

# CIAS2022

del 23 al 25 de noviembre de 2022

Albacete

## Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas: libro de resúmenes

J. Jaime Gómez-Hernández  
Carolina Guardiola-Albert  
Juan José Gómez-Alday  
David Sanz  
Editores

Editores:

J. Jaime Gómez-Hernández  
Carolina Guardiola-Albert  
Juan José Gómez-Alday  
David Sanz

Editorial:

Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español  
ISBN: 978-84-920529-8-1

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 cuarta edición en Albacete entre el 23 y el 25 de noviembre. 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 ochenta ponencias que allí se presentaron incluyendo tanto comunicaciones orales como pósteres.

J. Jaime Gómez-Hernández  
Carolina Guardiola-Albert  
Juan José Gómez-Alday  
David Sanz  
Editores



## Comité Organizador

El comité organizador está formado por un comité local con miembros del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Castilla-La Mancha y los miembros de la Junta Directiva del Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos.

### Comité local del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Castilla-La Mancha

Juan José Gómez Alday  
David Sanz Martínez  
Zaira Castellanos Martínez  
Yolanda Espín Montoro  
José Antonio Fernández Pérez  
Iordanka Guenova Dountcheva-Robles  
Gustavo Martínez Couque  
Beatriz Toledo Galindo

### 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
Ana Andrade	University of Aveiro
Ana Rebollo Baños	Tragsatec
Andrés González Quirós	British Geological Survey
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
Eduardo Cassiraga	Universitat Politècnica de València
Emilio Custodio Gimena	Universitat Politècnica de Catalunya
Enric Vázquez Suñé	IDAEA, CSIC
Enrique Aracil Ávila	Análisis y Gestión del Subsuelo, S.L. (AGS)
Francisco Javier Elorza Tenreiro	Universidad Politécnica de Madrid
Héctor Alonso Aguilera	Instituto Geológico y Minero de España, CSIC
Helder Chamíné	Instituto Superior de Engenharia do Porto
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
Jorge Virgilio Cruz	Universidade dos Açores
José Angel Sánchez Navarro	Universidad de Zaragoza
José Miguel Andréu Rodes	Universidad de Alicante
Jose Paulo Monteiro	Universidade do Algarve
Juan Antonio Barberá Fornell	Universidad de Málaga
Juan Antonio López Geta	Club del Agua Subterránea
Juan José Durán Valsero	Instituto Geológico y Minero de España, CSIC
Juan Vicente Giráldez Cervera	Universidad de Córdoba
Lucia di Stefano UCM,	Fundación Botín
Lucila Candela Lledó	IMDEA-Agua
Lurdes Martinez Landa	Universitat Politècnica de Catalunya
M. Carmen Hidalgo Estévez	Universidad de Jaén
Manuel Olías Álvarez	Universidad de Huelva
Manuel Pulido Velázquez	Universitat Politècnica de València
María Almudena Ordóñez Alonso	Universidad de Oviedo
María Elena Rodrigo Clavero	Universitat Politècnica de València
María Luisa Calvache Quesada	Universidad de Granada
María Paula Mendes	Técnico Lisboa

María Pool Ramírez  
Marisol Manzano Arellano  
Miguel Rodríguez Rodríguez  
Nuno Barreiras  
Paula Rodríguez Escales  
Ricardo Juncosa Rivera  
Teresa Melo  
Vanessa Almeida de Godoy  
Vicente Navarro Gámir

Amphos 21  
Universidad Politécnica de Cartagena  
Universidad Pablo de Olavide  
Técnico Lisboa  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Universidad de A Coruña  
Técnico Lisboa  
Universitat Politècnica de València  
Universidad de Castilla-La Mancha



## Índice de ponencias (por orden alfabético de título)

Actualización de la situación hídrica de los acuíferos del Vinalopó (provincia de Alicante) .....	1
Aguas minerales embotelladas vs aguas subterráneas de abastecimiento. ¿Son diferentes? .....	3
Análisis de la salinidad de los acuíferos relacionados con lagunas costeras mediante el uso de tomografía eléctrica de resistividades .....	5
Análisis preliminar de las respuestas naturales de los manantiales Aguamula y Aguasnegras, cabecera del río Guadalquivir (provincia de Jaén).....	9
Análisis preliminar de las respuestas naturales de los manantiales kársticos situados en el valle del río Castril (provincia de Granada). Implicaciones para la evaluación de los recursos hídricos .....	11
Antibióticos, genes de resistencia y su relación con la materia orgánica disuelta en manantiales naturales (Osona, Cataluña central).....	13
Aplicación de método VARS (variogram analysis of response surfaces) para el cálculo de la sensibilidad global de modelos de transporte reactivo .....	15
Aplicación de tomografía de resistividad eléctrica 2D para la caracterización de la interfaz agua dulce agua salada en humedales hipersalinos .....	17
Aplicaciones del método del estado adjunto para el transporte de contaminantes en aguas subterráneas .....	19
Caracterización de acuíferos mediante vuelos electromagnéticos.....	21
Caracterización de la mezcla a escala de acuífero inducida por evaporación .....	23
Caracterización hidrogeológica preliminar de la Fm. Areniscas del Aljibe. Complejo de los Flyschs del Campo de Gibraltar (Parque Natural de Los Alcornocales, provincias de Cádiz y Málaga).....	25
Caracterización hidrogeológica preliminar de los acuíferos del entorno del río Guadalmanza (Estepona, S España) para la evaluación del uso sostenible de sus recursos hídricos .....	27
Claves para la gestión de acuíferos en países en vías de desarrollo: ejemplos de Mozambique .....	29
Comportamiento hidrogeológico de la laguna hiperalcalina de Caballo Alba (Segovia).....	31

Contaminación por nitratos y atenuación natural en acuíferos costeros superficiales vinculados a lagunas costeras: El caso del Baix Ter - La Pletera. ....	33
Contribución del deshielo a la recarga de aguas subterráneas en la cuenca del Salar de Atacama, Chile.....	37
Criterios para completar la red de control cuantitativa de aguas subterráneas .	39
Definición de la geometría Niebla-Posadas incluido en la MASb de Guillena-Cantillana (provincia de Sevilla) para el diseño de experiencias de recarga gestionada del sector acuífero .....	41
Determinación de la línea meteórica local utilizando isótopos estables $\delta^{18}O$ and $\delta^2H$ de las precipitaciones en el mayor espacio protegido de España: Parque Natural Sierras de Cazorla, Segura y las Villas. SE of Spain .....	43
Directrices de recarga gestionada de acuíferos como adaptación al cambio climático en Guatemala .....	45
Distribución y variabilidad de elementos traza en la laguna de Santa Olalla (Parque Nacional de Doñana) .....	47
Ejemplos de aplicación de métodos geofísicos en corriente continua (tomografía eléctrica 2D) para la localización de nuevas captaciones de agua subterránea ..	49
El extraño viaje de las aguas minerales y termales desde zonas profundas hasta la superficie.....	51
El Grupo Tragsa, medio propio de la administración en la gestión y conservación de las aguas subterráneas .....	53
El servicio europeo de monitorización de desplazamientos del terreno, EGMS. Aplicación al estudio de la subsidencia del terreno causada por la explotación de acuíferos.....	55
El uso de la teledetección como apoyo a la gestión de las aguas subterráneas en la cuenca del Guadalquivir .....	57
Érase una vez el acuífero de la Mancha Oriental .....	61
Estrategias de bombeo hacia el uso sostenible del acuífero de La Mancha Oriental .....	63
Estudio de la presencia de contaminantes emergentes residuales en las barreras reactivas de sistemas de tratamiento suelo-acuífero (SAT) tras dos años de recarga. ....	65
Estudio hidrogeoquímico y de la radiactividad natural de las aguas del Río de los Horcajos y sus manantiales asociados (Tolox, Málaga).....	67

