
DE MINAS DEL NOROESTE DE ESPAÑA**



**GAIA**  
EXPLORACIÓN

**Patrocinan:**



**Colaboran:**



## Índice (por orden alfabético del título)

40 años de asesoramiento hidrogeológico del IGME en la Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra. ¿Para qué? .....	20
Actualización del modelo numérico de gestión del acuífero Almonte-Marismas (Doñana).....	22
Acuíferos costeros de la cuenca del Júcar: Análisis de la información existente, evolución hidroquímica, establecimiento de estándares ambientales y perspectivas de sostenibilidad .....	24
Airborne EM para hidrogeología: un estudio de caso de Portugal (Beja) .....	27
Almacenamiento y lavado de nitratos en zona no saturada: implicaciones en la gestión del agua subterránea en acuíferos de zonas agrícolas de la cuenda del Duero. Resultados preliminares .....	29
Análisis de la contaminación de aguas subterráneas por terbutilazina y desetil-terbutilazina en el acuífero de la Plana Sur de Valencia (España).....	31
Análisis de la movilización de fuentes de contaminación de solventes clorados en emplazamientos donde existen zonas de transición y acuitardos .....	33
Análisis de las componentes hidrológicas en el manto eólico litoral de Doñana con distintos escenarios climáticos .....	35
Análisis multicriterio para la determinación de alternativas de mitigación de la subsidencia del terreno provocada por la extracción de aguas subterráneas ....	37
Aplicación web para el acceso al histórico de medidas de precipitación de la AEMET y a las medidas de piezometría en la Península Ibérica y Baleares.....	39
Aplicaciones de la minería de datos en la estimación de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos .....	41
Aprovechamiento de aguas termales para uso lúdico. El caso del Parque de Teáns-Salvaterra de Miño (Pontevedra).....	43
Aproximación al balance hídrico del lago de Banyoles. Implicaciones en su explotación y preservación ambiental .....	45
Aspectos prácticos de la modelación del rebaje de nivel freático durante la excavación. Un caso de estudio.....	47
Atenuación natural de nitrato bajo dos relaciones acuífero-lago salado diferentes. El caso de las lagunas de Pétrola y Tírez-Peñahueca .....	49

Balance hídrico del Acuífero Centro Norte y estudio de factibilidad para el aprovechamiento del agua subterránea bombeada por el Edificio EPIQ para fines no potables en el cantón Quito, Ecuador .....	51
Caracterización de estériles de mina para protección de las aguas en la mina de Touro .....	53
Caracterización del acuífero de Los Pedroches (Córdoba) mediante la integración del conocimiento local .....	55
Caracterización hidrodinámica de la capa de alteración en los afloramientos de Peridotitas de Ronda (Andalucía, España).....	57
Caracterización preliminar del funcionamiento hídrico de la laguna de Torreguadiaro (provincia de Cádiz) .....	59
Caracterización y modelización hidrogeológica en proyecto de recarga gestionada de acuíferos con propuesta de mejora de diseño y de monitoreo...	61
Cartografía histórica inédita de los “Viajes de agua” de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos de Madrid .....	63
Condicionantes geológicos e hidrogeológicos de las Fuentes del río Mijares (Teruel). MASb Javalambre Oriental. Demarcación Hidrográfica del Júcar.....	64
Consecuencias de la sobreexplotación del acuífero Almonte-Marismas sobre el abastecimiento urbano. El caso de Almonte (Huelva) .....	66
Contaminación de aguas subterráneas por actividades industriales históricas en Cataluña .....	68
Contaminantes emergentes en acuíferos del Sur peninsular y otras zonas del planeta .....	70
Cuantificación de la descarga de agua subterránea a la rambla del Albuñón (cuenca del Mar Menor, Murcia) con trazadores químicos e isotópicos tras un evento de lluvia intensa en mayo de 2023.....	71
Definición de la mejor estrategia de remediación de un acuífero contaminado por compuestos clorados, aplicando un enfoque de múltiple actuación .....	73
Desarrollo de un modelo numérico con densidad variable para la gestión de aguas subterráneas en Laura, Atolón de Majuro, República de las Islas Marshall .....	74
Drenaje de la corta de Minas de Alquife, Granada .....	76

Efecto sobre la infiltración de distintas condiciones de saturación del suelo. Caso de estudio del humedal de Somolinos (Guadalajara, España) .....	78
Efectos de la explotación intensiva de agua subterránea en los acuíferos carbonáticos del entorno de la laguna de Fuente de Piedra.....	80
El acuífero de los manantiales de San Felices (Soria, Cordillera Ibérica).....	82
El acuífero de Sarrión (Teruel). Definición preliminar de sus límites según criterios estructurales, hidrodinámicos e hidroquímicos .....	84
El acuífero holoceno de la Plana de Valencia. Modelado y caracterización geológica para una planificación urbana eficiente.....	85
El agua en forma de vapor y su importancia para los recursos hídricos subterráneos en periodos de sequía.....	87
Agradecimientos: Estamos muy agradecidos a André Peters por proporcionar el filtro AWAT. Agradecemos el apoyo y la colaboración de la Estación Biológica de Doñana, la Reserva Biológica de Doñana y la administración del Parque Nacional de Doñana. La infraestructura ha sido cofinanciada por Fondos Europeos de Investigación (Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares y Equipamiento 2013, IGME13-1E-2113). .....	87
El origen del manantial sulfhídrico de Agreda (Cordillera Ibérica, Soria).....	89
El robo del agua en la cuenca del Segura. Diagnóstico y evolución de la superficie en regadío en situación de potencial ilegalidad en varias zonas de la demarcación hidrográfica.....	91
Ensayo piloto de mitigación de los eventos climáticos extremos mediante la promoción de la recarga de los acuíferos aluviales del río La Muga.....	93
Estimación de las fuentes de recarga en un acuífero urbano .....	96
Estudio de la distribución de la humedad en la zona no saturada en sistemas de recarga gestionada suelo-acuífero .....	98
Estudio de la subsidencia por sobreexplotación de acuíferos a escala nacional .....	100
Estudio de la variación estacional de una amplia gama de contaminantes de preocupación emergente en recursos hídricos de la Cuenca del Guadalhorce (Sur de España): uso de isótopos estables de nitrato (d15N) y boro (d11B) para identificar fuentes de contam .....	102

Estudio de salinidad del agua subterránea en el acuífero detrítico costero Marbella-Estepona (Costa del Sol, provincia de Málaga) a partir de un ensayo de lixiviado tipo batch .....	104
Evaluación de la eficacia de barreras reactivas en la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes durante la recarga gestionada de acuíferos .....	106
Evaluación de la potencialidad de los canales de riego para la recarga gestionada de acuíferos en la zona Centro-Sur de Chile.....	108
Evaluación de los recursos hídricos para la Recarga Gestionada de Acuíferos en el acuífero interfluvial Duerna-Peces (León) mediante modelos semi-distribuidos de precipitación-aportación .....	110
Geoquímica de un acuífero carbonatado regulado por la oxidación de piritas: los Ojos del Keyles de Agreda (Cordillera Ibérica, Soria) .....	112
Hacia una gestión integral del agua: modelación numérica del balance hídrico en balsas de fosfoyesos.....	114
Hidrogeodía 2024 en La Valduerna (León), un ejemplo ancestral de uso conjunto de agua superficial y el agua subterránea.....	116
Hidrogeoecología de la antigua laguna de Añavieja (Cordillera Ibérica, Soria). .....	118
Hidrogeología 4.0 .....	119
Hidrogeología, estructura y distribución del permafrost, en los depósitos cuaternarios de Cabo Wellchness, Dundee Island (Península Antártica oriental) .....	120
Huella isotópica e hidroquímica de las aguas en la zona alta del río Llobregat .....	122
Huella isotópica y patrones de la precipitación en los Andes argentinos .....	123
Impacto de contaminantes de preocupación emergente en el acuífero carbonatado que rodea la ciudad de Mérida (Yucatán, México) .....	125
Instrumentación de investigación para la estimación de la recarga en el acuífero de Doñana. Análisis de datos obtenidos .....	127
Interpretación mediante técnicas estadísticas: principal component analysis (PCA) y hierarchical cluster analysis (HC) .....	129
Investigación analítica exploratoria para la determinación de la afección a las aguas subterráneas provocada por el empleo de residuos inertes como relleno en la restauración de una explotación de áridos .....	131

La coherencia InSAR en la detección y la cartografía de transporte torrencial de sedimentos en zonas áridas .....	133
La descarga submarina de aguas subterráneas a diferentes escalas temporales y espaciales: caracterización multidisciplinar y multimétodo.....	135
La figura del hidrogeólogo residente. Aplicación práctica en una explotación minera .....	137
La recarga de acuíferos con agua regenerada para hacer frente a la sequía a corto plazo y a la sostenibilidad a largo plazo. ....	139
Las zayas de la Valduerna, un sistema ancestral de uso conjunto de agua superficial-agua subterránea replicable en las principales zonas de riego españolas.....	141
LIFE REMAR, renaturalización del efluente de la EDAR de Cambrils con la recarga gestionada de acuíferos .....	143
Manual básico sobre el uso de datos InSAR para medir desplazamientos de la superficie del terreno .....	145
Metodología de Estimación de Caudales Objetivo para Desagüado de Mina...	147
Métodos geofísicos electromagnéticos para el seguimiento de la dinámica del agua subterránea en entornos costeros .....	149
Migración de contaminantes emergentes en el entorno río-acuífero de la cuenca del Onyar (Girona).....	151
Mitigación de drenajes ácidos en el antiguo depósito de estériles del entorno minero de Touro.....	153
Modelación de la contaminación del suelo por fugas de tanques subterráneos de combustible. Aplicación a una futura estación de servicio en Barranquilla (Colombia) .....	155
Modelación estocástica del transporte y retención de bacterias durante la recarga artificial de acuíferos .....	156
Modelación hidrogeológica del núcleo del salar de Atacama (Chile) considerando los efectos del cambio climático .....	158
Modelación numérica de flujo del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena .....	159
Modelación numérica del acuífero interfluvial Peces-Duerna (León) .....	161

Modelación numérica en zona no saturada de la contaminación por hidrocarburos procedentes de la fuga de tanques subterráneos de combustible en Bahía Blanca (Argentina) .....	162
Modelación numérica integral de la hidrología de la cuenca lagunar intermareal de La Paz, Baja California Sur, México .....	164
Modelización multifísica de una cobertura vegetal sobre la zona de almacenamiento de residuos de baja y media actividad .....	166
Modelo de flujo de agua subterránea del sistema de acuíferos de la Mancha Oriental (MODOS) .....	167
Modelo hidrogeológico conceptual y numérico del acuífero fluviovolcánico de La Garrotxa (Girona) .....	169
Modelo térmico e hidroquímico del perfil vertical del lago de Meirama.....	171
Monitorización hidrológica de las lagunas peridunares de la Reserva Biológica de Doñana: Análisis de la evolución de la temperatura del agua 2015-2024 .....	173
Nuevos sistemas de humedales construidos basados en procesos bioelectroquímicos para reducir la contaminación de aguas superficiales y subterráneas .....	175
Presencia de contaminantes emergentes en el acuífero del Campo de Cartagena (Murcia).....	177
Presencia, distribución y concentración de contaminantes de preocupación emergente en los acuíferos volcánicos de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica .....	179
Propuesta de protocolo de emergencia ante accidentes de personas en pozos de captación de agua subterránea .....	181
Propuesta de una barrera hidráulica como medida correctora de los efectos que tendría una marina deportiva sobre el humedal de la Charca de Suárez (Motril, Granada).....	183
Proyecto LIFE REMAR, Tratamiento Suelo-Acuífero con barreras reactivas a escala piloto para renaturalizar aguas residuales tratadas .....	185
Proyecto UPWATER: Entender los procesos de contaminación de las aguas subterráneas para proteger y mejorar su calidad .....	187
Recarga gestionada de acuíferos carbonatados en Menorca .....	189

Redes neuronales informadas por la física para la simulación de flujo transitorio en un acuífero libre .....	191
Relevancia de la identificación de episodios de contaminación puntual en la gestión de las masas de aguas subterráneas.....	193
Remediación de acuitardos contaminados por compuestos orgánicos persistentes y emergentes mediante fracturas bioactivas para la minimización del efecto rebote en la descontaminación de acuíferos .....	195
Resultados preliminares y operación de prototipo MAR en Medina del Campo .....	197
Simulaciones numéricas relativas a sistemas de inyección y recuperación de agua en el acuífero de la Vall Baixa y Delta del Llobregat.....	199
Soluciones creativas para el control de surgencias y filtraciones de agua subterránea en construcciones de excavaciones profundas.....	201
Transporte a escala de poro: Mezcla, deformación y caos .....	203
Tratamiento de drenajes ácidos de mina en Touro.....	204
Trazabilidad de los procesos biogeoquímicos en un estuario subterráneo: Aplicación de enfoques multidisciplinares integrando isótopos de nitrógeno, hidrogeoquímica y análisis estadísticos .....	205
Un nuevo modelo geológico para los acuíferos de la masa de agua subterránea Campo de Cartagena. Implicaciones en la relación del acuífero libre con la laguna costera del Mar Menor (SE España) .....	207
Un viaje interdisciplinario a través de las Peridotitas de Ronda (Andalucía, España): desde la serpentización hasta la búsqueda de vida extraterrestre y sus aplicaciones energéticas .....	210
Uso del machine learning en la toma de decisiones en el dewatering de una mina a cielo abierto.....	212
Utilización de aguas subterráneas urbanas para preservar la biodiversidad en estanques urbanos naturalizados. Caso de estudio en Barcelona (España).....	214
Viabilidad del uso de subproductos de la industria agroalimentaria para inducir la desnitrificación en el acuífero del Campo de Cartagena .....	216
WaterpyBal: plataforma en código abierto para la cuantificación espacio-temporal del balance hídrico en el suelo .....	218
Índice de autores.....	219



## 40 años de asesoramiento hidrogeológico del IGME en la Reserva Natural Laguna de Fuente de Piedra. ¿Para qué?

Sergio Martos Rosillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España - Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

Palabras clave: Humedal, Uso intensivo, Ecohidrología, Espacio Natural

**Resumen.** La Reserva Natural de Fuente de Piedra, situada en término municipal de Fuente de Piedra, en la provincia de Málaga, alberga un ecosistema acuático emblemático, siendo uno de los principales criaderos de flamencos a nivel europeo. En 1962, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza lo declara zona húmeda de especial interés y en 1983 entra en el listado de humedales de importancia internacional del Convenio Ramsar. Fue, en 1984, cuando el Parlamento Andaluz le da el reconocimiento de Reserva Integral y en 1989, cuando adquiere la categoría de Reserva Natural.

En el sistema hidrológico endorreico asociado a la Laguna de Fuente de Piedra, la ecohidrología, la ciencia que estudia, a escala de cuenca hidrológica/acuífero, cómo los procesos hidrológicos afectan a los ecológicos y viceversa, empieza a hacerse en los años setenta del siglo anterior. En esas fechas, especialistas en zoología, botánica, ecología e hidrogeología empiezan a trabajar juntos, con el objetivo común de mejorar el conocimiento de las complejas interrelaciones que se dan entre la biota y el agua.

En 1984, el IGME comienza a hacer informes anuales sobre el estado de los acuíferos asociados a la Laguna de Fuente de Piedra, informes en los que también se analizan la meteorología y la evolución de la lámina de la laguna. Este trabajo, realizado junto con el equipo humano de la Junta de Andalucía que trabaja en la Reserva, ha permitido que este humedal sea uno de los mejor conocidos, desde el punto de vista hidrogeológico, de España. Sin embargo, pese a su elevado conocimiento y pese a la especial labor de transferencia de los resultados de investigación a los gestores y tomadores de decisiones, la gestión hidrológica de esta cuenca endorreica deja mucho que desear. Los descensos de nivel piezométrico, como consecuencia de la explotación intensiva del agua subterránea, en algunos de los acuíferos que alimentaban a la laguna son alarmantes, la calidad del agua subterránea ha empeorado de forma notoria y los

hidroperiodos de la laguna se han visto modificados. En este trabajo se analizan los cambios hidrológicos acaecidos en la Reserva Natural durante los 40 últimos años, se señala las causas por las que se ha llegado a esta lamentable situación, se hacen algunas propuestas de mejora, y se discute sobre la repercusión que tiene la inacción de los organismos de planificación hidrológica en el estado de este tipo de humedales.

## Actualización del modelo numérico de gestión del acuífero Almonte-Marismas (Doñana)

Carmen Serrano Hidalgo<sup>1</sup>, Ana María Rebollo Baños<sup>1</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>2</sup>, José Manuel Gómez Fontalva<sup>2</sup>, Víctor Juan Cifuentes Sánchez<sup>3</sup>, David González Rojas<sup>3</sup>, Fernando Ruiz Bermudo<sup>2</sup>, José Antonio Serrano Reina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TRAGSATEC

<sup>2</sup>Instituto Geológico y Minero de España

<sup>3</sup>Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

Palabras clave: Doñana, Modelación, MODFLOW, Modelmuse

**Resumen.** El acuífero Almonte-Marismas está situado en el suroeste de España y se distribuye entre las demarcaciones hidrográficas del Guadalquivir (aproximadamente un 90 %) y del Tinto-Odiel-Piedras. Sus aguas juegan un papel fundamental en el mantenimiento de los ecosistemas del Espacio Natural de Doñana, así como en el soporte socioeconómico de las poblaciones situadas en sus inmediaciones. La vigente planificación hidrológica del Guadalquivir gestiona la parte del acuífero situada en esta demarcación a través de cinco masas de agua subterráneas (MASb), delimitadas según criterios hidrogeológicos y administrativos.

El Espacio Natural de Doñana fue declarado espacio RAMSAR en 1982 en virtud de la gran riqueza ecológica sustentada por la presencia de los humedales que posee. La magnífica biodiversidad de estos humedales se encuentra actualmente amenazada debido a la reducción significativa de los flujos hídricos, ocasionada por las crecientes demandas de agua y agravada por un contexto de disminución de las precipitaciones e incremento de las temperaturas. Es esencial abordar la cuantificación de los flujos hidrogeológicos existentes para comprender plenamente los impactos ambientales y socioeconómicos que se están produciendo.

La Oficina de Planificación Hidrológica (OPH) de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) es la responsable de diseñar e incorporar a la planificación hidrológica estrategias efectivas para la protección de los recursos hídricos de dicha demarcación hidrográfica. Para ello, se requiere una evaluación minuciosa de dichos recursos, que permita elaborar estrategias para asegurar tanto la continuidad de los ecosistemas de Doñana como la atención a las demandas en el marco de un desarrollo sostenible.

Una de las herramientas más eficaces para el apoyo a la gestión hídrica, es el modelo numérico de flujo del acuífero Almonte-Marismas elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) mediante el código MODFLOW utilizando la interfaz de Modelmuse. Este modelo ha ido evolucionando desde los años 80, y se ha actualizado en las últimas dos décadas en el marco de varios convenios de colaboración entre el IGME y la CHG. La última revisión que se presenta en esta comunicación ha sido realizada en la Oficina de Planificación Hidrológica de la CHG con el asesoramiento del IGME. Algunas de las mejoras implementadas son: redefinición de zonas de recarga y nueva estimación de la misma desde 1975 hasta 2021, la adaptación de los límites de las MASb a los del Plan Hidrológico vigente y la estimación más precisa y localizada de las extracciones en las zonas más intensamente explotadas del acuífero (entorno de El Rocío y sur de Villamanrique, fundamentalmente).

El objetivo principal del presente trabajo es reproducir el comportamiento de los niveles piezométricos y presentar los resultados del balance hídrico obtenidos con el uso del modelo actualizado. Asimismo, se expondrán los resultados obtenidos al simular la implantación de diferentes actuaciones propuestas en el actual Plan Hidrológico con el objetivo de comprobar la eficacia de tales medidas. Dichos escenarios se basan, principalmente, en considerar la reducción o eliminación de extracciones en determinadas zonas, así como la sustitución del uso de aguas subterráneas por superficiales.

Los resultados obtenidos en estos escenarios simulados, muestran una notable recuperación de los niveles piezométricos en zonas estratégicas como los conos de depresión del sur de Villamanrique, del Rocío y Matalascañas, entre otras. Además, destaca la efectividad del modelo matemático como un recurso valioso para respaldar la toma de decisiones en la gestión de las aguas subterráneas.

**Agradecimientos:** Este proyecto está financiado en el marco del Plan de recuperación, transformación y resiliencia de la Unión Europea NEXTGENERATION.

# Acuíferos costeros de la cuenca del Júcar: Análisis de la información existente, evolución hidroquímica, establecimiento de estándares ambientales y perspectivas de sostenibilidad

Juan Grima Olmedo<sup>1</sup>, Bruno J. Ballesteros Navarro<sup>1</sup>, José Antonio Domínguez Sánchez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>C.N. Instituto Geológico y Minero de España-CSIC

Palabras clave: valores naturales de fondo, valores modificados de fondo, tendencias

**Resumen.** En las últimas décadas, los acuíferos costeros de la cuenca del Júcar han sido testigos de un intenso desarrollo socioeconómico, asociado a una distribución característica de la población, concentrada en la zona costera. El aumento de las extracciones de agua subterránea asociado a dicho crecimiento ha provocado un deterioro de la calidad de sus recursos, lo que compromete el cumplimiento de los objetivos fijados en las Directivas Comunitarias. En el presente trabajo se examinan los datos de concentración de diferentes parámetros, esencialmente cloruros, nitratos y sulfatos, utilizados para la determinación del estado químico de las aguas subterráneas, en varias planas litorales situadas en el este de España. La información analizada se ha extraído del repositorio abierto de datos de la Confederación Hidrográfica del Júcar. El acceso se realiza a través del Sistema de Información del Agua de la CHJ. En concreto, se han analizado los datos correspondientes a la Plana de València Sur, Plana de Cenia, Plana de Vinaròs, Oliva - Pego, Plana de Castelló, Plana de Sagunto y Plana de València Norte).

Estos acuíferos comparten características geológicas e hidrogeológicas similares. En primer lugar, se proporciona una visión general del estado y calidad de las masas de agua subterránea investigadas. Igualmente, se facilitan metodologías genéricas para el desarrollo de indicadores de calidad y valores de concentración máxima. Considerando que la Comisión Europea ha iniciado a finales de 2021 un procedimiento contra España ante el tribunal de Justicia de la Unión Europea por incumplimiento de la Directiva de Nitratos, se hace urgente delimitar zonas en las cuales su concentración supere los límites establecidos, diferenciando entre Valores Naturales de Fondo (VNF) y Valores de Fondo Modificado por actividades antrópicas (VMF). El estadístico característico del primero es el percentil 50,

mientras que su rango de variación viene definido por los percentiles 2,3% y 97,7%, respectivamente. El VMF, en cambio, se define mediante los intervalos de confianza del percentil 50.

Para la determinación de uno y otro se ha realizado un proceso de preselección de valores. En el caso de los nitratos se ha establecido un umbral de 10 mg/L, basado en la literatura existente, mientras que dicho umbral se ha fijado en 2000mg/L para los sulfatos. Una vez realizada la preselección, se han obtenido los intervalos de confianza de los valores de fondo natural y modificados en ambos casos.

En cambio, la información proporcionada por los estadísticos anuales de concentración de cloruros se ha considerado insuficiente, por lo que se propone la utilización de métodos combinados que consideren índices de intrusión, ya que la concentración en agua subterránea depende de factores como el grado de explotación y distancia a la costa, además de los propiamente hidrogeológicos.

Con objeto de obtener una visión de conjunto de la influencia de la precipitación sobre los valores medios de concentración en cada masa de agua subterránea (MASub), se ha evaluado la precipitación media anual en cada una de ellas a partir de los datos de precipitación diaria acumulada en rejilla de 5 km para la totalidad del territorio nacional proporcionados por la AEMET. Para ello se han seleccionado los nodos existentes en los acuíferos analizados y se ha hallado la mediana de las precipitaciones anuales.

Para el análisis de tendencias en los valores de concentración, se han utilizado métodos no paramétricos, ya que los análisis estadísticos realizados proporcionan p-valores inferiores a 0.05 en los tests de bondad de ajuste a las distribuciones paramétricas más ampliamente utilizadas (normal, lognormal y gamma). Por ello, los datos se han analizado mediante la prueba de tendencia de Mann-Kendall. La cuantificación de la pendiente se ha realizado mediante el estimador de Theil-Sen. Aunque este último es un estimador robusto, no considera cambios abruptos en la tendencia de las series o variaciones cíclicas, por lo que se ha utilizado un modelo Bayesiano para realizar la inferencia. Con ello se han detectado tanto los puntos en los que se producen cambios en la tendencia de la serie como su probabilidad asociada.

Por otra parte, la representación en un sistema de información geográfica de las estaciones de control en las que se han producido cambios estadísticamente significativos ha permitido delimitar las zonas en las que se produce un empeoramiento (o una mejora), lo que puede contribuir a definir las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos o sulfatos. La consideración de todos estos factores permite evaluar su sostenibilidad ambiental mediante la

determinación del impacto de los programas de medidas y la gestión efectiva de los métodos de información y comunicación con los actores implicados.

En conclusión, a pesar de las limitaciones inherentes a las generalizaciones efectuadas, se puede afirmar que los indicadores propuestos, basados en la elaboración de estadísticos anuales, en concreto las medianas, pueden proporcionar una visión global de la calidad del agua subterránea, así como de su evolución.

## Airborne EM para hidrogeología: un estudio de caso de Portugal (Beja)

Andrea Viezzoli<sup>1</sup>, Antonio Menghini<sup>2</sup>, Silvia Aragon<sup>2</sup>, Isla Fernández<sup>2</sup>, Ronald Barcala<sup>2</sup>, Joel Zeferino<sup>3</sup>, Ana Patricia Jesus<sup>4</sup>, Bruno Bartolomeu<sup>4</sup>, Rosario Carvalho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*EMergo s.r.l.*

<sup>2</sup>*Gaia Exploracion S.L.*

<sup>3</sup>*Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia*

<sup>4</sup>*Instituto Dom Luiz (IDL), Universidade de Lisboa*

Palabras clave: Airborne EM, Geofísica

**Resumen.** El Electromagnetismo Aerotransportado (AEM) se ha convertido en un instrumento válido para la hidrogeología, ya que es capaz de explorar grandes áreas (a escala de cuenca hidrográfica) con gran detalle, en poco tiempo y a un coste relativamente bajo. Este estudio de caso se refiere a un área en Portugal (Beja Layered Gabbroic Sequence- LGS) que fue investigada mediante el sistema HeliTem (de Xcalibur), en el marco de un proyecto europeo (Semacret). Aunque el proyecto está más centrado en la exploración minera, el análisis de los resultados del modelado AEM ha sugerido una aplicación relevante para la Hidrogeología. El sistema acuífero de Beja se desarrolla en la parte poco profunda, alterada y fracturada del gabbro. Tiene un espesor medio de 24 m, 10 m en la zona alterada y 14 m en la zona fracturada, situando la base del acuífero (zona compacta) a unos 26 m de profundidad. La masa de agua se presenta, en general, como un acuífero libre, relativamente somero, donde el nivel piezométrico depende fuertemente del modelo topográfico. Todas estas características exigen una resolución superficial mejorada y un tratamiento avanzado de los datos. Esto implica el uso de un sistema de alto rendimiento, capaz de muestrear datos con gran detalle, y un procedimiento preciso que debe considerar el desacoplamiento de datos (debido a varias infraestructuras), la evaluación tardía del ruido y una rutina de inversión dedicada. El sistema HeliTem permitió la adquisición de datos en tiempos muy tempranos (20 microsec), correspondiente a unos pocos metros de profundidad, y una elevada relación señal/ruido, lo que le permitió alcanzar una profundidad de investigación de unos 300-400 m. Además, el flujo de trabajo de procesamiento avanzado fue capaz de proporcionar un modelado correcto de la resistividad, teniendo en cuenta también la distorsión de los datos debida a los efectos de polarización inducida. Estos últimos son probablemente causados por

el relleno arcilloso del sistema de fracturas del gabra alterado, que se caracteriza por una alta conductividad: representa la sección de baja permeabilidad en la parte superior del acuífero freático fracturado y fue debidamente resuelto en toda la zona de estudio. Al cotejar esta información con los datos piezométricos, fue posible estimar el espesor del acuífero. La visión general proporcionada por la distribución 3D detallada de la resistividad puede constituir un soporte válido en la implementación de cualquier modelo hidrogeológico, hasta el modelo de flujo.

**Agradecimientos:** Cofinanciado por la Unión Europea (SEMCRET, Acuerdo de subvención n.º 101057741) y UKRI (UK Research and Innovation).

# Almacenamiento y lavado de nitratos en zona no saturada: implicaciones en la gestión del agua subterránea en acuíferos de zonas agrícolas de la cuenda del Duero. Resultados preliminares

Luis Moreno Merino<sup>1</sup>, Héctor Aguilera Alonso<sup>1</sup>, Olga García Menendez<sup>1</sup>, Mediavilla Laso Rosa<sup>1</sup>, de la Hera Portillo África<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto Geológico y Minero de España CN-IGME CSIC*

Palabras clave: Nitrato, Lixiviación, Agua Subterránea

**Resumen.** La política ambiental Europea (Directiva 91/676/CEE), intenta paliar el problema de la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas, mediante el “establecimiento de programas de acción de obligado cumplimiento”, entre otras acciones. Al desarrollar este aspecto las Confederaciones Hidrográficas han establecido en sus Planes Hidrológicos fechas objetivo para conseguir que las Masas de Agua Subterránea alcancen un buen estado químico. Sin embargo, la acumulación de nitrato en zona no saturada (ZNS), cuya lixiviación es muy lenta, puede hacer inviable alcanzar dichos objetivos temporales.

El trabajo que se presenta tiene por objetivo desarrollar modelos de almacenamiento y lixiviación de nitratos almacenados en ZNS tomando como base datos provenientes de sondeos perforados en zonas agrícolas, zonas sin uso y el lecho de lagunas en estado natural, situados en la masa de agua de Medina del Campo. Se ha perforado el primer sondeo y tomado muestras representativas, en tramos de un metro, desde la superficie hasta los 90 metros de profundidad. En cada muestra se ha analizado: contenido en humedad, nitrógeno total, nitratos, materia orgánica y fósforo total. Además se ha dividido la columna del sondeo en 15 tramos homogéneos que se están caracterizando desde un punto de vista físico (textura, porosidad, curvas de retención). El objetivo último es realizar un modelo de flujo y transporte de nitratos en la columna tomando como punto de partida sus características físicas, la distribución de nitrógeno actual, y diversos escenarios de recarga. Este modelo permitirá calcular tiempos de tránsito y con ello la repercusión de las acciones de restricción de aplicación de nitratos en superficie.

Los primeros resultados muestran una distribución muy irregular de la cantidad de nitrato almacenado, con picos en superficie (37 g/m<sup>3</sup>) a 24 metros de

profundidad ( $11,0 \text{ g/m}^3$ ) y a 43 m ( $8,8 \text{ g/m}^3$ ) siendo en el resto de la columna los contenidos relativamente homogéneos en el rango entre  $3 \text{ g/m}^3$  y  $6 \text{ g/m}^3$ . De forma general el contenido en nitrato desciende muy lentamente con la profundidad ( $0,022 \text{ g/m}^3/\text{m}$ ). No se ha encontrado correlación entre la cantidad de nitrato almacenado y el resto de las variables analizadas aunque es cierto que los dos principales picos de nitrógeno se sitúan muy próximos a los picos principales de fósforo total, desplazados hacia la superficie del terreno. Por último, se han encontrado valores inesperados en el contenido en materia orgánica que en la mayor parte de las muestras se sitúa entre el 1% y el 2%. En este momento está en estudio si se tratan de valores reales o ha habido algún problema analítico, parecen valores muy elevados, de ser correctos posibilitarían la aparición en profundidad de fenómenos de desnitrificación bacteriana.

En conclusión, como se ha visto, para planificar con objetivos temporales realistas la recuperación de la calidad química de los acuíferos contaminados por nitratos, es necesario tener en cuenta que en el sistema existe una gran cantidad de nitrato almacenado en la ZNS, y que este nitrato seguirá percolando durante mucho tiempo aunque en superficie no se aplique abono en exceso. Los primeros resultados del estudio en detalle en una columna tomada en una masa agrícola en Cuenca del Duero corroboran la idea anterior y servirán de base a la construcción de un modelo y que los resultados tengan una aplicación directa en la masa seleccionada y sirvan como modelo metodológico.

**Agradecimientos:** Este trabajo se enmarca dentro de los resultados del proyecto LIFE-IP Duero. LIFE16 IPE/ES/000019 LIFEIP RBMP-DUERO. Water IP: Implementation of the river Duero basin management plan in the Central-South part of the River Duero Basin. <https://www.lifeduro.eu/>

# Análisis de la contaminación de aguas subterráneas por terbutilazina y desetil-terbutilazina en el acuífero de la Plana Sur de Valencia (España)

María Elena Rodrigo-Clavero<sup>1</sup>, Javier Rodrigo-Illarri<sup>1</sup>, Eduardo Cassiraga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universitat Politècnica de València*

Palabras clave: Pesticidas, Contaminación de las aguas subterráneas, Modelación matemática, Plana Sur de Valencia

**Resumen.** En el presente estudio se ha realizado el análisis de la contaminación del acuífero de la Plana Sur de Valencia mediante la aplicación del modelo PRZM (Pesticide Root Zone Model). El análisis ha incluido la modelación de la concentración de dos pesticidas (terbutilazina y desetil-terbutilazina) a partir de las concentraciones observadas en los seis pozos de monitorización pertenecientes a la red de control de calidad de aguas subterráneas de la Demarcación Hidrográfica del Júcar existentes en el acuífero donde estos pesticidas han sido analizados.

Para realizar la modelación se parte de los datos registrados en los pozos de la red de calidad de la Confederación Hidrográfica del Júcar. En la Plana Sur de Valencia se dispone de 6 pozos de los cuales en 5 de ellos se supera la concentración de desetil terbutilazina (valor máximo encontrado 0.3 µg/L el día 14/04/2015). La concentración de terbutilazina detectada siempre está por debajo del límite legal. En cuanto a la piezometría de la zona se han utilizado los resultados procedentes de un modelo de flujo desarrollado previamente con MODFLOW. Los valores de las variables climatológicas (precipitación y evapotranspiración) se han obtenido a partir de las bases de datos existentes en las estaciones de control climatológico más cercanas a cada uno de los pozos. La tipología de los cultivos se ha determinado a partir de la información sobre usos de suelo obtenida a partir de la base de datos SIOSE. Las dosis aplicadas se infieren a partir de las entrevistas realizadas a los agricultores que se recogen en la información del Ministerio de Agricultura "Estadística anual de consumo de productos fitosanitarios y Estadística quinquenal de utilización de productos fitosanitarios en la Agricultura". Sin embargo, los datos e información proporcionada en dicha documentación no son suficientes para determinar exactamente la dosis aplicada.

Por tanto, es objeto de calibración a partir de los escenarios planteados, manejando tres dosis de aplicación de la terbutilazina: 0.5, 0.6 y 0.8 kg/ha.

El análisis de sensibilidad de parámetros realizado ha permitido formular 54 escenarios de simulación en cada uno de los seis pozos analizados, variando el año en que se finaliza la aplicación de pesticida, la dosis aplicada y las características de la columna de suelo. Los resultados obtenidos muestran que las concentraciones de desetil-terbutilazina son habitualmente superiores a las de terbutilazina, al tratarse de un metabolito de ésta. En algunos de los pozos simulados y para escenarios de simulación específicos, estas concentraciones pueden llegar a superar el valor de referencia (0,1 µg/L) establecido por la legislación vigente.

Futuros trabajos desarrolladas por nuestro grupo de investigación se dirigen hacia la aplicación de técnicas geoestadísticas para la obtención de los mapas de vulnerabilidad del acuífero, integrando la totalidad de los resultados obtenidos.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido financiado por la Generalitat Valenciana a través de las subvenciones del Programa para la promoción de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en la Comunitat Valenciana (convocatoria del año 2021), apartado subvenciones para grupos de investigación consolidados.

## Análisis de la movilización de fuentes de contaminación de solventes clorados en emplazamientos donde existen zonas de transición y acuitardos

Alberto Millán Martos<sup>1</sup>, José María Carmona Pérez<sup>1</sup>, Jofre Herrero Ferran<sup>1</sup>, Patricia Cabello López<sup>1</sup>, Cristina Villanova De Benavent<sup>1</sup>, Magdalena Grifoll Ruiz<sup>1</sup>, Amparo Cortés Lucas<sup>1</sup>, Emilio Orejudo Ramírez<sup>2</sup>, Sergi Latres i Simó<sup>3</sup>, Diana Puigserver Cuerda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universitat de Barcelona (UB)

<sup>2</sup>Agència Catalana de l'Aigua (ACA)

<sup>3</sup>Agència de Residus de Catalunya (ARC)

**Resumen.** En las zonas de transición entre acuíferos y acuitardos basales, suelen acumularse líquidos orgánicos más densos que el agua (dense non-aqueous phase liquids, DNAPL). Estos actúan como fuentes de contaminación de compuestos como el percloroetileno (PCE). La existencia de niveles de baja conductividad hidráulica sobre estas acumulaciones, favorecen la difusión molecular de contaminantes hacia el interior de los niveles, prolongando su persistencia en el medio y convirtiéndolos en recalcitrantes.

Para estudiar la evolución de estas fuentes de contaminación, se analizaron datos históricos de un emplazamiento contaminado ubicado al sur de la población de Figueres (Cataluña, España). Este emplazamiento se sitúa en un complejo industrial sobre un acuífero de abanicos aluviales, donde se detectaron paleocanales de gravas bajo los cuales se localiza una zona de transición y un acuitardo basal de arenas finas y limos con intercalaciones de gravas finas. La contaminación afecta a todo el sistema acuífero-zona de transición y acuitardo, caracterizándose por su baja movilidad y descloración reductiva incompleta que favorece la acumulación de cis-dicloroetileno (cDCE).

La hipótesis de trabajo es que, en la zona de transición, la acumulación de compuestos orgánicos del grupo de los DNAPL dificulta enormemente la movilización de las fuentes de contaminación por atenuación natural. Esto, junto con la acumulación de los compuestos debido a la difusión molecular dentro de los acuitardos, contribuye al efecto rebote durante y después de las estrategias de remediación de acuíferos suprayacentes.

Para poder entender las vías de movilización de los contaminantes, se llevaron a cabo metodologías interdisciplinarias, incluyendo campañas de sondeos en los que se realizaron análisis de la distribución de contaminantes y estudios de microorganismos y minerales en el subsuelo. Además, se realizaron campañas de tomografía eléctrica y diagráfias en los sondeos, junto con muestreos de aguas subterráneas. Se analizaron los compuestos orgánicos volátiles (COV), especies redox sensibles y su composición isotópica y microorganismos. También se tuvieron en cuenta datos meteorológicos para comprender los mecanismos de incorporación de los contaminantes en la zona no saturada, permitiendo desarrollar un modelo conceptual y su modelación matemática.

Los resultados muestran que, durante periodos de elevadas precipitaciones, las concentraciones de cloroetenos, especialmente el PCE, aumentan debido al lavado piezométrico de acumulaciones de DNAPL en la zona no saturada. En la zona de transición, la movilización de la contaminación está condicionada por las condiciones redox del medio. Durante los meses de verano, predominan las condiciones reductoras, generando la mayor degradación del PCE, aunque parcial, acumulándose *cis*-dicloroetileno, metabolito más tóxico que el PCE. En las épocas de recarga, la movilización de *cis*-dicloroetileno aumenta debido a que, aunque la oxigenación del medio inhibe la descloración reductiva, al mismo tiempo aumentan los microorganismos descloradores oxidativos, que dan lugar a la mineralización total de los cloroetenos menos oxidados, *cis*-DCE y cloruro de vinilo. Se observó la presencia de contaminantes en el acuitardo basal fracturado, donde la migración por difusión molecular hacia la matriz adyacente indica que el acuitardo representa un gran almacén de contaminante.

Tras analizar los resultados, las principales conclusiones son que la atenuación natural permite degradar los contaminantes en la zona de transición y el acuitardo, pero de manera lenta e incompleta. A pesar de que los procesos de mineralización actúan en el acuitardo, la baja conductividad hidráulica dificulta el flujo advectivo, por lo que la difusión molecular toma protagonismo, especialmente cuando el acuífero se descontamina y se produce la retrodifusión, incorporando al medio tanto compuestos parentales como metabolitos.

# Análisis de las componentes hidrológicas en el manto eólico litoral de Doñana con distintos escenarios climáticos

Lorena Bermejo Santos<sup>1</sup>, Ricardo Juncosa Rivera<sup>2</sup>, Emma Gaitán Fernández<sup>3</sup>, Jaime Ribalaygua Batalla<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Universidad Rey Juan Carlos, Departamento de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica. Compañía General de Soporte a la Ingeniería (CGSi)*

<sup>2</sup>*Universidade da Coruña, Grupo de Ingeniería del agua y del Medio Ambiente (GEAMA)*

<sup>3</sup>*Fundación para la Investigación del Clima (FIC)*

Palabras clave: Humedal, Cambio global, Escenario climático

**Resumen.** Tal y como concluyen diversos autores, los humedales son ecosistemas especialmente vulnerables frente a los cambios climáticos y, sin embargo, han sido poco estudiados en el ámbito del cambio climático. Por este motivo, es necesaria la identificación de los humedales vulnerables al clima para su conservación y restauración a través de las pertinentes medidas de adaptación y mitigación.

Bajo estas premisas, se ha llevado a cabo un estudio de prognosis del clima en el futuro y de evaluación de la afección a un humedal. El humedal piloto seleccionado ha sido el Parque Nacional de Doñana, el humedal más importante de España y de todo el continente europeo, siendo la mayor reserva ecológica de Europa. En concreto el estudio se ha llevado en el Manto Eólico Litoral de Doñana, ya que la modelización requiere acotar a un área con los límites bien definidos.

En este trabajo se han empleado 10 modelos climáticos asociados al 6 Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). Los escenarios de concentración futura de Gases de Efecto Invernadero bajo los que se ha realizado la simulación de los modelos climáticos son los SSP (Shared Socioeconomic Pathways). En este trabajo se han establecido como escenarios principales los SSP1(2.6), SSP2(4.5), SSP3(7.0) y SSP5(8.5). El escenario SSP1-2.6 muestra un futuro en el que las emisiones globales de CO<sub>2</sub> se reducen drásticamente alcanzando el cero después de 2050, con unas temperaturas 1,8 grados más altas a finales de siglo. En el escenario SSP2-4.5 las emisiones de CO<sub>2</sub> se sitúan en torno a los niveles actuales antes de empezar a descender a mediados de siglo, sin llegar al cero neto hasta 2100, y en el que aumentan 2,7 grados las temperaturas a finales de siglo. La trayectoria del

escenario SSP3-7.0 muestra que las emisiones de CO<sub>2</sub> se duplican respecto a los niveles actuales para finales de siglo, y la temperatura media aumenta en 3,6 grados. Por último, el escenario SSP5-8.5 muestra un futuro a evitar, en el que los niveles actuales de emisiones de CO<sub>2</sub> se duplican en 2050 y para el año 2100 la temperatura media mundial ha subido 4,4 grados.

Los modelos simulados muestran un aumento promedio de la precipitación en los escenarios SSP1-2.6 (2,8%) y SSP2-4.5 (0,8%), mientras que se proyecta una disminución en los escenarios SSP3.7.0 (-4,4%) y SSP5-8.5 (-6,5%). En la variable recarga se estiman incrementos en todos los escenarios: los escenarios SSP1-2.6 y SSP2-4.5 los incrementos son mayores (14,1% y 11,7% respectivamente); el escenario SSP3.7.0 y SSP5-8.5 presentan incrementos menores en términos porcentuales (5,1% y 2% respectivamente). Las tendencias estacionales de la ETP media mensual muestran incrementos en los cuatro escenarios, siendo más pronunciados en SSP5-8.5 (30,3%). La tendencia de la ETR es principalmente a la baja, calculándose unos descensos en términos porcentuales del -12%. El nivel piezométrico alcanza sus máximos en el tránsito del invierno a la época primaveral, con cierta inercia a la componente lluvia, esperando un aumento del 1% en esta variable. La descarga hacia el arroyo de la Rocina y el océano presenta sus máximos en la época invernal, indistintamente del escenario y modelo de que se trate, aumentando en los escenarios SSP1-2.6 (14,0%) y SSP2-4.5 (11,9%). La componente media mensual de la intercepción presenta sus máximos en la época otoñal, indistintamente del escenario y modelo de que se trate, incrementándose en los escenarios SSP1-2.6 (2,2%) y SSP2-4.5 (0,2%) y descendiendo en los escenarios SSP3.7.0 (-4,8%) y SSP5-8.5 (-7%).

**Agradecimientos:** Agradecer la subvención otorgada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico dentro de la “Línea A” para el desarrollo de actividades de interés general consideradas de interés social, en el ámbito de la investigación científica y técnica y protección al medio ambiente en materias de competencia estatal.

# Análisis multicriterio para la determinación de alternativas de mitigación de la subsidencia del terreno provocada por la extracción de aguas subterráneas

Concepción Pla<sup>1</sup>, Javier Valdés-Abellán<sup>1</sup>, María I. Navarro-Hernández<sup>1</sup>,  
Guadalupe Bru<sup>2</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>2</sup>, Roberto Tomás<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Alicante

<sup>2</sup>Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)

Palabras clave: proceso analítico jerárquico (AHP), explotación de acuíferos, hundimiento del terreno

**Resumen.** La extracción de agua subterránea de forma no controlada causa el descenso de los niveles piezométricos que en acuíferos fundamentalmente detríticos conlleva, en muchas ocasiones, la compactación de los sistemas acuíferos y el descenso de la superficie del terreno. Es decir, está directamente relacionada con la subsidencia del terreno. Para evitar esta subsidencia es crucial gestionar los recursos subterráneos mediante monitoreo continuo, evaluación de daños potenciales y análisis de costes-beneficios, para determinar las medidas de mitigación adecuadas. En este estudio, se propone y analiza la aplicación de un método de análisis multicriterio, específicamente la metodología AHP (Proceso Analítico Jerárquico), para evaluar alternativas de mitigación de la subsidencia. Este método involucra tres niveles: el primero incluye tres criterios (social, ambiental y económico-técnico), el segundo abarca nueve subcriterios agrupados bajo estos criterios, y el tercero presenta diez posibles alternativas de mitigación. Los criterios (y subcriterios) son: criterio social (subcriterios: concienciación de la población, impacto social sobre las infraestructuras e interrupción del suministro de agua urbano), criterio ambiental (subcriterios: conservación de ecosistemas, aumento del riesgo de inundaciones y sostenibilidad de recursos hídricos) y criterio económico-técnico (subcriterios: costes directos de ejecución, viabilidad técnica e impacto económico esperado). Por su parte, las diez alternativas de mitigación propuestas son: mejora del control legal de las extracciones de agua subterránea, utilización de aguas superficiales de otras regiones (trasvases), uso de agua reutilizada, uso de agua desalada, aumento de la eficiencia en el uso del agua, adquisición de derechos de explotación de aguas subterráneas, reestructuración de sectores económicos con alta demanda de agua, recarga

artificial de acuíferos, represurización de acuíferos y reubicación de pozos de bombeo. La metodología AHP se aplicó mediante cuestionarios distribuidos entre diversos agentes (técnicos, agricultores, empresarios, población general, etc.), quienes asignaron ponderaciones y pesos a cada criterio y alternativa. En concreto, el cuestionario fue distribuido, en España (desde donde se obtuvieron 13 respuestas), a expertos relacionadas con la zona de estudio del acuífero Alto Guadalentín (Murcia). Los resultados mostraron que la medida más importante para mitigar la subsidencia es la mejora del control legal de las extracciones de agua subterránea (12%), seguida por el aumento de la eficiencia en el uso del agua (11.9%) y el uso de agua reutilizada (11.2%). Las menos importantes fueron el trasvase de aguas superficiales (9.0%), la recarga artificial (8.7%) y la represurización de acuíferos (8.3%). Estos resultados pueden ayudar a gestores de recursos hídricos a implementar estrategias sostenibles para mitigar la subsidencia del terreno causada por la extracción de agua subterránea.