Estudio hidrológico de la laguna de Sobrado de los Monjes (Coruña) .....	69
Evaluación de la afección en el régimen de caudales y la calidad del agua del río Guadaíra (Sevilla) a causa de la explotación de las aguas subterráneas en su cuenca .....	71
Evaluación de la modelización hidrodinámica en una dimensión del comportamiento del río Júcar a su paso por el acuífero de la Mancha Oriental (SE de España).....	73
Experiencia educativa sobre el agua subterránea: “Cuando el suelo se hunde por la sobreexplotación de acuíferos” .....	75
Guía para el diseño, construcción, sellado y clausura de pozos de captación de agua subterránea .....	77
Hidrogeodía 2022: Una experiencia renovada en la divulgación de las aguas subterráneas .....	79
Influencia del aporte de agua subterránea en el régimen térmico de un río de alta montaña semiárida. La cuenca del río Alhorí (Sierra Nevada, Sur de España) ....	81
La aplicación de las técnicas geofísicas para emplazar sondeos de agua termal.	83
La gestión avanzada de agua subterránea para hacer frente a los nuevos retos climáticos .....	85
La gestión de las aguas subterráneas en el “Parc Natural de la Zona Volcànica de la Garrotxa” .....	87
La importancia de las aguas subterráneas en la cooperación y el desarrollo: algunos retos y experiencias. ....	91
La reutilización de las aguas regeneradas y biosólidos, base de la economía circular en la cuenca del río La Villa de la República de Panamá. ....	93
Mejora de la red hidrométrica de manantiales .....	97
Modelo 2D de flujo y transporte de HCH en el aluvial del río Gállego aguas abajo del vertedero de Sardas (Huesca) .....	99
Modelo 2D para estudiar la posible amenaza de intrusión salina en el acuífero Almonte-Marismas.....	101
Modelo 3D de flujo en régimen transitorio del vertedero de Sardas (Huesca) .	103
Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero costero Manglaralto en Ecuador .....	105
Modelo de flujo del ATDM: Gestión de la explotación de aguas subterráneas y mejora del conocimiento del acuífero .....	107

Modelos de Inteligencia Artificial como herramientas de alerta temprana para la gestión de los recursos hídricos .....	109
Nuevas herramientas informáticas para la interpretación y gestión de variables hidrogeológicas .....	111
Optimización de redes de control piezométrico mediante cluster de series temporales .....	113
Origen hidrogeológico del agua mineral rica en CO <sub>2</sub> de Vilajuïga (Pirineos Orientales, Alt Empordà).....	115
Presencia y aislamiento de bacterias degradadoras de atrazina en un sistema acuífero-lagunar hipersalino. ....	117
Primeros avances en la metodología para la identificación de la fuente de alimentación histórica de humedales secos .....	119
Recarga gestionada en un acuífero detrítico costero con agua regenerada mediante balsas de infiltración en Marbella (Málaga, España): proyecto LIFE Matrix.....	121
Relación entre el la dinámica de gases y las aguas de goteo en la cueva del Rull (Vall d'Ebo, Alicante) .....	123
Renaturalización de aguas deterioradas mediante recarga artificial de acuíferos: logros y desafíos futuros .....	125
Replicas a escala piloto de sistemas de recarga artificial para el tratamiento de efluentes de depuradora.....	127
Reservas naturales subterráneas .....	129
Resultados del prototipo a escala real de GRA del proyecto MarAdentro .....	131
Retención de atrazina mediante procesos de adsorción en sedimento orgánico reciente de la laguna hipersalina de Pétrola (Albacete). ....	133
Retos del regadío sostenible ante un escenario de escasez de agua.....	137
Simulación de sequías futuras (2030-2059) en el área de Doñana utilizando diferentes índices aplicados a los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 del IPCC. ....	139
Sistemas ancestrales de recarga artificial de acuíferos en cuencas de alta montaña desarrolladas en rocas duras. Río Mecina, Sierra Nevada, España .....	141
Soluciones ancestrales basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Las zayas de La Valduerna (León). ....	143

---

Una fusión de bosques aleatorios y el filtro de Kalman para mejorar la modelación inversa .....	145
Una herramienta de código abierto para generar cortes geológicos en 3D: Geopropy .....	147
Uso de los análisis isotópicos ( $^{13}\text{C}$ , $^{37}\text{Cl}$ ) en etenos clorados para la evaluación de la biorremediación mediante la inyección de aceite vegetal emulsionado en un acuífero contaminado .....	149
Uso del modelo matemático del acuífero Almonte-Marismas con ModelMuse como apoyo a la planificación hidrológica de las aguas subterráneas en Doñana .....	153
Utilización de ensayos de trazadores reactivos para la caracterización de un sistema de recarga artificial .....	155
Índice de autores .....	159



## Actualización de la situación hídrica de los acuíferos del Vinalopó (provincia de Alicante)

Miguel Fernández-Mejuto<sup>1</sup>, José Miguel Andreu<sup>2</sup>, Ernesto García-Sánchez<sup>3</sup>, Juan Bellot<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Ciclo Hídrico. Diputación Provincial de Alicante*

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

<sup>3</sup>*Universidad Miguel Hernández (Elche)*

Palabras clave: recarga, balance hídrico, Vinalopó, Alicante

**Resumen.** Desde el punto de vista de la gestión de los recursos hídricos, es fundamental evaluar y cuantificar el agua existente de una región. Disponer de esa información, lo más actualizada y exacta posible, se hace aún más necesaria en regiones semiáridas fuertemente dependientes de las aguas subterráneas, como es el caso de la Cuenca del Vinalopó situada en la provincia de Alicante en el SE de España.

Durante el siglo XX la Cuenca del Vinalopó experimentó una fuerte transformación agrícola a cultivos de alta productividad basada en la utilización de aguas subterráneas. Además del uso agrícola, estas aguas se utilizaron para abastecimiento dentro y fuera de la cuenca, transfiriendo parte de sus recursos a la zona litoral provincial. La presión a la que se vieron sometidos muchos de los acuíferos de la cuenca se tradujo en diferentes problemas asociados a la sobreexplotación como secado de manantiales, salinización de acuíferos o afección a ecosistemas naturales, entre otros. Sin embargo, a lo largo del tiempo la explotación de las aguas subterráneas ha variado, reduciendo su nivel de presión, y algunos acuíferos fuertemente sobreexplotados en tiempos pasados presentan ahora una nueva situación hidrodinámica.

El principal objetivo del presente trabajo ha sido actualizar los balances hídricos de los acuíferos de la Cuenca del Vinalopó (mayoritariamente de naturaleza kárstica), poniendo especial hincapié en precisar la cuantificación de la recarga. Para ello se ha utilizado la información proveniente de las bases de datos del Sistema de Información Hidrológica (SIH) de la Diputación Provincial de Alicante. En total se han efectuado nuevas estimaciones de recarga para los 50 acuíferos definidos en la cuenca. En cada caso concreto, atendiendo los datos disponibles (escala espacial y temporal, tipo de acuífero, ubicación climática, entre otros), se ha empleado la metodología más apropiada.

En los acuíferos más extensos y complejos con suficiente información se han empleado de modelos numéricos. El más empleado ha sido MODFLOW, estimando los valores de recarga de forma indirecta durante el proceso de

calibración a partir de niveles y de datos de bombeos. También ha sido ampliamente utilizado el modelo de balance del agua en suelo RENATA (REcarga NATural de Acuíferos), el cual permite realizar balances de forma distribuida a partir de datos climáticos, características suelo y usos del suelo. En aquellos casos en los que no se disponía de suficiente información, pero sí de algunas evoluciones piezométricas y de datos de explotación, se han utilizado variantes del método de fluctuaciones del nivel de agua, el cual se basa en la premisa de que los aumentos de nivel son debidos únicamente a la llegada de la recarga que provoca un aumento del almacenamiento de agua en el acuífero. La aplicación de las distintas metodologías ha permitido establecer coeficientes de infiltración, que han sido extrapolados para aquellos casos de características semejantes y en los que se carecía de información.

Los valores de recarga encontrados para el conjunto de acuíferos de la cuenca varían entre 4 y 201 mm/año, mostrando un valor medio para la cuenca de 33 mm/año. No obstante el 70% presentó valores de recarga inferiores a 50 mm/año. Las mayores cuantías de recarga tienen lugar en la comarca del Alto Vinalopó, donde las precipitaciones anuales medias son ligeramente superiores (300-600 mm) con porcentajes de recarga respecto a dichas cuantía entre un 9 y un 15%. Mientras que el resto de sectores muestran magnitudes de recarga medias inferiores a 30 mm/año y, por tanto, porcentajes entre 6 y 10%. Solo 3 acuíferos mostraron valores de recarga superiores a 100 mm/año, es decir, aproximadamente un 6% del conjunto de acuíferos de la cuenca. La principal alimentación de los acuíferos de la cuenca es la precipitación, ya que la gran mayoría de estos sistemas acuíferos corresponden a áreas montañosas elevadas. El caudal anual promedio de recarga a los acuíferos se estima en 64 hm<sup>3</sup>/año, de los que 53 hm<sup>3</sup>/año corresponden a la infiltración de lluvia, siendo el resto de entradas las procedentes a los retornos del agua de riego, infiltración directa de aguas superficiales, o entradas laterales desde otros acuíferos como ocurre en el Baix Vinalopó en el acuífero de la Vega Media del Segura. Por su parte, los bombeos actuales en la cuenca son de 80 hm<sup>3</sup>/año, pudiendo producirse otras salidas debido a transferencias laterales, descarga por manantiales o descarga al mar de 9 hm<sup>3</sup>/año. En definitiva, la diferencia entre salidas-entradas para conjunto de la cuenca es de 25 hm<sup>3</sup>/año, valor que indica el estado deficitario que persiste en la cuenca. Esta cuantía es ligeramente inferior a la estimada en anteriores estudios, si bien sigue mostrando la falta de agua, la cual se cubre a costa de sobreexplotar los acuíferos.



# Aguas minerales embotelladas vs aguas subterráneas de abastecimiento. ¿Son diferentes?

Héctor Aguilera Alonso<sup>1</sup>, Luis Moreno Merino<sup>1</sup>, Almudena de la Losa Román<sup>1</sup>

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

Palabras clave: Agua mineral embotellada, Hidroquímica, Machine learning, Inteligencia artificial explicable (XAI)

**Resumen.** Cada vez más, el agua mineral natural embotellada se propone como una alternativa saludable y segura para el consumo. Sin embargo, en muchas ocasiones, el agua de abastecimiento del grifo procede de acuíferos, incluso de los mismos acuíferos que el agua embotellada, compartiendo los mismos mecanismos de formación y procesos de mineralización. Se plantea la hipótesis de que las aguas embotelladas y las aguas de abastecimiento procedentes de acuíferos son, en general, indistinguibles desde el punto de vista de su composición química. En este trabajo se ha comparado la composición química, antes de la desinfección de las aguas de abastecimiento, de muestras de ambos tipos de agua de España utilizando cinco criterios: juicio de expertos, hidroquímica, normativa legal, análisis estadístico y aprendizaje automático (ML). El criterio hidroquímico incluyó todas las muestras de agua embotellada en el grupo de las de grifo, al igual que el criterio legal, mientras que el análisis estadístico clásico no pudo encontrar diferencias significativas entre los dos grupos. Aunque los expertos pudieron diferenciar correctamente una pequeña submuestra de ambos tipos de agua con una precisión de 0,67, la clasificación basada en ML con el algoritmo “Extreme Gradient Boosting” alcanzó una precisión de 0,92 en un conjunto de datos extremadamente desbalanceado en cuanto a la proporción de muestras de una clase y otra. El análisis de explicaciones aditivas de Shapley (SHAP) en el marco de la Inteligencia Artificial Explicable (XAI), identificó el pH, SiO<sub>2</sub>, el parámetro E de D’Amore, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> como las variables más relevantes para la discriminación del tipo de agua. Además, se hizo una validación adicional con un conjunto de 15 aguas embotelladas portuguesas, de entre las cuales el algoritmo clasificó correctamente 14 de ellas. La consistencia global y la capacidad de generalización del clasificador ML se ha demostrado mediante la distribución espacial de aciertos y fallos del modelo. Los casos de aguas indistinguibles están ubicados próximos a reservas naturales, lo que parece indicar que condicionantes como el uso del suelo (ej. alejamiento de focos de contaminación) tienen más peso que las propias características geológicas o hidrogeológicas a la hora de seleccionar aguas potencialmente

embotellables. Finalmente, se puede concluir que ambos tipos de agua son realmente diferentes, y que sólo el ML ha podido encontrar la estructura oculta en la composición química que determina las diferencias. Esta estructura tiene su origen en cómo el mercado y los consumidores deciden qué agua se embotella finalmente. Los resultados pueden ayudar sobre las futuras elecciones en un contexto de escasez de agua.

# **Análisis de la salinidad de los acuíferos relacionados con lagunas costeras mediante el uso de tomografía eléctrica de resistividades**

Anna Menció<sup>1</sup>, Carles Roqué<sup>1</sup>, Mario Zarroca<sup>2</sup>, Eduard Madaula<sup>1</sup>, Warren Meredith<sup>1</sup>, Xavier D. Quintana<sup>3</sup>, Xavier Casamitjana<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>*Área de Geodinámica Externa e Hidrogeología, Universitat Autònoma de Barcelona*

<sup>3</sup>*GRECO, Institut d'Ecologia Aquàtica, Universitat de Girona*

<sup>4</sup>*Departamento de Física, Universitat de Girona*

Palabras clave: relación acuífero - lagunas costeras, lagunas hipersalinas, prospección geofísica

**Resumen.** Las lagunas costeras de la Pletera se sitúan en la depresión tectónica del Baix Empordà (NE de Catalunya), al norte de la desembocadura del río Ter. El relleno cuaternario de esta depresión corresponde a sedimentos depositados principalmente por este río, que conforman un sistema fluviodeltaico que alcanza una potencia máxima de 50-60 m. Las lagunas se relacionan con los niveles acuíferos más superficiales de este sistema (10-20 m de potencia), los cuales están formados por depósitos aluviales progradantes, que son substituidos por depósitos litorales (marismas, dunas y playas) en la zona más próxima a la línea de costa.

A nivel hidrológico, estas lagunas habían sido clasificadas como confinadas, porque su conexión con el mar o con las aguas superficiales sólo tiene lugar cuando se producen episodios de tormenta en otoño e invierno. Durante el resto del año, la evaporación juega un papel muy importante en las características hidroquímicas, dando lugar a que las conductividades eléctricas, en verano, lleguen a duplicar o triplicar los valores del agua del mar.