**Agradecimientos:** Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto RESERVOIR (Programa PRIMA, financiado por la Unión Europea, no. 1924).

# Aplicación web para el acceso al histórico de medidas de precipitación de la AEMET y a las medidas de piezometría en la Península Ibérica y Baleares

César Husillos Rodríguez<sup>1</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>1</sup>, Marta Béjar Pizarro<sup>1</sup>, Héctor Aguilera Alonso<sup>1</sup>, Pablo Ezquerro<sup>1</sup>, Ángel Prieto Martín<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC)

Palabras clave: consulta web, precipitación, temperatura, piezometría

**Resumen.** Durante décadas numerosas instituciones han recopilado datos georreferenciados. Éstos se encuentran disponibles en una variedad de formatos que normalmente derivan de los procesos de captura y tratamiento, o que se consideran idóneos por dichas instituciones para su almacenamiento y explotación. Con frecuencia se presentan en archivos de texto con estructuras propias que no siguen un formato reconocible por las aplicaciones más utilizadas por la comunidad, lo que implica trabajo adicional para su procesado o el pago de licencias software.

Como primer ejemplo, mencionaremos los históricos de datos meteorológicos proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Incluyen medidas diarias de precipitación y temperatura desde el 1 de enero de 1951 hasta el 31 de diciembre de 2022, y espacialmente distribuidas en una malla homogénea de 5x5 km. Han sido obtenidas a partir de modelos climáticos en base a las mediciones registradas en estaciones meteorológicas repartidas por la Península Ibérica y Baleares. Otro ejemplo de interés viene dado por los datos de piezometría proporcionados por la Dirección General del Agua, dependiente del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MTERD). Se facilitan a través de una base de datos Microsoft Access. Consta de 3745 localizaciones de piezómetros. A diferencia de los datos meteorológicos, la distribución espacial es heterogénea en la Península y Baleares. Las medidas no son continuas en el tiempo y cubren diferentes intervalos según la ubicación. Las medidas más antiguas datan del 9 de octubre de 1965. Las últimas se registraron el 31 de diciembre de 2020.

En el marco del proyecto SARAI, surgió la necesidad de complementar la información obtenida en las diferentes campañas de toma de datos en puntos de

muestreo con medidas de precipitación, temperatura (máxima y mínima) y nivel piezométrico. Para lograrlo, se ha desarrollado una aplicación web que ahora se pone a disposición de la comunidad científica y técnica en la dirección web <https://sarai-data.igme.es/>. Dadas las coordenadas de un punto cualquiera y un intervalo temporal, permite a los usuarios obtener dicha información en un formato estándar CSV.

Con el objetivo de mejorar la aplicación, se facilitará el acceso a un formulario para recoger las opiniones de los usuarios. Entre los desarrollos planificados se incluye la implementación de una API en Python que permita la consulta de información mediante scripting.

**Agradecimientos:** Este trabajo es parte del proyecto SARAI del Ministerio de Ciencia e Innovación, con referencia PID2020-116540RB-C22 y financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033. Ha sido desarrollado dentro del subproyecto liderado por el Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME), como centro de investigación integrado en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

# Aplicaciones de la minería de datos en la estimación de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos

Marisela Uzcategui-Salazar<sup>1</sup>, Javier Lillo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de investigación en Ciencias de la Tierra TERRA. Universidad de los Andes, Venezuela

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Cambio Global de la Tierra y Geología Ambiental, Departamento de Biología, Geología, Física y Química Inorgánica. Universidad Rey Juan Carlos, España

Palabras clave: Aguas subterráneas, Vulnerabilidad a la contaminación, Minería de datos, K-medias

**Resumen.** La evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos es crucial para la gestión eficaz del agua subterránea. Ésta se refiere a la probabilidad de que contaminantes lleguen desde la superficie hasta el acuífero, dependiendo de las condiciones naturales del entorno. El uso de tecnologías avanzadas y herramientas de inteligencia artificial, como la minería de datos y algoritmos de aprendizaje automático, son cada vez más importantes en estudios ambientales, especialmente en la evaluación de la contaminación de aguas subterráneas. Uno de los algoritmos más populares en este contexto es K-medias, que agrupa datos en clusters de acuerdo con patrones observados. Este enfoque se aplicó al acuífero "Aluviales Jarama-Tajuña" en el centro de España, una zona con un alto desarrollo agrícola y significativa recarga de agua de riego. Inicialmente, se consideraron variables como la profundidad del nivel freático, la recarga neta, el uso del suelo, la permeabilidad vertical de la zona no saturada, el espesor del acuífero y la conductividad hidráulica del acuífero. A través de un análisis de componentes principales (ACP), se seleccionaron las variables más relevantes y no redundantes: profundidad del nivel freático (D), recarga neta (R) y uso del suelo (L). Estas variables fueron analizadas con la técnica de K-medias, generando tres grupos o clústers con diferentes niveles de vulnerabilidad: baja (42,1% del área), moderada (36,8%) y alta (21,1%). La metodología se validó correlacionando estos niveles con las concentraciones de nitratos en 23 pozos. El uso intensivo de fertilizantes en la región ha aumentado los niveles de nitratos, con el 22% de las muestras de agua superando el límite recomendado de 50 mg/L, ubicadas en áreas de alta vulnerabilidad. En la zona central del acuífero, las concentraciones de nitratos fueron moderadas (12-25 mg/L), coincidiendo con

áreas de vulnerabilidad moderada en el mapa de K-medias. Los resultados subrayan la importancia de seleccionar características específicas y relevantes para evitar resultados inexactos. Los resultados mostraron que el agrupamiento de K-medias obtuvo una correlación estadística de 48%, confirmando la ventaja de la aplicación de esta técnica de minería de datos, que representa un enfoque novedoso para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en acuíferos detríticos.

# Aprovechamiento de aguas termales para uso lúdico. El caso del Parque de Teáns-Salvaterra de Miño (Pontevedra)

Javier González Paz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Colegio de Ingenieros de Minas del Noroeste de España, ESMIN Ingeniería, SL*

Palabras clave: aguas termales

**Resumen.** El Parque de Teáns es un espacio de uso público promovido por la administración local de Salvaterra de Miño que, conocedora del potencial termal de las aguas de la zona, optó por ofrecer un espacio de ocio a sus habitantes al mismo tiempo que fomentar el turismo local mediante el aprovechamiento de sus recursos naturales.

El área asociada al río Miño y sus afluentes y, más en concreto las áreas limítrofes con Portugal, presentan unas condiciones propicias para el aprovechamiento de aguas termales. Existen numerosos vestigios y surgencias a lo largo de esta zona ligada al río. El empleo de este tipo de aguas estaba históricamente restringido a establecimientos balnearios, quedando fuera la posibilidad de su explotación con otros fines.

Esta situación sufrió un cambio con la entrada en vigor de la Ley 8/2019, de 23 de diciembre, de regulación del aprovechamiento lúdico de las aguas termales de Galicia. Esta norma permite el uso lúdico de las aguas declaradas como termales, fuera del uso terapéutico de balneario.

En el Concello de Salvaterra de Miño existían importantes indicios de presencia de aguas termales a altas temperaturas por lo que, tras un periodo de investigación sobre la geología del entorno y las evidencias de otros aprovechamientos dieron lugar a la selección de varios puntos de ejecución de sondeos de investigación. Tras los resultados positivos se realizó la ejecución de varios pozos, captándose varios flujos que dieron lugar a la creación del primer espacio lúdico de aprovechamiento de aguas termales en la comunidad de Galicia.

Las terrazas aluviales asociadas al cauce del río Miño supusieron un importante reto en la ejecución de dichos pozos, ya que se buscaba alcanzar las profundidades donde circulaban los flujos de aguas termales y, a su vez, independizar del aporte de aguas freáticas frías para evitar que pudieran mezclarse.

Una vez captadas las aguas se inició el proceso de declaración de la condición termal de las mismas. Para ello se realizó un estudio de la composición mineralógica y se comprobó su estabilidad en el tiempo. Esto, además, verificó que los pozos habían sido ejecutados de forma correcta.

Paralelamente, y de acuerdo con la normativa vigente, fue preciso diseñar y construir las instalaciones para el aprovechamiento lúdico. Era necesario asegurar, mediante un correcto diseño de los vasos termales, la circulación continua y la renovación completa del agua en cada uno de los vasos termales y todo ello en un corto periodo de tiempo, de forma que permitiera garantizar la salubridad de la instalación y las condiciones termales de las aguas.

Por último, se elaboró un completo protocolo de funcionamiento del complejo termal, con las normas de uso, planes de control y limpieza de las instalaciones y el plan de control de la calidad de las aguas, así como el correspondiente estudio económico, como gestión pública, del espacio lúdico termal.

El proceso completo ha permitido la apertura del primer establecimiento de aprovechamiento de aguas termales como uso lúdico de Galicia, obteniéndose todas las autorizaciones necesarias, y sirviendo de referencia para la elaboración de guías sobre el funcionamiento y medidas de autocontrol de los espacios lúdicos.

# Aproximación al balance hídrico del lago de Banyoles. Implicaciones en su explotación y preservación ambiental

David Brusi<sup>1</sup>, Josep Mas-Pla<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Grup de Recerca Geocamb-GAiA, Universitat de Girona*

<sup>2</sup>*Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA) / Universitat de Girona.*

Palabras clave: Lago de Banyoles, Sistema hidrogeológico Banyoles - Alta Garrotxa, Hidrogeología cárstica

**Resumen.** El sistema hidrogeológico Alta Garrotxa–Banyoles constituye un ejemplo de acuífero cárstico desarrollado en unidades calizas y evaporíticas, cuyo elemento geomorfológico más relevante es el lago de Banyoles. En los últimos 70 años, las extracciones del propio lago se han utilizado para el abastecimiento municipal. Un sondeo de control piezométrico realizado en 2008 ha evidenciado el potencial del acuífero confinado en los niveles calizos eocénicos con recursos de mejor calidad, dado que la concentración de sulfato es inferior a la obtenida directamente del lago. Por este motivo, este estudio presenta una aproximación al balance hídrico de este sistema hidrogeológico y aporta una revisión del modelo hidrogeológico actual, propuesto por M. Sanz (1981, Tesis Doctoral, UAB), con la finalidad de evaluar las posibilidades de aprovechamiento de este acuífero confinado profundo.

El balance hídrico realizado se basa en las cuantificaciones de los distintos componentes del ciclo hidrológico realizadas en distintas campañas de investigación, evidenciando la ausencia de un registro de datos por parte de la administración que permita una evaluación más detallada de la hidrodinámica del sistema. A partir de los datos disponibles, se estima que los recursos anuales disponibles asociados a la recarga en la Alta Garrotxa son de 82,6 hm<sup>3</sup>, considerando la superficie de las cuencas de los ríos Llierca y Borró. Los recursos hidrológicos anuales de la cuenca hidrográfica local circundando el lago son de 2,4 hm<sup>3</sup>. En función de los diferentes componentes del balance hídrico: precipitación directa a la superficie del lago, la evaporación desde su superficie más la de las lagunas artificiales, las oscilaciones de nivel en el vaso lacustre, el caudal entrante y saliente del lago y el volumen de las extracciones, se calcula que el flujo subterráneo profundo de entrada al vaso lacustre es de unos 14,7 hm<sup>3</sup>/año. Las extracciones para abastecimiento de la ciudad de Banyoles y otros municipios limítrofes se estiman en 2,5 hm<sup>3</sup> (datos de 2020), habiéndose

calculado que el flujo artesiano de la nueva captación puede superar este valor en ausencia de bombeo activo.

Los efectos del cambio climático en los recursos hídricos valorados para el horizonte 2050 indican que los recursos en la Alta Garrotxa serán un 12% inferior a los actuales y en la zona de Banyoles, un 24% inferiores. Más que estas predicciones a largo plazo, la presión sobre la explotación del sistema estará asociada a los periodos de sequía puntuales, los cuales se ha producido con periodicidad de entre 5 y 10 años en las últimas décadas. En base a los escenarios climáticos, se considera que la explotación de los recursos subterráneos del sistema hidrogeológico que alimenta el lago de Banyoles podrá ser compatible con la preservación de su equilibrio ecohidrológico y su calidad ambiental.

En esta comunicación se presentan los detalles del balance hídrico y las alternativas de explotación del acuífero en rocas calizas para el abastecimiento urbano, discutiéndose el modelo conceptual para este caso hidrogeológico y qué posibilidades de explotación existen, tomando como premisa que el bombeo de agua subterránea debe proteger los valores ambientales y ecológicos de este sistema lacustre y adaptarse a los escenarios climáticos futuros.

**Agradecimientos:** Financiación: Aigües de Banyoles, SAU

# Aspectos prácticos de la modelación del rebaje de nivel freático durante la excavación. Un caso de estudio

María Pool<sup>1</sup>, Diego Sampietro<sup>1</sup>, Jordi Guimerà<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Amphos 21 Consulting SL*

Palabras clave: Rebaje nivel freático, Obras excavación, Modelización numérica

**Resumen.** El rebaje del nivel freático durante la excavación (“dewatering”) es una práctica común en proyectos de construcción e ingeniería civil para reducir el nivel temporalmente, permitiendo condiciones seguras y secas debajo de la superficie de trabajo. Existen varias cuestiones y consideraciones asociadas con el rebaje como son (1) Impacto ambiental (2) Subsistencia (3) Control y regulación (4) Consumo energético (5) Movilización de contaminantes (6) Prácticas sostenibles (7) Retrasos en la construcción: una planificación inadecuada o las entradas inesperadas de agua subterránea pueden provocar retrasos en la construcción y aumentar los costos del proyecto. La planificación, la investigación del emplazamiento y el diseño de ingeniería adecuados son esenciales para gestionar eficazmente el agua subterránea durante la excavación.

El presente trabajo recoge estos aspectos en un modelo numérico de un caso práctico para un cliente confidencial sobre la excavación para la construcción de una terminal ferroviaria en un acuífero muy permeable. La escasa caracterización inicial, no detectó la presencia de acuitardos que dificultaron el drenaje de los acuíferos más superficiales, los cuales ejercieron empujes importantes en el sistema de sostenimiento. El rebaje de estos acuíferos se intentó mediante drenes horizontales, los cuales fueron insuficientes y complicaron sobremanera la excavación.

Para mitigar todos estos efectos, particularmente durante la época húmeda, la dirección de obra y la constructora encargaron a Amphos 21 un modelo numérico para cuantificar los efectos de la heterogeneidad del medio y el impacto sobre la construcción.

El modelo se construyó con COMSOL Multiphysics y recogió las condiciones de contorno hasta km de distancia para detallar los efectos locales a una escala de metros. El modelo recoge la geometría de la excavación tal como se previó y no simuló el transitorio de la propia excavación. Así, se pudieron simular diferentes escenarios de drenaje -los actuales y los previstos necesarios-, las mejoras

necesarias en este drenaje y, del mismo modo, prever los efectos de una mayor recarga durante la época de lluvias.

# Atenuación natural de nitrato bajo dos relaciones acuífero-lago salado diferentes. El caso de las lagunas de Pétrola y Tírez-Peñahueca

David Sanz<sup>1</sup>, Iordanka Dountheva<sup>1</sup>, Beatriz Toledo<sup>1</sup>, Neus Otero<sup>2</sup>, Clara Torrentó<sup>2</sup>, Albert Soler<sup>2</sup>, Juan José Gómez-Alday<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Sección de Biotecnología y Recursos Naturales. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla - La Mancha*

<sup>2</sup>*Institut de Recerca de l'Aigua. Universitat de Barcelona*

Palabras clave: Contaminación por nitratos, Densidad variable, Atenuación natural

**Resumen.** Los humedales son unos ecosistemas muy sensibles a las actividades antrópicas. Modificaciones en la explotación de las aguas subterráneas para regadío, los cambios en los usos del suelo, vertidos directos e indirectos, y los efectos del calentamiento global provocan importantes cambios en el funcionamiento hidrogeológico de dichos sistemas. Este es el caso del entorno de varios humedales de Castilla – La Mancha (ejemplos Tírez-Peñahueca-Toledo y Pétrola-Albacete) donde durante el último medio siglo se ha producido una pérdida de la calidad de las aguas (aumento de salinidad en las aguas subterráneas y aumento de la contaminación por nitratos) junto con el descenso en los recursos hídricos disponibles. Sin embargo, no todo está perdido. El conocimiento del funcionamiento hidrogeológico puede ayudar a la gestión sostenible de dichos ecosistemas ya que este tipo de humedales tienen una alta capacidad de resiliencia. En efecto, en este trabajo se muestran ejemplos de atenuación natural de la contaminación por nitrato en sistemas con relaciones laguna salada-acuífero distintas. Estos son: a) una laguna de descarga (laguna de Pétrola), conectada con el acuífero subyacente, y b) una laguna desconectada con el acuífero subyacente (lagunas de Tírez-Peñahueca). La atenuación del nitrato parece estar ligada a los flujos producidos por la recarga de agua subterránea desde los humedales (pe. flujo inducido por diferencias de densidad en sistemas de descarga, recarga por infiltración en sistemas laguna-acuífero desconectados) – acorde con direcciones de flujo y perfiles de tomografía eléctrica). Este flujo, es capaz de transportar la materia orgánica implicada en los procesos de atenuación generando regiones en el acuífero con condiciones redox idóneas para la atenuación de la contaminación por nitratos del agua subterránea.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación PID2022-139911OB-C44 MCIN /AEI/FEDER y SBPLY/21/180501/000055 JCCM, y a la ayuda 2022-GRIN-34228 de la UCLM.

# Balance hídrico del Acuífero Centro Norte y estudio de factibilidad para el aprovechamiento del agua subterránea bombeada por el Edificio EPIQ para fines no potables en el cantón Quito, Ecuador

Kevin Anderson Ruiz Gonzalez<sup>3</sup>, Luis Modesto Coronel Merino<sup>3</sup>, Carlos Gabriel Enríquez Pinos<sup>1</sup>, Teresa Del Rocio Muñoz Martínez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Central Del Ecuador

<sup>2</sup>Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS)

<sup>3</sup>Universidad Central Del Ecuador, Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS)

Palabras clave: acuíferos, recarga, aprovechamiento, mitigación

**Resumen.** Quito, la capital del Ecuador, actualmente se abastece en un 80% de agua proveniente del páramo y considera al agua subterránea como una fuente estratégica del recurso para el abastecimiento en situaciones de emergencia. Dado al incremento poblacional y la construcción de edificaciones de gran envergadura, se ven en la necesidad de abatir el agua de nivel freático para construir sus subsuelos y evitar inundaciones. La problemática radica en el vertido del recurso subterráneo directamente al sistema de alcantarillado combinado sin un aprovechamiento previo, tal es el caso del Edificio EPIQ. La presente investigación se realizó con la finalidad de contribuir a la mitigación de la problemática relacionada a la escasez del recurso hídrico debido principalmente al agotamiento de las fuentes superficiales ocasionado por el cambio climático, el incremento poblacional y los inadecuados hábitos de uso del recurso.

El primer objetivo de la investigación aborda la actualización del balance hídrico del Acuífero Centro Norte de la ciudad de Quito-Ecuador, el cual tiene una extensión de 124 km<sup>2</sup>. En este acuífero se realizó un estudio hidrometeorológico de una red consolidada de 13 estaciones entre pluviométricas y climatológicas provenientes de la base de datos de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS). Se determinó la recarga total del acuífero equivalente a 794 l/s, considerando la recarga en las zonas urbanas, laderas del Pichincha e infiltración por pérdidas en los sistemas de agua potable y alcantarillado. En cuanto al caudal de extracción, proveniente de pozos y

vertientes se obtuvo una descarga equivalente a 734 l/s concluyendo así que el acuífero se encuentra en un incremento potenciométrico en promedio de 20 cm/año en cuanto a su nivel freático se refiere.

El segundo objetivo busca brindar alternativas de aprovechamiento del agua subterránea bombeada por el Edificio EPIQ para fines no potables. Se realizaron pruebas de bombeo y se obtuvieron los parámetros hidrogeológicos del acuífero y de los pozos de abatimiento con una transmisividad de 1043 m<sup>2</sup>/día, un coeficiente de almacenamiento de  $1.36 \times 10^{-4}$ , y un caudal de aprovechamiento de 24 l/s. Se realizó el análisis físico, químico y microbiológico del agua subterránea verificando su cumplimiento conforme la normativa local en cuanto a coliformes totales, oxígeno disuelto, temperatura, potencial de hidrógeno, tensoactivos, grasas y aceites. Dentro de las alternativas propuestas se evaluó la recarga de la Laguna del Quinde, riego para áreas verdes y jardines en edificaciones, riego del Jardín Botánico de la ciudad y abastecimiento para hidrosuccionadores de la EPMAPS. Posterior a un análisis técnico-económico, se realizó el diseño hidráulico de las alternativas de aprovechamiento de agua subterránea y su respectivo análisis de precios unitarios con un presupuesto referencial de \$49,721.66 en el caso del abastecimiento a la Laguna del Quinde y \$38,175.00 para el abastecimiento de los hidrosuccionadores.

## Caracterización de estériles de mina para protección de las aguas en la mina de Touro

Pelayo Fernández Álvarez<sup>1</sup>, Fernando Díaz Riopa<sup>1</sup>, Pablo Núñez Fernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Cobre San Rafael*

Palabras clave: Drenaje Ácido de Roca (DAR), PAG, minería, Touro

**Resumen.** Los estériles de mina son rocas que carecen de interés económico, pero que deben ser extraídas para alcanzar las rocas donde se encuentra el mineral. El yacimiento de Touro es rico en sulfuros de cobre, esto conlleva que parte de los estériles de mina tengan sulfuros y, por lo tanto, la capacidad de generar drenaje ácido de roca (DAR) cuando se oxidan. Se les denomina estériles PAG (por sus siglas en inglés, Potential Acid Generation), mientras que otra parte de los estériles de mina no contiene sulfuros y no genera esta problemática, denominándose estériles NAG (por sus siglas en inglés, Non Acid Generation). La identificación de ambos tipos de materiales es básica para poder gestionarlos correctamente y asegurar que no haya afecciones a las aguas por drenajes ácidos.

El objetivo de esta presentación es exponer esta problemática en el caso de Touro y cómo se plantea su ejecución en el proyecto de reapertura de la mina.

Para poder realizar esta segregación de los estériles y poder gestionarlos adecuadamente, es necesario caracterizarlos. Por un lado, son necesarios estudios previos que permitan estimar la cantidad de cada material que se va a explotar. Posteriormente, durante la explotación, deben segregarse en origen de manera sistemática en base a ensayos NAG-PAG realizados paralelamente al control de leyes. Los estudios previos permiten diseñar y dimensionar las diferentes instalaciones mineras, mientras que la segregación en origen asegura que cada tipo de material se ubique en la instalación minera correspondiente durante la explotación.

En el caso de Touro, se han realizado 2 programas de ensayos previos utilizando muestras de sondeos perforados en la zona para estudiar los diferentes tipos de rocas del yacimiento. Ambos concluyen que el material PAG representa entre un 52% y un 57% del total de los estériles.

El nuevo proyecto minero incluye la gestión de estos materiales de acuerdo con las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) en minería. La principal es utilizarlos para el relleno de los huecos mineros ya agotados, ubicándolos bajo el nivel freático, en condiciones anóxicas que impidan la oxidación de los sulfuros y la acidificación

de las aguas. Para el volumen de material PAG que no pueda ser reubicado bajo el nivel freático, el proyecto contempla una instalación especial donde se acopiará el material PAG. Esta instalación estará totalmente impermeabilizada y contará con cunetas perimetrales y balsas para gestión de escorrentías, siendo encapsulada y restaurada el final de su vida útil.

# Caracterización del acuífero de Los Pedroches (Córdoba) mediante la integración del conocimiento local

Nikoletta Roperó Szymańska<sup>1</sup>, Lucia De Stefano<sup>1</sup>, Nuria Hernández-Mora<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Complutense de Madrid

**Resumen.** La comarca de Los Pedroches (Córdoba), se caracteriza por un paisaje de dehesa y de olivar de sierra, donde la agricultura de secano y la ganadería extensiva sustentan la economía local. En la región, las aguas subterráneas juegan un papel clave en el abastecimiento de agua para la ganadería y para consumo humano de casas aisladas. Además, entre abril de 2023 y abril de 2024, la comarca sufrió la interrupción del servicio de agua potable por el impacto de la sequía y de la contaminación sobre los embalses de la zona, lo que en ocasiones ha llevado a la población a recurrir a pozos particulares para abastecerse de agua para consumo humano. El acuífero está dividido administrativamente en dos masas de agua subterráneas entre las Demarcaciones Hidrográficas del Guadiana y del Guadalquivir, y se compone fundamentalmente por el batolito granodiorítico de Los Pedroches. La información científico-técnica disponible sobre las masas de agua subterráneas es limitada, por lo que avanzar en la comprensión de su funcionamiento es clave para mejorar su gestión ante episodios de sequía y contaminación.

El objetivo de este trabajo es mejorar el conocimiento del funcionamiento del acuífero mediante la integración de la información científico-técnica y del conocimiento local de las aguas subterráneas para construir un modelo hidrogeológico conceptual y numérico. Para ello, por un lado, se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica de la información disponible en la literatura, bases de datos oficiales y estudios técnicos previos. Por el otro lado, se ha diseñado una metodología de recogida de información cualitativa del conocimiento local sobre el funcionamiento de las aguas subterráneas mediante entrevistas semiestructuradas a través de entrevistas con usuarios, grupos focales y talleres. Además, dada la limitada disponibilidad de datos piezométricos en la zona, se han realizado cuatro campañas de campo de medición de niveles del agua subterránea en distintos puntos distribuidos por la comarca y se prevé la realización de dos campañas adicionales. A partir de la integración de estas distintas fuentes de datos y de la información cualitativa recogida, se espera caracterizar de manera más exhaustiva el acuífero y su funcionamiento, para así contribuir a la toma de decisiones relativas a su aprovechamiento.

Este estudio se ha centrado en la caracterización del comportamiento de la capa superficial del granito meteorizado que es donde históricamente se ha concentrado su aprovechamiento. Esta capa tiene un espesor de unos 10 metros de media, que, localmente, puede llegar a los 20 metros. El conocimiento local ha permitido ajustar las condiciones de contorno del modelo, la estimación del espesor de la zona meteorizada, las relaciones acuífero-red de drenaje superficial y el grado de influencia de diques y fracturas en el flujo subterráneo.

Los resultados preliminares de la investigación permiten concluir que se trata de un acuífero libre compuesto de una capa superficial de granito meteorizado relativamente continua, pero de espesor heterogéneo, derivado del grado de meteorización. A mayor profundidad, el granito sin meteorizar ha podido llegar a desarrollar permeabilidad local como resultado de la fracturación de la roca. El nivel freático y la dirección del flujo subterráneo se ven influenciados por las fracturas y fallas presentes y por los contactos entre distintos cuerpos intrusivos.

Las campañas de campo han permitido constatar que el nivel freático en condiciones de pluviometría media y en ausencia de extracciones antrópicas, se encuentra de media a menos de un metro de profundidad. La principal fuente de recarga del acuífero es la precipitación, mientras que las principales zonas de descarga coinciden con la red de drenaje superficial. Además, existen numerosas extracciones por bombeo y evapotranspiración por parte de la vegetación de dehesa. En algunos casos, también puede haber arroyos que se originan fuera del acuífero que pueden funcionar como zonas de recarga.

**Agradecimientos:** Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 101037293.

# Caracterización hidrodinámica de la capa de alteración en los afloramientos de Peridotitas de Ronda (Andalucía, España)

Antonio Fermín Castro-Gámez<sup>1</sup>, Pablo Jiménez-Gavilán<sup>1</sup>, Lucía Ojeda-Rodríguez<sup>1</sup>, Sergio Durán-Laforet<sup>2</sup>, Sergio Martos Rosillo<sup>2</sup>, Juan José Durán-Valsero<sup>2</sup>, Raquel Morales-García<sup>2</sup>, Marta Inés Llamas-Dios<sup>1</sup>, Iñaki Vadillo Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Málaga

<sup>2</sup>Instituto Geológico y Minero de España-CSIC

Palabras clave: Peridotitas de Ronda, Zona de alteración, Hidrogramas, Caracterización hidrogeológica

**Resumen.** Al sur de la Península Ibérica, en la provincia de Málaga, se encuentra uno de los mayores afloramientos de peridotitas (Iherzolitas orogénicas) con unos 450 km<sup>2</sup>. Tradicionalmente se ha considerado que los recursos hídricos generados en estas rocas son provenientes casi en exclusividad de escorrentía superficial y que sólo una pequeña fracción de la precipitación útil se infiltra en la capa de alteración. Sin embargo, es bien conocida la existencia de cursos de agua permanentes y manantiales durante todo el año. La combinación de conductividades hidráulicas relativamente bajas, coeficientes de almacenamiento importantes y eventos pluviométricos más o menos regulares explica este carácter permanente de los cursos de agua y manantiales. Se han llevado a cabo 390 aforos hidroquímicos diferenciales en tres cuencas emplazadas total o parcialmente en peridotitas. Los aforos se llevaron a cabo en los cursos de agua superficial durante los años 2022 y 2023. Estos dos años se consideran secos ya que la precipitación media en esa zona para el periodo 2000-2023 es de 756 mm y durante los años de estudio se recogieron 601 mm. Estos aforos diferenciales, durante el periodo de estiaje, han permitido determinar el caudal base de los cursos de agua y han aportado datos sobre la localización de los acuíferos, sus propiedades hidrodinámicas y la caracterización de su capa de alteración. Para ello, se realizaron campañas de aforos diferenciales de duración anual y frecuencia inferior a un mes en diferentes zonas de los afloramientos de peridotitas. La aplicación clásica del análisis de curvas de recesión han permitido determinar, a escala de cuenca, los parámetros hidráulicos de las peridotitas; sin embargo, estas metodologías incorporan un cierto grado de incertidumbre al considerar subjetivamente una referencia temporal y no considerar los efectos de la evapotranspiración. Una alternativa ampliamente utilizada son los métodos

basados en la determinación de curvas de recesión que relacionan el caudal en función del tiempo medio para el intervalo considerado. Esta metodología elimina el efecto de la evapotranspiración y evita la elección del momento de inicio de la recesión. Para las tres cuencas de estudio se han obtenido permeabilidades y porosidades del orden de  $7\text{E-}06 \text{ m}\cdot\text{s-}1$ , 1%;  $8.5\text{E-}05 \text{ m}\cdot\text{s-}1$ , 4.85 % y  $1.1\text{E-}05 \text{ m}\cdot\text{s-}1$ , 0.64%. Estos resultados son coherentes con los obtenidos mediante ensayos de bombeo en una de las cuencas de estudio ( $8\text{-}9\text{E-}04 \text{ m}\cdot\text{s-}1$ , 1-2%) y con los reflejados en bibliografía. Estos parámetros obtenidos han permitido determinar caudales base en cuencas sin estaciones de aforo y determinar los parámetros hidráulicos de la capa de alteración. Los resultados sugieren que la solución de flujo no lineal de un acuífero libre es la más adecuada para parametrizar el hidrograma.

## Caracterización preliminar del funcionamiento hídrico de la laguna de Torreguadiaro (provincia de Cádiz)

Alejandro Millán-Madrid<sup>1</sup>, José Manuel Gil Márquez<sup>1</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA)*

**Resumen.** La laguna de Torreguadiaro es un humedal costero de régimen permanente localizado en el extremo oriental del litoral gaditano y que ocupa una superficie de inundación máxima de 1,2 ha. La cuenca hidrográfica del humedal abarca una extensión reducida, de aproximadamente 12 ha. El sustrato de la cuenca está formado principalmente por arcillas y areniscas del Complejo del Flysch del Campo de Gibraltar, sobre las que se encuentran una formación detrítica compuesta por arenas y gravas, que es parte del acuífero aluvial cuaternario del río Guadiaro, y otra de depósitos litorales arenosos del Holoceno, en los que se sitúa la laguna. Gran parte de la cuenca está urbanizada por lo que las condiciones de drenaje superficial están muy modificadas. No obstante, dada la extensión de la cuenca y la alta permeabilidad de los depósitos litorales, las aportaciones superficiales se presuponen reducidas. Se trata de un enclave de alto valor ecológico y en el que no se ha llevado a cabo ningún estudio previo sobre su funcionamiento hídrico. Por tanto, en este trabajo se realiza una caracterización preliminar del funcionamiento del humedal. Para ello, se ha establecido una red de puntos de observación de aguas subterráneas, formada por algunos pozos ya existentes y nuevos piezómetros perforados manualmente en abril de 2024, en la que se han realizado medidas puntuales de nivel piezométrico. Además, en junio de 2022 se han instalado equipos de registro continuo de altura de lámina de agua en la laguna y en un punto de control ubicado hacia el noroeste. Asimismo, desde esta fecha se han recogido muestras de agua subterráneas y del humedal para el posterior análisis hidroquímico y de la composición isotópica del  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  del agua. Las medidas piezométricas en la red de control indicarían que existe un flujo subterráneo hacia el humedal. Así, en época de estiaje, la laguna mantiene su nivel de agua prácticamente constante, con pequeñas oscilaciones en un rango de 15 cm que podrían estar relacionadas con periodos mareales interdiarios, pues coinciden con la evolución del nivel de agua del acuífero y del mar. Además, la estabilidad limnimétrica de la laguna en los meses de verano, en los que existe una evaporación acumulada de hasta 500 mm (julio-agosto), evidencia la existencia de aportaciones subterráneas hacia el

humedal de bastante entidad. Estos aportes también se hacen patentes en los días posteriores a eventos de fuertes precipitaciones, tras los que el nivel de agua del humedal asciende hasta 60 cm y de forma rápida y análoga a lo que lo hace el nivel piezométrico al noroeste de la laguna. Después, se observa un descenso del nivel de agua relativamente rápido hasta alcanzar cotas próximas a las iniciales en un periodo de unos 15 días. Dado que la laguna no cuenta con salidas superficiales y que la evaporación no justificaría dichos descensos, debe de existir una inversión del flujo en la que el humedal es el que cede parte de los recursos hacia el acuífero. Por otro lado, la composición química e isotópica del agua del humedal podría explicarse por la evaporación de un agua con características similares al agua subterránea muestreada al noroeste de la laguna. Así lo refleja el fraccionamiento isotópico ocasionado por la evaporación y la reconcentración de iones conservativos, como Cl<sup>-</sup> o Br<sup>-</sup>, que evidencian cómo los aportes subterráneos procederían principalmente de dicho sector. Todos los resultados ponen de manifiesto la buena conexión hídrica entre la laguna de Torreguadiaro y el acuífero cuaternario y permitirían clasificarla como un humedal fundamentalmente de descarga, aunque en determinadas condiciones hidrodinámicas pueda invertir su comportamiento de forma temporal. No obstante, la laguna de Torreguadiaro y su entorno se está investigando en la actualidad por lo que se espera disponer de un mayor número de datos y un periodo de monitorización más amplio para precisar más el funcionamiento hídrico del humedal y cuantificar así los componentes que intervienen en su balance hídrico.

# Caracterización y modelización hidrogeológica en proyecto de recarga gestionada de acuíferos con propuesta de mejora de diseño y de monitoreo

Benjamín Crisóstomo<sup>1</sup>, Sonia Valdivielso<sup>1</sup>, Enric Vázquez-Suñé<sup>1</sup>, Damían Córdoba<sup>2</sup>, Mariana Concha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), CSIC, España*

<sup>2</sup>*Gerencia Corporativa de Aguas, CODELCO, Chile*

**Resumen.** Este estudio se centra en la mejora de la modelización, diseño y del monitoreo de un proyecto de recarga gestionada de acuíferos, ubicado en la región de Valparaíso, Chile. Dicha región, afronta un período prolongado de sequía en los últimos años, lo que ha exacerbado la necesidad de métodos innovadores para gestionar e incrementar los recursos hídricos subterráneos disponibles. En este contexto, la recarga gestionada de acuíferos se presenta como una estrategia crucial para aumentar las reservas de agua subterránea, necesaria para las actividades económicas de la zona, la sostenibilidad y sustentabilidad de las gestiones para abastecimiento de agua a corto y largo plazo en períodos de escasez prolongada.

Por ello, el objetivo principal es desarrollar un estudio hidrogeológico integral que permita evaluar y mejorar el proyecto de recarga gestionada mediante la implementación de modelos numéricos, mejoras en el diseño y del sistema de monitoreo.

La metodología aplicada incluye la elaboración de un modelo numérico del acuífero con el software FEFLOW, dicho modelo considera la geometría de las unidades hidrogeológicas, recarga natural, parámetros hidráulicos, interacción con ríos y condiciones antrópicas. Además, se realizó una modelación de la zona no saturada con el software HYDRUS, donde se simuló las condiciones de infiltración actuales de las balsas de infiltración y de otros escenarios de colmatación física producto de la decantación de sedimentos finos.

Los resultados indican que el caudal de infiltración del sistema no afecta la dinámica del acuífero con las balsas de infiltración. Dicho caudal genera un aumento de los niveles piezométrico en algunos metros de forma local y bajo las piscinas. Además, se pudo ver cómo afecta la colmatación física en el vector de infiltración de las balsas, disminuyendo su eficacia a la mitad con algunos centímetros de decantación de finos. Por lo tanto, la implementación de técnicas

y protocolos que disminuyan la colmatación son vitales para la viabilidad del proyecto.

Finalmente, este estudio permitió establecer que mejoras en el diseño y la implementación de un sistema de monitoreo robusto proporcionan una base sólida para la reanudación y optimización futura del proyecto, destacando la importancia de estas técnicas en la gestión de la crisis hídrica regional. Además, la caracterización hidrogeológica local y los modelos numéricos han facilitado una mejor identificación de variables críticas y dinámicas del flujo subterráneo. Estos hallazgos sugieren que la integración de modelización numérica y monitoreo continuo es esencial para maximizar la eficacia de los proyectos de recarga gestionada de acuíferos. Se ha establecido que estos proyectos son vitales para la resiliencia hídrica de la zona central de Chile en un escenario de cambio climático y disminución de la precipitación.

# Cartografía histórica inédita de los “Viajes de agua” de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos de Madrid

Catalina Bezares<sup>1</sup>, Eugenio Sanz Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Laboratorio de Geología. Departamento de Morfología e Ingeniería del Terreno. Esc. Tec. Sup de Ing. de Caminos, CC. y PP., Universidad Politécnica de Madrid (U.P.M.)*

Palabras clave: Antiguo abastecimiento a Madrid, Viajes de Agua

**Resumen.** Como se sabe, antes del abastecimiento a Madrid con aguas del río Lozoya por parte del Canal de Isabel II, la ciudad se suministraba exclusivamente con galerías que drenaban el agua subterránea del Acuífero Terciario Detrítico y que se extiende por la mitad Oeste de Madrid, desde El Retiro, hasta el borde impermeable granítico de la Sierra en Torrelodones o Colmenar Viejo. Pero este sistema de “qanats” todavía fue funcional de manera complementaria durante unas décadas más, hasta que el problema de la contaminación antrópica generada por el crecimiento de la misma ciudad hizo insostenible la potabilidad del agua y fueron abandonadas. De esta última época corresponde los planos levantados por el alumno Enrique Pérez Villamil en 1913 que en este poster se reproducen, y del estado en el que se encontraban dichas obras de ingeniería que refleja en su trabajo de verano dentro de la asignatura de la titulación de ingeniero de Caminos “Estratigrafía y Física Terrestre” que dirigía el profesor D. Narciso Puig de la Bellacasa.

A parte del valor intrínseco histórico de esta documentación, tiene también un valor medioambiental y de gestión hidráulica, ya que marcan la situación inicial del freático del Acuífero Detrítico de Madrid antes de la explotación de las aguas subterráneas, es decir, cuando se dejaron de emplear los viajes de agua hacia los años veinte del siglo pasado.

**Agradecimientos:** Se agradece a la Ayudas a los Grupos de Investigación de la UPM

# Condicionantes geológicos e hidrogeológicos de las Fuentes del río Mijares (Teruel). MASb Javalambre Oriental. Demarcación Hidrográfica del Júcar

Bruno J. Ballesteros Navarro<sup>1</sup>, José A. Domínguez Sánchez<sup>1</sup>, Juan Grima Olmedo<sup>1</sup>, Arancha Fidalgo Pelarda<sup>2</sup>, Nieves Mondéjar Martín<sup>2</sup>, Ana Nieto Arias<sup>2</sup>, José M. Montes Villa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Instituto Geológico y Minero de España, CSIC*

<sup>2</sup>*Confederación Hidrográfica del Júcar*

<sup>3</sup>*Mi Geoblog*

Palabras clave: Javalambre Oriental, Manantiales, Mijares, Masa agua subterránea

**Resumen.** Las denominadas Fuentes del río Mijares (Sarrión, Teruel) son un conjunto de surgencias que constituyen el principal mecanismo de drenaje de la MASb 08.103 Javalambre Oriental. Los estudios realizados hasta la fecha sobre este sistema acuífero datan de los años setenta y ochenta del pasado siglo, y con posterioridad sólo se han llevado a cabo algunos de carácter local, por lo que su funcionamiento y estimación de recursos presentan una gran incertidumbre. En consecuencia, y entre otras cuestiones, se desconocían las causas que daban lugar a la presencia de estos manantiales y el volumen de los recursos drenado por ellos, así como la magnitud de los aportados directamente al río Mijares. La investigación realizada, actualmente en curso, basada en datos litoestratigráficos, tectónicos, foronómicos e hidroquímicos, ha permitido establecer una evaluación preliminar de los recursos de estos tres manantiales (Escaleruela, Babor y Mas del Royo), cifrados en 62 M de metros cúbicos/año, y conocer los aportes directos al río Mijares, hasta ahora no suficientemente bien contabilizados, con un volumen anual en torno a los 60. En consecuencia, el total de las salidas del acuífero hacia el río en este sector podrían establecerse de forma provisional en torno a los 122 M de metros cúbicos/año.

El análisis geológico detallado de la zona apunta a la existencia de una inyección en profundidad de las arcillas con yesos del Trías Keuper asociada a una fractura de dirección NE-SW. La intrusión de estos materiales, aunque no llega a alcanzar la superficie, consigue ejercer de barrera impermeable y dividir a la actual MASb de Javalambre Oriental en dos sectores de funcionamiento hidrogeológico

totalmente independiente. El efecto del empuje halocinético de la formación triásica queda reflejado en la elevación y basculamiento de las calizas lacustres "pontenses" post-orogénicas, con buzamientos de más de 30 grados, depositadas de forma discordante durante el Mioceno terminal sobre los sedimentos mesozoicos. Esta última formación, que dispone de una elevada permeabilidad, ejercería de elemento transmisor del flujo subterráneo hacia los puntos donde se localizan las surgencias.

El modelo de funcionamiento hidrogeológico descrito también es coherente con las determinaciones analíticas del agua de estos manantiales, con facies hidroquímicas sulfatadas cálcicas, claramente diferentes a las del resto del acuífero, donde son bicarbonatadas cálcicas.

Según lo expuesto, el sector acuífero localizado al noroeste quedaría drenado por el conjunto de manantiales y aportes directos al río Mijares existentes en el entorno de Sarrión, mientras que el situado al sureste, que pasaría a ser denominado como acuífero de Montanejos, lo sería exclusivamente por el manantial de la Fuente de los Baños, situado en las proximidades de dicha localidad.

# Consecuencias de la sobreexplotación del acuífero Almonte-Marismas sobre el abastecimiento urbano. El caso de Almonte (Huelva)

José Antonio Serrano Reina<sup>1</sup>, Fernando Ruiz Bermudo<sup>1</sup>, Víctor Juan Cifuentes Sánchez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC)*

<sup>2</sup>*Oficina de Planificación Hidrológica. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG)*

Palabras clave: Doñana, abastecimiento, Almonte, sondeos

**Resumen.** La localidad de Almonte (Huelva), según los datos del Instituto Nacional de Estadística (2023), tiene una población de 25.233 habitantes y cuenta con el término municipal más extenso de la provincia (859 km<sup>2</sup>). Se sitúa sobre el acuífero Almonte – Marismas, acuífero compartido entre las demarcaciones hidrográficas del Guadalquivir (DHG) y del Tinto, Odiel y Piedras (DHTOP), si bien, en una proporción 90% (DHG) – 10% (DHTOP). Dentro de los límites de su término municipal se encuentran enclaves tan relevantes como la aldea de El Rocío o el Parque Nacional de Doñana, sobre el cual existen múltiples figuras de protección (Patrimonio Mundial por la UNESCO, Reserva de la Biosfera, Sitio Ramsar, Zona Especial de Conservación o Zona de Especial Protección para las Aves).

El acuífero Almonte – Marismas es uno de los sistemas más estudiados y conocidos de España, en buena medida porque sobre él se asienta el Espacio Natural de Doñana. No obstante, su importancia radica, no sólo en factores medioambientales asociados a las referidas figuras de protección ambiental, sino también a otros factores tanto sociales (abastecimiento urbano), como económicos (más de 11.000 ha de regadío).

La recarga del acuífero se produce exclusivamente por infiltración de la precipitación sobre los afloramientos permeables, existiendo una clara dependencia del régimen pluviométrico. En este sentido, cabe señalar, que el último periodo húmedo registrado se corresponde con el año hidrológico 2010/11. Desde entonces, se impone un ciclo con precipitaciones, en general, por debajo de la media (años medios y secos), que se extiende hasta la actualidad (12 años de duración).

Este trabajo pretende poner de manifiesto como la preocupante situación hidrogeológica del acuífero está afectando al abastecimiento de Almonte, el cual se realiza, en un 80 %, utilizando aguas subterráneas. Concretamente, mediante dos captaciones (Matalagrana I y Matalagrana II) situadas al noroeste de la aldea del Rocío.

La zona donde se ubican los sondeos se corresponde con el sector II del Plan de Transformación Agraria Almonte – Marismas (PTAAM). Desde el punto de vista hidrogeológico, la situación actual del sector se caracteriza por el desarrollo de un cono de bombeo resultado de las extracciones para regadío durante los últimos 50 años, que han inducido un descenso en el nivel piezométrico de más de 30 m. En la actualidad, los sondeos de abastecimiento han visto reducidos significativamente sus rendimientos como consecuencia del mencionado abatimiento del nivel piezométrico. Si se mantiene la tendencia actual, se estima que el abastecimiento a Almonte se verá comprometido a medio plazo.

Para el desarrollo del presente trabajo se ha realizado el análisis de tendencia, aplicando el test de Mann-Kendall, sobre la evolución piezométrica de una serie de piezómetros cercanos a las captaciones. Estos puntos de control cuentan con una amplia serie de datos (1973 – 2023), que han sido proporcionados por la CHG. Asimismo, se han consultado las fichas de inventario de las propias captaciones y sus características constructivas, comparando la situación piezométrica original (durante la construcción entre los años 1973 y 1974) y la actual, tras la inspección realizada en el año 2022.

**Agradecimientos:** Este trabajo se ha realizado en el marco del convenio del CN IGME-CSIC con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), para la mejora del conocimiento hidrogeológico en el marco de la planificación hidrológica (2020-2024).

## Contaminación de aguas subterráneas por actividades industriales históricas en Cataluña

Roberto Espínola Cazorla<sup>1</sup>, Emilio Orejudo Ramírez<sup>1</sup>, Montse Toribio Sánchez<sup>1</sup>,  
Joan Sánchez Anguita<sup>1</sup>, Mireia Iglesias Carrera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agencia Catalana del Agua

Palabras clave: contaminación histórica, identificación de focos, descontaminación, preservar recurso

**Resumen.** La contaminación de las aguas subterráneas por fuentes de origen puntual (instalaciones industriales, estaciones de servicio, vertidos y derrames incontrolados, etc.) es una de las principales amenazas sobre la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos.

Un caso particular es la problemática ocasionada por las contaminaciones de carácter histórico asociadas a antiguas actividades industriales que generan un pasivo ambiental, tanto en suelos como aguas subterráneas. En concreto, las afecciones al medio producidas hace décadas tienen la capacidad de generar plumas de contaminación de las aguas subterráneas de muchos kilómetros de alcance. Estas grandes plumas tienen la capacidad de comprometer la disponibilidad de agua subterránea, que en momentos de emergencia por sequía, como la que afecta actualmente las cuencas internas de Cataluña, es especialmente crítico.

En la actualidad existe una legislación que permite a la administración intervenir y modular las actividades industriales con el objetivo de minimizar sus repercusiones en los diferentes vectores ambientales. No obstante, en el pasado esto no ha sido así y tanto las herramientas técnicas y jurídicas disponibles, así como la sensibilidad y conciencia ambiental, eran muy limitadas, incluso inexistentes.

La progresiva incorporación de normativa ambiental en el marco normativo ha ido revertiendo esta situación. Finalmente, la entrada en vigor de la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 665/2023, de 18 de julio), supone un cambio de paradigma, ya que por primera vez se incorpora al marco normativo español la problemática de contaminación puntual de las aguas subterráneas. Cabe señalar que la Agencia Catalana del Agua (ACA), que cuenta con más de 20 años de experiencia en la gestión de episodios de contaminación puntual de las aguas subterráneas, ya había promovido la incorporación de esta

problemática en el marco normativo autonómico, concretamente a partir del Decreto 91/2023, de 16 de mayo, por el que se aprueba el Plan de Gestión del Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña para el período 2022-2027.

La administración hidráulica de Cataluña lleva años invirtiendo en la identificación, caracterización y desactivación de focos históricos de contaminación de las aguas subterráneas y pone de manifiesto el éxito obtenido en algunas de las contaminaciones históricas más relevantes de Cataluña.

En la presente comunicación se mostrarán algunos de los casos de éxito más relevantes obtenidos en las investigaciones realizadas para la identificación de focos desconocidos relacionados con plumas históricas de contaminación de aguas subterráneas.

## Contaminantes emergentes en acuíferos del Sur peninsular y otras zonas del planeta

Iñaki Vadillo Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Málaga

Palabras clave: Contaminantes de Preocupación Emergente, Acuíferos detríticos (Sur peninsular), Acuífero carbonático de Yucatán (México), Acuífero volcánico del Valle Central (Costa Rica)

**Resumen.** La contaminación de aguas subterráneas por Contaminantes de Preocupación Emergente (CECs, en inglés) es un problema conocido desde hace tiempo. Como resultado del vertido o aplicación de forma continua en el medio ambiente, se encuentra una gran diversidad de grupos y rangos de concentración de estas sustancias. El solo hecho de que existan es motivo suficiente para su estudio, que conlleva, en primer lugar, la detección y, con posterioridad, su distribución y comportamiento en los recursos hídricos. Su presencia en el medioambiente está muy extendida y cada vez se detectan más compuestos y en concentraciones muy superiores a las que se podrían intuir o a las que se recogen en los listados de sustancias prioritarias para la evaluación del estado de las masas de agua. Entre las posibles explicaciones se encuentran: (1) el hecho de llevar a cabo campañas específicas de estos compuestos donde nunca se habían llevado a cabo, (2) la expansión de los enclaves urbanos y las fuentes precursoras de CECs, (3) la falta de depuración de las aguas residuales y (4) ineficacia técnica para la total desaparición de los CECs, entre otros. En la presente ponencia se mostrarán los resultados de investigaciones llevadas a cabo en la última década en acuíferos detríticos de diversas zonas del Sur peninsular (provincia de Málaga, Granada y Cádiz), incluyendo Espacios Naturales Protegidos, y en otras zonas del planeta como el acuífero carbonático de Yucatán (México) y el acuífero volcánico del Valle Central en Costa Rica. Se pondrá de manifiesto la influencia de factores hidrogeológicos como litología del acuífero, recarga y estiaje, influencia de zona no saturada, interacción río-acuífero, así como factores antrópicos como la estacionalidad de la población, prácticas de riego, volumen de tratamiento de aguas residuales o existencia de red de saneamiento.

# Cuantificación de la descarga de agua subterránea a la rambla del Albuñón (cuenca del Mar Menor, Murcia) con trazadores químicos e isotópicos tras un evento de lluvia intensa en mayo de 2023

Edison Steven Morales Sotaminga<sup>1</sup>, Marisol Manzano<sup>1</sup>, Andrés Mira Carrión<sup>1</sup>, Jorge Enrique Hornero Díaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena*

<sup>2</sup>*Instituto Geológico y Minero de España*

Palabras clave: Hidrograma, Flujo de base, Rambla del Albuñón, Mar Menor

**Resumen.** En el contexto actual de cambio climático la ocurrencia de eventos de lluvia intensa en la Península Ibérica ha aumentado en magnitud y frecuencia, especialmente en el litoral mediterráneo, donde hay múltiples ecosistemas costeros vinculados a ramblas vulnerables a la contaminación. Las escorrentías superficial y subterránea que se generan tras un evento de lluvia constituyen las vías de flujo del agua hacia los cauces fluviales, y su estudio es una pieza fundamental para entender el comportamiento hidrológico, geoquímico y ecológico de una cuenca, especialmente cuando esta se encuentra apreciablemente modificada por estar sometida a un alto desarrollo agrícola y urbano.

Una de las metas del proyecto OPAL (PID2019-11311RB-C22; MICIU) es conocer la relación de las ramblas que descargan a la laguna del Mar Menor con el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena (Murcia, España). La rambla del Albuñón es el único cauce permanente que descarga a la laguna, con caudales que pueden proceder de escorrentía pluvial, descarga de agua subterránea, vertidos autorizados de EDAR y drenaje agrícola. El objetivo de este estudio es explorar la utilidad de distintos métodos para cuantificar la aportación del flujo subterráneo a la escorrentía total de la rambla del Albuñón tras un evento de lluvia intenso ocurrido el 30 de mayo del 2023.

La metodología ha consistido en descomponer el hidrograma de la rambla en una estación de aforo cercana a la desembocadura del cauce en el Mar Menor mediante dos tipos de técnicas, hidrográficas (mediante el código WHAT;

Universidad de Purdue, EEUU) e hidroquímicas (mediante balances de masas de trazadores químicos e isotópicos). Para ello, se tomaron muestras de agua diarias en la rambla entre el 26 de mayo y el 30 de junio y se analizó el pH, la conductividad eléctrica, los componentes mayoritarios y los isótopos d18O y d2H. Además, se utilizaron datos químicos e isotópicos de agua subterránea somera de la zona de fechas anteriores (2021 y 2022) y datos de caudales de EDAR aportados a la rambla durante el periodo de estudio. Para los cálculos con trazadores que se presentan se usaron los valores de Cl y d18O.

La contribución del agua subterránea al caudal de la rambla del Albuñón calculada con varios métodos hidrográficos oscila entre un mínimo del 2 % y un máximo del 100 %. En el pico de la crecida del día 31 de mayo (7749 L/s) varía entre el 2 y el 13 %. A partir del 17 de junio, con el caudal estabilizado entre 160 y 200 L/s, la contribución estimada se sitúa entre el 76 y el 100 %.

La contribución del agua subterránea calculada con los distintos trazadores usados es la siguiente: tanto el Cl como el d18O estiman contribuciones entre el 0 y el 100 %. Con ambos trazadores se estiman contribuciones nulas en el pico de la crecida, lo cual es consistente con los datos de composición química disponible. La contribución estimada a partir del día 17 de junio, con el caudal estabilizado, oscila entre el 73 y el 77 % según el Cl y es >100 % según el d18O.

Los resultados obtenidos con los dos métodos usados son consistentes en términos generales, teniendo en cuenta las incertidumbres de cada uno. No obstante, los métodos químicos aportan información adicional muy útil para la modelación de la relación río-acuífero, como por ejemplo la procedencia del agua subterránea. Durante el agotamiento de la crecida, esta parece proceder del almacenamiento de riberas durante la crecida, o bien de flujos hipodérmicos; después del 17 de junio, parece ser agua subterránea de la zona saturada.

**Agradecimientos:** Esta investigación se ha realizado en el marco de los proyectos OPAL (PID2019-11311RB) y REMEDIATE (PID2021-131005B), financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación. El primer autor es beneficiario de un contrato del programa INVESTIGO del Ministerio de Trabajo y Economía Social.

## Definición de la mejor estrategia de remediación de un acuífero contaminado por compuestos clorados, aplicando un enfoque de múltiple actuación

Marta González Méndez<sup>1</sup>, Natalia Blázquez Pallí<sup>1</sup>, Pedro Yáñez Puentes<sup>1</sup>, Marçal Bosch Cartoixà<sup>1</sup>, David Garriga Piferrer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Litoclean S.L.*

Palabras clave: Contaminación aguas subterráneas, Compuestos clorados, Biorremediación

**Resumen.** El acuífero somero de una zona industrial del norte de España presenta una fuerte contaminación por compuesto clorados. La afección de este acuífero superficial genera un riesgo alto de contaminar al acuífero inferior, el cual está explotado como abastecimiento y, por lo tanto, de inhabilitar sus pozos de explotación.

El objeto del proyecto ha sido por un lado mejorar la caracterización hidrogeológica y ambiental de la zona y por lo tanto del modelo conceptual de la problemática de contaminación al acuífero, y por otro, realizar estudios de tratabilidad a escala de laboratorio y a escala de campo para trazar la mejor estrategia de remediación a la medida del problema. La tecnología de remediación ensayada a escala de laboratorio y piloto ha sido la oxidación química y la biorremediación.

Los trabajos se realizaron a múltiples escalas, desde nivel regional a local, abarcando profundidades de investigación en el acuífero de hasta 50 metros, así como involucrando múltiples disciplinas de la ciencia, como son la geológica/hidrogeológica, biología y química orgánica.

Este tipo de proyectos, ponen de manifiesto las ventajas de realizar un correcto modelo conceptual y adecuados ensayos de tratabilidad, para definir remediaciones fiables y exitosas tanto en suelos como en aguas subterráneas.

## Desarrollo de un modelo numérico con densidad variable para la gestión de aguas subterráneas en Laura, Atolón de Majuro, República de las Islas Marshall

Elena Abarca<sup>1</sup>, Tybaud Goyetche<sup>1</sup>, Maria Pool<sup>1</sup>, Jordi Guimerà<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Amphos 21 Consulting*

**Resumen.** Más de 50% de las masas de agua subterránea costeras en España se encuentran afectadas, en alguna medida, por intrusión marina. Desde hace décadas se conoce la salinización de los acuíferos costeros españoles mediterráneos e insulares y los modelos numéricos de transporte de sales y flujo con densidad variable son la herramienta fundamental para su gestión.

Presentamos, a modo de ejemplo de modelos de densidad variable para la gestión de recursos de agua dulce en zonas costeras particularmente vulnerables, un modelo numérico para ayudar con la gestión de aguas subterráneas en el Atolón de Majuro, en las Islas Marshall. Dicha actividad se ha desarrollado en el marco de un programa para la gestión de acuíferos costeros en pequeños estados insulares del Pacífico. Estos pequeños estados son particularmente vulnerables al aumento de las presiones sobre sus recursos hídricos debido a su limitada extensión del terreno y su exposición al cambio climático y a la subida del nivel del mar.

El modelo numérico de flujo de agua subterránea y transporte de salinidad se ha realizado en la isla más grande del atolón, la isla Laura, como herramienta para orientar las estrategias de gestión de forma que minimicen la pérdida de agua dulce y para cuantificar los impactos futuros de influencias externas como los bombeos y las tensiones climáticas.

El modelo tridimensional se ha configurado para reproducir la respuesta histórica (2007-2022) de la lente de agua dulce y la distribución de los niveles a variaciones en la recarga, del nivel del mar y de los bombeos. Una vez que el modelo calibrado reproduce adecuadamente el comportamiento histórico del sistema, se han simulado escenarios futuros para predecir impactos del cambio climático. Estos escenarios se centran en tres aspectos clave: (i) el impacto de períodos de sequía prolongados, (ii) los efectos del aumento del nivel del mar y (iii) el impacto de la inundación rápida debido a eventos de marejada ciclónica. Para todos los

escenarios, se ha evaluado la reducción del volumen de la lente de agua dulce y el tiempo necesario para su recuperación.

En general, la isla de Laura posee reservas de agua dulce limitadas con un volumen que fluctúa alrededor de los 2 hm<sup>3</sup>. Estas reservas son muy sensibles a las condiciones extremas, con respuestas rápidas a las tensiones externas como la sequía o las inundaciones. Sin embargo, también muestra una gran rapidez de respuesta para recuperar el estado inicial una vez que cesa el factor de estrés, lo que le confiere una gran resiliencia.

## Drenaje de la corta de Minas de Alquife, Granada

Juan Pucho Pajares<sup>1</sup>, Salvador Jordana Margalida<sup>2</sup>, Tybaud Goyetche Goyetche<sup>3</sup>, José Luis Murillo Esteban<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Minas de Alquife, S.L.U*

<sup>2</sup>*Amphos 21 Consulting, S.L.*

Palabras clave: Minería, Drenaje, Modelización

**Resumen.** Se ha realizado un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas para dar soporte técnico a la tramitación administrativa de la solicitud de drenaje para la reapertura de las Minas de Alquife (MdA).

MdA es la mayor mina de hierro a cielo abierto de Europa. La mina, que se cerró en 1996, reabrió en el 2020 con unas reservas probadas de 110 Mt y un plan de explotación de 4,5 Mt por año. La mina se ubica en la provincia de Granada, en la comarca del Marquesado, en la Hoya de Guadix, al pie de la vertiente norte de Sierra Nevada a unos 1160 m de altitud. El agua del sistema es drenada de forma natural por las ramblas y ríos que pueden ser estacionales y efímeros y acaban en el río Guadix, a la cabecera de la cuenca del río Guadalquivir.

El yacimiento está compuesto principalmente por óxidos e hidróxidos de hierro en forma de hematites y goethita, que se localizan en los mármoles del complejo Nevado-Filábride del Triásico. El conjunto fue fosilizado por los aluviones de la formación Guadix del Pliocuatnario, que rellena la fosa y que puede alcanzar algunos centenares de metros de espesor.

Las principales reservas de mineral se encuentran por debajo del nivel freático que a su vez está a unos 100 m de profundidad en el sector de la mina. Se trata del acuífero detrítico de Guadix (MASub Guadix 512.01 y 512.02 Corredor de la Calahorra – Huéneja).

En el siglo XX la corta se profundizó hasta unos 100 m por debajo del nivel freático natural. El desaguado fue muy complejo debido a la heterogeneidad de los materiales y a la inestabilidad del aluvión. Entre los bombeos en la corta y en los pozos del aluvión se alcanzaron los 14 hm<sup>3</sup>/a y la mayor parte del agua se vertía al río Verde a través del túnel del Berral. Al cesar la actividad en 1996, cesaron los bombeos y paulatinamente se generó el lago minero de la corta de Alquife presente en la situación actual.

Uno de los principales retos del nuevo proyecto minero es el desaguado de la corta, del aluvión y de los mármoles, para poder ampliar la corta y profundizarla 100 m más que en el siglo pasado.

Desde el inicio de la actividad en 2012, Minas de Alquife realiza estudios de caracterización y de monitoreo del agua subterránea. A su vez ha desarrollado estudios hidrogeológicos de conceptualización y modelación numérica del acuífero de Guadix. El plan de drenaje pretende ser similar al que se usaba en el pasado, pero con la gran diferencia que una gran parte del agua bombeada será retornada al las MASub mediante sistemas de infiltración.

Para el diseño conceptual del plan de drenaje se usa un modelo numérico de flujo desarrollado en Feflow, en 3D, en régimen transitorio desde la situación actual, durante las distintas fases de minado y drenaje hasta el periodo de cierre y generación del futuro “pit lake”. El modelo permite realizar escenarios de ubicación de las extracciones (pozos) y de las balsas de infiltración y estimar los caudales. También permite estimar el impacto en el acuífero en términos de descensos, para cada fase de minado. Se estima que a lo largo del drenaje se tendrán que bombear unos 15 hm<sup>3</sup>/a, variable en función de la fase de la operación, además del agua de la corta, a vaciar durante los 2 primeros años. El descenso máximo de nivel en la corta será de 200 m y el cono se propagará hasta algunos kilómetros de distancia.

La autorización administrativa para aprobar el drenaje es un proceso largo y complejo. El 3er ciclo del Plan Hidrológico, aprobado en 2023, incluyó a Mina de Alquife en el Anejo 8, Apéndice 6 de exenciones del Artículo 4.7 de la Directiva Marco del Agua. MdA, en base al Plan de Drenaje, desarrollado gracias a la modelación numérica, ha solicitado a la Comisaría de Aguas concesión administrativa para el drenaje de la mina.

## Efecto sobre la infiltración de distintas condiciones de saturación del suelo. Caso de estudio del humedal de Somolinos (Guadalajara, España)

Lorena Bermejo Santos<sup>1</sup>, Francisco Javier Montalván Toala<sup>1</sup>, Francisco Carreño Conde<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universidad Rey Juan Carlos, Departamento de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica.*

Palabras clave: Infiltración, Conductividad hidráulica, Modelización

**Resumen.** Los cambios climáticos producen efectos en las distintas fases del ciclo del agua: precipitación, evaporación, transpiración, escorrentía, infiltración y recarga. Los escenarios de clima futuro prevén modificaciones en los patrones de temperatura e incrementos en la intensidad de la precipitación, con mayores periodos secos y lluvias más intensas. En estos periodos de torrencialidad de las precipitaciones, la influencia del factor de la resistencia del aire en los poros del suelo debe considerarse, ya que retrasa el proceso de infiltración, estando el tiempo de infiltración inversamente correlacionado con el contenido de humedad inicial del suelo. Por tanto, para minimizar la incertidumbre relacionada con los procesos de circulación del agua en el suelo durante eventos climatológicos extremos, es necesario conocer en detalle las propiedades hidráulicas del suelo cuando varían las condiciones de humedad o saturación del mismo. La zona de estudio es el humedal de Somolinos, una laguna de montaña situada en la zona noroccidental de la provincia de Guadalajara (España), limitante con la provincia de Soria, dentro de la masa de agua subterránea (MASb) de la Cabecera del Bornova (Tajo). El grado de explotación de la MASb es prácticamente nulo, por tanto, se puede considerar que se encuentra en régimen natural, condición necesaria para poder realizar el presente estudio. El objetivo de esta investigación es estudiar la variación de la capacidad de infiltración en función de las condiciones iniciales de saturación del suelo, por medio de ensayos de laboratorio de muestras de suelo de la zona de estudio en diferentes condiciones de saturación, para el conocimiento de las condiciones hidráulicas de terreno, destacando así su relevancia en la conceptualización de la dinámica del movimiento del agua en el subsuelo, y que se emplearán como parámetros de entrada en la modelización. Para alcanzar este objetivo, se ha desarrollado una

metodología que consiste en: i) toma de muestras de distintos tipos de suelos en la zona de estudio; ii) caracterización de las propiedades físicas in situ (color, textura, humedad, estructura, grado de cohesión); iii) ensayos en laboratorio mediante el instrumento KSAT que permite la medición de conductividad hidráulica en muestras de suelo mediante dos métodos distintos: “falling head”, para suelos cohesionados y con menor permeabilidad ( $k$  inferior a  $10^{-4}$  cm/s) tales como arenas limosas y arcillas; y “constant head”, apropiado para suelos sin cohesión y de permeabilidades mayores a  $10^{-4}$  cm/s, tipo gravas y arenas. Las muestras han sido analizadas en condiciones naturales, es decir, tal y como fueron tomadas en campo, y en distintas condiciones de saturación. Ambas mediciones han sido empleadas como parámetro de entrada en la modelización de la zona. Los resultados obtenidos en las distintas muestras analizadas, indican que conforme evoluciona la prueba realizada, a un determinado valor de presión esta tiende a estabilizarse, lo que muestra el momento en que la muestra ha alcanzado su máxima saturación. Por otro lado, también se observa que en condiciones naturales (tal y como la muestra ha sido tomada en campo) los valores de conductividad hidráulica son un orden de magnitud superior a los valores conforme la muestra se va saturando, pasando de conductividades hidráulicas de 1270 cm/d a 308 cm/d en los primeros minutos de saturación. Tras una semana de saturación, los valores obtenidos en las distintas pruebas no muestran una variación significativa, manteniéndose los valores de conductividad hidráulica constantes en torno a 60 cm/d. Por tanto, se comprueba que de nuevo son un orden de magnitud inferiores con respecto a menores condiciones de saturación, pero se puede decir que se ha alcanzado la saturación y éste es el valor de conductividad hidráulica saturada. La conclusión del trabajo muestra que las condiciones iniciales de saturación de un suelo, condicionan significativamente la conductividad hidráulica del mismo (hasta dos órdenes de magnitud) y, por tanto, esto debe ser tenido en cuenta en la conceptualización de la dinámica del movimiento del agua en el subsuelo.

# Efectos de la explotación intensiva de agua subterránea en los acuíferos carbonáticos del entorno de la laguna de Fuente de Piedra

Pedro Marín Troya<sup>1</sup>, Juan Antonio Barberá Fornell<sup>1</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Málaga

Palabras clave: Acuíferos carbonáticos kársticos, Explotación intensiva, Evolución temporal, Laguna de Fuente de Piedra

**Resumen.** En el N de la provincia de Málaga, en las proximidades de la laguna de Fuente de Piedra se encuentran una serie de relieves montañosos de naturaleza carbonática que constituyen acuíferos kársticos. Debido al uso intensivo del agua subterránea para uso urbano y agrícola durante décadas, estos acuíferos se han declarado en estado de sobreexplotación. En esta comunicación se realiza una actualización del estado hidrodinámico e hidroquímico de los acuíferos carbonáticos de las sierras de los Caballos, Humilladero y Mollina - La Camorra. Para obtener estos resultados, se han recopilado y analizado un conjunto de series históricas de datos hidrodinámicos e hidroquímicos procedentes de distintas fuentes, además de nuevos datos de niveles piezométricos y composición química del agua subterránea obtenidos entre 2023 y 2024.

Desde el punto de vista geológico, estos acuíferos carbonáticos pertenecen al dominio Subbético Medio de la Cordillera Bética. Están formados por bloques aislados (~ 2-10 km<sup>2</sup>) de calizas y dolomías del Jurásico Inferior, con una potencia superior a los 200 m, que reposan sobre el basamento triásico (constituido principalmente por arcillas y yesos). A techo y discordante sobre los materiales citados anteriormente, afloran margas y margocalizas de edad Jurásico Superior-Cretácico, areniscas y calcarenitas del Mioceno, y otros depósitos de relleno de depresiones (Cuaternario).

En el acuífero de la sierra de los Caballos, al O de la laguna de Fuente de Piedra, se registran variaciones del nivel piezométrico superiores a 20 m para el período analizado (1974-2024), como consecuencia de las extracciones de agua por bombeo y la alternancia de episodios de pluviometría húmedos-secos. La tendencia de la serie histórica de los niveles piezométricos es descendente, registrándose el mínimo de cota piezométrica en 2024 (390 m s.n.m). La composición química del agua subterránea presenta una diferenciación espacial, de modo que en la vertiente S, E y NE del acuífero el agua subterránea muestra

facies hidroquímicas mixtas, con valores de conductividad eléctrica (CE) comprendidos entre 900 y 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que en la vertiente NO se han medido valores de CE inferiores a 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y de facies bicarbonatada cálcica. Las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en el agua subterránea, que pueden superar 80 mg/L, ponen de manifiesto la interacción con las formaciones cuaternarias y miocenas adyacentes.

La sierra de Humilladero, al E de la laguna de Fuente de Piedra, acumula más de 40 años de actividad extractiva de agua subterránea, con un descenso piezométrico total de 94 m (1998-2024). Las características hidroquímicas, fuertemente influenciadas por las extracciones, han propiciado que las facies bicarbonatadas cálcicas originales hayan evolucionado a facies cloruradas sódicas (para el periodo 1991-2016). En la actualidad (2023-2024) las aguas subterráneas presentan facies mixtas y valores de CE comprendidos entre 800 y 1800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La determinación de valores históricos máximos de  $\text{NO}_3^-$  (150 mg/L),  $\text{SO}_4^{2-}$  (640 mg/L) y  $\text{Cl}^-$  (3847 mg/L), indican procesos de mezcla entre las aguas hipersalinas del basamento triásico ( $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ ) y las aguas del acuífero mioceno (enriquecidas en  $\text{NO}_3^-$ ).

En la sierra de Mollina- La Camorra, al NE de la laguna de Fuente de Piedra, el análisis de la serie de niveles piezométricos permite la estimación de un descenso medio sostenido de 1,6 m/año para el periodo 1998-2023. Las cotas piezométricas, con valores que varían entre 385 y 387 m s.n.m., permiten deducir que el flujo subterráneo del acuífero carbonático que, originalmente descargaban hacia la laguna de Fuente de Piedra (408 m s.n.m.), es poco probable que se produzca en la actualidad. Los datos hidroquímicos recopilados muestran valores de CE entre los 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y los 2700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dándose los valores más altos en el N del acuífero, donde se producen importantes extracciones de agua subterránea. Las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y/o  $\text{Cl}^-$  pueden superar los 300 mg/L en el N del acuífero, reflejando la influencia de las aguas profundas hipersalinas en el acuífero carbonático.

## El acuífero de los manantiales de San Felices (Soria, Cordillera Ibérica)

Eugenio Sanz Pérez<sup>1</sup>, Joaquín Sanz de Ojeda<sup>1</sup>, Catalina Bezares<sup>1</sup>, Eva de Rojas García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Laboratorio de Geología. Departamento de Morfología e Ingeniería del Terreno. Esc. Tec. Sup de Ing. de Caminos, CC. y PP., Universidad Politécnica de Madrid (U.P.M.)*

Palabras clave: Caracterización de acuíferos, Cordillera ibérica

**Resumen.** Para la buena gestión de las aguas subterráneas resulta imprescindible caracterizar bien los acuíferos. Este trabajo tiene como objetivo la identificación de un sistema no definido oficialmente pero que adquiere una importancia significativa. En él se describe la geometría y su funcionamiento hidrogeológico, y se determinan de manera preliminar los parámetros hidrogeológicos del acuífero según ensayos de bombeo de sondeos realizados en la zona.

El acuífero de los manantiales de San Felices está formado por una capa de calizas pararecificales kimeridgienses bastante permeables por karstificación. Tienen una potencia variable desde los 200 m hasta desaparecer al oeste de la zona de estudio, en la Sierra del Madero. Se hayan a muro de las facies wealdicas, pero en la zona de San Felices se encuentran interdigitadas con otras capas menos permeables de esta facies, de las cuales hace de dren. Aquí la capa principal se desgaja en dos por cambio lateral de facies, terminando por desaparecer en San Felices. Por eso no se puede precisar bien su área de recarga autógena, aunque los afloramientos de las mencionadas calizas totalizan unos 10 km<sup>2</sup>, pero la zona de influencia de los manantiales de San Felices no llegará a los 5 km<sup>2</sup>.

La geometría del acuífero se sitúa en el núcleo de un amplio cierre periclinal anticlinal (anticlinal del Pégado) con inmersión al N.NO. Esta estructura y la situación en divisoria de los ríos Alhama y Añamaza condiciona que el flujo y las descargas se dirijan hacia los manantiales de San Felices (unos siete manantiales de unos 25 l/s en total, con caudales muy regulares y constantes), y hacia el río Añamaza, alimentando la antigua laguna de Añavieja. El acuífero está en régimen natural pero parece que algunos sondeos cercanos lo están influenciando en la zona de Añavieja.

Es de destacar que las aguas son muy incrustantes y han dejado importantes depósitos de tobas colgados en las laderas del valle del río Alhama. Esta

singularidad de que los manantiales no se sitúen en el río, como es normal, es debido precisamente a que el cierre periclinal anticlinal de la capa acuífera termina en la parte alta del barranco del río Alhama.

**Agradecimientos:** Se agradece a la Ayudas a los Grupos de Investigación de la UPM

## El acuífero de Sarrión (Teruel). Definición preliminar de sus límites según criterios estructurales, hidrodinámicos e hidroquímicos

Jose Antonio Domínguez Sánchez<sup>1</sup>, Juan Grima Olmedo<sup>1</sup>, Arancha Fidalgo Pelarda<sup>2</sup>, Nieves Mondéjar Martín<sup>2</sup>, Ana Nieto Arias<sup>2</sup>, Bruno José Ballesteros Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto Geológico y Minero de España (IGME)*

<sup>2</sup>*Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ)*

Palabras clave: Acuífero, Compartimentación, Javalambre, Sarrión

**Resumen.** Los estudios realizados hasta la fecha en la masa de agua subterránea (MASub) 080.103 Javalambre Oriental, cuyo acuífero principal está constituido por los niveles carbonatados del Jurásico inferior y medio, han constatado su complejidad hidrogeológica y la posibilidad de que se encuentre compartimentada en diferentes acuíferos. Este trabajo se centra en el análisis de las principales surgencias del sistema, localizadas en las provincias de Teruel (Mas Royo, Babor, Escaleruela) y Castellón (Fuente de Los Baños), bajo la hipótesis de que constituyan puntos de descarga de sectores acuíferos independientes. El estudio de datos históricos y actuales de estas surgencias, tanto de caudales como hidroquímicos, la realización de aforos diferenciales en el río Mijares, así como el análisis de la piezometría y de las estructuras geológicas que puedan constituir barreras al flujo subterráneo, han permitido establecer de forma preliminar los límites hidrogeológicos de un acuífero (Sarrión) que abarcaría parte de las actuales MASub de Javalambre Oriental y Javalambre Occidental, extendiéndose incluso hacia el noreste bajo la MASub 080.111 Lucena-Alcora. La definición de este acuífero mediante los criterios mencionados supondrá modificaciones sustanciales de los límites establecidos en la actualidad para estas dos masas de agua subterránea. Sin embargo, permitirá ajustar los balances hídricos y, con ello, contribuir a la mejor gestión de los recursos hídricos subterráneos.

# El acuífero holoceno de la Plana de Valencia. Modelado y caracterización geológica para una planificación urbana eficiente

Ariadna Callea<sup>1</sup>, Patricio Villafañe<sup>2</sup>, Carlos Santiesteban Bové<sup>2</sup>, Juan Bautista Gumbau Bellmunt<sup>3</sup>, Eduardo Cassiraga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.IIAMA, Universitat Politècnica de València*

<sup>2</sup>*Departamento de Botánica y Geología, Universitat de València*

<sup>3</sup>*EVREN S.L.*

Palabras clave: Plana de Valencia, Abanico costero, Holoceno, Modelación geológica urbana

**Resumen.** El ámbito territorial estudiado se enmarca geológicamente en la Plana de Valencia. La masa de agua subterránea de la Plana de Valencia Norte se asimila comúnmente a un acuífero multicapa, formado por diversos tramos de materiales detríticos miocuaternarios intercalados en una formación limo-arcillosa. Esta descripción presenta un medio muy heterogéneo en su comportamiento hidrogeológico, con formaciones diversas en sus características hidráulicas, lo que indica una notable complejidad en la interpretación de su comportamiento hidrogeológico.

La falta de información detallada sobre la configuración del subsuelo en la ciudad de Valencia, ubicada en el abanico aluvial que se forma por la desembocadura del Río Turia en el Mediterráneo, plantea desafíos significativos en la ejecución de proyectos civiles y urbanísticos. Hasta la fecha, la mayoría de los estudios se han centrado en aspectos geotécnicos o sedimentológicos superficiales, proporcionando una comprensión limitada de los cambios horizontales y laterales de las facies sedimentarias característicos en entornos aluviales como el de la zona de estudio.

Para enfrentar este desafío, este trabajo ha desarrollado un modelo de alta resolución de los primeros 50 metros del acuífero superficial cuaternario holoceno en una zona central de la ciudad. La metodología implementada incluyó una minuciosa recopilación de datos geológicos y geotécnicos, seguida de sondeos directos en el área de interés, que proporcionaron información litológica del subsuelo. La interpretación sedimentológica, estratigráfica y paleoambiental de estas perforaciones permitió realizar una correlación estratigráfica y una

reconstrucción 3D del subsuelo. Se han identificado cuatro facies sedimentarias de naturaleza detrítica: facies de limos y arcillas, facies de arenas, facies de cantos y gravas, subdivididas en facies de canales y de lóbulos.

El modelo paleoambiental propuesto en base a estos resultados sugiere que el sistema corresponde a un abanico costero (delta aluvial o abanico deltaico) con retrabajamiento marino esporádico en su frente. La posición de los sondeos analizados se considera como una sección transversal al eje del sistema, paralela a la línea de costa, y en la zona distal del abanico costero. Por otro lado, el estudio ha revelado que, a diferencia de sondeos anteriores que sugerían una capa holocena más superficial, al menos los primeros 50 metros del subsuelo corresponden a este periodo.

Durante el estudio, también se llevaron a cabo ensayos de permeabilidad tipo Lefranc en nueve sondeos y se revisaron ensayos previos de permeabilidad y bombeo en la zona de estudio y el entorno urbano adyacente. Los resultados de estos ensayos indicaron que los diferentes niveles acuíferos tienen una conexión hidráulica variable. Algunos niveles acuíferos mostraron poca respuesta a bombeos prolongados, lo que sugiere que están pobremente conectados con otros niveles, reflejando así la compleja estructura del sistema.

El acuífero holoceno de la Plana de Valencia se comporta como un sistema libre bajo condiciones naturales, recibiendo recarga principalmente por infiltración de lluvia, aportes laterales, retorno de riego y pérdidas de redes urbanas. En situaciones de explotación, los cuerpos de alta permeabilidad, aunque inicialmente se comportan como libres, pueden actuar como semiconfinados debido a su recarga a través de los materiales circundantes de menor permeabilidad. Esto explica las variaciones observadas en los niveles piezométricos y resalta la naturaleza compleja y heterogénea del sistema acuífero.

El resultado obtenido en este estudio es una reconstrucción de la geometría del acuífero superficial holoceno de la Plana de Valencia, que muestra la posición en profundidad de los materiales descritos y sus variaciones laterales. A su vez, se establece un marco fundamental para un mejor conocimiento del subsuelo valenciano, ofreciendo una herramienta útil para la planificación y realización de proyectos futuros en la región.

**Agradecimientos:** Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a ADIF por permitir la divulgación de los resultados de esta investigación. Su autorización ha sido crucial para compartir estos hallazgos con la comunidad académica y el público en general.

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco de doctorado industrial mediante el vínculo que la doctoranda tiene con la empresa EVREN.

## El agua en forma de vapor y su importancia para los recursos hídricos subterráneos en periodos de sequía.

Claus Kohfahl<sup>1</sup>, Fernando Ruiz Bermudo<sup>1</sup>, Jose Manuel Gómez Fontalva<sup>1</sup>, Antonio Nicolás Martínez Sanchez de la Nieta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IGME-CSIC

Palabras clave: flujo de vapor, lisímetro de precisión, balance hídrico del suelo

**Resumen.** En regiones áridas o semiáridas el flujo de agua en vapor puede tener un papel importante para el ciclo hidrológico y los recursos de agua subterránea. Varios estudios han mostrado que el volumen de evaporación/condensación llega a valores de 0,5-0,7 mm diarios que dan lugar a volúmenes acumulados considerables durante el año, especialmente en años secos. Por lo tanto, su estudio es importante para el entendimiento de procesos de la recarga de los acuíferos por precipitación no lluviosa que incluye el rocío, la deposición de niebla y la condensación de vapor en el medio poroso subterráneo del sedimento. Por la complejidad de la medida de los diferentes flujos de vapor hasta el momento hay pocos estudios sobre estos procesos, pero en los últimos años se ha obtenido una herramienta importante mediante los lisímetros de pesaje para cuantificar estos procesos con muy alta resolución. Por lo tanto, en marzo de 2021, con la financiación del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020 (proyecto EQC2018-004130-P), se realizó la instalación de 4 lisímetros de pesada (dos de 1 m<sup>2</sup> de superficie y 1,5 m de profundidad y dos de 0,07 m<sup>2</sup> de superficie y 0,9 m de profundidad). Cada uno de ellos se instaló en sedimentos homogéneos de arenas de dunas. Aparte de los pesos se monitorizan de remoto los parámetros meteorológicos y los parámetros del suelo en diferentes profundidades como contenido de agua, succión, temperatura y electroconductividad sumando un total de 160 parámetros con registro de cada 10 min. La presentación muestra el estudio de agua en forma de vapor durante el periodo seco de los años 2021-2023 y da resultados concretos sobre la evolución de los parámetros del balance del suelo. Aparte se presentará también la influencia de diferencias constructivos en los resultados.

**Agradecimientos:** Estamos muy agradecidos a André Peters por proporcionar el filtro AWAT. Agradecemos el apoyo y la colaboración de la Estación Biológica de Doñana, la Reserva Biológica de Doñana y la administración del Parque Nacional de Doñana. La infraestructura ha

sido cofinanciada por Fondos Europeos de Investigación (Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares y Equipamiento 2013, IGME13-1E-2113).

## El origen del manantial sulfhídrico de Agreda (Cordillera Ibérica, Soria)

Catalina Bezares<sup>1</sup>, Eugenio Sanz Pérez<sup>1</sup>, Ignacio Menéndez-Pidal<sup>1</sup>, Joaquín Sanz de Ojeda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Geología. Departamento de Morfología e Ingeniería del Terreno. Esc. Tec. Sup de Ing. de Caminos, CC. y PP., Universidad Politécnica de Madrid (U.P.M.).

Palabras clave: Procesos redox, Oxidación piritas, Turberas, Desnitrificación

**Resumen.** Comprender la distribución espacial de los procesos redox en acuíferos y cuantificar la velocidad de las reacciones es esencial para evaluar la calidad de aguas subterráneas ya que el destino de muchos contaminantes depende en gran medida de estos procesos y de los efectos autodepuradores de los acuíferos. Muchos de estos procesos están condicionados por el metabolismo microbiano cuya energía para su mantenimiento y crecimiento depende de la oxidación de especies orgánicas o inorgánicas (por ejemplo, piritas). El carbono orgánico es el donante de electrones más común en aguas subterráneas, tal como ocurre con la turba. Los microorganismos oxidarán primero el carbono orgánico usando el O<sub>2</sub> disuelto como aceptor de electrones a través de la respiración aeróbica porque es la reacción más energéticamente favorable. Cuando el O<sub>2</sub> disuelto se consume, los facultativos anaerobios comienzan a usar nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) como aceptor de electrones durante la desnitrificación, sulfatos, y otros sistemas redox inorgánicos.

El estudio que aquí presentamos ofrece el caso de turberas naturales que son la zona de descarga de acuíferos donde abundan las piritas de manera dispersa y generalizada, una circunstancia que confiere un ambiente hidrogeológico singular. Este caso puede ser aprovechado como modelo hidrogeoquímico de cómo funciona el efecto autodepurador de un acuífero natural con piritas y sedimentos orgánicos. Los acuíferos de Agreda forman un conjunto de dos sistemas perfectamente interconectados: se trata de un extenso acuífero carbonatado con piritas que alimenta de manera subterránea a otro acuífero cuaternario pequeño y superficial, donde predominan los materiales orgánicos. En ambos ha habido la oportunidad de conocer y comparar la química del agua que circula y sale del primer acuífero (manantiales conocidos como Los Ojos del Keyles) y entra a su vez por transferencia lateral subterránea en el acuífero

freático, y la que sale por este último a través del manantial sulfurado de la Dehesa de Agreda.

Los objetivos de este trabajo son: (1) Definir el modelo conceptual hidrogeológico e hidrogeoquímico del acuífero cuaternario de turbas. (2) Identificar el origen del alto contenido en sulfhídrico en el acuífero cuaternario en su relación a la litología y contenido en piritas y sedimentos turbosos, valorando la importancia de la oxidación de la pirita en ambientes hidrogeológicos anaerobios. (3) Examinar los cambios en las concentraciones a lo largo del flujo, explorando las reacciones dominantes redox que pueden darse, y las tasas de reducción de O<sub>2</sub> y desnitrificación.

Entre otros métodos y análisis, se llevó a cabo un monitoreo detallado de las aguas subterráneas durante un periodo de ocho años, muestreando en dos puntos seleccionados del flujo subterráneo a lo largo de un tramo de 500 m por el acuífero cuaternario. Se midió con periodicidad semanal in situ el contenido en oxígeno, transparencia, nitritos y nitratos, alcalinidad, pH, conductividad y temperatura de sus aguas, totalizando 10.584 análisis

En este tramo del acuífero rico en sedimentos orgánicos y piritas la velocidad del flujo es más lenta. Las turbas y la oxidación de la pirita en ambiente anaerobio conllevan a la anulación del oxígeno disuelto, la producción de gas sulfhídrico y la generación de yeso de origen bacteriano.

# El robo del agua en la cuenca del Segura. Diagnóstico y evolución de la superficie en regadío en situación de potencial ilegalidad en varias zonas de la demarcación hidrográfica

Manuel Bea Martínez<sup>2</sup>, Alberto Fernández-Lop<sup>1</sup>, Teresa Gil Gil<sup>1</sup>, Rafael Seiz Puyuelo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>WWF España

<sup>2</sup>ICATALIST - Shared Value Innovation

Palabras clave: robo del agua, agricultura ilegal, teledetección y fotointerpretación, mapa de cultivos

**Resumen.** El presente estudio tiene por objetivo identificar la superficie regada en situación de posible ilegalidad en el año 2022, esto es, fuera de los límites de las zonas con derechos de riego reconocidos y consolidados por la Confederación Hidrográfica del Segura, en el ámbito administrativo de la demarcación hidrográfica del Segura (DHS). Así mismo, el estudio ha realizado una primera estimación del volumen de agua utilizado para el riego, en función de las dotaciones oficiales propuestas para cada tipo de cultivo, correspondiente a esta superficie en posible situación de ilegalidad.

La metodología de análisis se basa en el uso de técnicas de teledetección y de fotointerpretación para elaborar una cartografía de detalle de zonas de cultivo que se encuentran fuera de los límites de la cartografía oficial, de zonas agrícolas con derechos de agua para riego consolidados. Para ello, se utilizan los recintos recogidos por el SIGPAC, y se diferencian los cultivos leñosos, los herbáceos, y los cultivos en invernaderos. Además, el análisis estima la evolución de las superficies regadas en el periodo 1985-2022, tomando cinco fechas claves como referencia, distinguiendo cuatro zonas de estudio distintas. Estas zonas son el Campo de Cartagena, y la superficie de las provincias de Albacete, Alicante y Almería dentro de los límites de la DHS.

Los resultados muestran la extensión significativa de los regadíos en posible situación de ilegalidad en el año 2022, principalmente en las superficies de la provincia de Albacete (11.620 ha), y de Almería (3.713 ha), dentro de los límites de la DHS. En la zona de la provincia de Alicante, que es atendida principalmente con recursos superficiales del Trasvase Tajo-Segura, la extensión de estas

superficies en posible situación de irregularidad es muy inferior (225 ha). Por otra parte, la distribución de los distintos tipos de cultivos regados, varía en cada zona de estudio, destacando los cultivos leñosos (viñedo especialmente) en Albacete, los herbáceos y los cítricos en Almería, y una mezcla de cultivos en la zona de Alicante. En el Campo de Cartagena a la luz de los resultados parece que la superficie regada potencialmente de forma ilegal se está estabilizando (10.727 ha en 2022 frente a 11.163 ha en 2019). Aquí destaca la reducción del número medio de cosechas de hortícolas por finca, aunque se está produciendo un incremento de la superficie de cultivo de hortícolas en otras zonas de la cuenca.

Los resultados del estudio apoyan la necesidad de promover enfoques específicos para abordar el problema de la práctica ilegal de riego en cada zona, siendo igual de importante entender la evolución de las prácticas agrícolas particulares de cada una de ellas, para poder promover en una gestión eficaz y sostenible del agua para estos usos.