En esta zona se han llevado a cabo varios estudios con el objetivo de analizar el funcionamiento hidrogeológico del sistema lagunas-acuífero, y los resultados obtenidos hasta ahora demuestran que el grado de dependencia de estas lagunas con respecto de las aguas subterráneas varía en función de la época del año, siendo principalmente en verano cuando se mantienen gracias a las aportaciones de agua subterránea. Sin embargo, de los modelos de funcionamiento obtenidos para este sistema, tanto a nivel hidroquímico e isotópico, como a nivel físico (a través del modelo General Lake Model) se desprende que la entrada de agua en las lagunas durante el otoño –cuando se recupera su nivel– tiene que presentar salinidades mucho mayores que el agua de mar. Una explicación para este hecho

sería que los aportes de agua subterránea hacia las lagunas, coincidiendo con las precipitaciones otoñales, tuvieran características similares a las del agua que se infiltra de las propias lagunas al acuífero durante el verano. Este funcionamiento es parecido al descrito por algunos autores, que detectan la entrada de agua hipersalina en lagunas y en ambientes estuarinos durante los meses de otoño e invierno, cuando el nivel freático del acuífero se recupera. Por otra parte, en la Pletera también se ha observado que la salinidad, tanto de las lagunas, como de la entrada de agua del acuífero, depende no sólo de las características morfológicas de éstas, sino también de la presencia de niveles de sedimentos finos en su base, estando estos últimos asociados a las conductividades más altas. Para evaluar los cambios estacionales de resistividad eléctrica que tienen lugar en el acuífero relacionado con las lagunas, se ha iniciado una campaña de adquisición de perfiles de tomografía eléctrica de resistividades (ERT), con un intervalo mensual y una duración de un año. En cada campaña se realizan dos perfiles, uno situado a lo largo de una de las lagunas de mayor salinidad –y donde se habían descrito los niveles de sedimentos más finos– y el otro entre las lagunas de menor salinidad y con mayor conexión con el acuífero. Complementariamente, se realizan campañas piezométricas mensuales en el acuífero superficial, así como el seguimiento continuo del nivel freático y de la conductividad eléctrica (CE) de cuatro piezómetros superficiales (de 0,8 y 3 m de profundidad) situados junto a las lagunas.

Los resultados preliminares obtenidos en las campañas de verano muestran que en las zonas donde se encuentran los sedimentos finos confinantes, la CE de los niveles acuíferos más superficiales (a menos de 0,8 m de profundidad) situados justo por encima de los niveles de sedimentos finos, presentan valores de 38,97 mS/cm, muy similares a los de las lagunas adyacentes (44,3 mS/cm), mientras que los valores de los niveles acuíferos más profundos (a partir de los 2 m de profundidad) son menores (27,6 mS/cm), lo que indica una posible relación influente de las lagunas. Los perfiles de ERT en estas lagunas muestran valores muy bajos de resistividad (0-1,25 ohm.m) en la parte más superficial (a profundidades menores a 1m), coherentes con las conductividades eléctricas elevadas detectadas en esta zona. Entre 1-2 m de profundidad se observa un cierto aumento de la resistividad (1,5-3 ohm.m), que concuerda con la presencia de niveles de sedimentos finos, y finalmente, entre los 2-20 m de profundidad la resistividad vuelve a disminuir, situándose entre valores de 0,75-1,25 ohm.m. En posiciones más profundas (aproximadamente a 20 m), se detectan niveles con valores superiores a los 2 ohm.m, que pueden indicar la presencia de la base del acuífero.

En el caso de los perfiles de ERT llevados a cabo en la zona donde las lagunas presentan CE más moderadas, no se observa el nivel de sedimentos finos en una posición intermedia, a diferencia del caso anterior, aunque se aprecia una zona más superficial (a menos de 5m de profundidad) con valores de resistividad entre

2-4 ohm.m, y también se detectan estos valores a partir de los 18-20 m de profundidad, lo que puede indicar la presencia de materiales finos en profundidad que no afectarían la dinámica hidrogeológica de las lagunas. En posiciones intermedias (de 5-18 m) se detectan los valores de resistividad menores, situándose entre los 1-1,5 ohm.m, que son indicativos de la presencia de agua salina, similar a la de los niveles profundos detectados en las lagunas de mayor salinidad.

Los resultados iniciales obtenidos son coherentes con la hipótesis planteada, y confirmarían la presencia de agua hipersalina, procedente de las lagunas, en el acuífero.

#### Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado a través de los proyectos Life+ Program from the European Commission (Life Pletera; LIFE13NAT/ES/001001), el Ministerio de Economía y Competitividad (CGL 2016-76024-R AEI/FEDER/UE), el Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2021-1227130B-C53), y el proyecto con financiación de la European Union's Horizon 2020 (Nº869296), The PONDERFUL Project.



# **Análisis preliminar de las respuestas naturales de los manantiales Aguamula y Aguasnegras, cabecera del río Guadalquivir (provincia de Jaén)**

Juan José Rovira Medina<sup>1</sup>, Alejandro Carrasco Martín<sup>1</sup>, Matías Mudarra Martínez<sup>1</sup>, Víctor Juan Cifuentes Sánchez<sup>2</sup>, David González Rojas<sup>2</sup>, Juan José Durán Valsero<sup>3</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup>*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*

Palabras clave: karst, hidrodinámica, hidroquímica, isótopos

**Resumen.** Los afloramientos carbonáticos situados en regiones de alta montaña constituyen reservas estratégicas de agua subterránea, con implicaciones directas en la conservación ambiental de los ecosistemas dependientes y en la planificación hidrológica. Ello obliga a una actualización y profundización del conocimiento hidrogeológico de estas áreas, más aún en el escenario de cambio climático. En el marco del Convenio firmado entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (BOE nº 271, de 12 de noviembre de 2021) se están llevando a cabo investigaciones hidrogeológicas en la Sierra de Segura (con mayor detalle en el sector central del macizo -Campos de Hernán Pelea-) y en los relieves circundantes. Se trata de un área de aproximadamente 3.000 km<sup>2</sup> de superficie en la divisoria hidrográfica natural entre las demarcaciones hidrográficas del Guadalquivir y del Segura. Estos relieves están formados mayoritariamente por dolomías y calizas del Mesozoico, permeables por fracturación y karstificación, cuyo drenaje natural tiene lugar de manera preferente por manantiales, que alcanzan caudales elevados. Dos de las surgencias más destacadas son Aguamula y Aguasnegras, localizadas en la cabecera del río Guadalquivir, ambas asociadas al contacto mecánico entre carbonatos del Cretácico Superior y materiales de baja permeabilidad del Terciario.