**Agradecimientos:** Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico pero no expresa la opinión del mismo

# Ensayo piloto de mitigación de los eventos climáticos extremos mediante la promoción de la recarga de los acuíferos aluviales del río La Muga

Juan Fernando Rubilar Contreras<sup>1</sup>, Diana Puigserver Cuerda<sup>1</sup>, José María Carmona Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universitat de Barcelona*

Palabras clave: Recarga gestionada de acuíferos, Intrusión marina, La Muga, Reutilización aguas residuales

**Resumen.** Los fenómenos hidroclimáticos extremos que provocan escasez (sequía) o exceso (inundación) de agua son capaces de generar impactos negativos tanto en las zonas afectadas, como en la población, en las actividades económicas y en las cadenas de producción. Por un lado, el calentamiento global y el aumento de la evapotranspiración contribuyen a que las precipitaciones sean más frecuentes e intensas. Así, las tres últimas décadas han sido uno de los periodos con más inundaciones en Europa. Por otro lado, la frecuencia y la gravedad de las sequías meteorológicas e hidrológicas también han aumentado en la mayor parte de Europa. La sequía pertenece a la categoría de "desastre natural" más importante a nivel mundial en función de la mortalidad e impacto socioeconómico en relación con el producto interno bruto (PIB) per cápita de los países. Minimizar estos impactos negativos y garantizar el suministro de agua para la humanidad y los ecosistemas es actualmente uno de los problemas sociales y ambientales más desafiantes, a causa también del aumento de la población mundial y la consiguiente demanda de agua.

Para afrontar esta problemática, la Recarga Gestionada de Acuíferos (Managed Aquifer Recharge, MAR), promueve la recarga de agua de los acuíferos mediante pozos de inyección, balsas de infiltración, infiltración inducida en las riberas de los ríos, recogida de agua de lluvia y de escorrentía, etc., para su uso posterior o beneficio medioambiental. Esta estrategia puede considerarse una solución basada en la naturaleza (nature-based solution, NBS), para conservar o rehabilitar los ecosistemas naturales haciendo uso de aguas pluviales, regeneradas, o recolectadas en eventos de crecidas e inundaciones, entre otras fuentes de agua.

En específico, el presente estudio consta de una prueba piloto MAR, de recarga por pozos de inyección, a efectuarse en la parte baja de la cuenca del río La Muga, ubicada en el límite oriental de la provincia de Girona, en Cataluña. La Muga es

una cuenca cerrada, su cabecera abarca cumbres de alrededor de 1500 msnm en los Pirineos y desemboca en el Mediterráneo, recorriendo una distancia de 58 km a través de su cauce principal, y abarcando una superficie de unos 990 km<sup>2</sup>. En esa zona, la creciente demanda estacional por el turismo y la intrusión salina en los acuíferos aluviales costeros marcan los desafíos a la gestión del tratamiento y distribución del agua. Estos acuíferos son, uno de carácter libre, y otro que es cautivo situado por debajo de un acuitardo subyacente al acuífero libre.

La citada prueba piloto se realizará tanto en el acuífero libre como en el cautivo. Se construirán dos pozos de inyección, uno para generar recarga en el acuífero libre-superficial y otro para el acuífero confinado-profundo, y además tres piezómetros de observación desde donde se monitorizará el nivel piezométrico y la calidad del agua, ubicados aguas arriba y aguas debajo de la inyección, en un esquema tipo Aquifer Storage Transport and Recovering (ASTR), aprovechando el tiempo de residencia y transporte a lo largo de los dos acuíferos para mitigar los efectos del descenso piezométrico a causa de la creciente sequía y de la pérdida de calidad por salinización como consecuencia de la intrusión marina. Cabe mencionar que no se contempla la recuperación del agua por bombeo posterior a la inyección, ya que el objetivo es generar una barrera hidráulica para la contención de la intrusión marina. El agua a inyectar se obtendrá desde la EDAR de Castelló d'Empúries, donde se tratan de 18.000 a 20.000 m<sup>3</sup>/día a través de una línea de tratamiento que incluye tratamiento biológico y aireación, decantación secundaria, y un innovador sistema de tratamiento terciario a través de un esquema de lagunas artificiales y humedales construidos, donde se eliminan nutrientes a través de procesos naturales de captación de nutrientes por microorganismos y plantas que permiten a su vez un aumento en el oxígeno para su posterior uso ambiental en el Parque Natural de Aiguamolls de l'Empordà.

La prueba piloto tendrá varios objetivos: i) Identificar, a nivel local, los principales parámetros cuantitativos y cualitativos del acuífero, que son fundamentales para la implementación de herramientas MAR y que controlan los sistemas de remediación basados en la naturaleza (NBS). ii) Desarrollar una metodología generalizada para aplicar el enfoque NB-MAR, basada en la evaluación a nivel de cuenca de eventos hidrológicos extremos y sistemas de flujo de agua subterránea. iii) Proporcionar no solo aportes al conocimiento en el campo, sino también desarrollar herramientas para la toma de decisiones, tanto en aspectos normativos como de gestión de cuenca. iv) Explorar los impactos positivos de índole social y económica que podrían derivarse de la aplicación de esta metodología.

**Agradecimientos:** El presente estudio se enmarca y recibe financiación del proyecto Water4All-Climate Extremes buffering through groundwater flow-based Managed Aquifer Recharge and

Public Engagement, ClimEx-PE. Este proyecto recibe cofinanciamiento de la Unión Europea y se le agradece por su financiación en el presente estudio.

## Estimación de las fuentes de recarga en un acuífero urbano

Diego Schmidlin<sup>1</sup>, Eike Thaysen<sup>1</sup>, Cristina Domenech<sup>2</sup>, Neus Otero<sup>2</sup>, Sandra Pérez<sup>3</sup>, Sergio Santana<sup>1</sup>, Enric Vázquez-Suñé

<sup>1</sup>*Department of Geosciences, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA), Severo Ochoa Excellence, Barcelona, Spain*

<sup>2</sup>*Grup MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia—MAGH, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, Spain*

<sup>3</sup>*Department of Environmental Chemistry, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA), Severo Ochoa Excellence Center of the Spanish Council for Scientific Research (CSIC), Barcelona, Spain*

Palabras clave: Contaminación, Fuentes de recarga, Procesos de mezcla y redox, Contaminantes Orgánicos Emergentes

**Resumen.** La ciudad de Barcelona está experimentando una de las mayores sequías de su historia. Si bien el suministro de agua potable en la ciudad proviene principalmente de aguas superficiales (embalses), con un menor porcentaje de aguas subterráneas, recientemente se están evaluando nuevas fuentes de suministro (ej. aguas regeneradas, desalinización) para satisfacer la demanda. Desde la década de 1970, los acuíferos de Barcelona han experimentado un considerable aumento en sus niveles piezométricos debido al abandono de pozos industriales, por lo que sus reservas potenciales no están siendo completamente explotadas, constituyendo un recurso esencial en momentos de emergencia como la sequía actual. En la actualidad, este recurso se utiliza principalmente para la limpieza de calles y el riego de parques y jardines debido a su mala calidad. Un primer paso para mejorar la calidad las aguas subterráneas es identificar las fuentes de contaminación y/o fuentes de recarga. Este conocimiento es esencial para establecer las medidas de gestión que permitan prevenir la contaminación de los acuíferos, ya que la prevención siempre es técnica y económicamente más favorable que la remediación cuando el recurso hídrico ya está contaminado. En el contexto del proyecto UpWater "Understanding Groundwater Pollution to Protect and Enhance Water Quality", se han utilizado modelos de mezcla utilizando el código MIX, con datos hidroquímicos, isotópicos y de compuestos emergentes, para identificar las fuentes de contaminación y su contribución en las aguas subterráneas. El caso de estudio utilizado para ilustrar la utilidad de la

metodología es el acuífero urbano del Delta del Besòs. Se han identificado cuatro principales fuentes de recarga (end members): el río Besòs, filtraciones de la red de distribución, filtraciones de aguas residuales y escorrentía urbana. Para cuantificar la magnitud de cada fuente de recarga, se ha aplicado el código MIX, considerando trazadores conservativos (ej. Cl<sup>-</sup>), y no conservativos (ej. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, DOC), isótopos estables de H<sub>2</sub>O y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y contaminantes orgánicos emergentes seleccionados (ej. diclofenaco, carbamazepina). Los trazadores conservativos se han utilizado para estimar los porcentajes de mezcla, mientras que los no conservativos para identificar procesos que estarían afectando la composición química de las aguas. Para el cálculo de los porcentajes de mezcla se han considerado 2 modelos; uno a escala de todo el Delta del Besos (~20 km<sup>2</sup>) y otro local (0.05 km<sup>2</sup>) correspondiente a una zona donde se da un bombeo intenso (150 – 200 L/s) cercano al río, que genera una importante infiltración desde el lecho del río (“river bank infiltration”). Para este último modelo solo se han considerado como end members el río Besòs en época seca y lluviosa. Los porcentajes de mezcla obtenidos, para el modelo a escala de acuífero, son espacialmente heterogéneos; en promedio el más abundante es el end member Río (época seca) con un 29% [0 - 56%], seguido de aguas residuales 24% [0 - 57%], la escorrentía urbana 20% [0 - 72%], la red de suministro de agua 20% [0 - 63%] y por último el end member Río (época lluviosa) 7% [0 - 34%]. En el modelo local los porcentajes de mezcla son homogéneos, y la práctica totalidad de la recarga proviene del end member del río, un 93% sería de recarga en época seca 1, seguido por la recarga en período húmedo (5%) y en época seca 2 (2%). Los resultados son consistentes con una sequía de largo alcance. Los modelos aplicados han permitido además identificar una serie de procesos como la degradación de materia orgánica, respiración aeróbica, desnitrificación, sulfato reducción y disolución/precipitación de calcita y magnesita.

**Agradecimientos:** Project UPWATER (Grant Agreement nº101081807)

## Estudio de la distribución de la humedad en la zona no saturada en sistemas de recarga gestionada suelo-acuífero

Lurdes Martínez-Landa<sup>1</sup>, Cristina Valhondo<sup>2</sup>, Perla Piña-Varas<sup>3</sup>, Juan José Ledo<sup>4</sup>, Jesús Carrera<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Dept. Enginyeria Civil i Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain. Unidad Asociada: Grupo Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC)*

<sup>2</sup>*Instituto Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona. Unidad Asociada: Grupo Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC)*

<sup>3</sup>*Dept. Dinàmica de la Terra i de l'Oceà. Universitat de Barcelona, Barcelona.*

<sup>4</sup>*Facultad Ciencias Físicas, Universidad Complutense, Madrid.*

Palabras clave: Recarga gestionada, Zona no saturada, Degradación, Biofilm

**Resumen.** La creciente demanda de agua de calidad insta a desarrollar estrategias ambientalmente sostenibles para promover la reutilización y el reciclaje del agua. Los sistemas de recarga gestionada y, en particular los Sistemas Suelo-Acuífero (SAT en inglés) han demostrado su eficiencia en la mejora de la calidad del agua al reducir la mayoría de los contaminantes presentes en estas aguas mediante procesos como la biodegradación, la retención y la sorción.

Dentro de estos sistemas, la zona no saturada (ZNS) juega un papel fundamental en la mejora de la calidad del agua. En esta zona, debido a los cambios en las condiciones físico-químicas se produce un aumento en la actividad biológica que favorece la biodegradación. Además, la convivencia de la fase sólida, líquida y gaseosa, aumenta las superficies disponibles para la adsorción, favoreciendo los procesos de retención de patógenos y coloides.

Durante la recarga, el frente de hidratación-drenado de la ZNS parece que sigue un patrón con la profundidad, pero, debido a la heterogeneidad, el agua de recarga empieza a hidratar el suelo a través de caminos preferentes y, a partir de aquí irá hidratando el resto del medio, y lo mismo ocurre durante el drenado. Dependiendo del tiempo que dure la recarga, el caudal y su forma de gestión, la forma de hidratar el medio puede ser diferente, y esto puede condicionar el volumen de medio en el que se forman las colonias bacterianas, el crecimiento del biofilm, las superficies de contacto, y con ello los procesos de degradación de los contaminantes.

Para poder estudiar cómo evolucionan los frentes de humedad-drenado en un sistema SAT, se han utilizado las réplicas construidas en la EDAR de Palamós (Valhondo et al, 2020). Estas réplicas recargan agua del efluente de la EDAR sobre una superficie de 3.5 m<sup>2</sup> con una ZNS de 1.2 m de profundidad. En esta comparación se utilizan las medidas realizadas en dos sistemas: el primero formado completamente por arena fina (SA) y el otro por una capa reactiva formada, fundamentalmente, por una mezcla de 50% arena fina y 30% materia orgánica de origen vegetal, con una pequeña proporción de materiales adsorbentes (10% biochar, 8% zeolitas, 2% arcilla) (SBR).

En estos sistemas se controla el volumen de agua recargado su CE y T<sup>a</sup>, en el acuífero se mide la CE, T<sup>a</sup> y posición del nivel freático bajo la superficie de recarga, y los parámetros meteorológicos en una estación local. Para el control de la evolución temporal de la humedad en la ZNS se ha instalado una sonda Aquachek con 6 sensores distribuidos en profundidad cada 10 cm. Esta sonda proporciona medidas puntuales, que dan una idea de la evolución del frente de humedad en profundidad.

Se han instalado 6 varillas separadas entre sí 65 cm con 12 electrodos cada una hasta alcanzar los 1.2 m de profundidad (hasta el acuífero), que nos permite medir la distribución 3D de la resistividad en un volumen de 1 m<sup>3</sup>. Las medidas de resistividad se asocian a las propiedades del medio poroso y también a los fluidos que circulan por él. Es por esto que, repitiendo las medidas desde los materiales secos iniciales y en varios momentos del proceso de recarga, por comparación entre ellas, podremos obtener la distribución 3D de este volumen de ZNS durante la hidratación (inicio de la recarga) y el drenado (parada de la recarga), y con el tiempo de funcionamiento de los SAT, la posible formación de biofilms.

En este trabajo se presentan las comparaciones de las medidas de resistividad en dos periodos de recarga operados con diferente distribución de la recarga en el tiempo, manteniendo el mismo volumen total recargado, tomando medidas durante el inicio y a la parada de la recarga, para observar la evolución 3D del contenido de agua. Se observa cómo el agua se va infiltrando formando digitaciones y una gran heterogeneidad en el contenido de agua en el volumen estudiado, tanto para el SA como para el SBR. El comportamiento del SA es algo diferente al SBR debido a su composición.

**Agradecimientos:** Water JPI MARADENTRO (PCI2019-103603 y PCI2019-103425), CONMIMO (TED2021-131188B-C31), y al AGAUR-SGR00609. Queremos agradecer al Consorci d'Aigües de la Costa Brava Girona (CACBGi) por el acceso a la EDAR. EU Life programme (LIFE REMAR LIFE20 ENV/ES/000284).

## Estudio de la subsidencia por sobreexplotación de acuíferos a escala nacional

Guadalupe Bru<sup>1</sup>, Marta Béjar-Pizarro<sup>1</sup>, Pablo Ezquerro<sup>1</sup>, Jhonatan S. Rivera<sup>1</sup>, Rosa M. Mateos<sup>1</sup>, Anna Barra<sup>2</sup>, Oriol Monserrat<sup>2</sup>, Héctor Aguilera Alonso<sup>2</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*

<sup>2</sup>*Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC)*

Palabras clave: Buen estado, InSAR, Masa de Agua Subterránea, Subsidencia

**Resumen.** La detección y seguimiento de los desplazamientos del terreno en grandes áreas, incluyendo regiones nacionales y continentales, es posible gracias al uso de técnicas avanzadas de Interferometría Radar Satelital (InSAR). En los últimos dos años estas técnicas han aprovechado la amplia disponibilidad de imágenes del satélite Copernicus Sentinel-1 y la implementación del Servicio Europeo de Movimiento del Suelo (EGMS). Este servicio proporciona millones de puntos de medición para cartografiar la deformación a nivel nacional.

La sobreexplotación de los acuíferos es un problema global que conlleva consecuencias significativas, como la subsidencia del terreno, que puede tener impactos severos en infraestructuras y ecosistemas. En este estudio hemos utilizado el producto ORTHO Vertical del periodo 2018-2022 del EGMS a escala nacional para investigar los movimientos del terreno relacionados con la sobreexplotación de acuíferos.

Una vez descargados todos los datos del EGMS de toda la península ibérica, se ha utilizado el conjunto de herramientas denominadas ADATools (Navarro et al., 2019, 2020; Tomás et al., 2019), desarrolladas para facilitar el uso e interpretación de mapas de desplazamientos de datos InSAR. En concreto se ha empleado la herramienta ADAfinder, con la que es posible realizar la detección automática de Áreas de Deformación Activa (ADAs). De este modo se ha obtenido un mapa de ADAs de toda la península ibérica, en aquellas zonas donde existen definidas masas de agua subterránea (MASb).

A continuación, se ha realizado un análisis de correlación espacial de este mapa de ADAs con todas las masas de agua subterránea declaradas, según el tercer ciclo de planificación hidrológica, en riesgo de no alcanzar en 2027 el buen estado cuantitativo y/o cualitativo.

Los resultados permiten identificar zonas con una alta correlación entre los movimientos del terreno importantes y las MASb declaradas en riesgo, y por lo tanto, con acuíferos sobreexplotados y/o en los que existe un regadío intenso. Se pueden mencionar algunas zonas en las que las MASb que registran en el EGMS velocidades reseñables de movimiento del terreno, como las que están situadas en el entorno de Villena, valle del Guadalentín, Almería, Tenerife o Zaragoza. En general, este trabajo resalta la utilidad de los datos InSAR a escala nacional como herramienta de apoyo a la gestión de los recursos hídricos.

**Agradecimientos:** Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto SARAI, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de la Agencia Española de Investigación 10.13039/501100011033 (PID2020-116540RB-C21 y C22).

# Estudio de la variación estacional de una amplia gama de contaminantes de preocupación emergente en recursos hídricos de la Cuenca del Guadalhorce (Sur de España): uso de isótopos estables de nitrato (d15N) y boro (d11B) para identificar fuentes de contam

Marta Inés Llamas-Dios<sup>1</sup>, Iñaki Vadillo Pérez<sup>1</sup>, Pablo Jiménez-Gavilán<sup>1</sup>, Pablo Lara-Martín<sup>2</sup>, María de la Luz Tovar-Salvador<sup>2</sup>, Rubén Ríos-Quintero<sup>2</sup>, Lucía Ojeda-Rodríguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Málaga

<sup>2</sup>Universidad de Cádiz

Palabras clave: Contaminantes de preocupación emergente, Acuíferos detríticos, Isótopos de Nitrato y Boro, Cuenca del Río Guadalhorce

**Resumen.** Los Contaminantes de Preocupación Emergente (CECs; sustancias derivadas del consumo y las actividades humanas, como fármacos, productos de cuidado personal, sustancias derivadas de la industria, etc.) suscitan cada vez más interés debido a sus posibles efectos adversos en los seres vivos y a su ubicuidad en el medio ambiente, sobre todo en los sistemas acuáticos. Su distribución es difícil de comprender, ya que puede verse afectada por numerosos factores: localización de las fuentes de contaminación, hidrofobicidad, degradabilidad, características hidro(geo)lógicas del medio en el que se han introducido, etc. El uso integrado de  $\delta^{11}\text{B}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  se ha aplicado en la cuenca del río Guadalhorce (Sur de España) para investigar las fuentes de contaminación (aguas residuales, purines de cerdo, fertilizantes) y su relación con una amplia gama de CECs. La cuenca del río Guadalhorce integra acuíferos de naturaleza carbonática, evaporítica y detrítica. El estudio que se expone se ha desarrollado en los acuíferos detríticos de la zona alta de la cuenca (Vega de Antequera, Campillos/Teba) y de la zona baja (Bajo Guadalhorce). Su recarga proviene, principalmente de la precipitación pero al ser una zona agrícola también hay aportes, en algunas épocas de importancia, en forma de retorno de riegos. Se han realizado dos campañas de muestreo para estudiar la estacionalidad de los contaminantes: Noviembre 2021 (Estiaje) y Abril 2022 (Recarga), en las que se han recogido 70 muestras de agua de acuíferos detríticos y cursos de agua

superficiales relacionados en la cuenca alta, media y baja y se han analizado isótopos estables y CECs. El uso de gráficos (1/B vs.  $\delta^{11}\text{B}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  vs.  $\delta^{11}\text{B}$ ) ha permitido diferenciar las tres fuentes de contaminación pero también el peso relativo de cada uno de los contribuyentes para los periodos seco y húmedo. En total, se han detectado 93 CECs, al menos una vez: 51 productos farmacéuticos (incluidos 22 antibióticos), 19 sustancias derivadas de drogas de abuso (anfetaminas, cannabinoides, opioides...), 6 edulcorantes artificiales, 7 filtros UV, 7 fragancias, un antibacteriano y un repelente de insectos. En la mayoría de los casos, los CECs se detectan con mayor frecuencia en el periodo húmedo, pero en menor concentración, lo que sugiere un mayor efecto de los procesos hidrodispersivos por el mayor aporte de la recarga, que se ve respaldado por los resultados isotópicos: las señales isotópicas, tanto de la molécula del agua, como de los isótopos de nitrato y boro, se vuelven más similares para la cuenca superior e inferior en la estación húmeda. Esta investigación es objeto de estudio en la actualidad y se pretende obtener información pertinente sobre la degradación y/o procesos de sorción de estos contaminantes en cada acuífero de la cuenca.

## Estudio de salinidad del agua subterránea en el acuífero detrítico costero Marbella-Estepona (Costa del Sol, provincia de Málaga) a partir de un ensayo de lixiviado tipo batch

María del Rosario García Cuadra<sup>1</sup>, Juan Antonio Barberá Fornell<sup>1</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga*

Palabras clave: acuíferos costeros, recarga gestionada, salinidad, interacción agua-sedimento

**Resumen.** La presente investigación hidrogeoquímica se enmarca en el proyecto europeo LIFE-MATRIX, que tiene por objetivo analizar la viabilidad de realizar recarga gestionada de acuíferos con agua regenerada y evaluar su posible impacto en las aguas subterráneas del acuífero pliocuaternario de Marbella-Estepona (Costa del Sol, Málaga). Las operaciones de recarga gestionada se pretenden implementar en la EDAR de La Víbora (Marbella), a partir de una infraestructura de nueva creación consistente en dos balsas de infiltración en las que se verterán aguas residuales urbanas depuradas mediante tratamiento terciario. Esta comunicación se centra en el análisis del origen de la salinidad de las aguas subterráneas en un acuífero costero a partir de pruebas experimentales en laboratorio y su posterior comparación con observaciones de campo. Asimismo, se pretende averiguar la composición química del agua intersticial para un mejor entendimiento de los procesos hidrogeoquímicos que tienen lugar en la dimensión vertical del acuífero (tránsito zona no saturada – zona saturada). Para ello, se ha realizado un ensayo de tipo batch (lixiviado de sedimentos) a partir de once muestras de sedimentos arcilloso-arenosos pliocenos obtenidas de testigos de sondeos geotécnicos (de 8,1 a 18,2 metros de profundidad) recientemente perforados en la EDAR. El experimento se llevó a cabo mediante la aplicación del método de extracción por saturación del suelo (SSE) similar al descrito por Schuwirth y Hofmann (2006). Durante el período de estudio (80 días) se realizaron mediciones in situ del total de sólidos disueltos (TSD), potencial de oxidación-reducción (ORP) y pH. Asimismo, se tomaron muestras de agua para la determinación de iones mayoritarios (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup>), carbono orgánico total (TOC) y una selección de elementos traza (Fe, Mn, Al y Sr).

Los resultados obtenidos en el ensayo muestran un aumento generalizado del valor de TDS en todas las muestras, de manera que los iones que más contribuyen a la mineralización del agua son principalmente  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ . Los valores de ORP tienden a disminuir con el tiempo, aunque se observa en todas las muestras un pico muy pronunciado (con valores de hasta 272 mV) a las 6-12 horas. Por su parte, el pH aumenta progresivamente hasta estabilizarse con valores próximos a 7, que parece indicar el equilibrio químico al término del ensayo. Los valores de TOC analizados, variables entre 0,20 y 3,50 mg/L, ponen de manifiesto la disponibilidad de materia orgánica entre los poros de los sedimentos, que debe actuar como producto de reacción en diferentes procesos biogeoquímicos (respiración aeróbica). La información hidroquímica antecedente permite constatar que las aguas subterráneas del sector acuífero estudiado muestran concentraciones elevadas de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ , que aumentan progresivamente a lo largo del flujo subterráneo hacia la costa. En cuanto al resto de iones, el contenido de  $\text{Na}^+$  presenta los valores más elevados, seguido del  $\text{Ca}^{2+}$ , especialmente en áreas más próximas a costa donde se producen procesos de intercambio catiónico. La mineralización resultante en las muestras de agua de los ensayos de lixiviados de sedimentos está asociada a procesos de disolución mineral (p.e. halita, yeso y fluorita, entre otras fases minerales) en los sedimentos pliocenos, que atestiguan la liberación de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en disolución. Llama la atención la ausencia de  $\text{Br}^-$  en las muestras acuosas de lixiviados, hecho que podría indicar la existencia de procesos de intenso lavado de los sedimentos a partir de la recarga vertical del acuífero. Las muestras que contienen concentraciones relativamente significativas de Fe coinciden con aquellas en las que se detecta Al. En otras muestras, se detecta Mn de forma puntual coincidiendo con la determinación de Sr. Estas observaciones son coherentes con la ocurrencia de reacciones químicas que contribuyan a la reducción del Fe y a la precipitación de gibbsita y/o a la meteorización de feldespatos. Los resultados experimentales obtenidos, aunque arrojan información de gran interés para explicar mejor los procesos la evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del acuífero pliocuaternario, muestran ciertas limitaciones asociadas a la técnica experimental empleada (interacción agua-sedimento por difusión, cinética de disolución no reproducible en período de observación, etc).

## Evaluación de la eficacia de barreras reactivas en la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes durante la recarga gestionada de acuíferos

Cristina Valhondo<sup>1</sup>, Lurdes Martínez-Landa<sup>2</sup>, Gaëlle Cabaret<sup>5</sup>, Jesus Carrera<sup>1</sup>, Jingjing Wang<sup>3</sup>, Geoffrey Duporté<sup>5</sup>, Elena Gómez<sup>5</sup>, Linda Luquot<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de diagnóstico ambiental y estudios del agua (IDAEA-CSIC), Jordi Girona 18-26, 08034, Barcelona. Grupo de Hidrogeología UPC-CSIC, Unidad asociada*

<sup>2</sup>*Departamento de ingeniería civil y medioambiente, Universidad Politécnica de Cataluña DECA-UPC, Jordi Girona, 1-3, 08034, Barcelona. Grupo de Hidrogeología UPC-CSIC, Unidad asociada.*

<sup>3</sup>*Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*

<sup>4</sup>*Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, 34095 Montpellier, France*

<sup>5</sup>*HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, IRD, 34095 Montpellier, France*

Palabras clave: Barreras reactivas, Renaturalización del agua, Tratamiento Suelo-aquifero, Transporte de contaminantes

**Resumen.** La recarga gestionada de acuíferos (MAR) es una tecnología robusta disponible para hacer frente a la creciente demanda de agua de calidad. La tecnología MAR, aplicada a través de superficies de infiltración, tiene como principal objetivo incrementar los recursos de agua subterránea y mejorar la calidad del agua recargada. Los dos procesos principales involucrados en la mejora de la calidad del agua recargada son la biodegradación y la adsorción.

La biodegradación está mediada por las comunidades de microorganismos presentes en el suelo, que transforman y eliminan los contaminantes presentes en el agua, utilizando el carbono orgánico como fuente de energía. La adsorción retarda el transporte de los compuestos adsorbidos, aumentando el tiempo en el que esos compuestos están disponibles para ser degradados por los microorganismos.

El uso de barreras reactivas basadas en sustratos orgánicos ha demostrado ser una herramienta efectiva para favorecer ambos procesos. Las barreras reactivas consisten en una mezcla de material del acuífero, sustratos orgánicos (como “compost” y/o madera) y pequeñas porciones de sustratos que proporcionan superficies de sorción (como arcillas, zeolitas, “biochar” y óxidos de hierro) distribuidos en la superficie de la zona de infiltración, formando una capa de un metro de espesor.

Los sustratos orgánicos liberan carbono orgánico en el agua que pasa a través de ellos, induciendo una secuenciación redox aguas abajo que favorece la presencia de comunidades microbianas diversas, capaces de realizar diferentes rutas metabólicas y, por lo tanto, potenciando la biotransformación de los contaminantes orgánicos emergentes. Esta mezcla de materiales tiene también la función de favorecer la adsorción tanto de contaminantes neutros como iónicos.

El objetivo de este estudio es evaluar la eficiencia de una barrera reactiva potenciando estos dos procesos mediante unos ensayos en columna. Para ello se construyeron 4 columnas que emulan un sistema de recarga gestionada de acuíferos. Dos de las columnas se rellenaron con arena y otras dos con material de barrera reactiva. Las columnas se alimentaron con agua sintética. Después de un mes y medio de operación de las columnas se realizó un ensayo de trazadores inyectando un volumen conocido con una concentración dada de dos trazadores y 24 fármacos. El efluente de las columnas se recogió para obtener las curvas de llegada de los trazadores y los fármacos. La eficacia de la barrera reactiva para favorecer la eliminación de los fármacos se evaluó mediante el análisis de las curvas de llegada de los trazadores y de los fármacos. Los resultados iniciales muestran un claro aumento de la eliminación de los fármacos en las columnas que contenían barrera reactiva en comparación con las columnas rellenas de arena.

**Agradecimientos:** ConMimo (Agencia estatal de investigación, AEI, numero TED2021-131188B-C31). Proyecto Sinergia-SAFE, 202330E155- Ayuda mención de excelencia-IDAEA.

# Evaluación de la potencialidad de los canales de riego para la recarga gestionada de acuíferos en la zona Centro-Sur de Chile

Hamil Uribe Cifuentes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA Chile*

Palabras clave: recarga, acuíferos, canales, riego

**Resumen.** La zona centro sur de Chile se ha visto afectada por el Cambio Climático, experimentando un déficit de precipitaciones cercano al 30 por ciento desde el año 2010, lo que se ha denominado megasequía. Las aguas superficiales, que históricamente han sido la principal fuente para el riego, se han reducido drásticamente y las tasas de construcción y uso de pozos han crecido en forma tal, que se pone en riesgo la estabilidad de los acuíferos. Para enfrentar esta situación se generó un Plan Nacional de Recarga de Acuíferos para la Agricultura y se están probando algunas técnicas, como lagunas y pozos de infiltración, sin embargo, son de alto costo y los niveles de recarga logrados han sido relativamente bajos, en relación a la demanda hídrica de riego.

Como una forma alternativa de recarga, más masiva y económica se ha planteado la idea de usar la profusa red de canales de riego, sin revestir, para infiltrar agua hacia los acuíferos durante el otoño e invierno, cuando no hay riego.

Se asume que existe un cierto nivel de filtraciones en los canales, pero es necesario caracterizar y evaluar cuantitativamente el real potencial de recarga, entendido como la cantidad de agua posible de ser infiltrada por los canales, que constituye el objetivo de este trabajo.

La metodología aplicada consistió tomar áreas de riego y pre seleccionar canales para medir el porcentaje de agua que se infiltra. Utilizando un equipo StreamPro ADCP, se realizaron mediciones de caudal cada cierta distancia para diferenciar los tramos con mayor capacidad de infiltración y en algunos casos se aplicaron técnicas de teledetección para apoyan su identificación. Una vez seleccionados los tramos más permeables, se cuantificaron sus filtraciones en más detalle, para identificar espacial y cuantitativamente la capacidad de los canales para infiltrar agua a los acuíferos, como una primera etapa del proceso. En la medida que se contó con información hidrogeológica se pudo asociar la capacidad de filtración de los canales con la aptitud de los acuíferos para ser recargados, considerando aspectos como presencia de acuífero poroso no confinado, pendiente ( $<0,05$ ),

tasa de infiltración ( $> 1$  m/d), profundidad de la zona saturada ( $>5$  m), transmisividad ( $>40$  m<sup>2</sup>/d) y tiempo de tránsito ( $>6$  meses).

**Agradecimientos:** Se agradece a CORFO por el apoyo a la innovación y financiamiento para participar en el CIAS2024.

# Evaluación de los recursos hídricos para la Recarga Gestionada de Acuíferos en el acuífero interfluvial Duerna-Peces (León) mediante modelos semi-distribuidos de precipitación-aportación

Nuria Naranjo-Fernández<sup>1</sup>, Sergio Martos Rosillo<sup>1</sup>, Jorge Jódar-Bermúdez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IGME-CSIC

Palabras clave: balance hídrico, escasez hídrica, Recarga Gestionada de Acuíferos, zayas

**Resumen.** La implementación de modelos hidrológicos se ha convertido en una práctica habitual para poder estudiar o evaluar, por ejemplo, la planificación y la distribución temporal de los recursos hídricos utilizables en actuaciones de Recarga Gestionada de Acuíferos (RGA), además de ser una herramienta de gran utilidad para observar los cambios o tendencias a largo plazo en un área de estudio determinada, entre otros aspectos. En el presente estudio se ha modelado mediante un modelo semidistribuido de precipitación-aportación, aplicando el código HBV-Light, a escala diaria, la cuenca del río Duerna (León), aguas arriba de la estación de aforos de Velilla. El río Duerna se encuentra en el ámbito de actuación geográfica de la Demarcación Hidrográfica del Duero (CHD) y es la principal fuente de suministro hídrico de la comarca de La Valduerna. El interés de conocer los aportes del Duerna, en esta zona, reside en cuantificar su balance hídrico para mejorar la gestión hídrica del acuífero interfluvial Duerna-Peces, que se encuentra aguas abajo de la estación de aforos elegida. Una vez calibrado el modelo, se tendrá un mejor conocimiento del funcionamiento hidrológico de este sistema y se podrán proponer estrategias eficientes en el uso conjunto de aguas subterráneas y superficiales, dado que los usuarios de la zona se enfrentan, cada vez más, a periodos de escasez hídrica.

Como resultado de este trabajo se ha obtenido un modelo de precipitación-aportación calibrado y representativo del río Duerna, que reproduce la secuencia temporal de los caudales medidos en la estación de aforo de Velilla con una eficiencia de la función objetivo del 81,9%. Los recursos anuales para la cuenca de recepción modelada han sido de 76,38 hectómetros cúbicos anuales. En cuanto a la distribución temporal de estos recursos, los resultados revelan que la recarga a

través de las zayas podría adelantarse temporalmente a los meses de invierno, obteniendo un mejor reparto de los recursos hídricos a lo largo del año. También se han podido obtener de forma desglosada los aportes superficiales, hipodérmicos y subterráneos que discurren por la cabecera de este río, siendo del 12,5%, 11,7% y 75,7%, respectivamente. Por último, se han comparado los caudales simulados con los caudales ecológicos concluyendo que la derivación del agua por las zayas para regadío no pone en riesgo el incumplimiento de su régimen según los caudales ecológicos fijados por la CHD.

**Agradecimientos:** El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto WaSHa), que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través de la Convocatoria de subvenciones para la realización de proyectos que contribuyan a implementar el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2021-2030).

Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto.

Agradecemos a la Confederación Hidrográfica del Duero por la aportación de los datos de caudales. También a los coordinadores del proyecto Sarai (IGME-CSIC), mediante el cual se ha facilitado la tarea de obtención de los datos climáticos de la Serie Rocio de AEMET.

## Geoquímica de un acuífero carbonatado regulado por la oxidación de piritas: los Ojos del Keyles de Agreda (Cordillera Ibérica, Soria)

Catalina Bezares<sup>1</sup>, Eugenio Sanz Pérez<sup>1</sup>, Ignacio Menéndez-Pidal<sup>1</sup>, Guillermo Martínez-Lucas<sup>1</sup>, Joaquín Sanz de Ojeda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Esc. Tec. Sup de Ing. de Caminos, CC. y PP., Universidad Politécnica de Madrid (U.P.M.)

Palabras clave: Procesos redox, oxidación piritas, desnitrificación

**Resumen.** Como se sabe, la oxidación de la pirita aumenta el deterioro de la calidad del agua subterránea, a través por ejemplo de la liberación de metales y metaloides como el arsénico. Esto es frecuente con las aguas acidas de minas. En nuestro caso, el exceso de sulfatos derivado de la oxidación de la pirita es la que ha dado problemas de abastecimiento de agua: Las aguas de los manantiales de “Los Ojos del Keyles” sirvieron para el abastecimiento de agua a la población de Agreda hasta 1935, pero debido a su alto contenido en sulfatos se sustituyó con otros manantiales lejanos de mejor calidad del Moncayo.

Una caracterización detallada e investigación de los factores que afectan la oxidación de pirita es, por lo tanto, crucial para identificar y predecir de manera confiable las reacciones geoquímicas asociadas a la evolución de la calidad del agua a largo plazo. Así pues, los objetivos de este trabajo son: (1) Definir el modelo conceptual hidrogeológico e hidrogeoquímico de este acuífero. (2) Identificar el origen del alto contenido en sulfatos en su relación a la litología y contenido en piritas, valorando la importancia de la oxidación de la pirita en ambientes hidrogeológicos aerobios. (3) Se examinan los cambios en las concentraciones a lo largo del flujo y se exploran las reacciones dominantes redox que pueden darse, y las tasas de reducción de O<sub>2</sub> y desnitrificación. Para ello se ha realizado un monitoreo detallado de las aguas subterráneas a escala real que se llevó a cabo durante un periodo de nueve años, muestreando dos puntos seleccionados a lo largo de un tramo de unos 1.200 m de longitud en la dirección del flujo. Los puntos seleccionados incluyen un pozo de abastecimiento de la población de Agreda que consideraremos al inicio de la línea de corriente antes de entrar en la zona mineralizada de piritas. Y el punto de descarga de este acuífero en los manantiales de los Ojos del Keyles en el borde del acuífero cuaternario (y también punto de recarga de un acuífero cuaternario de turbas). Se ha utilizado el software

PHREEQC versión 3 para determinar el tiempo de residencia en el acuífero, tomando como punto de partida los datos de campo obtenidos.

Comparando los análisis químicos, observamos que en la distancia de 1.200 m desde el pozo hasta los manantiales de los Ojos del Keyles, se detectan cambios en el sistema que se traducen en un incremento de los sólidos disueltos en general, pero sobre todo en un incremento de sulfatos (de 64 a 260 mg/l), simultáneo a una disminución de nitratos (de 15 mg/l en el sondeo a 3 mg/l en los manantiales) y de oxígeno disuelto (de 9,4 mg/l a 7 mg/l). Esto proporciona la evidencia que la oxidación de la pirita es la fuente dominante de sulfato en el acuífero, al entrar el flujo en la zona más mineralizada del mismo. Teniendo en cuenta que la velocidad real media del agua subterránea de este acuífero es de 21 m/día, del sondeo de abastecimiento de Ágreda hasta el manantial de los Ojos tarda 57 días, se produce una reducción de oxígeno disuelto de 2 mg/l y una tasa de desnitrificación de 10 mg/l cada 1000 m.

**Agradecimientos:** Se agradece a la Ayudas a los Grupos de Investigación de la UPM

# Hacia una gestión integral del agua: modelación numérica del balance hídrico en balsas de fosfoyesos

Franco Coscia<sup>2</sup>, Estanislao Pujades Garnes<sup>1</sup>, Manuel Olías Alvarez<sup>2</sup>, Enric Vázquez-Suñé<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Diagnostico Ambiental y Estudios del Agua*

<sup>2</sup>*Universidad de Huelva*

Palabras clave: Balsas de fosfoyesos, Balance hídrico, Modelación numérica

**Resumen.** Los fosfoyesos son un subproducto resultante de la producción de ácido fosfórico, generados a partir de fosfatos mediante el proceso de producción por vía húmeda. Los depósitos de fosfoyesos pueden tener consecuencias negativas para el medio ambiente y la salud humana, ya que están enriquecidos en radionucleidos de la serie de desintegración del uranio, y contienen altas concentraciones de elementos traza como As, Cd, etc.. Los residuos de fosfoyeso se acumulan comúnmente en grandes relaves, los cuales están expuestos a varios procesos de meteorización.

Estos relaves se encuentran cerca de las plantas de producción de fertilizantes, las cuales suelen ubicarse en áreas costeras. Este es el caso del depósito de fosfoyesos ubicado en el lado occidental del estuario del río Tinto (Huelva, suroeste de España), donde los residuos se vertieron directamente en las marismas sin utilizar ningún aislamiento desde 1968 hasta 2010.

Además de los posibles impactos ambientales, el efecto de los residuos de fosfoyeso en la salud humana es motivo de preocupación, ya que las pilas están ubicadas muy cerca del núcleo urbano de Huelva. En este contexto, es de suma importancia evaluar la percolación de lixiviados de fosfoyesos en los sistemas acuíferos subyacentes y la liberación de contaminantes al estuario del río Tinto.

El primer paso ha consistido en desarrollar un modelo numérico de flujo que ha sido calibrado ajustando las oscilaciones del nivel hidráulico como resultado de los procesos de recarga y las oscilaciones de las mareas.

El buen ajuste obtenido durante el proceso de calibración (el RMS normalizado al comparar los niveles hidráulicos simuladas y observadas es inferior al 10%) permite afirmar que los parámetros hidráulicos estimados son precisos y consistentes con la revisión bibliográfica realizada.

Además, el balance de masas calculado de forma numérica es consistente con el estimado de manera conceptual, las diferencias fueron como se esperaba. Esto permite proporcionar nuevos conocimientos sobre el funcionamiento hidrogeológico del sistema y cuantificar el balance hídrico de las pilas de fosfoyesos.

Por lo tanto, el modelo permitirá simular los procesos de flujo y modelar escenarios predictivos. Los próximos pasos consistirán en implementar la densidad variable, procesos hidroquímicos y, posiblemente, hidromecánicos. Este estudio, que utiliza la modelación numérica, tiene como objetivo ser útil para trabajos futuros relacionados con medidas de restauración.

**Agradecimientos:** Acción Especial de la Consejería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía.

## Hidrogeodía 2024 en La Valduerna (León), un ejemplo ancestral de uso conjunto de agua superficial y el agua subterránea

Almudena de la Losa-Román<sup>1</sup>, Nuria Naranjo-Fernández<sup>1</sup>, Sergio Martos Rosillo<sup>1</sup>, Antonio González Ramón<sup>1</sup>, Jose Angel Ventura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CN- IGME-CSIC

<sup>2</sup>Provilacer

Palabras clave: Zayas, Recarga, León, Hidrogeodía

**Resumen.** El Hidrogeodía es una actividad promovida por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español (AIH-GE) que tiene el objetivo de divulgar la importancia de las aguas subterráneas a través de excursiones guiadas en el marco de la celebración del día mundial del agua (22 marzo). Es de carácter divulgativo, gratuito y dirigido a todos los públicos. El Hidrogeodía 2024 de León se realizó en la comarca de la Valduerna, donde existe un sistema ancestral de manejo del agua en el que las zayas, también conocidas como “zaigas” o “raudas”, juegan un papel fundamental. Se trata de canales excavados en el terreno, generalmente sobre materiales cuaternarios (arenas, gravas y arcillas), y sin revestir, que derivan el agua del río Duerna al río Peces, recargando el acuífero que se localiza entre ambos. Es un ejemplo de uso conjunto de agua superficial y subterránea, que data, al menos, de la Edad Media. Además, constituye un ejemplo vivo de Solución basada en la Naturaleza (SbN) para la recarga de acuíferos. La actividad realizada en la Valduerna se orientó a abordar distintas temáticas. Se dio a conocer la geología y la hidrogeología de la zona, explicando el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero, la importancia de las estaciones de aforo para evaluar los recursos de agua en una cuenca hidrológica y el funcionamiento e importancia de las zayas. Además, se tuvo la posibilidad de conocer oficios e instalaciones tradicionales vinculadas a las zayas: molinos harineros, aserraderos, batanes, etc. Toda esta infraestructura hidráulica, actualmente en desuso, empleaba la fuerza motriz del agua que circula por las zayas para su funcionamiento y constituye un importante conjunto etnológico y patrimonial de la región, que no debería caer en el olvido. Mediante esta jornada, se puso en valor la importancia de llevar a cabo una buena gestión de los recursos hídricos de esta comarca, donde cada vez es más frecuente la existencia de largos periodos de tiempo sin recursos hídricos superficiales suficientes para cubrir la demanda agrícola. Consideramos que el Hidrogeodía

2024 de León ha contribuido a mostrar, de forma divulgativa, y sin perder el rigor científico, la relación entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas. Asimismo, esta actividad permitió que los asistentes pudieran conocer, de primera mano, el importante patrimonio hidráulico de la comarca, que debería ser potenciado para fomentar un turismo sostenible y para mejorar la calidad de vida de la población local.

**Agradecimientos:** Agradecemos a la AIH-GE por la financiación en el Hidrogeodía de León.

## Hidrogeoecología de la antigua laguna de Añavieja (Cordillera Ibérica, Soria)

Eugenio Sanz Pérez<sup>1</sup>, Catalina Bezares<sup>1</sup>, Joaquin Sanz de Ojeda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Geología. Departamento de Morfología e Ingeniería del Terreno. Esc. Tec. Sup de Ing. de Caminos, C.C. y P.P., Universidad Politécnica de Madrid (U.P.M.)

Palabras clave: Zonas húmedas, Hidrogeoecología

**Resumen.** La antigua laguna de Añavieja era una masa de agua dulce de casi 8 km de longitud y que fue desecada a mediados del siglo XIX. Formaba parte de un conjunto de rosario de lagunas de cierre tobáceo a lo largo del valle del río Añamaza, de las cuales, la de Añavieja era la más grande. Esta laguna se alimentaba de manantiales situados en su fondo y orillas, así como de escorrentía superficial. Este trabajo tiene tres objetivos: 1. La caracterización del acuífero sustentador de la alimentación subterránea de este humedal. 2. La reconstrucción paleohidrológica y paleoecología de la laguna, y 3. La descripción de una recuperación parcial de la misma.

Se parte de un estudio histórico acerca de las características de la laguna desecada y de un profundo estudio del medio físico, especialmente hidrogeológico y de caudales disponibles del río Añamaza.

Se describe la recuperación parcial con una pequeña superficie inundada de 2 ha con carrizal en un paraje con morfología en cañón de gran belleza paisajística. Ello ha sido compatible con los usos actuales del agua y el territorio, y tiene por tanto un alcance realista. Se piensa que serviría para aumentar la población de unas 15 especies de aves acuáticas y lacustres típicas de la zona, y como apeadero de varias especies de aves migratorias. Se propone su acondicionamiento para la observación de aves.

**Agradecimientos:** Se agradece a la Ayudas a los Grupos de Investigación de la UPM

## Hidrogeología 4.0

Ester Vilanova Muset<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Amphos 21*

**Resumen.** La hidrogeología ha experimentado una revolución significativa con la incorporación de tecnologías avanzadas, alineándose con la era de la Industria 4.0. Se incluyen diferentes desarrollos tecnológicos pero especialmente la inteligencia artificial (IA) y el desarrollo de la sensorica los cuales están transformado y continuarán transformando este campo científico.

La IA ha irrumpido en la hidrogeología con aplicaciones que van desde el análisis predictivo hasta la optimización en la gestión de los recursos hídricos. Herramientas como el aprendizaje automático permiten analizar grandes volúmenes de datos (trabajar con el big data) e identificar patrones complejos tanto en el comportamiento de los acuíferos como en el uso de los recursos. También permiten predecir contaminantes, la respuesta de los acuíferos o del medio y gestionar eficientemente los recursos hídricos. La IA se presenta como una herramienta de gestión avanzada con un elevado potencial no exenta, no obstante, de factores limitantes.

Al igual que los modelos numéricos permitieron a los hidrogeólogos transformar datos en predicciones y tomar decisiones informadas, basadas en procesos físicos, sobre la gestión de los acuíferos, la IA lleva estas capacidades al siguiente nivel. La IA utiliza redes neuronales y algoritmos de aprendizaje profundo que pueden adaptarse y aprender de los datos que se generan con las nuevas tecnologías. Esto permite manejar sistemas más complejos y con limitada información hidrogeológica.

El elevado potencial de ambas herramientas no las hace excluyentes, sino que su uso conjunto permite mejorar más las funcionalidades de ambas. El desarrollo de modelos subrogados o híbridos son un claro ejemplo de ello ya que permiten la retroalimentación de ambos sistemas e incluir así en la inteligencia artificial la simulación de los procesos físicos y conceptualización de los problemas.

El futuro de la hidrogeología debe pasar por la integración de tecnologías 4.0 las cuales ya están demostrando sus capacidades. La combinación de IA, big data, IoT y otras tecnologías emergentes como la realidad aumentada está optimizando las prácticas actuales y abriendo nuevos campos de investigación y de aplicación enfocados a aumentar la seguridad en la gestión actuando en tiempo real y mejorar la sostenibilidad minimizando los impactos.

## Hidrogeología, estructura y distribución del permafrost, en los depósitos cuaternarios de Cabo Wellchness, Dundee Island (Península Antártica oriental)

Luis Moreno Merino<sup>1</sup>, Adrián Silva Busso<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Geológico y Minero de España CN-IGME CSIC

<sup>2</sup>Instituto Antártico Argentino

Palabras clave: Isla Dundee, Base Petrel, CrioHidrogeología, Permafrost

**Resumen.** En ambiente antártico, el estudio de la estructura y distribución del permafrost y de la dinámica del acuífero suprapermafrost desarrollado a lo largo del verano, permiten planificar la construcción de infraestructuras y evitar el impacto antrópico sobre los sistemas hídricos. En el marco del plan de mejora y expansión de la logística Antártica Argentina, se prevé la construcción de una nueva base permanente en la zona del cabo Welchness (Base Petrel), por ello es necesaria la caracterización precisa, en esta zona, de la dinámica del permafrost y del agua subterránea, y así poder garantizar el éxito en la ubicación de las instalaciones de la base, su suministro de agua, y el mínimo impacto ambiental.

Cabo Welchness es una zona descubierta de hielo, situada al noreste de la Península Antártica, en la Isla Dundee. Se encuentra cubierta en su mayor parte por depósitos glaciales o glacio-marinos de edad Holocena de hasta 70 metros de espesor. En algunas áreas se observan afloramientos de rocas de los grupos Trinity o Gustav. El primero es visible durante la marea baja a lo largo de la costa, el segundo se encuentra en el pie de la morrena actual en la llanura alta. Ambos grupos son angularmente discordantes entre sí, y están cubiertos por depósitos cuaternarios más recientes, también discordantes, que cubren casi toda el área de estudio y consisten principalmente en depósitos glaciares ocasionalmente retrabajados por el mar formando una extensa planicie delimitada al oeste por la morrena glacial actual. El retroceso glacial, verificable durante al menos los últimos 50 años, ha ocurrido a una velocidad entre 4,8 y 7,7 metros por año, desarrollando depósitos de till en el fondo y llanuras fluvio-glaciales.

Las unidades criogénicas, reconocidas a través de métodos geoeléctricos, se han agrupado en tres categorías: singenéticas, epigenéticas y criopég. La unidad singenética (58% del área) incluye principalmente el till de planicie baja, presenta bajos contenidos de hielo en profundidad y probablemente hielo enterrado, así

como la morrena actual con un alto contenido de hielo y hielo enterrado superficialmente; en esta unidad el desarrollo de la capa activa alcanza hasta 0,9 metros de espesor y un contenido en hielo que oscila entre el 6% y el 15%, aumentando en profundidad. La unidad epigenética (26% del área) incluye la planicie alta, planicie fluvio-glacial, depósitos fluvio-lacustres, depósitos de pendiente y áreas de afloramiento del Grupo Gustav; en estas áreas, la infiltración de hielo domina con concentraciones que van del 6% al 16%; esta unidad desarrolla en verano una capa activa de hasta 1,25 metros de espesor. A lo largo de la costa el criopég (16% del área) alcanza espesores de hasta 8 metros, donde alternan hielo intersticial, agua salada y agua dulce procedente del acuífero suprapermafrost. Los taliks cerrados están limitados a cuerpos de agua en la morrena actual alimentados por precipitaciones locales. Las zonas de taliks abiertos están bien desarrolladas en cuerpos de agua y arroyos directamente conectados al glaciar a lo largo de los arroyos Rosamaría y Gabriela María. Los arroyos Verde y Lobería en la planicie baja también desarrollan taliks, pero son de menor extensión y profundidad. En la planicie baja, el acuífero suprapermafrost que se desarrolla en verano, se recarga verticalmente y circula hacia la costa. La presencia de domos de inyección es un claro indicador de flujo subterráneo que incluye el de mayor recorrido. Las planicies alta y baja muestran extensas áreas de talik abierto. En la planicie baja se desarrolla un acuífero suprapermafrost con una potencia de entre 1,00 y 1,25 metros. Los arroyos alimentados por glaciares descargan el 98% de la entrada de agua, mientras que los alimentados por el deshielo de la nieve contribuyen con apenas 0,04 hm<sup>3</sup>/año. La salinidad promedio de los arroyos se encuentra en el rango de 198 mg/l, la de los lagos 190 mg/l y la del agua subterránea 223 mg/l. La hidroquímica distingue diferentes ambientes donde la ablación glaciar domina el suministro de agua en el área entre la morrena y el glaciar, y el deshielo alimenta las áreas de llanura alta y baja. El mar deja su huella en la hidroquímica local, y el análisis de las relaciones iónicas arroja resultados comparables a los observados en otros sitios en la Península Antártica septentrional.

**Agradecimientos:** Este trabajo se ha realizado gracias al soporte logístico de la Dirección Nacional del Antártico, Instituto Antártico Argentino. Agradecer al CAV 04-05 and CAV 16-17 staff de la Base Petrel por su apoyo en los trabajos de campo. Agradecer además a Aitor Ormazabal y Evgueny Ermolin por sus contribuciones en el trabajo de campo y laboratorio.

## Huella isotópica e hidroquímica de las aguas en la zona alta del río Llobregat

Deby Jurado Duarte<sup>2</sup>, Sonia Valdivielso<sup>1</sup>, Sergi Diez<sup>1</sup>, Enric Vázquez-Suñé<sup>1</sup>, Marta Turull<sup>1</sup>, Joan Botey i Bassols<sup>1</sup>, Sergio Carrero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Cataluña

**Resumen.** La gestión de los recursos hídricos es crítica para el desarrollo socioeconómico de una región. En Catalunya, la cuenca del Llobregat satisface las necesidades hídricas de más de 3 millones de personas, incluyendo la ciudad de Barcelona. Dada la actual sequía extrema y prolongada en esta región, es imperativo evaluar no solo la cantidad sino también la calidad del agua. Las Fuentes de Llobregat, ubicadas en la parte alta de la cuenca del Llobregat, son fundamentales como punto de nacimiento del río e inicio de la cuenca.

El objetivo de este estudio es caracterizar la composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) e hidroquímica de las fuentes (manantiales), de aguas subterráneas y de aguas superficiales en la zona alta de la cuenca del río Llobregat. Para ello, se han realizado una serie de campañas de muestreo en diversas fuentes existentes en la zona de estudio, piezómetros pertenecientes al ACA y en el río Llobregat y sus afluentes.

El análisis e interpretación de los datos obtenidos ha dado como resultado la identificación y clasificación de la huella isotópica e hidroquímica de cada tipo de agua y se ha establecido la relación entre ellas. El estudio genera conocimientos relevantes para las autoridades y usuarios de agua para una gestión óptima y sostenible de los recursos hídricos a corto y largo plazo.

**Agradecimientos:** Proyecto SENTINEL, IDAEA -CSIC

# Huella isotópica y patrones de la precipitación en los Andes argentinos

Sonia Valdivielso<sup>1</sup>, Jesica Murray<sup>2</sup>, Emilio Custodio<sup>3</sup>, Ashkan Hassanzadeh<sup>1</sup>, Daniel Emilio Martínez<sup>4</sup>, Enric Vázquez-Suñé<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de diagnóstico ambiental y estudios del agua (IDAEA-CSIC), Barcelona, España.*

<sup>2</sup>*Instituto de bio y geociencias del NOA (IBIGEO), CONICET-Universidad Nacional de Salta, Argentina. Institut Terre et Environnement de Strasbourg (ITES), Université de Strasbourg, Francia.*

<sup>3</sup>*Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Real academia de matemáticas, física y ciencias naturales de España (RAC). Instituto de estudios ambientales y recursos naturales (IUNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canarias, España.*

<sup>4</sup>*Instituto de investigaciones marinas y costeras - CONICET, Universidad Nacional de Mar del Plata, Instituto de geología de costas y del Cuaternario - Universidad Nacional de Mar del Plata, CIC Prov. de Buenos Aires, Argentina*

Palabras clave: Cuenca Los Pozuelos, Isótopos estables, HYSPLIT, OLR

**Resumen.** La precipitación juega un papel crucial en el ciclo hidrológico natural. Comprender las variaciones espaciales y temporales de los isótopos de precipitación es esencial para identificar procesos hidrológicos, meteorológicos y ecológicos. En zonas de alta montaña con condiciones áridas y semiáridas, especialmente en regiones con cuencas endorreicas, la porción de precipitación que se infiltra en las aguas subterráneas es la principal fuente de recarga hídrica. Sin embargo, estimar esta recarga es un desafío y propenso a una gran incertidumbre.

El principal objetivo de este estudio fue implementar una metodología robusta y detallada para analizar la influencia de las variables meteorológicas y el origen de las fuentes de humedad en la composición isotópica estable ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) de la precipitación. Como caso ilustrativo, nos centramos en la Cuenca de Los Pozuelos, una cuenca endorreica en la región Altiplano-Puna de los Andes. El análisis incorporó muestras de precipitación recolectadas durante un período de 3 años (enero de 2020 a abril de 2023) junto con un monitoreo integral de variables atmosféricas locales, imágenes satelitales y modelos de trayectoria hacia atrás HYSPLIT.

Se realizó un análisis multivariado de datos meteorológicos y de isótopos estables y del patrón de transporte atmosférico. Las características de las precipitaciones mostraron variabilidad estacional, siendo las precipitaciones de verano empobrecidas en isótopos pesados debido a su prolongado viaje continental y al reciclaje que sufre al atravesar la cuenca del Amazonas, además de su actividad convectiva. Otro camino de humedad desde el océano Atlántico, a través de la cuenca del Río de la Plata o Gran Chaco, representó una huella isotópica intermedia. Los eventos de La Niña intensificaron los vientos del oeste, atrayendo masas de aire húmedo del océano Pacífico y provocando lluvias en el área de estudio durante el verano. En invierno, la precipitación siempre proviene del océano Pacífico y está enriquecida en isótopos pesados, debido a la poca precipitación y la menor actividad convectiva.

Al emplear una metodología metódica y un análisis estadístico multivariado, el estudio contribuye positivamente al discurso más amplio sobre la gestión y conservación de los recursos hídricos en ambientes áridos y semiáridos.

# Impacto de contaminantes de preocupación emergente en el acuífero carbonatado que rodea la ciudad de Mérida (Yucatán, México)

Flor Árcega-Cabrera<sup>1</sup>, Marta Inés Llamas-Dios<sup>2</sup>, María de la Luz Tovar-Salvador<sup>3</sup>, Rubén Ríos-Quintero<sup>3</sup>, Ismael Ocegüera-Vargas<sup>1</sup>, Elisabeth Lamas-Cosío<sup>1</sup>, Pablo Jiménez-Gavilán<sup>2</sup>, Lucía Ojeda-Rodríguez<sup>2</sup>, Pablo Lara-Martín<sup>3</sup>, Iñaki Vadillo Pérez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Autónoma de México

<sup>2</sup>Universidad de Málaga

<sup>3</sup>Universidad de Cádiz

Palabras clave: Compuestos de interés emergente, Acuífero carbonático, Yucatán, Contaminación urbana

**Resumen.** La ciudad de Mérida (Yucatán, México), con una superficie de 800 km<sup>2</sup> y una población cercana al millón de habitantes carece de una red completa de recolección de aguas residuales y su única gestión se realiza a través de fosas sépticas. Esta gestión de las aguas residuales repercute en las aguas subterráneas del acuífero carbonatado subyacente, que es la única fuente de abastecimiento de la población y de riego agrícola, además de ser el caudal base de zonas de gran valor ecosistémico, como cenotes, humedales continentales y costeros y zonas litorales por las que vierte el acuífero mediante descarga submarina.

En julio de 2023 se realizó una campaña hidrogeoquímica en las aguas subterráneas del entorno de la ciudad de Mérida. Esta campaña consistió en unos 30 puntos, distribuidos aguas arriba de la ciudad, sondeos y piezómetros en el casco urbano y en la dirección del flujo de agua subterránea. Además de la hidrogeoquímica clásica (parámetros de campo, iones mayoritarios, isótopos estables del agua) se recogieron muestras para analizar Compuestos de Preocupación Emergente (CECs), incluyendo antibióticos y otros productos farmacéuticos, drogas de abuso, fragancias, repelentes de insectos, filtros UV, entre otros.

Los resultados hidrogeoquímicos muestran un impacto en la calidad del agua, con concentraciones de nitratos superiores a 50 mg/L y valores medios de unos 25 mg/L; o concentraciones de carbono orgánico total de hasta 34 mg/L, con una media de 3,2 mg/L. Paralelamente, se han detectado 48 CECs: 8 antiinflamatorios, 3 beta bloqueadores, 4 reguladores lipídicos, 1 antidepresivo, 1 viagra, 19

antibióticos, 1 filtro solar, 1 edulcorante, 2 drogas psiquiátricas y estimulantes y 8 drogas de abuso, en la red de muestreo.

Este estudio permite establecer, por primera vez, la presencia y concentración de CECs en ese sector del acuífero carbonático de Yucatán. Además, es una zona con escasez (o ausencia) de suelo y/o arcillas en la columna estratigráfica, en comparación con otros acuíferos carbonatados, por lo que el efecto de retardo y degradación de los CECs en estos acuíferos no debería ser tan efectivo. Por ese motivo, los resultados obtenidos serán motivo de comparación con otros acuíferos de litologías más detríticas y reacciones de sorción más efectivas.

# Instrumentación de investigación para la estimación de la recarga en el acuífero de Doñana. Análisis de datos obtenidos

Fernando Ruiz Bermudo<sup>1</sup>, Claus Kohfahl<sup>1</sup>, Antonio Nicolás Martínez Sánchez de la Nieta<sup>1</sup>, José Manuel Gómez Fontalva<sup>1</sup>

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

Palabras clave: Recarga, Lisímetro, Doñana

**Resumen.** Las formaciones de mantos eólicos y cordones litorales costeros están principalmente constituidas por arenas y se suelen caracterizar por la presencia de dunas más o menos recientes que, en su conjunto, forman acuíferos que pueden jugar un papel fundamental en el mantenimiento de ecosistemas asociados a las aguas subterráneas o actuando como barrera frente a la intrusión marina. Estas zonas suelen estar sometidas a fuertes presiones hídricas causadas principalmente por la acción humana (básicamente por los usos agrícolas, turísticos y de abastecimiento a núcleos urbanos) y los efectos del cambio climático. Es necesario, por tanto, realizar una gestión sostenible de estos recursos hídricos subterráneos, lo que implica tener un conocimiento lo más preciso posible de las entradas naturales que se producen en el acuífero, término conocido como recarga. En este sentido, en septiembre 2015 se instaló en el Parque Nacional de Doñana una infraestructura para la monitorización de la recarga natural y sus tendencias climáticas regionales de alta precisión en 5 emplazamientos con condiciones diferentes de suelo y vegetación. En el principal emplazamiento se instaló un lisímetro de pesada que ha venido proporcionando una referencia exacta para la estimación de la recarga sobre suelo dunar sin vegetación. También se instaló una estación meteorológica completa. En marzo de 2021 se complementó esta infraestructura con la instalación de i) 3 nuevos lisímetros de pesada (uno de 1 m<sup>2</sup> de superficie y 1,5 m de profundidad (de igual tamaño al ya instalado en 2015); y dos de 0,2 m<sup>2</sup> de superficie y 0,9 m de profundidad, ii) reemplazo de sensores del lisímetro preexistente, iii) un nuevo pluviómetro de pesada y iv) un tanque de evaporación. Todas las instalaciones se encuentran incorporadas en la Infraestructura Científica y Tecnológica Singular ICTS-RBD, gestionada por la EBD-CSIC en la Reserva Biológica de Doñana, lo que permite un seguimiento online de los parámetros monitorizados. El objetivo principal que se pretende conseguir es calcular la recarga que se produce en suelo con/sin vegetación y bajo cubierta de pinos. Además, otra de las finalidades es

demostrar la fiabilidad de los resultados aportados por los lisímetros de menor tamaño frente a los mayores. Los lisímetros pequeños pueden ser cambiados de ubicación e instrumentados entre 2 ó 3 personas, sin necesidad de maquinaria pesada ni excesivos movimientos de tierra por lo que, de aportar datos fiables, resultaría en un equipamiento muy práctico para estudiar diferentes emplazamientos. En esta contribución se presentará una descripción de la instrumentación instalada en cada uno de los lisímetros, así como una comparación de los resultados preliminares del balance hídrico del suelo en cada uno de ellos entre 2021-2023.

**Agradecimientos:** Este trabajo se ha realizado en el marco del convenio del IGME-CSIC con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, para la mejora del conocimiento hidrogeológico en el marco de la planificación hidrológica (2020-2024). La infraestructura de recarga instalada en 2015 se ejecutó con fondos FEDER mediante el Proyecto IGME13-1E-2113. La ampliación de dicha instalación, realizada en 2021, se ha realizado con fondos FEDER (proyecto EQC2018-004130-P).

# Interpretación mediante técnicas estadísticas: principal component analysis (PCA) y hierarchical cluster analysis (HC)

Teresa Bros Miranda<sup>1</sup>, Francisco Ruiz Allén<sup>1</sup>, Miguel Palacios Corcuera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Consultoría geológica, S.L.

Palabras clave: principal component analysis (PCA), hierarchical cluster analysis (HC), Hidroquímica

**Resumen.** El trabajo se centra en un área de estudio que posee una red de control donde se monitorean de forma periódica los niveles piezométricos y la calidad de las aguas, mediante el análisis de algunos parámetros físico-químicos generales (pH, conductividad, temperatura), algunos cationes y aniones mayoritarios (calcio, potasio, sulfatos) y metales (Al, As, Cd, Ca, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb, Zn).

Esta red de control ha proporcionado a lo largo de los años un enorme número de datos que mostraban concentraciones erráticas y muy variables de determinados elementos y cuyo comportamiento era diferente en cada punto de control. Es por ello que, con el objetivo de identificar las causas de este comportamiento, resultó necesario utilizar técnicas geoestadísticas para su interpretación.

Los datos fueron analizados mediante la técnica del PCA lo cual permitió reducir la complejidad de los grandes grupos de datos y establecer relaciones entre las variables identificando procesos subyacentes comunes. Igualmente se identificaron aquellos componentes que realmente tenían relevancia entre todos los analizados y se determinaron las relaciones directas o inversas existentes entre cada uno de ellos.

Además, con la técnica del Hierarchical Cluster Analysis (HCA), se establecieron jerarquías dentro del conjunto de datos analizados y se determinaron las relaciones entre las diferentes variables y entre los puntos de muestreo, identificando características comunes y puntos que mostraban un comportamiento individual y diferente al resto.

El análisis estadístico permitió focalizar aquellos puntos y parámetros cuyas concentraciones mostraban tendencias y/o comportamientos que podían ser

interpretables en base a eventos específicos acontecidos y a la naturaleza de los procesos minero-industriales del entorno.

Esto ayudó a poder realizar posteriormente una interpretación hidroquímica convencional en aquellos parámetros que resultaron de interés, desechando aquellos cuya interpretación resultaba irrelevante para el control de la calidad de las aguas y detectando ausencia de parámetros analizados que deberían ser incorporados a la red de control para un mejor y mayor conocimiento del comportamiento de las aguas subterráneas presentes en el entorno.

# Investigación analítica exploratoria para la determinación de la afección a las aguas subterráneas provocada por el empleo de residuos inertes como relleno en la restauración de una explotación de áridos

Juan Ricoy Alonso<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del Noroeste*

Palabras clave: Minería, Agua, Restauración

**Resumen.** Durante los últimos años ha proliferado el empleo de residuos inertes como material de relleno en los trabajos de restauración de huecos mineros: RCDs, tierras, serrines de serrado de rocas ornamentales y otros residuos de distinta naturaleza pétreo, son utilizados habitualmente para su valorización como material de relleno en las tareas de rehabilitación y recuperación de espacios alterados por la actividad minera.

A pesar de su carácter inerte, el uso de estos materiales para rellenar antiguos huecos mineros, gran parte de los cuales se encuentran por debajo del nivel freático, podría suponer una afección a la calidad de las aguas subterráneas.

Este artículo expone el caso real de la investigación analítica exploratoria llevada a cabo en una explotación de áridos naturales próxima al río Miño, con el objeto de determinar el grado de afección a la calidad de las aguas subterráneas, derivada del empleo de residuos inertes para su valorización como material de relleno en los trabajos de restauración.

Dicha investigación consistió en la realización de una campaña de sondeos, calicatas y piezómetros, sobre una superficie cercana a las 50 ha, para el muestreo de suelos y aguas y su precisa caracterización. Las muestras tomadas fueron sometidas a una batería de análisis para la determinación de la posible carga contaminante. Concretamente se analizaron los siguientes parámetros en las aguas:

- Hidrocarburos totales del petróleo (TPH).
- Hidrocarburos aromáticos
- DQO, DBO5, PH y conductividad

- Metales (As, Cd, Pb, Cr, Cu, Hg, Pb)

Algunas de las muestras de suelo analizadas presentaron contenidos en TPH superiores a 50 mg/kg, valor genérico de referencia (NGR) establecido en el anexo IV del Real Decreto 9/2005 del 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo, así como los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. Los hidrocarburos encontrados son mayoritariamente de cadenas largas, propias de aceites y lubricantes.

También se encontraron concentraciones en metales pesados tales como Cu y Cr, que superaban los NGR establecidos en el Decreto 60/2009, de 26 de febrero, sobre suelos potencialmente contaminados y procedimiento para la declaración de suelos contaminados.

En cuanto a las aguas subterráneas analizadas, se detectaron valores de As, Hg y Cr superiores a los valores de intervención fijados en el documento "Soil Remediation Circular 2013", considerado como guía de referencia a nivel ambiental en Europa. La presencia de As podría tener un origen natural, habiendo sido arrastrado por el río Miño, dado que este río atraviesa macizos graníticos con anomalías geoquímicas por arsénico.

Finalmente, con la información obtenida en la fase de investigación, se procedió a realizar una valoración del riesgo de acuerdo con el anexo IV del Decreto 60/2009, de 26 de febrero, sobre suelos potencialmente contaminados y procedimiento para la declaración de suelos contaminados, con el fin de estimar de forma cuantitativa el riesgo para la salud humana en el entorno de los terrenos afectados. El resultado de esta valoración resultó ser "riesgo aceptable".

# La coherencia InSAR en la detección y la cartografía de transporte torrencial de sedimentos en zonas áridas

Joan Botey i Bassols<sup>1</sup>, Carmen Bedia Girbés<sup>2</sup>, María Cuevas González<sup>3</sup>, Sonia Valdivielso Mijangos<sup>2</sup>, Michele Crosetto<sup>3</sup>, Enric Vázquez-Suñé<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IDAEA-CSIC); Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya (DECA-UPC); Building, Architecture and Town Planning Depart*

<sup>2</sup>*Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IDAEA-CSIC)*

<sup>3</sup>*Unitat de Geomàtica, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA)*

Palabras clave: InSAR-CCD, Teledetección, Morfodinámica

**Resumen.** La detección de cambios de coherencia InSAR (CCD, por sus siglas en inglés) es una técnica de teledetección utilizada para cartografiar fenómenos que, en determinadas condiciones, pueden relacionarse directamente con cambios en la coherencia interferométrica entre imágenes de radar de apertura sintética (coherencia InSAR). En zonas áridas, estos cambios se deben principalmente a cambios en la superficie, por lo que una de las aplicaciones más comunes de la CCD consiste en cartografiar las áreas afectadas por episodios de transporte torrencial de sedimentos en zonas de clima árido. Sin embargo, dado que no se puede descartar del todo el efecto residual de otros factores sobre la coherencia InSAR, la fiabilidad de los mapas resultantes sigue siendo una cuestión sin resolver: en primer lugar, porque es necesario verificar que la coherencia InSAR es capaz de detectar todos los episodios de transporte torrencial de sedimentos que realmente se han producido en zonas áridas; y en segundo lugar, porque los mapas basados en la CCD contienen la incertidumbre de si los cambios detectados son cambios reales en la superficie observada o sólo errores relacionados con estos efectos residuales. En un lenguaje más matemático: por un lado, es necesario verificar si existe una correlación entre coherencia InSAR y transporte de sedimentos en el tiempo, y por otro, estudiar si esta correlación también existe en el espacio. Respecto a la capacidad de detección, la metodología propuesta consiste en construir un modelo de clasificación y validarlo mediante el estudio sucesivo de tres áreas en la cuenca del Salar de Atacama, Chile, utilizando tres

años de datos de Sentinel más un cuarto año para su validación, y registros meteorológicos de lluvia y cobertura de nieve. Respecto a la capacidad de cartografía, se comparan los resultados de cuatro métodos de cartografía CCD, con distintos grados de complejidad y sensibilidad a los distintos factores que afectan a la coherencia InSAR, para evaluar la eventual existencia de errores y su importancia. Los mapas CCD obtenidos se comparan también con los cambios detectados con imágenes ópticas de satélite y con una campaña de campo. Los resultados demuestran que, efectivamente, la coherencia InSAR es capaz de detectar de forma remota episodios de transporte torrencial de sedimentos en zonas de clima árido y que podría tener una mayor capacidad de detección que los registros meteorológicos, aunque la base perpendicular del radar (error en la posición del radar) tiene un efecto relevante sobre la coherencia InSAR a tener en cuenta. En cualquier caso, además, una vez calibrado, el modelo de clasificación desarrollado permite la detección remota automatizada de nuevos episodios, y centrar las tareas de cartografía sólo en las fechas relevantes. En cuanto a la capacidad de cartografía, los resultados concluyen que los mapas CCD son fiables en la identificación de las zonas afectadas por el transporte torrencial de sedimentos y, por tanto, permiten elaborar mapas de riesgo, por ejemplo. Sin embargo, la precisión en la delimitación de la zona afectada sigue siendo una cuestión pendiente de resolver, y las áreas de relieve muy accidentado todavía requieren un análisis minucioso de los resultados con el fin de descartar posibles efectos geométricos relacionados con –de nuevo– la base perpendicular del radar.

# La descarga submarina de aguas subterráneas a diferentes escalas temporales y espaciales: caracterización multidisciplinar y multimétodo

Albert Folch<sup>1</sup>, Marc Diego Feliu<sup>1</sup>, Jose Tur<sup>1</sup>, Bella Almillategui<sup>1</sup>, Valentí Rodellas-Vila<sup>5</sup>, Manuel Espino<sup>2</sup>, Maarten W. Saaltink<sup>1</sup>, Clara Ruiz<sup>3</sup>, Juanjo Ledo<sup>6</sup>, Manel Grifoll<sup>2</sup>, Jesús Carrera Ramírez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Groundwater Hydrology Group. Department of Civil and Environmental Engineering (DECA), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain*

<sup>2</sup>*Maritime Engineering Laboratory (LIM), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain*

<sup>3</sup>*Institut de Ciències del Mar, CSIC, Barcelona, Spain*

<sup>4</sup>*Institute of Environmental Assessment and Research, Barcelona, Spain*

<sup>5</sup>*Departament of Physics and Institut de Ciència i Tecnologia Ambiental, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Spain*

<sup>6</sup>*Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid, Spain*

Palabras clave: Acuíferos costeros, Descarga Submarina de Agua Subterránea, Multidisciplinar, Multimétodo

**Resumen.** Las aguas subterráneas son de vital importancia en las zonas costeras debido a su rol en la sostenibilidad de los ecosistemas y como un importante recurso hídrico. Como parte de las aguas subterráneas costeras, la descarga submarina de agua subterránea (SGD, por sus siglas en inglés) sirve como una interfaz dinámica entre los ambientes terrestres y marinos, influyendo en el ciclo de nutrientes, la biodiversidad y la calidad del agua en los ecosistemas costeros. La SGD opera a varias escalas espaciales y temporales, lo que requiere una comprensión integral que solo se puede lograr mediante la combinación de múltiples métodos de investigación en tierra y mar. En esta presentación, resumiremos los avances realizados durante un periodo de más de 10 años en el estudio de las aguas subterráneas costeras. Durante este tiempo, se ha desarrollado un sitio experimental en el acuífero detrítico de Argentona (norte de Barcelona) para investigar con precisión los estuarios subterráneos (STE, por sus siglas en inglés), utilizando una combinación de métodos directos e indirectos, incluyendo geología detallada, hidrogeoquímica, isótopos, diversas técnicas

geofísicas, detección de temperatura distribuida con fibra óptica y caracterización microbiana, entre otros. El trabajo en este sitio experimental se ha integrado con: 1) enfoques a escala regional que incluyen muestreo mar adentro, teledetección y tomografía eléctrica continua; y 2) enfoques a escala local (escala de playa) en el acuífero cárstico del Garraf (Sur de Barcelona), combinando “time lapse” de tomografía eléctrica anfibia con métodos directos como “sepagometers” y muestreo de agua intersticial. Estos métodos de campo se han complementado con modelos numéricos acoplados de flujo y transporte de agua subterránea y océano, mejorando nuestras observaciones y proporcionando información sobre las dinámicas de la SGD en tierra y mar de forma continua. Nuestra investigación muestra la influencia de la geología y la heterogeneidad en la dinámica de los STE y la SGD a diferentes escalas espaciales (de metros a kilómetros) y temporales, con cambios que llegan a producirse a escala de horas.

**Agradecimientos:** Los autores quieren agradecer a todos los compañeros del Grup d'Hidrologia Subterrània - GHS (Universitat Politècnica de Catalunya) financiado con la beca Agaur-SGR-609 y del Grup de Recerca en Radioactivitat Ambiental de Barcelona – GRAB (Universitat Autònoma de Barcelona), por participar en las campañas de muestreo. Esta investigación ha contado con el apoyo de la Agencia Catalana del Agua (subvención nº ACA210/18/00007) y el proyecto PID2022-140862OB-C21 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y "FEDER Una manera de hacer Europa".

## La figura del hidrogeólogo residente. Aplicación práctica en una explotación minera

Jose Daniel Liso Martin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Colegio Oficial de Geólogos de Andalucía*

**Resumen.** En las Demarcaciones Hidrográficas existen proyectos o actuaciones en el ámbito de las aguas subterráneas que por su envergadura, dinamismo o singularidad, requieren de una especial atención que en ocasiones, resulta complicado atender con los medios propios de la Administración. Para ello, el Instituto Geológico y Minero de España propuso la incorporación de la figura del hidrogeólogo/a residente.

Esta figura, surge en definitiva como necesidad de garantizar el cumplimiento de las condiciones que se establezcan en los títulos de uso del recurso subterráneo otorgados a estos proyectos o actividades singulares, de forma que la Administración pueda tener conocimiento inmediato y objetivo de su correcto funcionamiento, del cumplimiento de las previsiones establecidas y las posibles desviaciones que en las mismas pudieran darse. Las tareas se ejercen por esta figura de forma independiente al titular del derecho y acorde a las directrices que marque la Administración del agua.

Como ejemplo práctico se ha considerado la explotación minera Las Cruces (Sevilla), situada en la Faja Pirítica Ibérica, que viene explotando un recurso minero de sulfuros de cobre situado a una cota muy inferior a los niveles piezométricos preexistentes. Para poder deprimir el acuífero, minimizar la llegada de agua a la zona de trabajo de operación minera y garantizar la explotación del recurso en condiciones de seguridad, la mencionada entidad obtuvo una Autorización para instalar y operar un sistema de drenaje de aguas subterráneas y posterior inyección en el mismo medio, previo tratamiento del agua si fuese necesario. Estos objetivos de la Autorización son compartidos con los de preservar cuantitativa y cualitativamente el medio hídrico subterráneo en particular y el dominio público hidráulico en general.

Para este caso, además de comprobar el cumplimiento de las condiciones impuestas al titular de la Autorización, las principales funciones y responsabilidades de esta figura con la Administración son las de realizar un control y seguimiento en las instalaciones y operaciones que conforman el sistema de drenaje e inyección, de los volúmenes y calidades de las aguas circulantes, de los niveles piezométricos y en general, de cualquier actuación

llevada a cabo por el titular en relación con el dominio público hidráulico. Para ello, los principales elementos de la Autorización en los que ha de apoyarse son: un Programa de Vigilancia y Control como instrumento fundamental de apoyo al seguimiento de las actividades de drenaje-reinyección, un Plan de Contingencias de obligada aplicación en el caso de incidencia de cualquier tipo en el sistema proyectado y un Modelo Hidrogeológico como herramienta de gestión de las aguas subterráneas.

# La recarga de acuíferos con agua regenerada para hacer frente a la sequía a corto plazo y a la sostenibilidad a largo plazo.

Enric Queralt Creus<sup>1</sup>, Jordi Massana Molera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Comunitat d'Usuaris d'Aigües del Delta del Llobregat

Palabras clave: Gestión de la recarga, Agua regenerada, Sequía

**Resumen.** El acuífero de la Vall Baixa i Delta del Llobregat, se sitúa en área metropolitana de Barcelona, y es una infraestructura estratégica importante de recurso agua para los diferentes usos de la misma. El acuífero está en normalidad muy explotado con índice de explotación cercano a 1. En episodios de sequía el acuífero se sobreexplota llegando a los 65 hm<sup>3</sup>/año. Además, como es un acuífero costero, la intrusión salina es importante.

En este contexto des de la administración hidráulica y des de los usuarios se ha promovido la gestión de la recarga por medio de la inyección en pozos y de balsas de recarga. Hay dos sistemas de recarga por balsas en la Vall Baixa. Las de Sant Vicenç dels Horts que estuvieron operativas des de 2009 hasta 2015, y las recientes construidas de Molins de Rei en el marco del proyecto INTERREG AQUIFER SUDOE. El diseño de ambas balsas se realizó nicialmente con agua de recarga del propio río.

El proyecto EUROMED-CLEPSYDRA consistente en el monitoreo de les aguas subterráneas y el desarrollo de sistemas de soporte a la decisión en contexto de escasez hídrica facilitará herramientas para mejorar la gestión del acuífero del Valle Bajo y delta del Llobregat. Una parte de este proyecto se destinará a la gestión de estas últimas balsas.

En la actualidad y en este periodo de sequía, el acuífero se ha salinizado de una manera muy rápida por la sobreexplotación de los últimos 18 meses. Para corregir esta situación, y dada la falta de agua superficial, se ha solicitado a la administración hidráulica la derivación temporal de agua regenerada de la ERA del Prat para la recarga de acuíferos. No obstante, los requisitos de calidad sanitaria y de impacto sobre el acuífero tienen que ser previstos y estudiados previamente. Para evaluar ese potencial riesgo se han realizado análisis de la calidad del agua a recargar, y, a través de simulaciones numéricas con el modelo regional del acuífero, su influencia a nivel de calidad a los pozos de abastecimiento situados aguas debajo de estas infraestructuras.

**Agradecimientos:** AQUIFER SUDOE- Proyecto cofinanciado por CUADLL y por el Programa Interreg Sudoe a través de Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER)

CLEPSYDRA - Proyecto INTERREG- EURO-Med cofinanciado por CUADLL y por la Unión Europea

Explotación de las balsas de Sant Vicenç cofinanciado por Agencia Catalana de l'Aigua y CUADLL

# Las zayas de la Valduerna, un sistema ancestral de uso conjunto de agua superficial-agua subterránea replicable en las principales zonas de riego españolas

Almudena de la Losa-Román<sup>1</sup>, Nuria Naranjo-Fernández<sup>1</sup>, José María Ruiz-Hernandez<sup>1</sup>, Carlos Marín<sup>1</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>1</sup>, Jose Ángel Ventura<sup>2</sup>, Sergio Martos Rosillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IGME-CSIC

<sup>2</sup>Profesional libre

Palabras clave: recarga gestionada de acuíferos, zayas, escasez hídrica, gestión hidrológica

**Resumen.** En el noroeste de la provincia de León, concretamente en la comarca de La Valduerna, existe desde la Edad Media un sistema de canales excavados en el terreno (zayas), que derivan el agua desde el río Duerna al río Peces. Entre ambos ríos se encuentra un acuífero detrítico interfluvial que, con la infiltración que se produce mediante las zayas, genera un incremento de la recarga al acuífero. El uso de las zayas para la recarga del acuífero y para riego está regulado por la Confederación Hidrográfica del Duero, que permite la captación de recursos superficiales desde el 1 de abril de cada año hasta que el caudal del río llega al caudal ecológico fijado en el punto de toma de cada zaya. Además de las aguas superficiales derivadas del río Duerna, los regantes de esta zona también explotan, mediante pozos someros (de unos 5-8 metros de profundidad), las aguas subterráneas del acuífero interfluvial, al final del periodo de estiaje.

En el marco de este sistema de uso conjunto, se han realizado estudios preliminares para caracterizar y cuantificar hidrogeológicamente este sistema de manejo del agua. Actualmente, con respecto al trabajo in situ, se están realizando campañas de piezometría mensuales, aforos diferenciales en las zayas y se han instalado sensores de medida continua del nivel piezométrico en pozos, con la finalidad de mejorar el conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico básico. Además, con respecto al trabajo de gabinete, se han desarrollado un modelo geológico 3D del acuífero para definir sus límites espaciales, dos modelos hidrológicos semidistribuidos, con el código HBV- Light, en los ríos Duerna y Peces para cuantificar los recursos hídricos superficiales para la recarga; y un modelo matemático hidrogeológico del acuífero interfluvial Duerna-Peces realizado con

el código MODFLOW. Los primeros resultados obtenidos sugieren que el uso de las zayas como canales de infiltración es esencial para mantener los sistemas de regadío de la comarca. La recarga que se realiza con las zayas entre los meses de abril, mayo y junio, es esencial para mantener el riego con agua subterránea durante los siguientes meses.

**Agradecimientos:** El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto WaSHa), que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través de la Convocatoria de subvenciones para la realización de proyectos que contribuyan a implementar el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2021-2030). Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto. Agradecemos a la Confederación Hidrográfica del Duero por la aportación de los datos de caudales.

## LIFE REMAR, renaturalización del efluente de la EDAR de Cambrils con la recarga gestionada de acuíferos

Sara Bagés Estopà<sup>1</sup>, Miranda González Rodríguez<sup>1</sup>, Joan Campos Ferré<sup>1</sup>, Tiphaine Chantal Anderbouhr<sup>1</sup>, Silvia Díaz Cruz<sup>2</sup>, Jesús Carrera Ramírez<sup>3</sup>, Cristina Valhondo González<sup>3</sup>, Lurdes Martínez-Landa<sup>4</sup>, Xavier Sánchez Vila<sup>5</sup>, Linda Luquot<sup>6</sup>, Josep Martínez Vilar<sup>7</sup>

<sup>1</sup>*Comaigua*

<sup>2</sup>*Instituto Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona*

<sup>3</sup>*Instituto Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona. Unidad Asociada: Grupo Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC)*

<sup>4</sup>*Dpto. Ingeniería Civil y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Unidad Asociada: Grupo Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC)*

<sup>5</sup>*Dpto. Ingeniería Civil y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona*

<sup>6</sup>*Géosciences Montpellier, University of Montpellier, Centre national de la recherche scientifique (CNRS)*

<sup>7</sup>*Mejoras Energéticas*

**Resumen.** Desde hace años, en la costa mediterránea española se ha evidenciado un aumento exponencial de la demanda de agua, impulsado principalmente por el desarrollo de la agricultura intensiva y el sector turístico. En consecuencia, se produce la sobreexplotación de acuíferos, situación exacerbada por el cambio climático, y se favorece la intrusión marina. Ante este desafío, la tecnología de recarga gestionada de acuíferos (MAR) emerge como una solución prometedora para incrementar los recursos hídricos, y mitigar los efectos de la sobreexplotación y contaminación de las aguas subterráneas.

La EDAR de Cambrils (Tarragona) trata 4 hm<sup>3</sup> de agua al año que son vertidos al mar mediante emisario submarino. Con el fin de recuperar este recurso se presenta el proyecto LIFE REMAR (LIFE20 ENV/ES/000284), que se centra en la recarga del acuífero del Baix Camp utilizando un 3-4% del agua tratada en la EDAR. REMAR aplica la técnica de Tratamiento Suelo y Acuífero (SAT) con balsas de infiltración y barreras reactivas, que ha demostrado ser altamente eficiente en la eliminación de contaminantes, particularmente contaminantes orgánicos

emergentes, microplásticos, patógenos, genes de resistencia a los antibióticos y nitrógeno, entre otros.

El sistema SAT consiste en dos balsas, de 400 m<sup>2</sup> cada una, diseñadas para recargar hasta 200 m<sup>3</sup>/d. Como sistema de control se han perforado 8 piezómetros distribuidos en el acuífero aguas arriba, aguas abajo y bajo las balsas a diferentes distancias, con una zona ranurada de 2 a 4 m en el acuífero superficial del Baix Camp. En el acuífero y en el efluente de la EDAR, se miden en continuo CE, T<sup>a</sup> y nivel con sensores CTD-Diver y pH, ORP, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y DQO con sondas Aquatroll, además del volumen de recarga. En la zona no saturada (ZNS) se mide el contenido volumétrico en agua y T<sup>a</sup> hasta los 60 cm cada 10 cm de profundidad. Los muestreos se realizan periódicamente para el control de la evolución del agua recargada en las distintas partes del sistema (ZNS y acuífero). Para estudiar el comportamiento de diferentes especies de plantas en este tipo de sistemas se ha plantado una especie de humedal (Typha) en una balsa, mientras en la otra se deja que crezcan especies locales.

Los resultados preliminares muestran una reducción significativa de la concentración de nitrógeno y de la bacteria *Escherichia coli* presente en el agua de infiltración en su paso por la zona no saturada y su circulación por el acuífero.

REMAR contribuye así a la conservación y mejora del estado del acuífero mediante la recuperación y renaturalización del agua tratada en la EDAR. De esta forma, se aumenta la disponibilidad de los recursos hídricos empleando una tecnología basada en la naturaleza y respetuosa con el medio ambiente. Los resultados obtenidos en esta escala piloto servirán como base para el diseño del sistema a mayor escala; se espera que REMAR aborde los desafíos de gestión del agua en el Baix Camp e inspire soluciones análogas en otras regiones mediterráneas que enfrentan desafíos similares.

**Agradecimientos:** El proyecto LIFE REMAR (LIFE20 ENV/ES/000284) ha recibido financiación de la Unión Europea.

# Manual básico sobre el uso de datos InSAR para medir desplazamientos de la superficie del terreno

Guadalupe Bru<sup>1</sup>, Pablo Ezquerro<sup>1</sup>, Juan López-Vinielles<sup>1</sup>, Cristina Reyes-Carmona<sup>2</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>1</sup>, Marta Béjar Pizarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*

<sup>2</sup>*Università degli Studi di Milano-Bicocca (Italia)*

Palabras clave: InSAR, European Ground Motion Service, Sobreexplotación, Subsistencia

**Resumen.** Existen multitud de procesos geológicos y antrópicos con capacidad de producir desplazamientos de la superficie terrestre. Dichos procesos incluyen, entre otros, la extracción de agua subterránea, la cual puede inducir fenómenos de subsidencia del terreno en materiales detríticos de grano fino.

Por ello, la medida del desplazamiento de la superficie del terreno, su velocidad promedio, así como el análisis de su evolución temporal, son fundamentales tanto para entender el proceso causante y estimar su grado de actividad, como para diseñar medidas de prevención, mitigación y respuesta adecuadas.

Aunque las técnicas de detección y monitorización de deformación del terreno in situ son generalmente más precisas, presentan notables limitaciones debido a su reducida cobertura espacial. Por el contrario, las técnicas de teledetección como la Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR), son capaces de medir cambios milimétricos en el terreno a escala regional o global. Entre sus principales ventajas, se encuentran la posibilidad de adquirir medidas en lugares inaccesibles, la capacidad de aportar gran densidad de puntos de medida en áreas extensas y la posibilidad de obtener información sobre áreas activas no investigadas previamente.

Esta comunicación presenta el recién publicado manual elaborado por el grupo InSARLab, del Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España (CSIC). Este manual está dirigido tanto a usuarios finales de productos obtenidos a partir de datos InSAR, como a aquellos sin experiencia en la explotación de este tipo de datos. Su principal objetivo es proporcionar una introducción a las técnicas InSAR con un lenguaje sencillo, respaldado por explicaciones visuales. El documento se estructura de la siguiente manera. El capítulo 1 es una introducción al propio

manual. El capítulo 2 ofrece una aproximación a los fundamentos de la técnica InSAR, describiendo los sensores SAR y las particularidades de las imágenes SAR. En el capítulo 3 se revisan los servicios públicos que proporcionan datos InSAR ya procesados, con un enfoque específico en el servicio de Copernicus European Ground Motion Service (EGMS). El capítulo 4 recopila varios ejemplos de aplicación y explotación de los datos InSAR, todos ellos extraídos del EGMS, abarcando diferentes fenómenos que ocasionan movimientos del terreno. Finalmente, el capítulo 5 presenta una serie de ejemplos que reflejan las limitaciones y particularidades de la técnica InSAR. Asimismo, este manual se complementa con tres anexos que incluyen un glosario de términos, recursos de aprendizaje y una lista del software de procesamiento SAR libre más utilizado en la comunidad científica.