El análisis global de las precipitaciones (lluvia y nieve) y de las respuestas naturales (registro continuo –horario- del caudal, mineralización, temperatura del agua), así como de la composición isotópica del agua de precipitación y de la drenada por ambos manantiales, durante el año hidrológico 2021/22, seco desde el punto de vista pluviométrico, ha permitido avanzar en la caracterización del funcionamiento hidrogeológico de los sectores acuíferos asociados a cada

surgencia. Aunque ambos manantiales muestran un comportamiento típicamente kárstico, con aumentos rápidos de caudal en periodos de recarga, se aprecian algunas diferencias en sus respuestas hidrodinámicas. Así, ante los periodos de recarga, el manantial de Aguasnegras responde de forma más rápida (~23 horas de tiempo medio de respuesta), con crecidas de menor duración y de mayor magnitud, que el manantial de Aguamula (~29 horas). El caudal mínimo registrado en el primero de los puntos de descarga fue 150 l/s y el máximo 3.380 l/s, mientras que en la surgencia de Aguamula los valores fueron 290 y 1.821 l/s. Estas diferencias también se aprecian en las variaciones temporales de la conductividad eléctrica y temperatura del agua. En general, durante las crecidas se producen disminuciones bruscas de la conductividad eléctrica (de hasta 80  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en Aguasnegras y de 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en Aguamula) y un progresivo aumento durante el agotamiento. En cuanto a la temperatura, se registran aumentos sistemáticos, de hasta 0,7°C, durante los periodos de recarga en el agua drenada por el manantial de Aguasnegras, que contrastan con disminuciones de hasta 1°C en el manantial de Aguamula en las mismas condiciones meteorológicas.

Por lo que respecta a la composición isotópica –ponderada por el caudal-, el agua drenada por el manantial de Aguamula presenta valores más negativos que Aguasnegras ( $\delta^{18}\text{O}$  de -9,8 y -8,5 ‰, respectivamente). Las precipitaciones más significativas ocurrieron en otoño de 2021 y primavera de 2022. Los máximos relativos de precipitación se localizaron en las alineaciones montañosas que delimitan, tanto al E como al O, los Campos de Hernán Pelea. La composición isotópica de las muestras de agua de lluvia está influenciada por la altitud y la cantidad de precipitación. Así, los valores isotópicos del  $\delta^{18}\text{O}$ , ponderados por la cantidad de precipitación, varían entre -3,9 y -10,3 ‰, más ligeros en los sectores noroccidental y central de los Campos de Hernán Pelea y menos empobrecidos en el meridional. Según el exceso de deuterio (19,2 ‰), el contenido isotópico del agua de precipitación tiene origen mediterráneo.

Las respuestas naturales registradas en las surgencias de Aguasnegras y Aguamula son propias de acuíferos carbonáticos con un buen desarrollo de la karstificación funcional, algo más desarrollada si cabe en el sector de acuífero que alimenta al manantial de Aguasnegras, en el que el flujo subterráneo ocurre preferentemente a través de una red de conductos. El área de recarga de ambos manantiales se localizaría en el altiplano segureño, según se desprende del conocimiento hidrogeológico disponible. No obstante, se trata de resultados preliminares que serán contrastados con investigaciones más detalladas en los próximos años mediante el empleo de trazadores artificiales, lo que permitiría además concretar la superficie de recarga para cada uno de ellos. El avance del conocimiento hidrogeológico de la Sierra de Segura es fundamental para la adecuada planificación hidrológica.



# **Análisis preliminar de las respuestas naturales de los manantiales kársticos situados en el valle del río Castril (provincia de Granada). Implicaciones para la evaluación de los recursos hídricos**

Alejandro Carrasco Martín<sup>1</sup>, Juan José Rovira Medina<sup>1</sup>, Matías Mudarra Martínez<sup>1</sup>, Victor Juan Cifuentes Sánchez<sup>2</sup>, David González Rojas<sup>2</sup>, Juan José Durán Valsero<sup>3</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). 29071, Málaga*

<sup>2</sup>*Oficina de Planificación Hidrológica. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG). 41071, Sevilla*

<sup>3</sup>*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Calle Ríos Rosas, 23. 28003, Madrid*

**Resumen.** Los materiales carbonáticos de edad cretácica que constituyen los principales acuíferos de la Sierra de Segura juegan un papel fundamental como reservas estratégicas de agua subterránea en las demarcaciones hidrográficas de los ríos Segura y Guadalquivir, con implicaciones en la gestión de los recursos hídricos y en la conservación ambiental de los ecosistemas dependientes. En el marco del Convenio firmado entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (BOE nº 271, de 12 de noviembre de 2021) se está profundizando en el conocimiento hidrogeológico de este macizo y de los relieves circundantes. El drenaje natural de los acuíferos de esta región, con 3000 km<sup>2</sup> de superficie aproximada, tiene lugar de manera preferente por manantiales, cuyos caudales dan lugar al nacimiento de algunos ríos relevantes. Este es el caso del río Castril, que discurre de NE a SO entre los relieves de Sierra Seca (al SE) y la sierra de Castril (al NO), cuyos recursos son regulados por el embalse de El Portillo. En el presente trabajo se analizan de manera conjunta las respuestas naturales (registro continuo -horario- del caudal, mineralización, temperatura del agua) y composición isotópica ( $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$ ) del agua drenada por el Nacimiento del río Castril (1290 m s.n.m.) durante el año hidrológico 2021/22, considerado seco desde el punto de vista pluviométrico, y por otros manantiales que aportan recursos al cauce por su margen derecha: Barranco de Túnez (1145 m s.n.m.), Magdalena (1164 m s.n.m.) y Buitre-Lézar (977 m s.n.m.). El objetivo es avanzar en la caracterización del funcionamiento hidrogeológico de los sectores acuíferos asociados a cada surgencia, así como

precisar la cuantía de los recursos hídricos subterráneos que son regulados por el embalse.

El Nacimiento del río Castril presenta un comportamiento hidrodinámico típicamente kárstico, con aumentos rápidos de caudal de hasta 5500 l/s y tiempos medios de respuesta de 28 h en periodos de recarga. El caudal medio ha sido de 998 l/s durante el periodo de estudio. Según estos resultados, la aportación subterránea al embalse de El Portillo, durante el año hidrológico 2021/22, suma unos 31,5 hm<sup>3</sup>. El total de aportaciones medidas en la cola del embalse ha sido 54,4 hm<sup>3</sup>, a las que habría que sumar 7,4 hm<sup>3</sup> (234 l/s) procedentes del manantial Buitre-Lézar.

En cuanto a la conductividad eléctrica y la temperatura del agua, se observa un aumento progresivo de los valores medios de ambos parámetros a medida que los puntos de drenaje se encuentran a cotas cada vez más bajas, con mínimos de 272  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 9,7 °C (Nacimiento del Río Castril) y máximos de 358  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 11,8 °C (Buitre-Lézar). En general, durante las crecidas se producen disminuciones bruscas de la conductividad eléctrica (de hasta 60  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el Nacimiento del Río Castril y de 16  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en Buitre-Lézar) y un aumento progresivo de la mineralización del agua durante el agotamiento. La temperatura del agua drenada por el Nacimiento del Río Castril desciende hasta 1 °C durante los periodos de recarga, mientras que en el de Buitre-Lézar las disminuciones son de hasta 1,3 °C.

Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de la molécula del agua de estos manantiales presentan un rango comprendido entre -7,98 ‰ y -10,93 ‰ y entre -45,95 ‰ y -63,78 ‰, respectivamente. Los valores más negativos se registran en el agua del manantial de Buitre-Lézar y se vuelven más pesados a medida que la cota de surgencia se sitúa a una altitud mayor. Los resultados isotópicos muestran una variación estacional con los valores más empobrecidos entre octubre y marzo. Los valores isotópicos se localizan sobre la línea meteórica del mediterráneo occidental, desplazados hacia la línea meteórica del mediterráneo oriental. El análisis de la señal isotópica de las muestras de lluvia y del conjunto de los manantiales podría contribuir a la definición de la zona de recarga que alimenta cada uno de los manantiales según su situación en la sierra de Castril, además de su contexto y funcionamiento hidrogeológico. No obstante, son resultados preliminares, que deberán ser completados con un mayor período de registro y con el uso de trazadores artificiales. El avance del conocimiento hidrogeológico de esta región es fundamental para la correcta planificación de los recursos hídricos en la región del Altiplano Granadino.