**Agradecimientos:** Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos “UNDERGY”, subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), en el contexto del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, y del Programa Estatal de Liderazgo Empresarial en I+D+i del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2021-2023, y “SARAI”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de la Agencia Española de Investigación 10.13039/501100011033 (PID2020-116540RB-C22).

# Metodología de Estimación de Caudales Objetivo para Desaguado de Mina

José Luis Villa Lorenzo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Itasca Chile*

Palabras clave: Desaguado, Open Pit, Hidrogeología

**Resumen.** La explotación de pórfidos cupríferos de baja ley hace necesario la movilización de gran cantidad de material estéril, lo que conlleva a la generación de importantes excavaciones. La mayor parte de estas excavaciones alcanzan el nivel freático y sufren problemas de tipo operativo y de estabilidad como consecuencia del efecto de las presiones de poro.

Son numerosos los efectos negativos que tiene el nivel freático en la operación, desde los problemas de estabilidad de taludes a problemas operacionales como incremento de los costos por la utilización de explosivos especiales, pérdidas de rendimiento en la carga de los materiales con humedad, aumento de los volúmenes de extracción, problemas de movilidad de la maquinaria, etc.

Las compañías mineras que operan explotaciones bajo el nivel freático definen unos objetivos de desaguado, los cuales generalmente se basan en la definición de una profundidad mínima del nivel freático con respecto a las fases en avance y el fondo del open pit. Para definir este objetivo de desaguado es necesario conocer el caudal a extraer para rebajar el nivel freático y poder así, diseñar los sistemas de despresurización y desagüe más adecuados para la operación.

Se desarrolló una metodología para definir el caudal objetivo basada en modelamiento numérico mediante el software de flujo subterráneo 3D MINEDW. La metodología se basa en simular un escenario predictivo hipotético en el que se extrae toda el agua subterránea hasta la profundidad definida como objetivo para el nivel freático y calcular el flujo necesario para conseguirlo.

Inicialmente se cuenta con un modelo calibrado, el cual reproduce los procesos hídricos descritos y cuantificados en el modelo conceptual vigente de la operación, con ratios de desviación estadísticos dentro de los rangos definidos en las guías internacionales. El modelo MINEDW lleva incorporada toda la red de despresurización y desagüe implementada en la mina y que se compone de pozos de bombeo y abanicos de drenes, toda la red de monitoreo histórica desde la etapa de pre-minería, así como todas las topografías históricas y predictivas.

Con el modelo calibrado se ha desarrollado una simulación predictiva incluyendo el plan de minado futuro diseñado por la operación. Las topografías del plan de minado se han proyectado en profundidad hasta situar el fondo de las fases en la profundidad objetivo del nivel freático. Así, de esta manera, se ha calculado el flujo necesario para conseguir rebajar el nivel freático como la suma de los flujos obtenidos por los caudales de afloramiento en estas topografías proyectadas, el caudal extraído por el sistema de desagüe (pozos de bombeo existentes) y caudal extraído por el sistema de despresurización (abanico de drenes).

Esta metodología ha sido probada con éxito en varias minas importantes de Chile, mostrando resultados que posteriormente han sido coherentes con los caudales extraídos en la realidad por la operación y la posición del nivel freático obtenida.

# Métodos geofísicos electromagnéticos para el seguimiento de la dinámica del agua subterránea en entornos costeros

Juanjo Ledo<sup>1</sup>, Jose Tur<sup>2</sup>, Andrea Palacios<sup>3</sup>, Jesús Carrera<sup>4</sup>, Pilar Queralt<sup>5</sup>, Perla Piña-Varas<sup>5</sup>, Alex Marcuello<sup>5</sup>, Marc Diego<sup>2</sup>, Valentí Rodellas-Vila<sup>6</sup>, Albert Folch<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Complutense de Madrid

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de Catalunya

<sup>3</sup>Amphos21

<sup>4</sup>IDAEA, CSIC

<sup>5</sup>Universitat de Barcelona

<sup>6</sup>Universitat Autònoma de Barcelona

Palabras clave: Intrusión salina, Descarga de aguas subterráneas, Resistividad eléctrica, Geofísica

**Resumen.** Los ambientes costeros representan sistemas críticos de importancia fundamental para el equilibrio ecológico y el bienestar humano. La dinámica de las aguas subterráneas en estas áreas, influenciada por fenómenos como las mareas y la intrusión marina, juega un papel crucial en el funcionamiento de todo el sistema hidrológico costero. Es fundamental monitorear y comprender esta dinámica subterránea para gestionar de manera sostenible las zonas costeras y adaptarse eficazmente a los efectos del cambio climático. En este contexto, las técnicas geofísicas electromagnéticas se destacan como herramientas eficaces para la monitorización no invasiva y de alta resolución de las aguas subterráneas en áreas costeras. En este artículo, exploramos cómo métodos como la magnetotelúrica, la tomografía de resistividad eléctrica entre pozos y la tomografía de resistividad eléctrica anfibia y marina han sido empleadas para estudiar la dinámica del agua subterránea en diversos casos a lo largo de la costa mediterránea. El método magnetotelúrico se aplicó al estudio de la evolución temporal de la intrusión salina en la zona deltaica del río Tordera. A lo largo de tres años se repitieron las medidas magnetotelúricas cada 4 meses a lo largo de un perfil perpendicular a la costa de casi dos kilómetros de longitud y que alcanzaba una profundidad de 300 metros. La zona de mezcla de agua de mar se identificó claramente a lo largo del perfil de seguimiento, además de los cambios de la intrusión con el tiempo. Cualitativamente, las secuencias del modelo de resistividad 2D AMT están bien correlacionadas con el estado hidrológico del sistema. El control y seguimiento de la evolución temporal del estado dinámico

del acuífero de Argentona se realizó mediante tomografía eléctrica entre pozos. En este caso la zona de estudio presentaba unas dimensiones más reducidas 50 metros en superficie y 25 metros de profundidad. Tras 2 años de seguimiento, observamos la variabilidad de la cuña de intrusión salina a diferentes escalas temporales: (1) variaciones estacionales naturales y salinización del acuífero que atribuimos a la sequía a largo plazo y (2) fluctuaciones a corto plazo debidas a tormentas marinas o inundaciones en el arroyo cercano durante lluvias torrenciales. Asimismo, la imagen en profundidad de la conductividad eléctrica de los modelos nos permite explicar los perfiles de salinidad registrados en los pozos de control. Finalmente el empleo de la tomografía eléctrica anfibia, con medidas simultáneas en tierra y en el fondo marino próximo a la línea de costa y la tomografía eléctrica marina con medidas desde la superficie del mar nos ha permitido evaluar la presencia de descargas de aguas dulces subterráneas (SGD) en alta mar cerca de la costa y examinar sus posibles variaciones estacionales. Se realizaron transectos de 700 m de longitud, perpendiculares a la línea de costa, utilizando una embarcación en una zona de aguas poco profundas para obtener datos de resistividad eléctrica del lecho marino en una superficie de 3 km<sup>2</sup> y hasta una profundidad de unos 15 metros desde la superficie del mar. Los datos se adquirieron en dos campañas de campo, una durante la estación seca y otra durante la estación húmeda. Los resultados muestran diferentes valores de resistividad eléctrica en los sedimentos marinos a lo largo de la zona estudiada. La estación húmeda presentó los valores de resistividad más elevados, lo que está relacionado con la presencia de una mayor cantidad de agua de poro más dulce/salobre en los sedimentos marinos debido a los cambios. Estos estudios evidencian la capacidad de estas técnicas para delimitar la intrusión de agua marina, medir las interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales, y seguir la evolución de los acuíferos costeros en el tiempo.

**Agradecimientos:** PID2022-140862OB-C21/C22; ACA210/18/00007

# Migración de contaminantes emergentes en el entorno río-acuífero de la cuenca del Onyar (Girona)

Nonito Ros-Berja<sup>1</sup>, Meritxell Gros<sup>1</sup>, Lúcia Helena Santos<sup>1</sup>, Anna Menció<sup>2</sup>, Josep Mas-Pla<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA) / Universitat de Girona.*

<sup>2</sup>*Grup de Recerca Geocamb-GAiA, Universitat de Girona*

Palabras clave: Contaminantes emergentes, Relación río-acuífero, Cuenca Río Onyar

**Resumen.** Las presiones antrópicas, como la agricultura y los vertidos de aguas residuales, son las principales fuentes de productos farmacéuticos (PhAC) y contaminantes emergentes (CE) a las aguas subterráneas. Una vez en el medio hídrico, su presencia está vinculada a la dinámica hidrogeológica del acuífero y por su relación con la red de drenaje. Esta relación río-acuífero es especialmente interesante durante períodos de sequía severa cuando la dilución por el agua de precipitación es menor y, consecuentemente, las concentraciones de CEs pueden aumentar. Este estudio muestra la distribución de CEs en la cuenca del río Onyar (295 km<sup>2</sup>) durante la reciente sequía (2000-2024) que afecta a las cuencas internas de Cataluña, como un ejemplo de la migración de estos contaminantes en el entorno río-acuífero.

Este estudio evalúa la presencia de fármacos (PhACs) y compuestos disruptores endocrinos (EDCs) en dos campañas de muestreo. La primera se realizó en junio-julio de 2021 e incluyó el análisis de 45 PhAC en 18 muestras de agua subterránea. La segunda tuvo lugar en marzo de 2023, después de dos años de pertinaz sequía, y se centró en 12 muestras de agua subterránea más 10 muestras de agua superficial para la determinación de 45 PhAC, más 9 productos de transformación (TP) y metabolitos, y 32 EDC.

En 2021 se detectaron cinco PhAC en aguas subterráneas (paracetamol, carbamazepina, hidroclorotiazida, ibuprofeno y venlafaxina) en concentraciones de 0,6 a 57 ng/L. El sulfametoxazol fue el único antibiótico encontrado. En la segunda campaña (2023) solo se identificaron 6 PhACs: sulfametoxazol, sulfametazina, sulfadiazina, carbamazepina, venlafaxina e hidroclorotiazida a 0,5 a 20 ng/L en aguas subterráneas, y 8 PhACs en muestras de ríos, entre ellos trimetoprim, clindamicina, sulfametoxazol, sulfapiridina, flubendazol,

carbamazepina, citalopram y venlafaxina, con un rango de 5,9 a 81,8 ng/L. Únicamente se encontraron TPs y metabolitos, como carbamazepina-10,11-epoxi y carbamazepina-2-hidroxi en muestras de ríos, mientras que el ácido metoprolol estaba presente tanto en muestras de ríos como de aguas subterráneas. Varios EDCs estaban presentes en muestras de ríos y de aguas subterráneas, incluyendo tolitriazol, benzotriazol-1H, bisfenol A, cafeína, metilparabenos, TCEP: tris(2-chloroethyl)phosphate; TBEP: tris(2-butoxyethyl)phosphate, TCPP: 2-chloropropylphosphate, y estrona en concentraciones de 0,3 a 142,2 ng/L.

Esta distinta distribución de CEs en el medio hídrico se interpreta en base a los factores hidrológicos y a la naturaleza reactiva de estos compuestos. Se considera que la recarga de acuíferos inducida por el agua de los arroyos debido a la extracción de agua subterránea es más intensa durante los períodos de sequía cuando el nivel freático es más bajo, como sucede claramente en 2023. Ello induce la captura de agua superficial, básicamente constituida por los aportes de aguas regeneradas vertidas al cauce, aunque la migración de estos compuestos está condicionada por su capacidad de adsorción y degradación. De esta manera, los compuestos más móviles, clasificados según el índice de GUS, y que incluyen la mayoría de EDCs (excepto el bisphenol A, TCEP, TBEP y TCPP, entre otros) y algunos fármacos como el sulfametoxazol y la carbamazepina, aparecen consistentemente en las aguas subterráneas, mientras que los TPs, los EDCs y fármacos, menos móviles sólo se detectan en las aguas superficiales. Por lo tanto, la variabilidad espacial y temporal de la concentración de CEs en las aguas subterráneas es una consecuencia de las condiciones hidrológicas cambiantes, observables y predecibles, más la naturaleza química reactiva de estos compuestos. Ignorar ambas en la interpretación de la presencia de ECs dará lugar a acciones erróneas en la prevención de los riesgos asociados a estos contaminantes.

**Agradecimientos:** Financiación: Proyecto ADVANCE4WATER, subproyecto ICRA: EC-FATE, AEI-Programa estatal de I+D+i Proyectos de Generación de Conocimiento 2022, PID2022-139911OB-C42.

# Mitigación de drenajes ácidos en el antiguo depósito de estériles del entorno minero de Touro

José Luis Cereijo Arango<sup>1</sup>, Ricardo Juncosa Rivera<sup>1</sup>, Fernando Díaz Riopa<sup>2</sup>, Constantino Penedo Ferreiro<sup>2</sup>, Pelayo Fernández Álvarez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade da Coruña*

<sup>2</sup>*Cobre San Rafael*

Palabras clave: Agua, Minería, Drenajes acidos

**Resumen.** La mina histórica de Touro, localizada entre los municipios de Touro y O Pino (A Coruña), fue explotada entre los años 70 y 80 del siglo pasado mediante técnicas de minería a cielo abierto para la extracción de cobre.

En el año 1986, al no ser viable la explotación desde el punto de vista económico, la empresa concesionaria abandonó las labores de aprovechamiento mineral. Es importante contextualizar esta etapa de abandono de la actividad minera, ya que en aquella época la legislación española no contemplaba la obligación de restaurar el espacio afectado. Desde hace ya varias décadas, la legislación nacional sí contempla esta obligación de restaurar los espacios afectados, asegurando que no pueda volver a darse una situación similar.

En línea con la nueva legislación y la concepción moderna de las actividades mineras e industriales enfocadas al respeto por el medioambiente, Cobre San Rafael, que pretende reactivar la explotación de este yacimiento, desarrolla desde 2020 labores de caracterización, identificación y gestión integral de las aguas de drenaje del antiguo depósito de estériles para reducir, en la medida de lo posible, los caudales generados en el mismo.

Para ello, se ha desarrollado un estudio de caracterización hidrodinámica e hidroquímica del antiguo depósito de estériles, analizando las mejores técnicas de mitigación de los drenajes ácidos que se producen. La caracterización hidrodinámica ha consistido en determinar los parámetros de permeabilidad y coeficiente de almacenamiento del material acumulado y la identificación de distintas zonas de menor y mayor permeabilidad. Asimismo, el análisis de muestras de agua obtenidas a partir de piezómetros practicados en dicho depósito ha posibilitado la determinación de la carga ácida de las aguas almacenadas.

Una vez caracterizado, las actuaciones principales practicadas han consistido en la ejecución de un canal perimetral en la zona norte que capta las aguas limpias de la parte alta de la cuenca evitando que las aguas de escorrentía epidérmica subsuperficial entren el depósito de estériles, el diseño y construcción de una planta de tratamiento que opera en circuito cerrado y la captación y bombeo hacia la planta de tratamiento de las aguas surgentes y de las acumuladas en una balsa ubicada en la zona sur.

En consecuencia, en este trabajo se presenta el análisis de la eficacia de las actuaciones practicadas, a tenor del conocimiento adquirido del medio en el estudio realizado, y que han dado lugar a una mejora sustancial de las aguas en el entorno próximo del depósito en forma de una disminución del flujo másico de metales a los arroyos cercanos Felisa y Portapego del 96 y 87 % respectivamente.

# Modelación de la contaminación del suelo por fugas de tanques subterráneos de combustible. Aplicación a una futura estación de servicio en Barranquilla (Colombia)

Javier Rodrigo-Illari<sup>1</sup>, María-Elena Rodrigo-Clavero<sup>1</sup>, Cristian Enrique Mora Cortés<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de València

Palabras clave: BTEX, Modelación, Zona no saturada, Suelo

**Resumen.** En el presente trabajo se ha realizado una evaluación de la contaminación y de los impactos sobre el suelo y las aguas subterráneas procedentes de fugas de tanques subterráneos de combustible de una futura estación de servicio ubicada en Barranquilla (Colombia). El análisis realizado se ha centrado en evaluar la concentración de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX) en la zona no saturada del suelo, considerando los valores de referencia establecidos por la legislación colombiana y por la Agencia de Protección Ambiental de USA (USEPA), y utilizando el modelo VLEACH, que resuelve la ecuación del transporte en zona no saturada mediante una aproximación en diferencias finitas. El modelo utiliza una formulación simplificada que permite evaluar la masa de contaminante distribuida en cada una de las fases (sólida, líquida y gaseosa) en la zona vados en una columna de suelo.

Los resultados obtenidos para los escenarios de análisis planteados muestran que, en condiciones normales, se dispone de al menos 2 años antes de que la contaminación alcance el nivel freático. Sin embargo, en algunos escenarios con condiciones más desfavorables (alto contenido en humedad en el suelo), se dispondría de un tiempo menor para evitar la contaminación de la fase sólida del estrato de arenas limosas. Por otro lado, se ha podido determinar que las concentraciones en fase gaseosa en el terreno son varias veces superiores a las que establece la USEPA. En el caso de que el nivel freático se mantuviera estable y la fuga fuera permanente, la llegada de contaminantes al acuífero se produciría lentamente y supondría un impacto considerable, llegando a superar las concentraciones de referencia de benceno en agua establecidas para el consumo humano por la USEPA tras un periodo de 25 años.

# Modelación estocástica del transporte y retención de bacterias durante la recarga artificial de acuíferos

Juan J. Hidalgo<sup>1</sup>, Cristina Valhondo<sup>1</sup>, Benjamín Piña<sup>1</sup>, Claudia Sanz<sup>1</sup>, Marta Casado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC)*

Palabras clave: recarga artificial, transporte anómalo, modelación estocástica, transporte de bacterias

**Resumen.** Los sistemas de recarga artificial de acuíferos permiten mejorar la calidad y aumentar la cantidad de agua recargada mediante la retención de partículas suspendidas y microorganismos. Sin embargo, de manera periódica se detectan patógenos y otros microorganismos en el agua subterránea, lo cual supone un riesgo importante para la salud humana que hace necesario el estudio de los mecanismos que afectan a la propagación de las poblaciones microbianas durante el proceso de recarga.

En este trabajo se realizaron una serie de experimentos en columna para caracterizar el transporte de bacterias en un medio poroso. Se construyeron dos columnas. Una utilizando sólo arena y otra formada por una combinación de arena, compost y virutas de madera. En cada columna se realizó una inyección puntual de trazadores (rodamina y ácido amino G) y un consorcio microbiano proveniente de agua de efluente de depuradora. Se tomaron muestras de agua a la salida de la columna para obtener las curvas de llegada de los trazadores y secuencias de amplicones (ASV) de las bacterias y así determinar el efecto del material de la columna en la retención de las bacterias. Las bacterias mostraron un fuerte comportamiento anómalo con retraso en los picos de llegada respecto a los trazadores y colas más largas, especialmente en las columnas con materia orgánica.

La interpretación de los datos se hizo mediante un modelo de camino aleatorio continuo, que representa el transporte en términos de dominios móviles e inmóviles. Las bacterias son transportadas por el flujo medio y experimentan transiciones desde y hacia las zonas de baja movilidad con una cierta frecuencia. El transporte se describe en términos de cuatro parámetros: la velocidad media, el coeficiente de dispersión, la tasa de atrapamiento y el tiempo medio de residencia en las zonas inmóviles. El modelo reproduce de manera satisfactoria las

más de 470 curvas de llegada de ASVs medidas. Finalmente se realizó un análisis estadístico para determinar la relación entre las características fisiológicas de los ASV y los parámetros del modelo de transporte.

**Agradecimientos:** Proyecto PID2022-137652NB-C41 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE. Ayuda 467\_CNS2023\_MRR financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR

## Modelación hidrogeológica del núcleo del salar de Atacama (Chile) considerando los efectos del cambio climático

Diego Campos Molina<sup>1</sup>, Javier Rodrigo-Illari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universitat Politècnica de València*

Palabras clave: Atacama, modelación, ecosistema, cambio climático

**Resumen.** El salar de Atacama ubicado en el norte de Chile, es el depósito de sal más grande del país y la mayor reserva de litio del mundo. Este salar está formado por una cuenca de tipo endorreica en una depresión que recibe al río San Pedro y múltiples quebradas por donde se filtra el agua desde la cordillera hasta el núcleo del salar. Es el quinto salar más grande del mundo con una gran diversidad de fauna. En el núcleo del salar se realiza una alta actividad minera no metálica. Desde el año 1986 se registran actividades de extracción de salmuera que han venido incrementándose a lo largo del tiempo.

En el presente trabajo se ha construido un modelo hidrogeológico mediante MODFLOW 6 utilizando la interfaz gráfica de usuario ModelMuse que reproduce los datos históricos. El modelo conceptual contempla tres unidades hidrogeológicas (núcleo superior, núcleo intermedio y núcleo profundo) en las que se ha zonificado la permeabilidad, el coeficiente de almacenamiento y el coeficiente de rendimiento específico de forma manual. El dominio queda acotado en superficie por la topografía del terreno, basada en el modelo digital de elevaciones del terreno a resoluciones de 12,5 metros identificado como ALOS PALSAR DEM del satélite ALOS de Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). En profundidad, el muro del acuífero se ha definido por un nivel tobáceo. Los valores de la recarga directa, el flujo lateral subterráneo, la evaporación, los caudales de bombeo y las reinyecciones se han obtenido a partir de fuentes de datos de libre acceso.

El modelo de flujo se ha calibrado en régimen estacionario y transitorio. Además, se ha analizado una serie de escenarios futuros para analizar los efectos del cambio climático (RCP 8.5) en el sistema. Los resultados muestran la importancia que los bombeos inducen sobre los descensos de los niveles freáticos, aspecto éste que compromete gravemente la estabilidad del ecosistema lagunar.

## Modelación numérica de flujo del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena

Maria Pool<sup>1</sup>, Roger Mas<sup>1</sup>, José Luis García Aróstegui<sup>2</sup>, Virginia Robles-Arenas<sup>2</sup>,  
Elena Abarca<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Amphos 21 Consulting S.L. member of RSK Group*

<sup>2</sup>*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*

**Resumen.** La modelización hidrogeológica del Campo de Cartagena es una necesidad en términos socioeconómicos y ambientales, y es un caso que puede considerarse como un referente de la importancia de la iteración entre aguas subterráneas y superficiales, y contaminación por nitratos en las zonas costeras vulnerables de España. El principal objetivo del presente estudio es presentar un modelo numérico de flujo del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena para avanzar en el conocimiento de la hidrodinámica del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena desde el régimen natural (previo a 1920) hasta la actualidad. Este estudio se realizó dentro del proyecto Interreg-Sudoe AQUIFER, liderado por el CN IGME-CSIC (Instituto Geológico y Minero de España) con la participación de otras 8 entidades de España, Portugal y Francia (CUADLL, CWP, BRGM, ISA-LEAF AR, y PPA). Dicho proyecto se enfocó en capitalizar, testar, difundir y transferir prácticas innovadoras de preservación, monitorización y gestión integrada de acuíferos que sean de ayuda a la hora de la toma de decisiones de la gestión de los recursos hídricos subterráneos, mejorar la transferencia tecnológica a los agentes locales y crear nuevas sinergias y desarrollar herramientas comunes en un contexto de escasez de recursos hídricos y amenazas medioambientales. El dominio del modelo considera únicamente las formaciones cuaternarias con límite este delimitado por la laguna del Mar Menor y límite oeste definido por una barrera geológica (elevación del sustrato) coincidiendo con el límite oriental de la cuenca de la rambla de la Murta. De forma general, el modelo numérico reproduce adecuadamente la dinámica del sistema, obteniendo un ajuste satisfactorio entre niveles medidos y calculados. El error cuadrático medio normalizado (nRMS) obtenido para toda la serie simulada es inferior 1%, con un error medio absoluto de 1,1 m, lo cual indica una calibración óptima en términos de ajustes. El sistema presenta un alto grado de heterogeneidad en la distribución de la conductividad hidráulica, con valores menores en el sector norte del sistema y mayores en el sector central de la franja costera y en el sector de Cartagena. Los parámetros calibrados obtenidos son coherentes con los antecedentes y modelos previos, obteniendo patrones similares tanto en la distribución de la conductividad hidráulica como en el almacenamiento o porosidad drenable. Por

otro lado, el Balance hídrico obtenido a partir del proceso de calibración es consistente con el definido en el modelo conceptual, con una única entrada al sistema correspondiente a la recarga directa por precipitación e infiltración de excedentes de riego de 71,8 hm<sup>3</sup>/año para todo el periodo simulado de 1920 a 2020, y descargas principales correspondientes a la salida al Mar Menor, con un promedio de 33,9 hm<sup>3</sup>/año, y la extracción del acuífero cuaternario, con un promedio para toda la serie de 31,2 hm<sup>3</sup>/año. Adicionalmente, los resultados numéricos indican que, aunque el acuífero se está recuperando, al final de la simulación el sistema no ha alcanzado la situación de equilibrio natural previa a la explotación correspondiente a la del año 1920. Esta herramienta numérica desarrollada sirve como herramienta de gestión para cuantificar los futuros impactos de efectos externos, como disminución en la recarga y otros factores relacionados con el cambio climático, y definir futuros planes de gestión sostenibles.

## Modelación numérica del acuífero interfluvial Peces-Duerna (León)

Giussepe Massone Grez<sup>1</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>2</sup>, Lucia De Stefano<sup>1</sup>, Almudena de la Losa-Román<sup>2</sup>, Nuria Naranjo-Fernández<sup>2</sup>, Sergio Martos Rosillo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Complutense de Madrid

<sup>2</sup>Instituto Geológico y Minero de España

**Resumen.** La recarga ancestral de acuíferos, también conocida como Siembra de Agua, mediante canales de infiltración, es un ejemplo de Solución Basada en la Naturaleza que se lleva a cabo en España, al menos desde la Edad Media. Por estos canales excavados en el terreno se desvía el agua de los ríos para favorecer su infiltración en materiales permeables. El agua infiltrada en los acuíferos circula lentamente, descargándose a través de manantiales, arroyos o pozos tiempo después de haberse infiltrado. De esta manera, los recursos hídricos están disponibles durante la estación seca, que es cuando la demanda es mayor.

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de un modelo de flujo con el que se ha evaluado la respuesta del acuífero Peces-Duerna tras un ensayo experimental de recarga de 15 días de duración. La recarga se realizó mediante la infiltración de agua en el acuífero, mediante unas acequias conocidas localmente como zayas. El acuífero interfluvial Peces-Duerna, se encuentra entre los dos ríos que le dan su nombre, en la comarca de La Bañeza, de la provincia de León. Está formado por materiales detríticos cuaternarios, tiene un espesor comprendido entre 2 y 10 m, y una extensión de 43 km<sup>2</sup>. La escasa cuantía de sus reservas y la importante explotación a la que se ve sometido todos los años, para afrontar la temporada de riego, hace necesario incrementar su recarga natural mediante la infiltración de agua desde las zayas.

El trabajo realizado ha requerido de la modelación del flujo de agua subterránea de este acuífero y de la evaluación de la recarga natural y la artificial, mediante las zayas. Para evaluar la recarga natural se utilizó el software TRASERO, mientras que para la modelización del flujo se empleó el software MODFLOW 6.

Los resultados preliminares por infiltración del agua de lluvia resultan comprendida entre 155 y 49 mm/año, que aplicada a la totalidad del acuífero sería de 6,4 y 2 hm<sup>3</sup>/año, respectivamente. Sugieren la especial importancia de la recarga artificial en el acuífero y permiten ir configurando una herramienta con la que poder realizar una mejor gestión de los recursos hídricos de la comarca de La Valduerna.

## Modelación numérica en zona no saturada de la contaminación por hidrocarburos procedentes de la fuga de tanques subterráneos de combustible en Bahía Blanca (Argentina)

Victoria Zanello<sup>1</sup>, Javier Rodrigo-Ilarri<sup>2</sup>, Eduardo Cassiraga<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional del Sur (Argentina)

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València

Palabras clave: BTEX, zona no saturada, HYDRUS-2D, modelación

**Resumen.** En el presente trabajo se ha realizado una modelación numérica para analizar el impacto sobre la zona no saturada (ZNS) de posibles fugas procedentes de tanques subterráneos de combustible en la localidad de Bahía Blanca (Argentina). En esta zona, el acuífero está compuesto por limos y arenas con distintos grados de cementación carbonatada. El nivel freático tiene una profundidad variable, con valores que van desde 50 m en el noroeste y noreste de la ciudad hasta 0 m en la zona de descarga (estuario de Bahía Blanca).

El análisis de la contaminación de hidrocarburos se ha centrado en la evaluación de las concentraciones de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX) en un perfil de suelo tipo, cuyo perfil litológico fue obtenido a partir de sondeos destructivos realizados de forma manual. Para ello, se realizó una aproximación numérica bidimensional utilizando el modelo HYDRUS-2D. Además, se realizó un análisis del comportamiento de estos compuestos en las diferentes fases: vapor, absorción y dilución.

Los resultados obtenidos muestran que el benceno y el tolueno son los compuestos más móviles. Se ha podido observar que los movimientos laterales se vuelven importantes cuando no hay biodegradación, alcanzando en ciertos escenarios de simulación valores superiores a los límites admisibles por la legislación. La vía principal para el movimiento de BTEX fue a través de la fase de vapor, por lo que en suelos con un alto contenido de humedad la difusión de BTEX fue menor. En la fase adsorbida de la ZNS se obtuvieron concentraciones mayores de tolueno y xileno, seguidos por el benceno y el etilbenceno. Se pudo concluir que la concentración de compuestos BTEX adsorbidos en el suelo aumentaba a medida que el nivel freático se acercaba a la base del tanque.

El análisis de sensibilidad realizado mostró que el flujo de contaminantes es uno de los parámetros más sensibles del modelo, pero no se observaron variaciones en el mismo cuando variaba la precipitación. Además, se comprobó que el modelo es extremadamente sensible a la biodegradación, un parámetro difícil de estimar.

# Modelación numérica integral de la hidraulogía de la cuenca lagunar intermareal de La Paz, Baja California Sur, México

Xiaoxiao Zha<sup>2</sup>, Francisco Padilla Benítez<sup>1</sup>, Jesús Horacio Hernández Anguiano<sup>3</sup>, Yanmei Li<sup>2</sup>, Xu Liao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, ETSICCP, Universidade da Coruña*

<sup>2</sup>*Doct. en Ciencia y Tecn. del Agua, Univ. de Guanajuato (México)*

<sup>3</sup>*Ingeniería Geomática e Hidráulica, Universidad de Guanajuato (México)*

Palabras clave: Modelación numérica, hidrología integral, cuenca hidrológica costera, regulación de recursos hídricos

**Resumen.** Se ha ultimado el desarrollo de un modelo numérico hidrodinámico subterráneo y superficial capaz de evaluar las variables físicas relativas a todos los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica costera, y esto en interacción con los distintos componentes del ciclo hidrológico, condicionado por los diversos usos regulados del agua y ciertos acontecimientos hidrológicos que conllevan las aguas dulces y saladas de transición en lagunas intermareales. Dicho modelo MELEF-FSW se fundamentó en el método de los elementos finitos y ha sido desarrollado por un equipo interdisciplinar de investigación. El modelo utiliza herramientas de Sistemas de Información Geográfica (QGIS, ArcGIS) que permiten gestionar la información espacial y una interfaz de usuario para preparar y analizar ficheros de entrada y salida.

Los trabajos realizados en este proyecto suponen, pues, la aplicación y desarrollo de un modelo numérico dotado de una interfaz informática amigable, a partir de la medición y el acceso a una gran variedad de datos hidrogeológicos y geográficos de relevancia para este tipo de estudios hidrológicos. Cabría resaltar la fuerte interacción espacial y temporal entre las aguas subterráneas y superficiales (en rocas y sedimentos de geología compleja, ríos y laderas de elevadas pendientes, acuíferos, suelos, vegetación, así como para derivaciones, galerías filtrantes, bombes, parcelas de irrigación, presas, embalses, lagos, o acontecimientos como inundaciones, sequías, etc.), para así poder evaluar local y globalmente todos los componentes del ciclo hidrológico (mediante niveles freáticos, caudales, velocidades del agua, hidrogramas, calados, salinidad, balances hidrológicos,

etc.), a partir de la climatología, los elementos de regulación y los usos del agua presentes y/o futuros.

A partir de la información adquirida sobre el modelo digital de elevaciones, el clima, la evolución de las mareas, las texturas de suelo, los usos de suelo, la geología, el tipo de vegetación, las parcelas de riego, las extracciones de agua subterránea y otros usos de agua superficial para las características de lagos, embalses y acuíferos, se preparó el modelo para toda la cuenca vertiente de La Paz (~1500 km<sup>2</sup>), ubicada en el Golfo de California en México, y se utilizó una única condición de contorno para la descarga de agua dulce en la costa intermareal. El modelo discreto está conformado por 42,342 nodos y 84,281 elementos triangulares y se ejecutó en distintos periodos, de calentamiento, de calibración y de validación con los datos observados en una red de monitoreo conformada por 107 pozos con mediciones durante el periodo 1990 - 2014, que permiten y avalan su aplicación para analizar la evolución de la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca de La Paz.

Los resultados del modelo resaltan la fuerte interacción espacial y temporal entre las aguas subterráneas y superficiales, donde la actual tasa de sobreexplotación y la evolución histórica de la intrusión de agua salada reflejan un gran reto para dotar de seguridad hídrica a la ciudad de La Paz, donde la gestión del recurso hídrico se enfoca cada vez más en las zonas de montaña como la principal fuente de agua dulce frente a las perspectivas futuras de cambio climático y de incremento del nivel del mar.

En este sentido se han utilizado en la cuenca de La Paz las variables y los parámetros hidrológicos suficientes como para cumplir con los objetivos de la aplicación, calibración y validación del modelo numérico desarrollado para el análisis de la evolución de todos los recursos hídricos afectados por los principales usos del agua (extracciones e irrigaciones) y operaciones de regulación, y esto con el fin de estar en condiciones de evaluar posibles escenarios futuros de gestión y planificación de los recursos hídricos en la región.

## Modelización multifísica de una cobertura vegetal sobre la zona de almacenamiento de residuos de baja y media actividad

Diego Sampietro<sup>1</sup>, Elena Abarca<sup>1</sup>, Meritxell Gran<sup>1</sup>, María Arribas<sup>2</sup>, Manuel Ordóñez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Amphos 21 Consulting S.L., Barcelona, España*

<sup>2</sup>*Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. S.M.E., (Enresa), Madrid, España*

**Resumen.** Enresa es la empresa encargada por el estado para gestionar los residuos radioactivos generados en España y como parte de su trabajo administra el almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos de baja y media actividad. Estos residuos son almacenados en celdas de hormigón superficiales en el almacén centralizado de El Cabril. Una vez llenas estas celdas, se sellarán y se cubrirán con una cobertura multicapa. El objetivo de esta cobertura es minimizar la cantidad de agua que llegue a entrar en contacto con las celdas, reducir la erosión y evitar la biointrusión, todo ello para prevenir la degradación de las celdas subyacentes. Para ello se planea instalar una cobertura multicapa donde cada uno de los materiales utilizados tiene funciones y propiedades diferentes. Previo al diseño de la cobertura definitiva, se construyó una cobertura piloto para comparar dos diseños distintos y analizar en detalle el funcionamiento de las distintas capas y materiales.

Con el objetivo de evaluar el funcionamiento y la efectividad de la cobertura se ha desarrollado un modelo numérico que simula el comportamiento termohidráulico de las distintas capas. El modelo desarrollado reproduce los distintos procesos que controlan el movimiento del agua a través de los materiales mediante la simulación de los flujos de agua y de aire, el transporte de vapor de agua y el flujo de energía. El modelo numérico ha sido validado mediante la comparación con datos de temperatura y contenido de agua medidos en la cobertura piloto. Una vez validado, el modelo permite estudiar la respuesta de la cobertura a largo plazo y ante fenómenos meteorológicos diversos. Así como observar en detalle las principales vías de drenaje del agua y evaluar el efecto de las propiedades hidráulicas y retentivas de cada uno de los materiales.

Este trabajo presentará el modelo numérico desarrollado junto con la validación y los resultados obtenidos del análisis de las simulaciones realizadas.

# Modelo de flujo de agua subterránea del sistema de acuíferos de la Mancha Oriental (MODOS)

David Sanz<sup>1</sup>, Eduardo Cassiraga<sup>2</sup>, Arancha Fidalgo Pelarda<sup>3</sup>, Laura Tanco<sup>3</sup>, Ana Nieto Arias<sup>3</sup>, Juan José Gómez-Alday<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Sección de Biotecnología y Recursos Naturales. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla - La Mancha*

<sup>2</sup>*Grupo de Hidrogeología. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València*

<sup>3</sup>*Oficina de Planificación Hidrológica. Confederación Hidrográfica del Júcar*

Palabras clave: Acuífero multicapa, Modflow, Relaciones río - acuífero, Toma de decisiones

**Resumen.** Desde que se implantó la Directiva Marco Europea del Agua (DMA) se establecieron nuevos retos para la planificación y gestión de los recursos hídricos, requiriendo herramientas que integrasen la investigación y la innovación en los trabajos de los organismos gestores para mejorar la gobernanza del agua.

En el caso de la explotación de las aguas subterráneas, debido a su carácter individualizado y su halo de “invisibilidad”, la planificación y gestión se convirtió a finales del siglo XX en un serio desafío. El conocimiento, control y modelización de los sistemas de aguas subterráneas se hacía enormemente complicado para las administraciones del agua debido a la falta de recursos administrativos y de personal con conocimientos de hidrogeología y modelización matemática.

Un paradigma de esta problemática ha sido la Mancha Oriental, una de las masas de agua subterránea más extensas del sur de Europa (7.260 km<sup>2</sup>). La Mancha Oriental es una masa de agua subterránea formada por un complejo sistema de acuíferos multicapa con relaciones cambiantes en el espacio-tiempo respecto al río Júcar en su tramo medio. El río Júcar suministra agua superficial para: a) importantes sistemas de riego: Canal Júcar-Turia y la Ribera Alta y Baja del Júcar (en total unas 55.000 ha), b) las poblaciones de Albacete (170.000 habitantes), Sagunto (70.000 habitantes) y Valencia y su área metropolitana (1.600.000 habitantes), c) la Albufera de Valencia (humedal Ramsar, importante medioambientalmente, así como para el cultivo de arroz, el turismo y la pesca) y d) generación de energía eléctrica. En este contexto, durante los últimos 60 años, aproximadamente unas 96.000 has de cultivos de secano pasaron a regadío, dependiendo de la masa de agua subterránea de la Mancha Oriental, lo que

permitió un importante desarrollo socioeconómico en la zona. La explotación intensiva de las aguas subterráneas provocó importantes descensos de los niveles piezométricos además de una disminución de la aportación subterránea de los acuíferos a los caudales del río Júcar, efectos que previsiblemente se verán amplificados por el efecto del cambio climático y las sequías.

El desequilibrio entre los recursos hídricos disponibles y las demandas de agua para los diferentes usos ha generado problemas sociales y ambientales que han llevado a conflictos relacionados con el acceso a los recursos hídricos entre los usuarios de aguas subterráneas en la Mancha Oriental, los usuarios de aguas superficiales en el área de Valencia aguas abajo, los grupos ambientalistas, los gestores del agua, las autoridades políticas y la sociedad en general.

Por todo ello, por iniciativa de la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) y la Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental (JCRMO), en el año 2007, se firma el convenio de colaboración entre estos organismos y las Universidades (de ambas regiones), Politécnica de Valencia (UPV) y de Castilla - La Mancha (UCLM), para la realización de un modelo de flujo subterráneo (MODOS) mediante el código MODFLOW. Con dicho modelo matemático del flujo subterráneo se ha venido modelando el comportamiento hidrogeológico del acuífero de la Mancha oriental y su relación con el río Júcar.

A lo largo de estos años se han ido sucediendo diferentes convenios entre estas instituciones. Los resultados de la primera y segunda parte de las investigaciones llevadas a cabo han sido debidamente documentados. Los resultados de un tercer periodo de trabajos se presentaron en el informe elaborado por Cassiraga y Sanz, actuando la empresa TRAGSATEC como parte contratante, siendo la CHJ y la JCRMO los entes interesados.

Estos resultados han servido de base a la toma de decisiones. Entre las actuaciones-simulaciones del modelo más destacadas se encuentran: a) calibración y validación del modelo para el periodo 1940-2023, b) simulaciones de la oferta pública de adquisición de derechos de agua con fines ambientales en la cuenca media del río Júcar durante la sequía de 2006 a 2008, c) diseño de escenarios de gestión futura según los horizontes establecidos en la planificación para los bombeo máximos y recarga de aguas subterráneas en base a series históricas representativas y d) escenarios de gestión para la sustitución de bombeos con aportaciones superficiales del río Júcar para evitar la explotación no sostenible de la masa de agua (diferentes fases).

# Modelo hidrogeológico conceptual y numérico del acuífero fluviovolcánico de La Garrotxa (Girona)

Salvador Jordana Margalida<sup>1</sup>, Tybaud Goyetche<sup>1</sup>, Isabel Tubau Fernández<sup>2</sup>, Alfredo Pérez-Paricio<sup>2</sup>, Joan Bach Plaza<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Amphos 21 Consulting S.L.*

<sup>2</sup>*Agència Catalana de l'Aigua*

<sup>3</sup>*Universitat Autònoma de Barcelona*

Palabras clave: Modelo, gestión, acuífero

**Resumen.** La Agencia Catalana del Agua promueve estudios detallados de algunas MASub y acuíferos en el contexto de las medidas de mejora del conocimiento y gestión de los acuíferos estratégicos (Plan de medidas de mejora Clave CTN21A0588). Entre los acuíferos estudiados está el fluviovolcánico de La Garrotxa en Girona, en la cabecera de la cuenca del río Fluvià. Se trata de un sistema hidrogeológico construido por materiales cuaternarios volcánicos y sedimentarios, fosilizando un paleovalle erosionado en materiales del Eoceno. Es una zona relativamente conocida, de la que se dispone de muchos datos de caudales y niveles. Se sabe que es muy dependiente a la recarga local, que tiene una transmisividad y un espesor variables, aumentando este último hacia el centro del antiguo valle donde el acuífero principal está confinado.

El objetivo del estudio es diagnosticar y cuantificar los recursos subterráneos para dotar a la administración de herramientas robustas que ayuden a la gestión y que permitan un uso sostenible frente a la creciente demanda y a la posible disminución de la recarga, sin perjudicar a los numerosos manantiales y usos ambientales.

Para ello se ha desarrollado un nuevo modelo hidrogeológico de flujo de agua subterránea del fluviovolcánico. Se ha seguido la metodología clásica de modelación hidrogeológica pero se han priorizado los objetivos de gestión. Las principales características han sido un dominio 3D incluyendo los materiales del Cuaternario y parte del Eoceno subyacente, focalizado en las zonas de mayor demanda industrial y urbana (Olot), discretizado con malla estructurada de elementos finitos y calculado con Feflow en régimen transitorio (2005-2021).

El modelo calibrado permite cuantificar el balance en general, y las salidas por los manantiales, en particular. A su vez, se han establecido sectores de estudio dentro del dominio, que permiten valorar de forma detallada el balance en cada sector, el origen y el destino del agua subterránea, así como las interacciones con sectores adyacentes.

Se simularon 4 escenarios de futuro: sequía, gestión de aprovechamientos, cambio climático, protección de sistemas acuáticos naturales. Los resultados han permitido definir unos umbrales de explotación vinculados no sólo a las captaciones existentes, sino también a los niveles piezométricos en puntos estratégicos de control y también a los caudales de los manantiales. Con esto consigue avanzar a una gestión dinámica de los recursos subterráneos.

# Modelo térmico e hidroquímico del perfil vertical del lago de Meirama

Ricardo Juncosa Rivera<sup>1</sup>, Jorge Delgado Martín<sup>1</sup>, José Luis Cereijo Arango<sup>1</sup>, Pablo Rodríguez-Vellando<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade da Coruña

Palabras clave: Modelo termohidrogeoquímico, Lago minero, Quimoclina, Termoclina

**Resumen.** La utilización de técnicas de modelización para el estudio y la caracterización termohidroquímica de los lagos está condicionada por la disponibilidad de datos con los que validar el modelo creado. No existen muchos modelos numéricos validados que reproduzcan el comportamiento físico-químico de un lago.

Durante el periodo comprendido entre marzo de 2008 y octubre de 2019 se ha monitorizado el proceso de llenado y postllenado de una antigua explotación minera a cielo abierto de lignito pardo, el cual finalizó formando el lago de Meirama en el Noroeste de España. Con los datos obtenidos, se ha desarrollado un modelo numérico que analiza el comportamiento térmico y el transporte difusivo-dispersivo en el perfil vertical del lago. Se ha analizado el comportamiento del sulfato en condiciones estacionarias en el periodo entre mayo de 2016 y octubre de 2019

Para el desarrollo del modelo de transporte se han tenido en cuenta los intercambios de energía y masa de agua en la zona superficial del lago, a través de la llegada de las aportaciones precedentes de los arroyos que descargan al lago, y la zona de alivio de éste hacia el Río Barcés. Asimismo, para el modelo térmico se ha tenido en cuenta el gradiente geotérmico procedente del macizo geológico en el fondo del lago. La carencia de datos con respecto a fases mineralizadas no ha hecho posible el desarrollo de un modelo de transporte reactivo, por lo que se ha preferido modelizar la especie semiconservativa del sulfato, dado que se carece de datos de cloruro.

El modelo desarrollado puede ser aplicado a humedales o lagos con aportaciones subterráneas. En este caso, las aportaciones subterráneas fueron importantes durante el proceso de llenado.

Por último, el modelo reproduce aceptablemente los perfiles verticales de los parámetros analizados, con una quimoclina que se difunde lentamente,

separando claramente dos zonas, y una termoclina en la zona superior de 30 m de espesor, que tiende a desaparecer en la época invernal, tendiendo el perfil vertical a un valor entre 11 y 12 °C.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido financiado con el proyecto ED431C 2022/10, Xunta de Galicia, Consellería de Educación, Universidade y Formación

# Monitorización hidrológica de las lagunas peridunares de la Reserva Biológica de Doñana: Análisis de la evolución de la temperatura del agua 2015-2024

José Luis Yanes Conde<sup>1</sup>, Miguel Rodríguez Rodríguez<sup>1</sup>, Alejandro Jiménez Bonilla<sup>1</sup>, Marina Martínez Caro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Pablo de Olavide

Palabras clave: Monitorización hidrológica, Lagunas peridunares, Doñana, Temperatura del agua

**Resumen.** La Universidad Pablo de Olavide, en convenio con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, lleva a cabo la monitorización hidrológica de detalle de las lagunas peridunares más importantes de la Reserva Biológica de Doñana (RBD) desde el año 2015 hasta la actualidad. Este proyecto de investigación ha proporcionado un amplio registro de la evolución del nivel de las lagunas de Sopotón, Santa Olalla, Dulce, Taraje y Zahílló, así como del nivel piezométrico en piezómetros adyacentes a estas lagunas. Asimismo, el registro abarca la monitorización de la temperatura del agua tanto superficial como subterránea. Este proyecto ha posibilitado caracterizar la interacción entre las aguas superficiales y las aguas de la masa de agua subterránea (MASb) del manto eólico litoral de Doñana, una de las seis masas en las que se divide administrativamente el sistema acuífero Almonte-Marismas. A pesar de que este sistema acuífero presenta una hidrología compleja, los estudios realizados bajo este convenio han revelado que la mayoría de las lagunas peridunares actúan como sistemas de descarga local y se ven afectadas por las alteraciones de la MASb del manto eólico. En el presente estudio se analiza la evolución de la temperatura del agua superficial y subterránea, a diversas profundidades, en las citadas lagunas peridunares de la RBD, con el fin de caracterizar los flujos de agua subterránea en diferentes años hidrológicos. Los resultados preliminares indican que en los últimos años (2020 a 2023), coincidiendo con una notable disminución en las precipitaciones y un aumento en la temperatura media ambiental en la zona, se ha producido un incremento en la temperatura media anual del agua de las lagunas y en los niveles piezométricos más superficiales. Concretamente, el incremento medio en la temperatura del agua en estos tres años ha sido de + 1,85 °C, siendo más pronunciado en las aguas superficiales (+ 2,2 °C) que en los

piezómetros someros (+ 1,27 °C). No obstante, en los piezómetros profundos, aunque la temperatura del agua muestra una escasa variabilidad intraanual, se ha registrado en este mismo periodo una tendencia descendente significativa (-0,1 °C), junto con una notable reducción de la variabilidad. Además, se ha detectado un desfase entre las temperaturas máximas y mínimas respecto a las ambientales, variando según la profundidad donde se ubica el sensor de temperatura. Estos hallazgos contribuyen a la caracterización de los flujos de recarga y descarga en estos sistemas tanto a escala local como regional, permitiendo evaluar la variabilidad de estos flujos en años hidrológicos con precipitaciones inferiores y temperaturas superiores a la media.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido realizado gracias al convenio de colaboración: "Monitorización hidrológica y modelización de la relación laguna-acuífero en los mantos eólicos de Doñana. Seguimiento y ampliación del inventario" suscrito entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y la Universidad Pablo de Olavide.

# Nuevos sistemas de humedales construidos basados en procesos bioelectroquímicos para reducir la contaminación de aguas superficiales y subterráneas

Laura Scheiber Pagès<sup>1</sup>, Clara Laguna Marín<sup>1</sup>, Yolanda Rodríguez<sup>1</sup>, Enric García<sup>1</sup>, Enric Vázquez-Suñé<sup>1</sup>, Víctor Matamoros<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Environmental Assessment & Water Research (IDAEA), CSIC,*

Palabras clave: Materiales electro-conductores, remoción contaminantes, Sistemas de humedales

**Resumen.** Mantener las condiciones de vida saludables en áreas urbanas es un desafío en la Unión Europea y en todo el mundo, siendo el abastecimiento de recursos de agua dulce fundamental para esta misión. La gestión de las aguas subterráneas en zonas urbanas está sometida a una presión cada vez mayor debido al crecimiento de la población mundial, lo que supone una mayor carga de contaminantes relacionados con el desarrollo de las actividades humanas. Además, también hay la presión ejercida por el cambio climático, por lo que surge la necesidad de extender el uso de las aguas subterráneas y por ello se debe estudiar en detalle la calidad de dicho recurso y mejorar su gestión para hacer frente a esta situación.

En este sentido, el vertido de contaminantes de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) al medio acuático es crucial debido a sus potenciales efectos adversos sobre el medioambiente, en especial sobre las aguas subterráneas, y la salud humana. Estos efluentes de depuradoras a menudo son vertidos a los cauces de los ríos y si estos ríos tienen conexión con los acuíferos subyacentes, los contaminantes pueden alcanzar e impactar a las aguas subterráneas. Este es el caso del río Besós, que en la última década se ha detectado que tanto las aguas del río como las aguas del acuífero presentan contaminantes procedentes de los efluentes de la EDAR situada aguas arriba del río Besós. En el año 2000, se construyen 60 humedales de flujo subsuperficial con el objetivo de renaturalizar el río Besós. Un estudio previo realizado en la zona demuestra que los humedales construidos en el margen del río Besós son poco eficaces para la eliminación de los contaminantes emergentes (eliminación del 30-40%) o nitrógeno amoniacal (eliminación máxima del 20%). El enriquecimiento de nitrógeno (N) es responsable del deterioro de la calidad del agua y los peligros

para la salud (World Health Organization, 1996) y su presencia está regulada por la Directiva Marco del Agua (Directive 2000/60/EC, 2000; Directive 2006/118/EC, 2006). Los estudios recientes sugieren que el uso de materiales electroconductores como el coque o el grafito pueden mejorar la atenuación de estos contaminantes mediante procesos bioelectroquímicos, pero se desconoce su uso en humedales y como estos podrían ayudar a mitigar la descarga de contaminantes emergentes y nutrientes (N y P) al medio acuático. Se han llevado a cabo experimentos a escala de laboratorio con dos tipos de Humedales Construidos (HC): esteras flotantes de raíces (EFR) y humedales construidos de flujo horizontal (HCFH). Las EFR se probaron en configuraciones triplicadas con *Cyperus alternifolius*, *Cyperus* con biochar y controles, mientras que los HCFH se experimentaron con tres materiales de relleno: biochar, coque y arena. Los experimentos se alimentaron con aguas residuales tratadas secundariamente, contaminadas con los 10 contaminantes más abundantes en aguas subterráneas (benzotriazol, bisphenol A, carbamazepina, diclofenaco, gemfibrozil, iopamidol, lamotrigina, methyl benzotriazol, sucralosa, y valsartan).

Los resultados revelaron que la adición de coque mejora significativamente la eficiencia de remoción de contaminantes, atribuible a sus propiedades físicas y químicas que favorecen la adsorción de contaminantes y el crecimiento microbiano. Además, la presencia de plantas incrementó la capacidad de remoción de los sistemas. En cuanto el amonio se logra reducir cerca del 100% de su concentración. Respecto a los contaminantes orgánicos, los mejores resultados se lograron con el sistema compuesto con biochar, con una eliminación entre el 41 % para iopamidol y el 99 % para gemfibrozilo (82 %, en promedio). La mayor parte de los contaminantes orgánicos se logra reducir su concentración en torno al 80%. Estos hallazgos sugieren que los materiales de relleno, la presencia de vegetación y la tasa de carga hidráulica (TCH) son factores críticos en el diseño de HC para la eliminación de CE de las aguas residuales, destacando la viabilidad de estas soluciones naturales para prevenir la contaminación del agua subterránea.

**Agradecimientos:** IDAEA-CSIC es un centro de excelencia Severo Ochoa (Ministerio de Ciencia e Innovación de España, Proyecto CEX2018-000794-S).

## Presencia de contaminantes emergentes en el acuífero del Campo de Cartagena (Murcia)

Nonito Ros-Berja<sup>1</sup>, Elisa García<sup>1</sup>, Meritxell Gros<sup>1</sup>, Josep Mas-Pla<sup>1</sup>, Virginia Robles-Arenas<sup>2</sup>, Steven Morales<sup>2</sup>, Marisol Manzano<sup>2</sup>, Rosanna Margalef-Martí<sup>3</sup>, José Luque<sup>3</sup>, Albert Soler<sup>3</sup>, Neus Otero<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institut Català de Recerca de l'Aigua - Universitat de Girona*

<sup>2</sup>*Universidad Politécnica de Cartagena*

<sup>3</sup>*Universitat de Barcelona*

Palabras clave: Contaminantes emergentes, Campo de Cartagena

**Resumen.** La presencia de contaminantes emergentes en las aguas subterráneas, asociada a la contaminación difusa por fertilización orgánica (purines) o por vertidos de aguas residuales urbanas, genera un impacto en su calidad con potenciales efectos nocivos, tanto para la salud humana como los ecosistemas. Estos contaminantes tienen diferentes propiedades físico-químicas que condicionan su capacidad de adsorción en el subsuelo y su degradación, determinando así su capacidad de migración hacia las aguas subterráneas. En este estudio se presentan los datos un muestreo realizado en el acuífero del Campo de Cartagena, cuyo flujo de agua subterránea es una de las principales vías de transporte de contaminantes, tanto nutrientes (nitrato) como compuestos emergentes, hacia el Mar Menor. El objetivo de este estudio es caracterizar la presencia de los contaminantes como parte del proyecto en un REMÉDIATE, donde se ensayarán métodos de atenuación inducida de nitrato. Cuando éstos se apliquen, se evaluará su efecto sobre la degradación de los contaminantes emergentes.

El muestreo se realizó en abril de 2023 en distintos pozos de captación de cerca de 1 m de profundidad situados en la zona del acuífero, formada por materiales aluviales, y en la zona litoral interna del Mar Menor, incluyendo sondeos poco profundos realizados dentro del vaso lagunar para captar el flujo de agua subterránea fluyente hacia la laguna. Los principales contaminantes emergentes estudiados incluyen fármacos, compuestos disruptores endocrinos y pesticidas. En las muestras se han identificado varias sustancias en concentraciones por debajo de 1 ng/L y hasta aproximadamente 90 ng/L, e incluyen: los pesticidas atrazina, terbutilazina y simazina, los fármacos hidroclorotiazida, valsartan, sulfametoxazol, enrofloxacin, claritromicina, clindamicina, carbamazepina y

venlafaxina, junto con los productos de transformación de la carbamazepina, carbamazepina epoxi, y el metoprolol, el metoprolol ácido. Además, también se han identificado varios compuestos disruptores endocrinos, como el tolitriazol, 1H-benzotriazol, la cafeína, el bisfenol A, parabenos (metil, etil y propilparabenos), el tris (2-butoxietil) fosfato y el tris(2-cloroetil)fosfato.

La detección de estos compuestos señala una amplia gama de fuentes de contaminación, como la agricultura (pesticidas) y la descarga de aguas residuales en las aguas superficiales (fármacos y disruptores endocrinos). En general, en todos los puntos de muestreo, se observa una disminución de la concentración desde las zonas internas hacia las litorales, coincidiendo con el incremento de la salinidad, originada por la entrada de aerosoles a través de la precipitación que posiblemente conlleve una dilución de los contaminantes.

Para respaldar la presencia de contaminantes en la laguna y en el acuífero se han realizado experimentos de adsorción/desorción y degradación a escala de laboratorio en muestras del subsuelo procedentes de los sondeos realizados en la zona del Carmolí.

En resumen, la presencia de los contaminantes emergentes mencionados indica no solo su existencia en el medio hidrogeológico, sino también una capacidad de transporte efectiva a pesar de su naturaleza reactiva. En etapas posteriores del proyecto se evaluará la viabilidad del uso de subproductos de la industria agroalimentaria, para inducir la desnitrificación y reducir la concentración de los contaminantes emergentes en el acuífero del Campo de Cartagena.

**Agradecimientos:** Financiación: Proyecto REMÉDIATE, subproyecto ICRA: EMFASIS, Programa estatal de I+D+I Proyectos de Transición Ecológica y Digital 2021, TED2021-131005B-C33. NR-B está becado por el Programa Ramón y Cajal (AEI-FSE/RYC2020-030324-I).

# Presencia, distribución y concentración de contaminantes de preocupación emergente en los acuíferos volcánicos de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica

Helga Madrigal-Solís<sup>1</sup>, Pablo Jiménez-Gavilán<sup>2</sup>, Marta Inés Llamas-Dios<sup>2</sup>, Rubén Ríos-Quintero<sup>3</sup>, María de la Luz Tovar-Salvador<sup>3</sup>, Alicia Fonseca-Sánchez<sup>11</sup>, Lucía Ojeda-Rodríguez<sup>2</sup>, Ruepert Clemens<sup>1</sup>, Pablo Lara-Martín<sup>3</sup>, Iñaki Vadillo Pérez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Costa Rica

<sup>2</sup>Universidad de Málaga

<sup>3</sup>Universidad de Cádiz

Palabras clave: Compuestos de interés emergente, Acuífero volcánico del Valle Central, Costa Rica, Contaminación agrícola y urbana

**Resumen.** El área de estudio se localiza en la Gran Área Metropolitana (GAM), la principal aglomeración urbana de Costa Rica (2.044 km<sup>2</sup>) y que acumula el 60% de la población del país con 3 millones de personas. En la zona alta de la cuenca se conserva el bosque natural, mientras que en la zona intermedia se acumulan plantaciones de café que se fertilizan tres veces al año. Las ciudades de la zona central y baja de la cuenca son las mayores aglomeraciones urbanas, donde los sistemas de saneamiento se caracterizan por una extensión limitada y un tratamiento reducido. En consecuencia, muchos residentes de las zonas semiurbanas y urbanas dependen de sistemas de fosas sépticas para la gestión de las aguas residuales. El principal recurso hídrico para abastecer a la población de la GAM procede de los acuíferos volcánicos de Barva y Colima, sistemas acuíferos multicapa con diferentes grados de confinamiento. Estudios anteriores han demostrado el impacto de las actividades agrícolas y urbanas en la calidad de las aguas subterráneas. Los hallazgos presentaron concentraciones elevadas de nitratos en áreas urbanas y agrícolas/urbanas, superando los 50 mg/L en los acuíferos no confinados de Barva y localmente confinados del Alto Colima/Bajo Colima. Los análisis isotópicos (d15N y d18O) y de carbono orgánico disuelto (COD) indican un desplazamiento de las fuentes de nitratos de las zonas agrícolas a las urbanas, tanto en el acuífero de Barva como en el de Colima. Paralelamente a esta investigación hidrogeoquímica, a finales de noviembre de 2022 se llevó a cabo una campaña para establecer la presencia, distribución y concentración de Contaminantes de Preocupación Emergente (CECs). Se tomaron 25 muestras de

agua en perforaciones ubicadas en los acuíferos que abastecen el recurso hídrico a la población. Se han detectado 49 CECs: 9 antiinflamatorios, 4 beta bloqueadores, 4 reguladores lipídicos, 1 diurético, 1 antidepresivo, 15 antibióticos, 1 filtro solar, 2 drogas psiquiátricas y estimulantes y 9 drogas de abuso, en la red de muestreo. Las mayores concentraciones promedio se encuentran en el Sulfato de Etilo (213 ng/L) y en la Sulfanilamida (163 ng/L), con máximos de 3545 ng/L en Sacarina, 1836 ng/L en Sulfanilamida y 430 ng/L en Sulfato de Etilo. La mayoría de compuestos se encuentran en los acuíferos superficiales (Barva) y en algunos puntos del acuífero inferior (Colima), posiblemente, por conexión hidrogeológica a través del acuitardo que los separa o por el diseño constructivo de los sondeos de abastecimiento. Los resultados son de gran importancia para las Gestoras de Agua del Valle Centra, ya que la mayoría de los puntos de control son sondeos de abastecimiento a la población.

# Propuesta de protocolo de emergencia ante accidentes de personas en pozos de captación de agua subterránea

Juan Antonio Hernández Bravo<sup>1</sup>, Juan José Rodes Martínez<sup>2</sup>, Sergio Martos Rosillo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Diputación de Alicante*

<sup>2</sup>*RODES Espacios Confinados, S.L.*

<sup>3</sup>*Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España - Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

Palabras clave: Rescate, Pozos, Emergencias, Espacios confinados

**Resumen.** Pese a la existencia de normativa para el sellado y clausura de captaciones de agua, nuestro país se encuentra plagado de pozos abiertos en los que de forma recurrente se producen accidentes personales. Cuando esto ocurre y el accidentado no puede ser rescatado del pozo mediante el descenso de especialistas de los Cuerpos de Seguridad, que están debidamente entrenados y capacitados para estas operaciones, se tiene que recurrir a la construcción de pozos de acceso paralelos al del accidente. En estos casos, en los que el tiempo de intervención debe reducirse al mínimo, la improvisación no tiene cabida. Entendemos que la existencia de un protocolo de actuación específico para accidente de personas en pozos, en el que se incluya la figura del técnico hidrogeólogo especialista en construcción de pozos, es esencial. Cuestiones tan básicas como las de tener preparados directorios actualizados de especialistas en hidrogeología de captaciones de agua subterránea a nivel autonómico, de empresas con equipos de diagrafías y cámaras de TV para pozos y de empresas de perforación que dispongan de tallantes de gran diámetro para distintos sistemas de perforación es esencial. Igual de importante es tener construidas, distribuidas geográficamente y listas para su uso algunas jaulas de rescate. Otras actuaciones de especial interés son las de preparar, capacitar y entrenar a los Cuerpos de Seguridad y a los equipos de rescate minero, para, inicialmente, poder atacar la excavación lateral de acceso al accidentado mediante un único especialista, que será reemplazado por otros, hasta crear una cavidad lateral suficiente en la que puedan trabajar simultáneamente dos o más personas. Todo este trabajo previo permitiría aminorar de forma sustancial los tiempos de intervención. Este es el objetivo de esta comunicación, el de presentar una

primera propuesta de un protocolo de emergencia, a nivel nacional, para accidentes en pozo.

## Propuesta de una barrera hidráulica como medida correctora de los efectos que tendría una marina deportiva sobre el humedal de la Charca de Suárez (Motril, Granada)

María Luisa Calvache Quesada<sup>1</sup>, Manuel Rodríguez del Rosario<sup>1</sup>, Manuel López-Chicano<sup>1</sup>, Angela María Blanco-Coronas<sup>1</sup>, Marta García-Gómez<sup>1</sup>, Carlos Duque<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Granada

Palabras clave: Charca de Suárez, afección antrópica, barrera hidráulica, acuífero costero

**Resumen.** La construcción de una Marina Deportiva de 758 amarres con una lámina de agua marina de 106.000 m<sup>2</sup> que se introduciría en el continente en la costa de Motril (Granada) podría provocar efectos negativos sobre el nivel del agua y la salinidad de la Reserva Natural Concertada La Charca de Suárez. Asimismo, la masa de agua subterránea sobre la que se asienta el humedal también podría afectarse tanto en calidad como en cantidad con la construcción de esta obra. La modelación numérica (SEAWAT) conjunta de los dos sistemas de agua, subterráneo y superficial, reproduce la situación actual de La Charca de Suárez y del acuífero Motril-Salobreña. Tomando como referencia este modelo, se han llevado a cabo una serie de simulaciones de diferentes escenarios que indican que la construcción de la marina produciría una reacción inmediata sobre el nivel piezométrico que se estabilizaría igualmente en un corto periodo de tiempo. El descenso máximo en una situación hidrológica media sería de unos 50 cm en la zona de la marina y de unos 11-7 cm en la zona del humedal. El efecto sobre la salinidad del agua subterránea es más lento y continuado. A los 16 meses se produciría un incremento de 0.3 g/L en la zona de Taraje y Lirio (lagunas más cercanas a la marina) y casi imperceptible en Aneas y Trébol (lagunas más alejadas). Al cabo de 25 años, se estabiliza el sistema con un incremento de la salinidad de 1.9 g/L en Taraje y Lirio y 0.3 g/L en Aneas y Trébol. Este efecto negativo sobre el humedal, se podría evitar totalmente con la recarga de agua en un sector intermedio entre la posición de la Marina Deportiva y la Charca de Suárez que provocaría la aparición de una divisoria subterránea local que haría el efecto de barrera hidráulica.

**Agradecimientos:** El trabajo ha sido financiado por la Junta de Compensación de los Sectores Unificados "PLA 1 y PLA 2" del PGOU de Motril, el proyecto CGL2016-77503-R del Ministerio de

Economía y Competitividad y fondos FEDER de la Unión Europea, Grupo de Investigación RNM369 de la Junta de Andalucía, fondos Next-Generation EU del Programa María Zambrano Sénior (REF: MZSA03), proyecto PCM\_00018 de la Conserjería de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía y Gobierno de España-Unión Europea (NextGeneretionEU)

## Proyecto LIFE REMAR, Tratamiento Suelo-Acuífero con barreras reactivas a escala piloto para renaturalizar aguas residuales tratadas

Sara Bagés Estopà<sup>1</sup>, Miranda González Rodríguez<sup>1</sup>, Joan Campos Ferré<sup>1</sup>, Tiphaine Chantal Anderbouhr<sup>1</sup>, Silvia Díaz Cruz<sup>2</sup>, Jesús Carrera Ramírez<sup>3</sup>, Cristina Valhondo González<sup>3</sup>, Lurdes Martínez-Landa<sup>4</sup>, Xavier Sánchez Vila<sup>5</sup>, Linda Luquot<sup>6</sup>, Josep Martínez Vilar<sup>7</sup>

<sup>1</sup>*Comaigua*

<sup>2</sup>*Instituto Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona*

<sup>3</sup>*Instituto Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona. Unidad Asociada: Grupo Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC)*

<sup>4</sup>*Dpto. de Ingeniería Civil y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Unidad Asociada: Grupo Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC)*

<sup>5</sup>*Dpto. de Ingeniería Civil y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona*

<sup>6</sup>*Géosciences Montpellier, University of Montpellier, Centre national de la recherche scientifique (CNRS)*

<sup>7</sup>*Mejoras Energéticas*

**Resumen.** La escasez de agua es un problema creciente en los países mediterráneos que se ve agravado por el cambio climático. Generalmente, la demanda de agua se suple mediante la extracción de agua subterránea, pudiendo dar lugar a la sobreexplotación de acuíferos, lo que en zonas costeras puede favorecer la intrusión marina. En regiones costeras la demanda aumenta especialmente en las épocas de mayor afluencia del turismo.

En este contexto, la recarga gestionada de acuíferos (MAR) con aguas residuales tratadas, en concreto, el tratamiento suelo-acuífero (SAT), se presenta como una solución robusta para aumentar la disponibilidad de los recursos hídricos y mejorar la calidad del efluente de la EDAR. La tecnología SAT utilizando barreras reactivas ha demostrado una eficiencia notable en la eliminación de contaminantes al favorecer una secuencia de estados redox mediante la adición de carbono orgánico y, por tanto, promoviendo así la biodegradación y aumentando el número de sitios de sorción. La zona no saturada del acuífero bajo estas barreras también actúa como un filtro natural, aumentando los procesos de eliminación de los contaminantes del agua que se infiltra, que finalmente se

mezcla con el agua del acuífero. El crecimiento de plantas en la superficie de las balsas ayuda a evitar la colmatación de la zona de recarga y aporta materia orgánica a la barrera al final de su ciclo de vida.

En el proyecto LIFE REMAR (LIFE20 ENV/ES/000284) se utiliza agua tratada en la EDAR de Cambrils para recargar el acuífero del Baix Camp mediante un sistema SAT que consiste en dos balsas de infiltración, a las que llega el agua del efluente por gravedad y en las que se ha instalado una barrera reactiva formada, principalmente, por sedimentos del acuífero y materia orgánica de origen vegetal. El objetivo de esta barrera es el de favorecer los procesos naturales involucrados en la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes, microplásticos, patógenos, y genes de resistencia a los antibióticos. Además, se está ensayando el comportamiento del sistema con diferentes especies de plantas (especies autóctonas y de humedal). El sistema está dimensionado para recargar unos 146.000 m<sup>3</sup>/año, lo que representa un 3-4% del total del volumen tratado en la EDAR.

Se han instalado piezómetros para monitorizar el proceso de recarga y la calidad del agua. Los puntos de muestreo antes del sistema de infiltración se encuentran aguas arriba de la recarga, como referencia del agua del acuífero que no está afectada por la recarga, y el agua de infiltración, que es el efluente secundario, es decir, el agua ya tratada de la EDAR. Esta agua pasa por la barrera reactiva y se infiltra hasta llegar al acuífero. Este proceso se monitoriza tomando agua en la zona no saturada del acuífero, en los piezómetros más someros que se encuentran dentro de las balsas, y en la zona saturada, donde se muestrean en dos piezómetros más profundos, también dentro de las balsas. Finalmente, aguas abajo de la recarga se han dispuesto tres puntos de muestreo para hacer el seguimiento de las aguas subterráneas en su recorrido hasta el mar.

Desde el inicio de la infiltración se ha registrado una reducción significativa del nitrógeno presente en el agua de infiltración en su paso por la barrera reactiva y la zona no saturada hasta llegar al acuífero. Inicialmente, antes de infiltrar, en el acuífero se encontraba nitrógeno en forma de nitratos. Con la recarga se reducen considerablemente los nitratos presentes en la zona saturada del acuífero, justo por debajo de las balsas. Los nitratos en los piezómetros aguas abajo no se ven afectados por la recarga. Además, con la recarga se reduce notablemente la concentración de la bacteria *Escherichia coli* presente en el efluente de la EDAR. Estos resultados indican el éxito inicial del proyecto en la eliminación de contaminantes y la mejora de la calidad del agua. Los resultados de este sistema piloto servirán para el diseño de un sistema a mayor escala.

**Agradecimientos:** El proyecto LIFE REMAR (LIFE20 ENV/ES/000284) ha recibido financiación de la Unión Europea.

# Proyecto UPWATER: Entender los procesos de contaminación de las aguas subterráneas para proteger y mejorar su calidad

Eike M. Thaysen<sup>1</sup>, Enric Vázquez-Suñé<sup>1</sup>, Silvia Lacorte<sup>1</sup>, Sandra Pérez<sup>1</sup>, Sergi Díez<sup>1</sup>, Victor Matamoros<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC). C/ Jordi Girona 18-26, 08034, Barcelona, España.*

Palabras clave: muestreadores pasivos, CECs, mitigación contaminación

**Resumen.** Entre los recursos de agua dulce disponibles, el agua subterránea desempeña un papel clave al proporcionar suministros de agua y medios de vida para responder a la pronunciada escasez de agua. La contaminación de las aguas subterráneas por sustancias químicas (orgánicas e inorgánicas) y agentes biológicos (virus y bacterias) procedentes de actividades humanas es un problema generalizado en todo el mundo. El proyecto UPWATER tiene los siguientes objetivos científicos y tecnológicos: (1) proporcionar conocimiento científico sobre la identificación, ocurrencia y destino de los contaminantes en las aguas subterráneas con métodos de muestreo eficientes y económicos basados en muestreadores pasivos para compuestos químicos y patógenos; (2) desarrollar métodos de asignación de fuentes para identificar y cuantificar las fuentes de contaminación, incluido el análisis isotópico específico de compuestos (CSIA) y (3) validar y evaluar el desempeño de sistemas de tratamiento natural de ingeniería biológica diseñados como soluciones de mitigación. Las soluciones de seguimiento y mitigación se validarán en tres estudios de caso (Dinamarca, Grecia y España), que representan diferentes condiciones climáticas de la Unión Europea (UE) y una combinación de fuentes de contaminación rurales, industriales y urbanas. Los modelos hidrogeológicos existentes se actualizarán y se aplicarán criterios innovadores, lo que permitirá la simulación de escenarios de toma de decisiones bajo múltiples factores de estrés y proyecciones de cambio climático. Los escenarios también incluirán los impactos esperados de la ampliación de las soluciones de mitigación y la adopción de otras medidas preventivas no tecnológicas dedicadas a minimizar la liberación de sustancias contaminantes en origen (regulación de sustancias químicas, impuestos, campañas de consumo, contratación pública, etc.). La explotación de resultados específicos de UPWATER conducirá a los resultados esperados a medio plazo, que incluyen, entre otros: la actualización de las listas de prioridades sobre contaminantes químicos de la UE,

la ampliación de las soluciones piloto de base biológica a escala de demostración, la adopción de algunas medidas preventivas en los casos de estudio y el desarrollo e lanzamiento al mercado de dispositivos de muestreo pasivo.

# Recarga gestionada de acuíferos carbonatados en Menorca

Jordi Guimerà<sup>1</sup>, Camilo Fernández-Iglesias<sup>2</sup>, Roger Mas<sup>1</sup>, Sergi Martino<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Amphos 21 Consulting SL*

<sup>2</sup>*NorthLine Solutions SL*

<sup>3</sup>*Direcció General de Recursos Hídrics, Govern Balear*

Palabras clave: Recarga Gestionada de Acuíferos, Agua regenerada, Acuíferos costeros, Mejora de la salinidad

**Resumen.** La presencia de aguas subterráneas en las islas depende en gran medida de eventos de recarga regulares. El clima del Mediterráneo occidental limita estos fenómenos, que normalmente se producen durante períodos cortos de lluvias intensas seguidos de largos períodos secos de recarga no significativa. Además, la economía de las Islas Baleares depende en gran medida del turismo, que se concentra durante los periodos estivales de junio a septiembre, acentuando la demanda estacional de agua. En tales condiciones, la recarga gestionada de acuíferos no sólo es una opción sostenible para el agua, sino que muy a menudo es la única disponible, lo que se debe a la presencia de acuíferos permeables a muy permeables. Presentamos aquí un estudio piloto finalizado recientemente en Sant Lluís (Menorca).

El proyecto piloto tiene como objetivo mejorar la salinidad del acuífero y consiste inyectar agua recuperada en un sistema acuífero entre 60 y 80 m de profundidad a través de pozos específicos. El proyecto capta agua procedente del sistema terciario de una pequeña planta de tratamiento de aguas residuales urbanas y utiliza un proceso de ósmosis inversa para cumplir con los estándares de calidad para la recarga de acuíferos. De hecho, la calidad del agua tras el proceso mejora la calidad del acuífero, afectado por cloruros y nitratos. El sistema está dimensionado para producir dos líneas de 100 m<sup>3</sup>/d y hasta 200 m<sup>3</sup>/d de forma continua, que se han inyectado al acuífero a través de dos pozos. La red de control de agua inyectada consta de un total de 12 piezómetros de nueva construcción y pozos existentes, que están equipados con sensores de presión y calidad del agua, además de ser muestreados durante toda la vida del proyecto, un año. Dado que el agua de origen tiene un alto contenido de materia orgánica, antes de la ósmosis se realizará un tratamiento de cinco fases y un pretratamiento químico.

Los resultados altamente positivos del proyecto permiten ser muy optimistas a la hora de escalar los resultados para plantas y casos de dimensiones muy

superiores y que generen un gran impacto positivo en la gestión de los recursos hídricos de la isla.

**Agradecimientos:** Proyecto ganado en licitación de la Direcció General de Recursos Hídrics del Govern Balear

# Redes neuronales informadas por la física para la simulación de flujo transitorio en un acuífero libre

J. Jaime Gómez-Hernández<sup>1</sup>, Daniele Secchi<sup>2</sup>, Vanessa A. de Godoy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de València

<sup>2</sup>Universitat Politècnica de València, Università degli Studi di Parma

Palabras clave: PINN, solución continua

**Resumen.** La ecuación diferencial para la solución de flujo en una sección vertical de un acuífero libre tiene una condición de contorno que no es conocida a priori, que convierte la ecuación diferencial en no lineal y de solución no trivial. Habitualmente, esa ecuación se resuelve por métodos numéricos donde hay que iterar considerando que las celdas en las que se ha discretizado el acuífero pueden secarse y que la transmisividad de las mismas es función de si la celda está totalmente saturada o no.

La condición de contorno a la que nos referimos es la que identifica la superficie freática (límite superior del acuífero) donde la altura de presión es cero y, por tanto, la altura piezométrica coincide con la cota. Esta condición de contorno no es solo desconocida a priori sino que cambia en el tiempo en el caso de flujo transitorio.

Las redes neuronales informadas por la física se han mostrado como importantes herramientas para la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales complejas sin necesidad de recurrir a discretización alguna. Si además se combinan con observaciones, pueden servir para corregir errores conceptuales en la formulación de la ecuación de flujo o errores numéricos en su solución.

Consideremos una red neuronal para predecir la altura piezométrica en una sección vertical de un acuífero; esa red tiene como variables de entrada las coordenadas espaciotemporales  $x$ ,  $z$ , y  $t$ , y como salida la altura piezométrica  $h$ . Formalmente, una red neuronal es una función no lineal tan compleja como se quiera construir (en función del número de capas, el número de neuronas por capa y las funciones de activación usadas al final de cada capa) que relaciona piezometría con sus coordenadas  $h=f(x,z,t)$ . Esta función depende de una serie de parámetros (pesos y sesgos) que deben ser calculados durante el proceso de entrenamiento que busca que las predicciones de la red reproduzcan los valores observados allá donde se dispongan. Gracias a la diferenciación automática, se

pueden calcular las derivadas parciales de  $f$  con respecto a cualquiera de las variables de entrada, y entonces imponer que la expresión de la ecuación diferencial en derivadas parciales que describe el fenómeno se cumpla en tantos puntos dentro del dominio como se desee. Puede que haya pocas observaciones para entrenar la red, pero el número de puntos donde podemos imponer la ecuación diferencial es ilimitado, facilitando el entrenamiento de la red y el cálculo de los parámetros que la definen. En este trabajo se muestra una aplicación de las redes neuronales informadas por la física a la resolución del flujo transitorio en un acuífero libre y demuestra cómo estas producen una solución continua dentro del dominio de estudio tan buena como la que se obtendría con un modelo numérico como MODFLOW a una fracción del coste computacional.

**Agradecimientos:** Proyecto financiado por la fundación PRIMA con fondos H2020 y número de contrato 2222

# Relevancia de la identificación de episodios de contaminación puntual en la gestión de las masas de aguas subterráneas

Montse Toribio Sánchez<sup>1</sup>, Emilio Orejudo<sup>1</sup>, Joan Sánchez<sup>1</sup>, Roberto Espínola Cazorla<sup>1</sup>, Mireia Iglesias Carrera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Agència Catalana de l'Aigua (ACA)*

Palabras clave: contaminación puntual, ETBE, sequía, Planes de vigilancia y control

**Resumen.** El área metropolitana de Barcelona dispone de diversos recursos hídricos para abastecer de agua potable a los más de 1,6 millones de abonados, considerándose la masa de agua subterránea de la Vall Baixa i Delta del Llobregat un recurso estratégico. Esta masa de agua tiene definido en el Plan de Gestión del Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña, para el período 2022-2027, un perímetro de protección del área de recarga.

La sequía prolongada que afecta a las cuencas internas de Cataluña ha provocado el incremento de las extracciones de diversos pozos que explotan este acuífero. El aumento de las extracciones ha movilizado contaminantes que han conllevado un incremento de tratamiento en las aguas de abastecimiento.

La detección de olor y sabor indeseable en el agua extraída ha motivado una serie de actuaciones identificando como causa la presencia de ETBE (Etil tert-butil eter). Este compuesto se utiliza como aditivo oxigenado en las gasolinas y su uso en España se introdujo a partir de 2002 como sustituto del MTBE (metil tert-butil eter). Tanto el ETBE como su antecesor, se consideran unos potenciales contaminantes de las aguas subterráneas debido a sus propiedades fisicoquímicas (solubilidad, movilidad, persistencia, gusto y olor).

En este contexto, la ACA (Agencia Catalana del Agua) inició un estudio sistemático de focos potenciales de contaminación, considerando como focos principales las Estaciones de Servicio. El entorno densamente poblado e industrializado condicionó las actuaciones a realizar que consistieron en la identificación de focos y la priorización de actuaciones considerando el modelo hidrogeológico y las características de las actividades (ubicación, antigüedad, estado actual e incidentes conocidos).

Las actuaciones realizadas (inspecciones, instalación de dispositivos de control y muestreos) constataron que un número elevado de estaciones de servicio presentaban afección o indicios de afección del subsuelo por compuestos hidrocarburos. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de establecer planes de vigilancia y control en estaciones de servicio ubicadas en la zona de recarga que garanticen la detección de posibles fugas de combustible.

# Remediación de acuitardos contaminados por compuestos orgánicos persistentes y emergentes mediante fracturas bioactivas para la minimización del efecto rebote en la descontaminación de acuíferos

Diana Puigserver Cuerda<sup>1</sup>, Alberto Millán Martos<sup>1</sup>, José María Carmona Pérez<sup>1</sup>, Alberto Sáez Ruiz<sup>1</sup>, Patricia Cabello López<sup>1</sup>, Francisco Javier Santos Vicente<sup>1</sup>, Cristina Vilanova De Benavent<sup>1</sup>, Joaquim Vila Grajales<sup>1</sup>, Jofre Ferrero Ferran<sup>2</sup>, Emilio Orejudo Ramirez<sup>3</sup>, Sergi Latres i Simó<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Barcelona

<sup>2</sup>Eurecat

<sup>3</sup>Agencia Catalana del Agua

<sup>4</sup>Agencia de Residuos de Catalunya

Palabras clave: Contaminantes emergentes y persistentes, Fracturación hidráulica, Remediación de acuitardos con fracturas bioactivas, Acoplamiento de procesos bióticos y abióticos

**Resumen.** El almacenamiento de contaminantes en formaciones de baja conductividad es uno de los principales responsables del efecto rebote observado durante la descontaminación de acuíferos. Este fenómeno se debe a la migración de contaminantes por difusión molecular desde los acuíferos hacia los niveles de baja conductividad hidráulica, donde se acumulan a lo largo de décadas. Se trata de un proceso lento pero muy frecuente en emplazamientos contaminados desde hace décadas.

Durante las tareas de descontaminación de acuíferos, la movilización de contaminantes puede ser significativa después de aplicar las estrategias de remediación debido a la retrodifusión molecular desde los acuitardos o niveles de baja conductividad hidráulica.

En este estudio, se plantea la hipótesis de que es posible minimizar el efecto rebote mediante la descontaminación previa o simultánea de los niveles de baja conductividad hidráulica generando fracturas bioactivas.

La investigación se llevó a cabo en un emplazamiento contaminado al sur de Figueres (Cataluña, España), afectado por contaminación por percloroetileno (PCE) y otros contaminantes persistentes y emergentes en un acuífero de abanicos aluviales. Este acuífero se encuentra sobre un acuitardo basal fracturado de arenas finas con niveles interestratificados de gravas finas.

La metodología utilizada incluyó la inyección de microscale zero-valent iron (mZVI) y reactivos bioestimuladores de la flora bacteriana autóctona mediante fracturación hidráulica. Para evaluar la eficiencia de la descontaminación, se monitorearon las fracturas bioactivas creadas, tanto a nivel de material del subsuelo como de las aguas subterráneas, y se analizaron los cloroetenos derivados de la degradación del PCE, así como otros compuestos persistentes y emergentes detectados. También se analizó la composición isotópica, los consorcios microbianos y los minerales implicados en los procesos bióticos y abióticos de la degradación total de los contaminantes.

Los resultados muestran la formación de halos de degradación de cloroetenos alrededor de las fracturas creadas, así como una secuencia redox que controla la distribución de microorganismos como los de los géneros Dehalococcoides, Treponema y Propionibacterium acnes.

La presencia de niveles de gravas finas interestratificados en el acuitardo que presentan flujo de agua, favorece la oxigenación del medio, permitiendo la existencia de microorganismos capaces de realizar la dechloración oxidativa y la mineralización de los metabolitos más difíciles de degradar en condiciones reductoras.

En conclusión, la creación de fracturas bioactivas en acuitardos permite aumentar la superficie de contacto entre reactivos y contaminantes almacenados, creando ecotonos capaces de mineralizar los contaminantes mediante el acoplamiento de procesos bióticos y abióticos. Además, la heterogeneidad del medio, favorece el acoplamiento entre microorganismos oxidadores y reductores lo que minimiza el impacto derivado de la descontaminación, pues este acoplamiento permite la movilización de los metabolitos más tóxicos.

**Agradecimientos:** Agradecer a la Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca AGAUR por financiar el proyecto REMESilient (2023 CLIMA 0025), a la Agencia Catalana del Agua por financiar el ensayo piloto de la zona de transición CTN1601136 y al Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) por financiar PID2021-122743NB-I00

## Resultados preliminares y operación de prototipo MAR en Medina del Campo

Miriam Tena Villares<sup>1</sup>, Javier Rico Ibabe<sup>1</sup>, Karen Mora Cabrera<sup>1</sup>, Patricia Zamora Bonachela<sup>1</sup>, Patricio Hermosilla Olmos<sup>1</sup>, Victor Monsalvo García<sup>1</sup>, Lourdes Martínez-Landa<sup>3</sup>, Cristina Valhondo<sup>4</sup>, Silvia Díaz Cruz<sup>2</sup>, Jesús Carrera<sup>4</sup>, Frank Rogalla<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Innovación y Tecnología. FCC Aqualia*

<sup>2</sup>*Instituto de diagnóstico ambiental y estudios del agua, IDAEA-CSIC, Barcelona*

<sup>3</sup>*Grupo de Hidrogeología UPC-CSIC, Unidad asociada. Departamento de ingeniería civil y medioambiente, Universidad Politécnica de Cataluña DECA-UPC, Barcelona*

<sup>4</sup>*Instituto de diagnóstico ambiental y estudios del agua, IDAEA-CSIC, Barcelona. Grupo de Hidrogeología UPC-CSIC, Unidad asociada*

**Resumen.** La Gestión de la Recarga de Acuíferos (GRA, o MAR, por sus siglas en inglés) es una herramienta potente que permite recuperar los acuíferos sobrexplotados y restaurar los servicios ecológicos de los ríos con un consumo limitado de energía y sin utilización de químicos. El proyecto europeo MARadentro (Recarga Gestionada de Acuíferos: Abordando los Riesgos de Recargar Agua Regenerada), tiene como objetivo general aumentar los beneficios de la Recarga Artificial como herramienta para mejorar el estado de las masas de agua subterránea mediante la implementación de capas reactivas en el lecho de las balsas de infiltración. Estas barreras reactivas están formadas por una mezcla de diversos materiales naturales, incluyendo restos forestales y compost vegetal entre otros.

El prototipo MAR construido en Medina del Campo consta de dos balsas de unos 115m<sup>2</sup> de superficie que se alimentan con el efluente de la EDAR de Medina. Para el seguimiento y control del sistema se instalaron 8 piezómetros y cuatro cápsulas de succión (dos en cada balsa). El sistema tiene una capacidad de recarga de 200 m<sup>3</sup>/día y comenzó su operación a mediados de 2023. La recarga se alterna semanalmente entre las dos balsas a fin de reducir el riesgo de colmatación. Se mide en continuo el nivel, la CE y temperatura del agua del efluente en los piezómetros bajo las balsas, aguas arriba y aguas abajo, además de un control semanal de sólidos en suspensión, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Ntotal, Ptotal, DQO, pH y CE en todos los puntos de control.

Tras la operación en continuo del prototipo durante un año, se han observado mejoras y reducciones de diferentes parámetros en las aguas subterráneas presentes bajo las balsas de infiltración, alcanzando una reducción del 80% en los sólidos en suspensión, descensos superiores al 70% en las concentraciones de fósforo y un 75% en las de nitrógeno total, así como una disminución de amonios entre el 40 y 70% con respecto al estado inicial de las aguas subterráneas, previas a la operación del sistema.

Este efecto de mejora en la calidad de las aguas no es apreciable aún en la zona perimetral externa a las balsas, debido a la escala y el caudal de recarga empleado hasta el momento.

El proyecto MARadentro, emplea la recarga gestionada de acuíferos mediante unas balsas de infiltración diseñadas para recargar agua regenerada, actuando de este modo no sólo como un método de recuperación y almacenamiento del recurso si no como un sistema de mejora de la calidad de este, presentándose como un sistema de tratamiento terciario natural.

**Agradecimientos:** Spanish Research Agency, AEI, number TED2021-131188B-C31

# Simulaciones numéricas relativas a sistemas de inyección y recuperación de agua en el acuífero de la Vall Baixa y Delta del Llobregat

Jordi Massana Molera<sup>1</sup>, Enric Queralt Creus<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Comunitat d'Usuaris d'Aigües del Delta del Llobregat

Palabras clave: ASTR, Simulaciones numéricas

**Resumen.** Los sistemas ASTR (Acuifer, Storage, Transport and Recovery) consisten en realizar recarga al acuífero a gran escala y la recuperación de ésta para su uso. Estos sistemas están ampliamente implementados en varios lugares con el objetivo de utilizar el acuífero, sin dañarlo, como pretratamiento del agua.

En este trabajo se estudia la posibilidad de realizar ASTR en la parte baja del Llobregat. Para la primera aproximación se usa el modelo numérico de los acuíferos La Vall Baixa y del Delta del Llobregat con el fin de determinar la solución óptima en cuanto a los caudales y a distribución de los pozos de recarga y de extracción.

La capacidad de almacenamiento de la Vall Baixa se cuantifica en 60-90 hm<sup>3</sup> de volumen de agua con una capacidad de aumento de entre 20 y 30 hm<sup>3</sup>. Por tanto los caudales de diseño del sistema ASTR deberían moverse en torno a estos valores. Ahora bien, si se aumenta también la extracción existe la posibilidad de que los volúmenes a aplicar puedan ser superiores a este cálculo previo.

El caudal óptimo del sistema ASTR dependerá en primer lugar de la geometría del acuífero y de la localización de los propios sistemas de recarga y extracción. En este sentido también se explorará la posibilidad de realizar estas acciones en la zona Delta.

En segundo lugar, es necesario asegurar la efectividad del uso del acuífero como pretratamiento del agua y la seguridad sanitaria de ésta en las captaciones. A partir de diferentes estudios realizados sobre la perdurabilidad de patógenos en el agua se establece como tiempo de tránsito del agua recargada antes de ser captada, entre 2 y 3 meses.

Otra condición a tener en cuenta es que los niveles del acuífero no superen la cota de la base del río, ya que en este caso parte del agua recargada retornaría al río lo que disminuiría la eficiencia del sistema ASTR.

Finalmente los escenarios propuestos deben dar un resultado que no empeoren en términos generales la evolución actual del acuífero.

Estas condiciones se implementan en las simulaciones y se valoran en los resultados de éstas para encontrar que escenarios son plausibles.

Las simulaciones que cumplen las condiciones impuestas son diversas. De todas ellas se seleccionan algunos escenarios que se consideran los más interesantes de aplicar. En concreto si solo se efectúa el sistema ASTR en la Vall Baixa se consigue una circulación de agua inyección/extracción con un volumen de 60 hm<sup>3</sup>/año situando los pozos de inyección justo en medio de los campos de pozos de Cornellà y de Sant Feliu (pozos estrella). Si se usa la zona Delta como posibilidad de inyección, se puede llegar a una circulación de agua de 100 hm<sup>3</sup>/año.