## Antibióticos, genes de resistencia y su relación con la materia orgánica disuelta en manantiales naturales (Osona, Cataluña central)

Meritxell Gros<sup>1</sup>, Àlex Sánchez-Melsió<sup>1</sup>, José Luís Balcázar<sup>1</sup>, Carles M. Borrego<sup>1</sup>, Núria Catalán<sup>2</sup>, Mira Celic<sup>1</sup>, María José Farré<sup>1</sup>, Mira Petrovic<sup>1</sup>, Josep Mas-Pla<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Laboratoire des Sciences du Climat et de l' Environnement, LSCE, CNRS, France*

Palabras clave: Antibióticos, Materia orgánica disuelta, Cotransporte

**Resumen.** La presencia de antibióticos y genes de resistencia a antibióticos (ARG) se evaluó en once manantiales naturales en la comarca de Osona (Cataluña central), caracterizada por ser un área de intensa producción ganadera lo que comporta la aplicación de grandes cantidades de purín en los campos de cultivos. Asimismo, también se caracterizó la presencia de materia orgánica disuelta (DOM) para estudiar las posibles asociaciones entre los primeros y los distintos tipos de DOM identificados.

Los antibióticos tetraciclina y sulfonamida fueron omnipresentes en todos los manantiales muestreados, a concentraciones de ng/L, excepto la doxiciclina, un tipo de tetraciclina que se detectó a concentraciones de 2 µg/L en un único punto. Respecto a los genes de resistencia a los antibióticos, se detectaron los genes *sul1* y *sul2* (resistencia a sulfonamidas), *tetW* (resistencia a tetraciclinas) e *intl1*, un proxy de la contaminación antropogénica, en la mayoría de manantiales, siendo *sul1* el más abundante. Se observó una gran variabilidad estacional tanto para los antibióticos como para los genes de resistencia, que se atribuyeron tanto a factores hidrológicos como a procesos de transporte reactivo.

Las correlaciones entre los antibióticos y los componentes DOM mostraron que las tetraciclinas se correlacionan positivamente con sustancias insaturadas de oxígeno, mientras que las sulfonamidas se relacionaban con compuestos alifáticos e insaturados pobres en oxígeno. Esta observación sugiere que el transporte de los diferentes antibióticos podría estar controlado por el tipo de DOM presente en el agua subterránea, favoreciendo su movilidad en condiciones de cotransporte.

Financiación. EU Marie Skłodowska Curie Actions projects #750104 and #839709, Proyecto MINECO PACE-IMPACT (FEDER-MCIU-AEI/CGL 2017-87216-C4-4-R), Beca Ramón y Cajal (AEI-MICIU, RyC-2015-17108).



# Aplicación de método VARS (variogram analysis of response surfaces) para el cálculo de la sensibilidad global de modelos de transporte reactivo

Javier Samper Calvete<sup>1</sup>, Carlos López Vázquez<sup>3</sup>, Bruno Pisani Veiga<sup>1</sup>, Alba Mon López<sup>1</sup>, Aurora-Core Samper Pilar<sup>2</sup>, Fernando Lentijo Robledo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UDC. Coruña

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA). UDC. Coruña

<sup>3</sup>Universidad ORT Uruguay

<sup>4</sup>ENRESA Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. C/ Emilio Vargas 7, 28043 Madrid

Palabras clave: Análisis de sensibilidad global, Modelo de transporte reactivo, VARS

**Resumen.** Los modelos de transporte reactivo se utilizan para la evaluación de la seguridad a largo plazo de los almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad. Por otro lado, se han desarrollado sofisticados métodos de análisis de sensibilidad de los modelos numéricos basados en el análisis de los resultados del modelo (p.e. Morris, Sobol, ...). VARS (Variogram Analysis of Response Surfaces) es un método que proporciona una herramienta integral y eficiente para analizar la estructura de una función de respuesta Y (Razavi & Gupta, 2016). Al igual que los métodos de Morris y Sobol, el método VARS requiere realizar simulaciones de Monte Carlo para disponer de la función de respuesta Y (salida del modelo). El método VARS no sólo engloba los métodos de Morris y Sobol como casos particulares ya que además la eficiencia del VARS mejora respecto a la del resto de los métodos previos. En este trabajo se presenta la aplicación del método VARS al cálculo de las sensibilidades globales de las predicciones de un modelo de transporte reactivo para un almacenamiento de residuos radiactivos alta actividad. Se trata de un modelo de transporte reactivo multicomponente 1D axisimétrico en elementos finitos para cuantificar las interacciones a largo plazo (50 000 años) de los productos de corrosión de un contenedor de acero al carbono con una barrera de bentonita en el seno de una formación granítica. Las simulaciones se realizaron con el código CORE2D V5 (Fernández, 2017) en el Centro de Supercomputación de Galicia. El resultado del modelo que se considera en el análisis es el pH calculado en la interfaz del contenedor con la bentonita después de 50000 años. Los parámetros considerados incluyen: la tasa de corrosión, el coeficiente de difusión los solutos en la bentonita, el flujo de agua

subterránea a través del granito, la selectividad de intercambio catiónico del Fe y la constante de estabilidad de la magnetita. Se utilizaron funciones de densidad de probabilidad log-uniformes para los parámetros, excepto para la velocidad de corrosión, que es uniforme. Los indicadores de Morris, Sobol y VARS dan resultados similares. Los resultados del análisis de sensibilidad global llevan a la conclusión de que los parámetros que más influyen son la tasa de corrosión, el flujo en el granito y la selectividad catiónica del Fe. Los resultados del modelo son ligeramente sensibles a la discretización temporal y a la tolerancia del criterio de convergencia del esquema de iteración secuencial.

Agradecimientos: La investigación que ha dado lugar a estos resultados ha sido financiada por ENRESA a través de un Contrato de Investigación dentro del Paquete de Trabajo DONUT de EURAD (European Joint Program on Radiactive Waste Management of the European Union, Grant Agreement, 847593). El trabajo ha sido parcialmente financiado también por el Ministerio de Economía y Competitividad de España (Proyecto PID2019-109544RB-I00) y la Xunta de Galicia (Subvención número ED431C2021/54 de "Consolidación e estruturación de unidades de investigadores).

# Aplicación de tomografía de resistividad eléctrica 2D para la caracterización de la interfaz agua dulce agua salada en humedales hipersalinos

Silvia Rodríguez<sup>1</sup>, Iordanka Dountcheva<sup>2</sup>, Diego Salcedo<sup>2</sup>, Manuel Martín<sup>1</sup>, Juan José Gómez-Alday<sup>2</sup>, David Sanz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Reconocimiento y Testificación de Sondeos

<sup>2</sup>Sección de Biotecnología y Recursos Naturales. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla - La Mancha

Palabras clave: Relaciones aguas superficiales aguas subterráneas, Geofísica, Flujos de densidad variable

**Resumen.** Los métodos de prospección geoelectrica son una herramienta poderosa en acuíferos con flujos de densidad variable (diferentes salinidades), ya que se puede utilizar el contraste entre diferentes resistividades de corriente continua en agua subterránea salina y agua subterránea dulce. Un ejemplo real de este tipo de ecosistemas son los sistemas salino-endorreicos de la Mancha (casos excepcionales a escala mundial de sedimentación salina actual en ambientes continentales: p.e. humedales del Cigüela, humedales de Cordovilla y humedales del sector endorreico Pétrola-Corral Rubio-La Higuera). En dichas zonas se realizaron dos campañas (periodo húmedo y seco) de prospección eléctrica mediante la técnica de tomografía eléctrica. En concreto se realizaron secciones 2D en el entorno de algunas de sus lagunas con el objetivo de identificar la presencia de una interfaz agua dulce-agua salada y describir con precisión su morfología.