**Agradecimientos:** Aigües de Barcelona

# Soluciones creativas para el control de surgencias y filtraciones de agua subterránea en construcciones de excavaciones profundas

Alejandro Ferrer Granell<sup>1</sup>, Eduardo Cassiraga<sup>2</sup>, Jesús Carrera Ramírez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ferrer S.L.

<sup>2</sup>Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente - Universitat Politècnica de València

<sup>3</sup>Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua - Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Palabras clave: Dewatering, Aguas subterráneas e ingeniería civil, Modelación hidrogeológica

**Resumen.** Cuando se realiza una excavación por debajo del nivel freático, existe el riesgo de que se vuelva inestable o se inunde, a menos que se tomen medidas para controlar las aguas subterráneas del terreno circundante. Dicho control puede conseguirse a través de pozos de bombeo especialmente instalados para bajar artificialmente el nivel freático en las proximidades de la excavación, técnica conocida como dewatering.

Cuando se desarrolla un plan de dewatering, existe el riesgo de efectos secundarios indeseables en las propiedades adyacentes, en la obra en cuestión o en el medio ambiente. Dentro de los potenciales riesgos existentes están las posibles surgencias y filtraciones que se podrían originar como consecuencia de la existencia de acuíferos confinados desconocidos a la hora de concebir el proyecto. Las excavaciones de suelos saturados o próximas al techo de un acuífero confinado pueden presentar problemas debido al flujo, a la presión intersticial o a la suma de ambos efectos.

Este trabajo describe tres casos recientes de excavaciones con diferentes patologías asociadas a surgencias provocadas por acuíferos no detectados en la fase de diseño de la construcción. En el primer caso, se trata con una surgencia no deseada que procede de una perforación preexistente no sellada que habría alcanzado el acuífero semiconfinado subyacente. En el segundo caso, se estudia el efecto de compartimentación que provoca la existencia de elementos interiores de la cimentación, los cuales limitan el flujo horizontal hacia los pozos de dewatering, afectando su eficiencia. El tercer caso es una combinación de los 2 anteriores.

En el primer caso de estudio la solución pasa por el hincado de una tubería que aísla la surgencia y que posteriormente se sella y hormigona hasta el nivel de la losa de cimentación. En el segundo caso la solución consistió en aplicar una capa de árido drenante sobre el fondo de máxima excavación que permitió el flujo de agua por dicha capa hacia los pozos de bombeo, sin necesidad de incrementar el número de puntos de bombeo superficial. Y en el tercero la solución pasó por utilizar resinas acuarreactivas para eliminar las filtraciones a través de las pantallas y de la construcción de pozos que aislaron las surgencias de fondo y que se sellaron al nivel de la losa de cimentación.

El presente estudio pone de manifiesto que, aun ante situaciones imprevistas, cuando existe consenso entre el conocimiento teórico y la experiencia práctica, se pueden desarrollar soluciones creativas que permiten superar las patologías de forma razonable.

## Transporte a escala de poro: Mezcla, deformación y caos

Guillem Sole-Mari<sup>1</sup>, Joris Heyman<sup>1</sup>, Diogo Bolster<sup>2</sup>, Saif Farhat<sup>2</sup>, Daniel Hallack<sup>2</sup>, Stefano Ascione<sup>1</sup>, Tanguy Le Borgne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Université de Rennes*

<sup>2</sup>*University of Notre Dame*

**Resumen.** La modelización del transporte en aguas subterráneas por métodos tradicionales puede presentar limitaciones, especialmente para números de Péclet altos y cuando involucra reacciones químicas. Esto es debido a las fluctuaciones de concentración que se forman a pequeña escala (típicamente no consideradas por el modelo), las cuales son causadas por heterogeneidades a escala de Darcy, así como por la heterogeneidad inherente de la advección a escala de poro. Así pues, avanzar hacia una mejor comprensión del complejo proceso de transporte y mezcla a la escala de poro puede ser importante para mejorar en la modelización y predicción de ciertos procesos a escalas mayores.

En esta presentación exploramos esta problemática con la ayuda de simulaciones numéricas. Analizamos y modelizamos la evolución espaciotemporal de las fluctuaciones de concentración en medios porosos desde varias perspectivas. También abordamos la deformación (caótica) del fluido, su potencial importancia en el proceso de mezcla, y recientes avances en la caracterización de los factores que la controlan.

**Agradecimientos:** European Commission (MixUp, MSCA-101068306)

## Tratamiento de drenajes ácidos de mina en Touro

Luis Abia Aguilá<sup>1</sup>, Pelayo Fernández Álvarez<sup>2</sup>, Cristóbal Piñón Fernández<sup>1</sup>, Héctor Dopico Hermida<sup>1</sup>, Celestino Freire Casalderey<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Intacta Gestión Ambiental, S.L.*

<sup>2</sup>*Cobre San Rafael, S.L.*

Palabras clave: metales pesados, aguas ácidas de mina, tratamiento de aguas

**Resumen.** La motivación de este trabajo ha sido la de diseñar y construir una planta de tratamiento de aguas de mina en la explotación de Cobre San Rafael en la localidad de Touro, A Coruña; para la eliminación de metales pesados disueltos.

La metodología seguida para el diseño, ha sido la siguiente. La aplicación de condiciones en las que los hidróxidos y oxihidróxidos de estos metales pesados, aparezcan durante alguna de las etapas o fases del tratamiento a escala industrial. El problema que se puede presentar en cuanto a la formación de los hidróxidos, es el derivado de que cada metal pesado posee un valor o intervalo de pH en el cual alcanza condiciones de mínima solubilidad. Para resolver esto, se ha usado como técnica de tratamiento la coprecipitación química y la floculación de barrido. Los mecanismos para interpretar la coprecipitación, coagulación y posterior floculación por barrido (sweep flocculation) son: adsorción y neutralización de carga.

En la planta de tratamiento de aguas de mina, diseñada y construida en las instalaciones de EXGA (Excavaciones y Obras Publicas Galicia,S.L.) y gestionadas por Cobre San Rafael, S.L., se han combinado todos estos mecanismos. La planta además, cuenta con una etapa de insolubilización del manganeso; metal que es frecuente aparezca en forma natural soluble. La oxidación del mismo, se realiza mediante la aireación con aire atmosférico a un pH ligeramente alcalino.

Durante la fase de arranque y puesta en operación de la planta construida, se ha podido comprobar que las instalaciones cumplen los criterios de vertido de metales pesados solicitados por las normativas vigentes.

En resumen y como conclusión: el diseño de la planta construida permite tratar los metales pesados las aguas ácidas de mina mediante un proceso de coprecipitación y floculación de barrido, usando una técnica de clarificación convencional mediante decantadores lamelares.

# Trazabilidad de los procesos biogeoquímicos en un estuario subterráneo: Aplicación de enfoques multidisciplinarios integrando isótopos de nitrógeno, hidrogeoquímica y análisis estadísticos

Bella Almillategui<sup>1</sup>, Valentí Rodellas-Vila<sup>3</sup>, Maarten W. Saaltink<sup>1</sup>, Marc Diego Feliu<sup>1</sup>, Jose Tur<sup>1</sup>, Jesús Carrera<sup>2</sup>, Albert Folch<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Grupo de Hidrología Subterránea (GHS), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*

<sup>2</sup>*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*

<sup>3</sup>*Departamento de Física, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)*

Palabras clave: estuarios subterráneos, acuíferos costeros, procesos biogeoquímicos, descarga submarina de agua subterránea

**Resumen.** Los estuarios subterráneos, descritos como las zonas dentro de los acuíferos costeros donde el agua subterránea se mezcla con el agua de mar, han sido reconocidos por su importante rol en el transporte y destino de compuestos químicos que se descargan en las costas. Esta interface reactiva subterránea, en similitud con su homólogo superficial, presenta una combinación de procesos fisicoquímicos y biológicos que regula una parte importante de los ciclos biogeoquímicos.

El enriquecimiento de las aguas subterráneas costeras con nutrientes y metales se ve controlado por diferentes fuentes y mecanismos de transporte, como la descarga submarina de aguas subterráneas (DAS) y la intrusión marina (IM). Además, las reacciones biogeoquímicas que se producen en la zona de mezcla influyen en la distribución de estas sustancias vertidas al mar costero, impactando las dinámicas de sus ecosistemas.

Esta primera fase de la investigación identificó parte de las fuentes de nutrientes y los procesos biogeoquímicos que tienen un papel activo en el estuario subterráneo situado en el arroyo efímero de Argentona, al noreste de Barcelona, Cataluña (España). En esta zona, existe una instalación experimental que ha sido explorada continuamente desde el 2014. Es monitoreada por 24 piezómetros distribuidos en 5 nidos con 4 piezómetros cada uno (por intervalos de

profundidad a 10 m, 20 m, 15 m y 25 m) y 4 piezómetros individuales, equipados con diferentes sensores que recolectan datos cada 15 minutos, en un área de 30 m de ancho y 100 m de largo perpendicular a la costa.

Utilizando datos obtenidos durante dos campañas de muestreo (invierno 2021 y verano 2022), este estudio integró varios enfoques como el análisis hidrogeoquímico, la composición isotópica de especies de nitrógeno (N) ( $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ ,  $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ ,  $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$ ), las transformaciones de la materia orgánica disuelta (DOM) y su componente fluorescente (FDOM), la concentración de bacterias, y técnicas estadísticas como el Análisis de Componentes Principales.

Los resultados muestran una alta actividad en el acuífero. En los niveles más someros del acuífero (entre 10 m a 15 m) se observó menor influencia de la intrusión marina pero mayor concentración de nutrientes (nitratos), sugiriendo fuentes antropogénicas en sus aportes. Los diagramas duales de isótopos de N mostraron los fertilizantes y desechos sépticos como las posibles fuentes de nitratos durante ambas estaciones y el análisis hidrogeoquímico permitió identificar la desnitrificación en todo el sistema. En los niveles profundos del acuífero (entre 20 m a 25 m) se observó potenciales fuentes de amonio asociadas al nitrógeno del sedimento. La reducción de oxígeno sugiere oxidación de materia orgánica, evidenciando las reacciones de óxido-reducción. Mayores concentraciones de bacterias en las muestras profundas de 25 m se relacionan con mayores concentraciones de materia orgánica y condiciones anóxicas. En contraste, bajas concentraciones de bacterias se presentan en los pozos con mayores concentraciones de nitratos y de oxígeno, excepto por los pozos someros (a 10 m) dónde la tendencia es un aumento de estas comunidades, planteando la identificación de diferentes orígenes o tipos de comunidades microbianas durante el estudio.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno de España, bajo el proyecto MUCHOGUSTO (PID2022-140862OB-C21/C22) y B.A. es financiada por una beca doctoral SENACYT del Gobierno de Panamá (BIDP-I-2020-016)

# Un nuevo modelo geológico para los acuíferos de la masa de agua subterránea Campo de Cartagena. Implicaciones en la relación del acuífero libre con la laguna costera del Mar Menor (SE España)

Andrés Mira Carrión<sup>1</sup>, Jorge Gutiérrez Meseguer<sup>1</sup>, María Josefa Alvargonzález Tera<sup>1</sup>, Christian Moreno Morales<sup>1</sup>, Edison Steven Morales Sotaminga<sup>2</sup>, Pablo García Cerezo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>TRAGSATEC

<sup>2</sup>UPCT

<sup>3</sup>DGA

Palabras clave: Campo de Cartagena, Mar Menor, Modelo geológico

**Resumen.** El Mar Menor es un caso paradigmático de degradación y eutrofización de un ecosistema lagunar costero por la entrada de nutrientes desde la cuenca vertiente del Campo de Cartagena (Murcia, España). Gran parte de estos nutrientes llegan a la laguna por descarga directa o indirecta de aguas provenientes del acuífero superficial incluido en la masa de agua subterránea Campo de Cartagena. Dicha masa, está formada por un sistema multicapa, con varios de sus acuíferos calificados en situación de riesgo cuantitativo y cualitativo por sobreexplotación y contaminación, respectivamente. El propósito del trabajo, encargado por el MITERD a través de la Dirección General del Agua, dentro del proyecto “SERVICIO TÉCNICO PARA LA MEJORA DEL CONOCIMIENTO DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA CAMPO DE CARTAGENA Y DESARROLLO DE GUÍAS METODOLÓGICAS”, es determinar con precisión la geometría de la cuenca del Campo de Cartagena, con especial énfasis en la relación de acuífero del Cuaternario con el Mar Menor, para conocer su dinámica e interacción con la laguna. Los avances en el conocimiento geológico e hidrogeológico expuestos en el presente estudio son resultado del citado proyecto. Geológicamente, el sistema Campo de Cartagena-Mar Menor se trata de una cuenca sedimentaria activa, con un basamento constituido por rocas pertenecientes a las Zonas Internas de las cordilleras Béticas. Sobre este reposa una cobertera de rocas y sedimentos, con edades desde el Mioceno hasta la actualidad, de espesor variable pudiendo llegar a alcanzar los 1500 m. El registro sedimentario de la cuenca tiene una marcada tendencia regresiva, e incluye varias discordancias de diversa

importancia. Destaca por su relevancia e implicaciones en el modelo geológico e hidrogeológico la discordancia fini-Messiniense, asociada a la Crisis de Salinidad que afectó al Mediterráneo. Tanto la cobertera sedimentaria como el basamento están afectados por tres episodios magmáticos intrusivos en contextos geodinámicos distintos. Estos, junto con los rasgos paleogeográficos heredados de la crisis de salinidad Messiniense y la tectónica activa presente en la actualidad, son indicadores de la gran complejidad geológica de la región. Desde un punto de vista hidrogeológico, la cuenca del Campo de Cartagena es un sistema acuífero multicapa, compuesto por tres niveles permeables principales considerados como independientes (aunque hay evidencias de que existe cierta conexión natural y antrópica entre ellos) denominados oficialmente según sus edades: acuífero Cuaternario, Plioceno y Andaluciense (este último también llamado Messiniense). Constituye, junto con el acuífero de La Naveta, la masa de agua subterránea Campo de Cartagena. Enclavada en el centro de la cuenca, se ubica la masa de agua subterránea de Los Victoria. A la luz de las nuevas evidencias geológicas recogidas en este estudio, ambas masas de agua presentan relaciones de intercambio de agua y forman estructuralmente un mismo sistema hidrogeológico. El acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena supone el tramo superior del acuífero multicapa del Campo de Cartagena. Es un acuífero libre detrítico formado fundamentalmente por limos, arenas y gravas. La sucesión y diversidad de ambientes sedimentarios continentales y costeros, con frecuentes cambios laterales de facies y discordancias, resultan en una compleja geometría interna. La presencia de arcillas, margas y calizas añaden heterogeneidad al acuífero superficial, con importantes implicaciones para los estudios hidrogeológicos de detalle. Es este un acuífero históricamente sometido a un gran estrés de origen antrópico ligado al notable desarrollo agrario y demográfico de la región, siendo sometido a una explotación intensiva durante décadas y a los efectos de la contaminación, principalmente por nitratos y fosfatos. Estos contaminantes son transferidos por descarga a la laguna costera del Mar Menor directamente por su borde costero e indirectamente por las ramblas del Albuñón y Miranda. Para la cuenca del Campo de Cartagena se propone un modelo geológico tridimensional elaborado a partir de diversas fuentes. Por un lado, se han reinterpretado y sintetizado más de 400 columnas de sondeos de datos geológicos previos. Basado en este análisis, y en el marco del desarrollo del citado proyecto, se ha planificado y ejecutado una campaña de prospección geofísica, consistente en 150 sondeos eléctricos verticales, 80 km de tomografías eléctricas de hasta 300 m de profundidad y 10 sondeos electromagnéticos en el dominio de tiempo. Con estos datos se ha propuesto la ubicación de 41 sondeos de investigación litológica e hidrogeológica, de los cuales se han ejecutado 7 de 80 m de profundidad con recuperación continua de testigo. Como resultado de una testificación exhaustiva de estos se han obtenidos columnas litológicas de detalle

y datos estructurales de relevancia para ser incorporados al modelo geológico. Asimismo, se han realizado diversas analíticas de los materiales extraídos (químicas, mineralógicas, granulométricas y dataciones paleontológicas). El modelo geológico propuesto ha permitido definir hasta 7 unidades litoestratigráficas relevantes en la cuenca del Campo de Cartagena, con unas características litológicas e hidroquímicas claramente diferenciables. Han sido identificadas y definidas nuevas unidades litológicas no descritas previamente, dado que no afloran en superficie. Estas son incorporadas al nuevo modelo geológico, en contraste con los modelos geológicos previos basados principalmente en la geología superficial. Entre otros avances, se ha podido trazar con precisión la extensión real de los acuíferos del Plioceno y Messiniense. Este hecho supone un gran avance, redefiniendo los límites administrativos previamente considerados para estos acuíferos. También se ha ampliado la extensión subsuperficial de las formaciones acuíferas de estas edades en otras áreas de la cuenca. Ambos avances serán un aspecto clave para la futura gestión de la masa de agua. También se ha redefinido la geometría del acuífero del Campo de Cartagena en su borde sur, con importantes implicaciones en cuanto a su funcionamiento hidrodinámico, debido a su relación con el basamento y las rocas volcánicas intrusivas cenozoicas. El nuevo modelo geológico propuesto permite distinguir las capas que constituyen el acuífero libre superficial con hasta 5 tramos permeables separados por capas arcillosas y margosas de baja permeabilidad que localmente aislarían parcialmente tramos semi-confinados. Dos de los nuevos tramos identificados corresponden a calizas. Estas juegan un importante papel en determinadas zonas de la cuenca desde el punto de vista hidrogeológico, y tienen relevancia en la paleogeografía del Plioceno superior y el Cuaternario de esta región. El detalle de diferenciación litológica alcanzado es un paso crucial en la mejora del conocimiento del acuífero superficial del Campo de Cartagena. Los avances descritos en el modelo geológico regional servirán como base a un modelo hidrogeológico preciso de la cuenca del Campo de Cartagena. Respecto a la descarga de agua subterránea al Mar Menor, está podrá ser definida con mayor precisión cuantitativamente, cualitativamente y espacialmente, constituyendo una herramienta de gestión indispensable para la laguna salada, que actuará como soporte para la toma de decisiones encaminadas a la mejora del ecosistema del Mar Menor.

# Un viaje interdisciplinario a través de las Peridotitas de Ronda (Andalucía, España): desde la serpentinización hasta la búsqueda de vida extraterrestre y sus aplicaciones energéticas

Lucía Ojeda-Rodríguez<sup>1</sup>, Pablo Jiménez-Gavilán<sup>1</sup>, Antonio Fermín Castro-Gámez<sup>1</sup>, José Benavente<sup>2</sup>, Iñaki Vadillo Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Málaga, España.*

<sup>2</sup>*Departamento de Geodinámica e Instituto del Agua, Universidad de Granada, Granada, España.*

Palabras clave: Aguas hiperalcalinas, Serpentinización, Metano abiótico, Hidrógeno molecular

**Resumen.** Las peridotitas de Ronda constituyen uno de los mayores conjuntos de lherzolitas orogénicas en el mundo, abarcando más de 450 km<sup>2</sup>. Estos macizos exhiben dos tipos de surgencias de agua subterránea. Unas, de tipo subsuperficial, reflejan la interacción del agua meteórica con la roca serpentinizada de la superficie, presentando una facies HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> – Mg<sup>2+</sup> y un pH ligeramente alcalino. Las otras aguas, con facies OH<sup>-</sup> – Ca<sup>2+</sup>, se asocian a un sistema de flujos profundos. Estas últimas presentan un pH elevado (entre 10 y 12), bajo contenido de carbono inorgánico disuelto y están empobrecidas en Mg<sup>2+</sup> debido a la precipitación de brucita y serpentina. También presentan una distribución inusual de elementos de tierras raras, enriquecida en lantano y cerio, y al emerger en la superficie reaccionan con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico e inducen la precipitación de carbonatos. Los travertinos resultantes exhiben una amplia gama de biomarcadores lipídicos y evidencias isotópicas de vida, preservados a lo largo del tiempo como archivos biomoleculares de la historia pasada.

Los manantiales hiperalcalinos albergan comunidades microbianas adaptadas a estos entornos extremos y contienen cantidades significativas de metano (CH<sub>4</sub>), así como otros hidrocarburos (etano y propano), además de hidrógeno (H<sub>2</sub>) molecular, producto principal de la reacción de serpentinización entre los minerales ferromagnesianos y formas de carbono, y que aparecen como burbujas o disueltos en el agua. Los estudios isotópicos, tanto estables como los más innovadores en isotopía agrupada ("clumped"), indican que el CH<sub>4</sub> tiene un origen tanto abiótico (hidrogenación de CO<sub>2</sub>) como biótico, dependiendo del manantial,

y que se forma a temperaturas relativamente bajas (<150 °C). Además, estas aguas no son el origen del CH<sub>4</sub> (ausencia de 14C), sino que actúan como meras transportadoras de gas.

Investigaciones recientes identifican la serpentinización de litologías ricas en olivino en otros cuerpos planetarios, como Marte y las lunas heladas de Júpiter y Saturno, lo cual tiene importantes implicaciones para su habitabilidad. Además, la serpentinización es un proceso fundamental en las hipótesis actuales sobre el origen de la vida en la Tierra primitiva. Estos avances son significativos para entender el origen de la vida, no solo porque señalan cómo las moléculas orgánicas podrían haberse sintetizado en la Tierra primitiva, sino también porque identifican un entorno geoquímico específico donde se produce de manera demostrada la reducción abiótica del dióxido de carbono en la naturaleza. Además, las reacciones fluido-roca en sistemas serpentinizados liberan H<sub>2</sub> molecular, considerado una fuente de energía limpia debido a su combustión sin emisiones de gases de efecto invernadero. La captura y utilización del H<sub>2</sub> generado en estos ambientes podría representar una vía prometedora hacia una economía energética más sostenible.

**Agradecimientos:** Este trabajo es una contribución al Proyecto "Hidrogeoquímica de las Peridotitas de Ronda: Caracterización de las Aguas Subterráneas y Metano Asociado - UMA18-FEDERJA-101" financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y la Junta de Andalucía; y al Proyecto "Caracterización isotópica de fuentes de metano en la provincia de Málaga - B1-2022\_30" financiado por la Universidad de Málaga. También es una contribución al Grupo de Investigación RNM-308 (Grupo de Hidrogeología) y RNM-128 de la Junta de Andalucía. L.O. es beneficiaria de una Ayuda Margarita Salas financiada por la Unión Europea-NextGenerationEU.

# Uso del machine learning en la toma de decisiones en el dewatering de una mina a cielo abierto

Aitor Iraola Galarza<sup>1</sup>, Lizardo Huamani<sup>2</sup>, María Pool<sup>1</sup>, Bertha Llanos<sup>2</sup>, Milton Cairo<sup>2</sup>, Albert Nardi Ricart<sup>1</sup>, Ester Vilanova Muset<sup>1</sup>, Eduardo Ruiz Delgado<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Amphos 21 Consulting SL (España)*

<sup>2</sup>*Amphos 21 Consulting Perú*

Palabras clave: machine learning, dewatering, inteligencia artificial, modelos híbridos

**Resumen.** En la actualidad, los modelos numéricos se presentan como la herramienta fundamental para la integración, comprensión y predicción de los procesos de aguas subterráneas en las actividades hidrogeológicas y hídricas mineras. Sin embargo, existen ciertas dificultades asociadas a la modelación numérica para algunos casos, como la gestión en operación de las operaciones de dewatering a cielo abierto.

En primer lugar, los modelos numéricos suelen estar sujetos a procesos de validación y calibración de las diferentes propiedades hidráulicas del medio y considerando unas condiciones de contorno con alta incertidumbre en las grandes operaciones mineras. Este proceso no es sencillo ni tan rápido como la propia operación minera. Requiere de apoyo externo especializado hidrogeológico, implica un alto costo en tiempo de cálculo y son predicciones con notable grado de incertidumbre debido a la multitud de soluciones inherente al proceso de calibración.

Por otro lado, las operaciones mineras suelen ser muy dinámicas y cambiantes ya que los planes mineros generalmente pueden ser modificados por decisiones operativas. Esto impacta en la planificación geológica y requiere decisiones a corto plazo y, por lo tanto, lo que requiere reducir los tiempos de respuesta de las predicciones de apoyo.

Hoy en día, debido a la creciente capacidad de recopilación y almacenamiento de datos (big data), los métodos de inteligencia artificial y los algoritmos de aprendizaje automático (ML) se presentan como un complemento prometedor a los modelos numéricos en el campo de la hidrogeología. Esta presentación evalúa el potencial predictivo de los algoritmos de ML en un estudio de caso del

dewatering en una operación minera a cielo abierto. Para este caso, el objetivo era proporcionar una predicción precisa de los niveles piezométricos basada únicamente en futuros planes de bombeo. Se desarrolló un modelo conceptual el cual combina métodos analíticos tradicionales con técnicas avanzadas de aprendizaje automático. De esta manera, el modelo tiene dos etapas principales: la aproximación analítica y la corrección mediante aprendizaje automático. Ésta se realiza mediante redes neuronales recurrentes (RNN las cuales son particularmente efectivas para manejar series temporales, ya que pueden "recordar" eventos pasados y reconocer patrones temporales. Esta capacidad los hace ideales para ajustar y mejorar las predicciones de nivel piezométrico.

Los resultados obtenidos de la aplicación han demostrado que las tecnologías de inteligencia artificial presentan (1) una capacidad predictiva satisfactoria, (ii) pueden ser herramientas rápidas y efectivas en la toma de decisiones sobre los impactos de los pozos de producción durante el desarrollo de la mina y (iii) se puede aplicar como apoyo en la planificación y optimización de costos para las operaciones de agua en el tajo.

## Utilización de aguas subterráneas urbanas para preservar la biodiversidad en estanques urbanos naturalizados. Caso de estudio en Barcelona (España)

José María Carmona Pérez<sup>1</sup>, Diana Puigserver Cuerda<sup>1</sup>, Alberto Millán Martos<sup>1</sup>, Jorge J. Montes<sup>1</sup>, Silvia Burdons<sup>2</sup>, Maria J. Chesa<sup>2</sup>, Daniel von Schiller<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universitat de Barcelona*

<sup>2</sup>*Barcelona Cicle de l'Aigua S.A. (Ajuntament de Barcelona)*

**Resumen.** Este estudio aborda la preservación de la biodiversidad en estanques urbanos naturalizados en Barcelona, combinando ecología acuática, hidrogeología urbana, planificación ambiental y percepción ciudadana para evaluar los beneficios y desafíos del uso de aguas subterráneas en la ciudad. Las zonas urbanas suelen estar sobre acuíferos abandonados por la pérdida de calidad del agua. El cambio climático y las sequías prolongadas, especialmente en climas mediterráneos, han llevado al diseño de parques con estanques naturalizados. Estos estanques mejoran la calidad del agua, desarrollan ecosistemas acuáticos y proporcionan bienestar a los ciudadanos, usando aguas subterráneas no aptas para el abastecimiento humano y mejorando la gestión de recursos hídricos.

El trabajo llevado a cabo tiene como principal objetivo analizar el impacto positivo sobre la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos que tiene el uso de las aguas subterráneas en los estanques naturalizados de la ciudad de Barcelona, en comparación con el uso de aguas de la red de abastecimiento. La metodología seguida ha consistido en llevar a cabo un análisis histórico de los eventos extremos que han afectado a la ciudad de Barcelona y de cómo estos han afectado a la evolución de los niveles piezométricos y a la calidad de las aguas subterráneas, para poder crear escenarios de futuro sobre cómo evolucionarán las aguas que son utilizadas por los estanques naturalizados. Además, se han llevado a cabo muestreos estacionales de las aguas subterráneas que se sitúan a lo largo de la ciudad y que abastecen los estanques de diferentes parques de la ciudad. También se han muestreado los estanques naturalizados, y los resultados obtenidos se han comparado con las muestras de los estanques no naturalizados, los cuales no se abastecen de aguas subterráneas. A partir de las aguas muestreadas, se han analizado iones mayoritarios, minoritarios, trazas, COV (compuestos orgánicos volátiles), la composición isotópica de la molécula de agua

( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ), de nitrato ( $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ), sulfato ( $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ), de boro ( $\delta^{11}\text{B}$ ), la relación isotópica del estroncio y  $\delta^{13}\text{C}$  de diferentes compuestos COV, así como gases de efecto invernadero como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{NO}$ .

Los principales resultados obtenidos muestran que las aguas subterráneas de la ciudad presentan diferentes calidades. Así, al noroeste, las aguas subterráneas presentan concentraciones por debajo de los valores paramétricos de referencia, lo que contribuye de forma importante a la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos que viven en los estanques de los parques de esta área. En la zona central de la ciudad, se detecta un incremento de la presencia de especies del nitrógeno, superándose los valores paramétricos, y en algunos puntos se detecta la presencia de algunos metales pesados y de COV. A pesar de ello, el hecho de que los estanques de la zona sean naturalizados permite mejorar la calidad de las aguas, y los ecosistemas, aunque no sean tan ricos, son capaces de mejorar la calidad de estas aguas. En las zonas situadas al sur de la ciudad, la calidad de las aguas empeora, y se detectan zonas donde existen contaminaciones por especies del nitrógeno, metales pesados y VOC, lo que a menudo favorece condiciones reductoras en el acuífero que se reflejan en la composición isotópica de algunos de esos componentes en las aguas, tanto porque se detectan procesos de reducción de nitrato y sulfato, como en la composición isotópica del boro ( $\delta^{11}\text{B}$ ). A pesar de ello, la presencia de grandes parques en estos sectores de la ciudad, que se abastecen con las aguas subterráneas, contribuye a la biodiversidad. En estas zonas también se detectan problemas de intrusión marina que, en determinados momentos, han afectado a la calidad de las aguas. Por último, cabe señalar el efecto beneficioso de los estanques naturalizados en las aguas del sector este de la ciudad, emplazadas en zonas que tradicionalmente han tenido una fuerte influencia industrial, lo que ha llevado a afectar de forma importante a las aguas subterráneas de la zona con contaminaciones por metales pesados y por COV.

**Agradecimientos:** Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España mediante el proyecto TED2021-130330B-I00 titulado: Contribución de los estanques urbanos naturalizados a la sostenibilidad ambiental de las ciudades.

# Viabilidad del uso de subproductos de la industria agroalimentaria para inducir la desnitrificación en el acuífero del Campo de Cartagena

Helena Escalona-Orellana<sup>1</sup>, Rosanna Margalef-Martí<sup>1</sup>, José Luque<sup>1</sup>, José Jiménez<sup>1</sup>, Albert Soler<sup>1</sup>, Neus Otero<sup>1</sup>, Virginia Robles-Arenas<sup>2</sup>, Steven Morales<sup>2</sup>, Marisol Manzano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grup MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia – MAGH, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, Spain

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Minera y Civil, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Spain

Palabras clave: Desnitrificación, Campo de Cartagena, Mar Menor, Carbono orgánico

**Resumen.** El nitrato es un contaminante común en las aguas subterráneas, principalmente debido al uso intensivo de fertilizantes y pérdidas en los sistemas sépticos. Aunque se han implementado medidas desde los años 90, muchas masas de agua subterránea aún superan el límite de 50 mg/L de nitrato, establecido por el Real Decreto 3/2023 (BOE-A-2023-628) para el consumo humano. Un ejemplo es el acuífero del Campo de Cartagena, cuya agua subterránea transporta nitrógeno al Mar Menor, agravando su eutrofización.

La desnitrificación, que convierte nitrato disuelto en nitrógeno gas en condiciones anóxicas con un donador de electrones (como carbono orgánico), es una solución efectiva para la reducción del nitrato. Sin embargo, la falta de donadores de electrones en acuíferos contaminados limita este proceso natural. Por lo tanto, se propone inducir la desnitrificación añadiendo donadores de electrones externos, aprovechando residuos agroalimentarios en un enfoque de economía circular.

El objetivo del presente estudio, enmarcado en el proyecto REMÉDIATE (TED2021-131005B), es evaluar el potencial de varios subproductos de la industria agroalimentaria para inducir la desnitrificación in situ en una planta piloto del acuífero del Campo de Cartagena, a través de experimentos a escala de laboratorio. Los objetivos secundarios incluyen: (I) evaluar la eficiencia de desnitrificación de 4 subproductos mediante experimentos en batch para

seleccionar el más adecuado, (II) determinar la relación óptima C/N para reducir los niveles de nitrato por debajo de 50 mg/L mediante experimentos de columna de flujo continuo con el subproducto más eficiente, y (III) calcular el fraccionamiento isotópico del N y O del nitrato para determinar la eficiencia de remediación al implementar el tratamiento in situ.

Se han realizado experimentos batch con agua y sedimento del área de estudio, añadiendo dos efluentes de edulcorantes y dos sueros lácteos en condiciones anóxicas, en oscuridad y a 24°C. Los resultados muestran que con los sueros lácteos la desnitrificación se completa en 48 horas, mientras que los efluentes edulcorados no son efectivos, detectándose nitrato y nitrito hasta el final del experimento (8 días). Considerando su eficiencia, en los experimentos con sueros lácteos se ha determinado el fraccionamiento isotópico. Asimismo, se han iniciado los experimentos en columna con flujo continuo para ajustar la relación C/N y evitar condiciones de sulfatoreducción por exceso de carbono, proceso que genera compuestos nocivos. Los resultados permitirán optimizar el diseño de la estrategia de bioestimulación en la planta piloto para la desnitrificación inducida en el Campo de Cartagena, manteniendo los niveles de nitrato por debajo de los 50 mg/l.

# WaterpyBal: plataforma en código abierto para la cuantificación espacio-temporal del balance hídrico en el suelo

Enric Vázquez-Suñé<sup>1</sup>, Ashkan Hassanzadeh<sup>1</sup>, Sonia Valdivielso<sup>1</sup>, Victor Pinilla<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Instituto de diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC) C/ Jordi Girona 18-26, 08034, Barcelona, España.*

Palabras clave: Balance Hídrico en el Suelo, Python, Recarga, Balance en zonas urbanas

**Resumen.** WaterpyBal es una herramienta diseñada por los autores de este resumen para la cuantificación espacio-temporal del Balance Hídrico en el Suelo (BHS), a partir de la precipitación difusa. WaterpyBal demuestra su versatilidad mediante la incorporación de diversos grupos de datos de entrada y la gestión mediante intervalos temporales flexibles. La herramienta integra de manera fluida etapas críticas de evaluación del BHS, abarcando la interpolación de datos, la evapotranspiración y los cálculos de infiltración, teniendo en cuenta los atributos del suelo y las complejidades hidrológicas urbanas. Proporciona parámetros completos del BHS, incluyendo recarga, déficit y escorrentía, acompañados por la generación de mapas informativos, hojas de cálculo y archivos raster. La arquitectura modular de WaterpyBal establece una base versátil, posicionándola como una librería de código abierto exclusivamente dedicada a los cálculos del BHS en Python. WaterpyBal soporta datos en diversas escalas temporales (horarias, diarias y mensuales) y acepta una amplia variedad de formatos en la introducción de datos. Aprovechando el formato de datos NetCDF, ampliamente reconocido en herramientas científicas, WaterpyBal simplifica el flujo de trabajo desde la interpolación espacial hasta la visualización de resultados, mejorando su aplicabilidad en diversas investigaciones ambientales, especialmente hidrogeológicas. La participación del usuario se facilita a través de WaterpyBal Studio, una interfaz gráfica intuitiva que guía a los usuarios a través de cada etapa del proceso de modelado. WaterpyBal Studio tiene un diseño centrado en el usuario y es eficiente en el apoyo a iniciativas de gestión sostenible de aguas subterráneas. En resumen, WaterpyBal y WaterpyBal Studio emergen como una solución inclusiva para el modelado del BHS, a partir de un enfoque integrado y se comentaran algunas posibles aplicaciones.

## Índice de autores

### A

A. de Godoy, 191  
Abarca, 74, 159, 166  
Abia Aguilá, 204  
África, 29  
Aguilera Alonso, 29, 39, 100  
Almillategui, 135, 205  
Alvargonzález Tera, 207  
Andreo Navarro, 59, 80, 104  
Aragon, 27  
Árcega-Cabrera, 125  
Arribas, 166  
Ascione, 203

### B

Bach Plaza, 169  
Bagés Estopà, 143, 185  
Ballesteros Navarro, 24, 64, 84  
Barberá Fornell, 80, 104  
Barcala, 27  
Barra, 100  
Bartolomeu, 27  
Bea Martínez, 91  
Bedia Girbés, 133  
Béjar Pizarro, 39, 145  
Béjar-Pizarro, 100  
Benavente, 210  
Bermejo Santos, 35, 78  
Bezares, 63, 82, 89, 112, 118  
Blanco-Coronas, 183  
Blázquez Pallí, 73  
Bolster, 203  
Bosch Cartoixà, 73  
Botey i Bassols, 122, 133  
Bros Miranda, 129

Bru, 37, 100, 145  
Brusi, 45  
Burdons, 214

### C

Cabaret, 106  
Cabello López, 33, 195  
Cairo, 212  
Callea, 85  
Calvache Quesada, 183  
Campos Ferré, 143, 185  
Campos Molina, 158  
Carmona Pérez, 33, 93, 195, 214  
Carreño Conde, 78  
Carrera, 98, 106, 149, 197, 205  
Carrera Ramírez, 135, 143, 185, 201  
Carrero, 122  
Carvalho, 27  
Casado, 156  
Cassiraga, 31, 85, 162, 167, 201  
Castro-Gámez, 57, 210  
Cereijo Arango, 153, 171  
Chantal Anderbouhr, 143, 185  
Chesa, 214  
Cifuentes Sánchez, 22, 66  
Clemens, 179  
Concha, 61  
Córdoba, 61  
Coronel Merino, 51  
Cortés Lucas, 33  
Coscia, 114  
Crisóstomo, 61  
Crosetto, 133  
Cuevas González, 133  
Custodio, 123

**D**

de la Losa-Román, 116, 141, 161  
de Rojas García, 82  
De Stefano, 55, 161  
Delgado Martin, 171  
Díaz Cruz, 143, 185, 197  
Díaz Riopa, 53, 153  
Diego, 149  
Diego Feliu, 135, 205  
Diez, 122, 187  
Domenech, 96  
Domínguez Sánchez, 24, 64, 84  
Dopico Hermida, 204  
Dountheva, 49  
Duporté, 106  
Duque, 183  
Durán-Laforet, 57  
Durán-Valsero, 57

**E**

Enríquez Pinos, 51  
Escalona-Orellana, 216  
Espino, 135  
Espínola Cazorla, 68, 193  
Ezquerro, 39, 100, 145

**F**

Farhat, 203  
Fernández, 27  
Fernández Álvarez, 53, 153, 204  
Fernández-Iglesias, 189  
Fernández-Lop, 91  
Ferrer Granell, 201  
Fidalgo Pelarda, 64, 84, 167  
Folch, 135, 149, 205  
Fonseca-Sánchez, 179  
Freire Casalderey, 204

**G**

Gaitán Fernández, 35  
García, 175, 177  
García Aróstegui, 159  
García Cerezo, 207  
García Cuadra, 104  
García Menendez, 29  
García-Gámez, 183  
Garriga Piferrer, 73  
Gil Gil, 91  
Gil Márquez, 59  
Gómez, 106  
Gómez Fontalva, 22, 87, 127  
Gómez-Alday, 49, 167  
Gómez-Hernández, 191  
González Méndez, 73  
González Paz, 43  
González Ramón, 116  
González Rodríguez, 143, 185  
González Rojas, 22  
Goyetche, 74, 76, 169  
Gran, 166  
Grifoll, 135  
Grifoll Ruiz, 33  
Grima Olmedo, 24, 64, 84  
Gros, 151, 177  
Guardiola-Albert, 22, 37, 39, 100, 141, 145, 161  
Guimerà, 47, 74, 189  
Gumbau Bellmunt, 85  
Gutiérrez Meseguer, 207

**H**

Hallack, 203  
Hassanzadeh, 123, 218  
Hermosilla Olmos, 197  
Hernández Anguiano, 164  
Hernández Bravo, 181  
Hernández-Mora, 55  
Herrero Ferran, 33, 195

Heyman, 203  
Hidalgo, 156  
Hornero Díaz, 71  
Huamaní, 212  
Husillos Rodríguez, 39

**I**

Iglesias Carrera, 68, 193  
Iraola Galarza, 212

**J**

Jesus, 27  
Jiménez, 216  
Jiménez Bonilla, 173  
Jiménez-Gavilán, 57, 102, 125, 179, 210  
Jódar-Bermúdez, 110  
Jordana Margalida, 76, 169  
Juncosa Rivera, 35, 153, 171  
Jurado Duarte, 122

**K**

Kohfahl, 87, 127

**L**

Lacorte, 187  
Laguna Marín, 175  
Lamas-Cosío, 125  
Lara-Martín, 102, 125, 179  
Latres i Simó, 33, 195  
Le Borgne, 203  
Ledo, 98, 135, 149  
Lj, 164  
Liao, 164  
Lillo, 41  
Liso Martin, 137  
Llamas-Dios, 57, 102, 125, 179  
Llanos, 212  
López-Chicano, 183  
López-Vinielles, 145

Luque, 177, 216  
Luquot, 106, 143, 185

**M**

Madrigal-Solís, 179  
Manzano, 71, 177, 216  
Marcuello, 149  
Margalef-Martí, 177, 216  
Marín, 141  
Marín Troya, 80  
Martínez, 123  
Martínez Caro, 173  
Martínez Sanchez de la Nieta, 87  
Martínez Sánchez de la Nieta, 127  
Martínez Vilar, 143, 185  
Martínez-Landa, 98, 106, 143, 185, 197  
Martínez-Lucas, 112  
Martino, 189  
Martos Rosillo, 20, 57, 110, 116, 141, 161, 181  
Mas, 159, 189  
Mas-Pla, 45, 151, 177  
Massana Molera, 139, 199  
Massone Grez, 161  
Matamoros, 175, 187  
Mateos, 100  
Menció, 151  
Menéndez-Pidal, 89, 112  
Menghini, 27  
Millán Martos, 33, 195, 214  
Millán-Madrid, 59  
Mira Carrión, 71, 207  
Mondéjar Martín, 64, 84  
Monsalvo García, 197  
Montserrat, 100  
Montalván Toala, 78  
Montes, 214  
Montes Villa, 64  
Mora Cabrera, 197  
Mora Cortés, 155

Morales, 177, 216  
Morales Sotaminga, 71, 207  
Morales-García, 57  
Moreno Merino, 29, 120  
Moreno Morales, 207  
Muñoz Martínez, 51  
Murillo Esteban, 76  
Murray, 123

## N

Naranjo-Fernández, 110, 116, 141, 161  
Nardi Ricart, 212  
Navarro-Hernández, 37  
Nieto Arias, 64, 84, 167  
Núñez Fernández, 53

## O

Oceguera-Vargas, 125  
Ojeda-Rodríguez, 57, 102, 125, 179,  
 210  
Olías Alvarez, 114  
Ordóñez, 166  
Orejudo, 193  
Orejudo Ramirez, 195  
Orejudo Ramírez, 33, 68  
Otero, 49, 96, 177, 216

## P

Padilla Benítez, 164  
Palacios, 149  
Palacios Corcuera, 129  
Penedo Ferreiro, 153  
Pérez, 96, 187  
Pérez-Paricio, 169  
Piña, 156  
Piña-Varas, 98, 149  
Pinilla, 218  
Piñón Fernández, 204  
Pla, 37

Pool, 47, 74, 159, 212  
Prieto Martín, 39  
Puche Pajares, 76  
Puigserver Cuerda, 33, 93, 195, 214  
Pujades Garnes, 114

## Q

Queralt, 149  
Queralt Creus, 139, 199

## R

Rebollo Baños, 22  
Reyes-Carmona, 145  
Ribalaygua Batalla, 35  
Rico Ibabe, 197  
Ricoy Alonso, 131  
Ríos-Quintero, 102, 125, 179  
Riversa, 100  
Robles-Arenas, 159, 177, 216  
Rodellas-Vila, 135, 149, 205  
Rodes Martínez, 181  
Rodrigo-Clavero, 31, 155  
Rodrigo-Illarri, 31, 155, 158, 162  
Rodríguez, 175  
Rodríguez del Rosario, 183  
Rodríguez Rodríguez, 173  
Rodríguez-Vellando, 171  
Rogalla, 197  
Ropero Szymańska, 55  
Rosa, 29  
Ros-Berja, 151, 177  
Rubilar Contreras, 93  
Ruiz, 135  
Ruiz Allén, 129  
Ruiz Bermudo, 22, 66, 87, 127  
Ruiz Delgado, 212  
Ruiz Gonzalez, 51  
Ruiz-Hernandez, 141

**S**

Saaltink, 205  
Sáez Ruiz, 195  
Sampietro, 47, 166  
Sánchez, 193  
Sánchez Anguita, 68  
Sánchez Vila, 143, 185  
Santana, 96  
Santiesteban Bové, 85  
Santos, 151  
Santos Vicente, 195  
Sanz, 49, 156, 167  
Sanz de Ojeda, 82, 89, 112, 118  
Sanz Pérez, 63, 82, 89, 112, 118  
Scheiber Pagès, 175  
Schmidlin, 96  
Secci, 191  
Seiz Puyuelo, 91  
Serrano Hidalgo, 22  
Serrano Reina, 22, 66  
Silva Busso, 120  
Sole-Mari, 203  
Soler, 49, 177, 216

**T**

Tanco, 167  
Tena Villares, 197  
Thaysen, 96, 187  
Toledo, 49  
Tomás, 37  
Toribio Sánchez, 68, 193  
Torrentó, 49  
Tovar-Salvador, 102, 125, 179  
Tubau Fernández, 169  
Tur, 135, 149, 205  
Turull, 122

**U**

Uribe Cifuentes, 108  
Uzcategui-Salazar, 41

**V**

Vadillo Pérez, 57, 70, 102, 125, 179, 210  
Valdés-Abellán, 37  
Valdivielso, 61, 122, 123, 218  
Valdivielso Mijangos, 133  
Valhondo, 98, 106, 156, 197  
Valhondo González, 143, 185  
Vázquez-Suñé, 61, 96, 114, 122, 123,  
 133, 175, 187, 218  
Ventura, 116, 141  
Viezzoli, 27  
Vila Grajales, 195  
Vilanova De Benavent, 195  
Vilanova Muset, 119, 212  
Villa Lorenzo, 147  
Villafañe, 85  
Villanova De Benavent, 33  
von Schiller, 214

**W**

W. Saaltink, 135  
Wang, 106

**Y**

Yanes Conde, 173  
Yáñez Puentes, 73

**Z**

Zamora Bonachela, 197  
Zanello, 162  
Zeferino, 27  
Zha, 164