Para las dos campañas de tomografía se optó por la configuración Wenner-Schlumberger, un híbrido entre las configuraciones Wenner y Schlumberger. Dicho dispositivo presenta una mayor profundidad de investigación, tiene una mayor densidad de datos y posee una buena resolución lateral y vertical. Para las medidas en cada perfil, se aplicaron dos ciclos de inyección, tomando 700 valores de intensidad y diferencia de potencial diferentes, y calculando el error del valor cuadrático medio para cada valor de resistividad aparente. El procedimiento de inversión de los datos de campo se llevó a cabo con el programa informático Res2Dinv. Los resultados de la inversión se transformaron en coordenadas absolutas XYZ. En el entorno de cada sección de tomografía se obtuvieron muestras de agua en los sondeos y piezómetros del agua intra-poro.

El resultado obtenido después de la inversión es una sección o bloque de resistividades de alta resolución con una muy buena aproximación del modelo de resistividades y profundidades reales del subsuelo. Al conocer las características

hidráulicas de los materiales que forman el acuífero se observa una relación empírica directa entre la resistividad eléctrica encontrada en el acuífero y la concentración de sólidos disueltos totales en el agua subterránea. Todo ello ha permitido identificar en cada una de las zonas de estudio no sólo un marco conceptual del funcionamiento hidrogeológico del humedal hipersalino sino la presencia de una interfaz agua dulce-agua salada (incluido el ancho de la zona de mezcla) con las posibles modificaciones debidas a las variaciones estacionales y las presiones antrópicas.

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación CGL2017-87216-C4-2-R del Programa Nacional de Investigación I + D + i (FEDER / Ministerio de Ciencia, Investigación y Universidades) y SBPLY / 17/180501/000296 de la Programa de Investigación I + D + i de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.



# Aplicaciones del método del estado adjunto para el transporte de contaminantes en aguas subterráneas

Javier Samper Calvete<sup>1</sup>, Aurora-Core Samper Pilar<sup>2</sup>, Javier Samper Pilar<sup>1</sup>, Alba Mon López<sup>1</sup>, Changbing Yang<sup>3</sup>, Fernando Lentijo Robledo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UDC. Coruña

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA). UDC. Coruña

<sup>3</sup>Environmental Data Techniques, Inc, 4515 Gardendale, BLDG 902, San Antonio, TX 78240, USA:

<sup>4</sup>ENRESA Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. C/ Emilio Vargas 7, 28043 Madrid

Palabras clave: Estado adjunto, transporte de solutos, modelos numéricos

**Resumen.** El método del estado adjunto (AS) es comúnmente utilizado para calcular las derivadas locales de la función objetivo del problema inverso de la estimación automática de los parámetros de modelos numéricos de flujo y transporte de solutos y para calcular las sensibilidades de los resultados de un modelo a las variaciones de sus parámetros. El método AS se puede aplicar: (a) Al problema original (método continuo) o (b) A la versión discretizada del problema original (método discreto). El método AS continuo consiste en obtener las ecuaciones del estado adjunto a partir de las ecuaciones en derivadas parciales del problema original y, posteriormente, resolver numéricamente dichas ecuaciones. El método AS discreto consiste en obtener las ecuaciones del estado adjunto directamente a partir de las ecuaciones discretizadas del problema original. En esta comunicación se presenta la formulación del estado adjunto continuo y discreto para el transporte de solutos conservativos y reactivos en medios porosos. Se incluye la descripción de los dos métodos, el análisis de sus propiedades y la comparación de ambas versiones, así como su aplicación a sistemas multicomponente de solutos conservativos y sistemas reactivos con reacciones de disolución/precipitación de minerales y de intercambio catiónico. Las propiedades y la aplicación del AS se ilustran con un caso sintético de flujo estacionario unidimensional y transporte transitorio de un soluto en una columna de longitud finita, considerando diferentes formulaciones de la función objetivo. También, se presentan diferentes opciones para la implementación del AS en el código de transporte reactivo CORE.

Agradecimientos: La investigación que ha dado lugar a estos resultados ha sido financiada por ENRESA a través de un Contrato de Investigación dentro del Paquete de Trabajo DONUT de EURAD (European Joint Program on Radiactive

Waste Management of the European Union, Grant Agreement, 847593). El trabajo ha sido parcialmente financiado también por el Ministerio de Economía y Competitividad de España (Proyecto PID2019-109544RB-I00) y la Xunta de Galicia (Subvención número ED431C2021/54 de “Consolidación e estruturación de unidades de investigadores cooperantes”). Agradecemos a Carlos López por su apoyo y comentari

## Caracterización de acuíferos mediante vuelos electromagnéticos

Antonio Menghini<sup>2</sup>, Isla Fernández<sup>1</sup>, Andrea Viezzoli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEOGNOSIA

<sup>2</sup>EMERGO

<sup>3</sup>GAIA EXPLORACIÓN

Palabras clave: Geofísica, Vuelos Electromagnéticos, Vuelos Magnéticos

**Resumen.** El conocimiento de la geología estructural de áreas grandes susceptibles de albergar acuíferos es una tarea muy costosa en tiempo y económica. Si los estudios se deben hacer desde la superficie, cartografiando la zona, con todos los inconvenientes que ello conlleva, relacionados con la solicitud de permisos oficiales y de propietarios de las fincas, el tiempo que se debe emplear es muy largo además de que existe la posibilidad de que queden zonas sin estudiar porque no sea posible la entrada a ciertas localizaciones.

Por todo esto, las campañas de vuelos geofísicos, y más concretamente los vuelos Electromagnéticos y Magnéticos que nos permiten estudiar grandes superficies en muy poco tiempo y tomando información y datos prácticamente continuos de toda la zona, configurando los estudios en relación al conocimiento geológico previo, se convierten en una herramienta muy útil en los estudios hidrogeológicos.

Las variaciones litológicas, así como lineamientos y fallas, tienen una respuesta habitualmente muy clara en estudios electromagnéticos y magnéticos, por lo que la combinación de ambos, junto con la interpretación geológica de la zona puede llevar a comprender los sistemas completos geológicos así como su evolución en profundidad.

Para probar estas metodologías se ha hecho una prueba en una zona de interés hidrogeológico cercana a Aracena, Huelva, con un equipo de NRG Europa, tomando datos EM y Magnéticos. En este poster se explican los resultados de dicha campaña.

La modelización de los datos de la campaña de vuelo Electromagnética y Magnética de Xcite nos ha proporcionados la siguiente información:

- 1.-Presencia de posibles acuíferos en dolomías, que no son visibles desde superficie por encontrarse en zonas recubiertas en superficie por otras litologías,
- 2.- Nos ha proporcionado información de los buzamientos en profundidad de las unidades litológicas cartografiadas desde la superficie.
- 3.-Mayores potencias de dolomías que potencialmente son objetivos prioritarios a la hora de localizar sondeos de captación de agua.

Las campañas de vuelos EM y Magnéticos a mayor escala en la zona, promete proporcionar datos y conocimientos inestimables a los gestores del agua para optimizar el uso sostenible de los recursos por parte de todos los interesados locales.

## Caracterización de la mezcla a escala de acuífero inducida por evaporación

Marco Pieretti<sup>1</sup>, Luis Cueto-Felgueroso<sup>2</sup>, Elena Abarca<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Amphos21 Consulting SL, Carrer de Vençuela, 103, 08019 Barcelona, Spain*

<sup>2</sup>*Departamento de Ingeniería civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), C/ Ramiro de Maeztu 7, 28040 Madrid, Spain*

Palabras clave: Modelación, Transporte reactivo, Salinización de suelos, Flujo con densidad variable

**Resumen.** Uno de los procesos que alteran la integridad del suelo consiste en la salinización y precipitación de sales minerales a escala de poro, que puede llegar a formar costras (p.e. caliches) e inducir cambios severos en la fertilidad y propiedades mecánicas del suelo. Estos procesos se ven particularmente favorecidos por las condiciones climáticas áridas, donde la tasa de evapotranspiración iguala o supera la recarga de los acuíferos poco profundos. Además, la evaporación que ocurre en el nivel freático inicia un efecto dominó que conduce a una dinámica de mezcla convectiva, que involucra a todo el acuífero, una vez que se alcanza una condición inestable en la que se forma agua salina y densa, al eliminar el solvente (agua) y reconcentrar los solutos, sobre el agua subterránea dulce. Este estudio se centra en el proceso de mezcla y a la precipitación de minerales a medida que el agua se satura con respecto a ellos. Aquí presentamos un modelo basado en la conceptualización propuesta por Bauer et al. 2015 para las islas de sal en el delta del Okavango (Botswana). En dichas islas, la geofísica detectó flujos convectivos en el acuífero que inducían la migración vertical de parte de los solutos. El sistema consiste en una porción somera del acuífero sometida a evaporación y precipitación mineral en condiciones de equilibrio. El agua es recargada por dos ríos a ambos lados de la isla que mantienen el suelo en condiciones saturadas. El modelo numérico se ha implementado en COMSOL Multiphysics y resuelve la ecuación de flujo de agua con densidad variable y transporte reactivo en medio poroso. El modelo replica la reconcentración de solutos en el límite de evaporación y las inestabilidades gravitatorias que ocurren eventualmente bajo la misma, evolucionando en digitaciones de agua más densa que se mueven, se fusionan, se difunden y se hunden por flotación. La formación de digitaciones reduce la concentración bajo la zona de evaporación, que disminuye drásticamente después de un valor máximo local correspondiente al evento de formación de digitaciones. Se caracterizan los diferentes patrones de evolución del sistema en función de los

dos parámetros clave del sistema, la tasa de evaporación y la permeabilidad del acuífero. El modelo simula adecuadamente la precipitación de fases minerales en el primer metro bajo la zona de evaporación que conlleva una reducción heterogénea de la porosidad. Por tanto, el modelo permite predecir la dinámica de mezcla del sistema para un rango de condiciones ambientales y geológicas reales e identificar como esta puede cambiar cuando se produzcan modificaciones externas (evaporación potencial) e internas (porosidad) al sistema. Estas simulaciones numéricas pueden implementarse como una herramienta predictiva de transporte reactivo aplicada a estudios de geingeniería y agricultura.

# Caracterización hidrogeológica preliminar de la Fm. Areniscas del Aljibe. Complejo de los Flyschs del Campo de Gibraltar (Parque Natural de Los Alcornocales, provincias de Cádiz y Málaga)

José Pablo González de Aguilar Etchemendi<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 (CEHIUMA)*

Palabras clave: Areniscas, Aljibe, Flysch, Numídico

**Resumen.** La Formación Areniscas del Aljibe pertenece al denominado Flysch Numídico del Complejo del Campo de Gibraltar (Cordillera Bética). Esta unidad geológica tiene su máxima expresión cartográfica en la mitad oriental de la provincia de Cádiz, coincidiendo en gran medida con los límites del Parque Natural de Los Alcornocales. El relieve alomado y boscoso del Campo de Gibraltar presenta sierras de hasta 1.091 m s.n.m. (Sierra del Aljibe), gargantas y valles. En esta zona, una de las más húmedas del Sur de España, existe un clima mediterráneo con una marcada influencia de frentes atlánticos que descargan lluvias comprendidas entre 500 y 1.500 mm/año. La formación geológica objeto de este estudio está constituida por una alternancia de más de 1.000 m de areniscas cuarzosas y lutitas, con claro predominio de las primeras, y edad Aquitaniense. Estas rocas se encuentran plegadas y afectadas por cabalgamientos, además de haber sufrido fracturación posterior. Tradicionalmente se han considerado con bajo interés hidrogeológico y, por ello, los antecedentes de este tipo son muy limitados. El objetivo principal de la presente investigación es caracterizar el funcionamiento hidrogeológico de esta unidad geológica. Para ello, se ha llevado a cabo el reconocimiento geológico, geomorfológico, hidrológico e hidrogeológico, este último a partir de medidas de caudales, parámetros físico-químicos y análisis químicos e isotópicos de muestras de agua en laboratorio. Las observaciones de campo han revelado la ausencia de flujo superficial en buena parte de las sierras de los sectores nororiental y central durante la época de estiaje. La actualización del inventario de puntos de agua ha mostrado que el mayor número de surgencias de aguas subterráneas (habitualmente con caudal < 2 l/s) se hallan en el área noroccidental y en el sector meridional de la zona estudiada. Esto puede explicarse por una elevada pluviometría (> 1.000 mm/año), por la existencia de afloramientos de areniscas afectadas por plegamiento y por mayor densidad de fracturación. Los datos de

conductividad eléctrica registrados (40 – 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ( $n = 243$ ) indican que las aguas subterráneas tienen muy baja mineralización, consecuencia de la ausencia de minerales carbonáticos, la baja solubilidad de los silicatos que constituyen la Fm. Areniscas del Aljibe y, posiblemente, por la circulación de flujos recientes de carácter local (hipodérmicos o someros a través de zonas más meteorizadas). Estas aguas también se caracterizan por valores de pH ácido (4 – 6) y bajas concentraciones de oxígeno disuelto (4 – 8 mg/l) y de carbono orgánico total (< 0,4 mg/l). Las muestras de agua subterránea recogidas en el sector meridional ( $n = 168$ ) presentan facies clorurada sódico-cálcica, con las concentraciones medias (en mg/l): 17 de  $\text{Cl}^-$ , 7 de  $\text{HCO}_3^+$ , 11 de  $\text{Na}^+$ , 5  $\text{Ca}^{+2}$  y 3 de  $\text{NO}_3^-$ . Esta zona se encuentra muy próxima a la costa (algunos manantiales a menos de 4 km) y son frecuentes los días con niebla en las cumbres. En cambio, las aguas subterráneas del sector Noroeste ( $a > 30$  km del mar) ( $n = 70$ ) presentan facies mixtas clorurada-bicarbonatada sódico-cálcica, con las siguientes concentraciones promedio (en mg/l): 9 de  $\text{Cl}^-$ , 10 de  $\text{HCO}_3^+$ , 6 de  $\text{Na}^+$ , 6 de  $\text{Ca}^{+2}$  y 0,4 de  $\text{NO}_3^-$ . Estas diferencias hidroquímicas entre localizaciones, aunque mínimas, se interpretan como consecuencia de una mayor influencia de aerosoles marinos (con mayores concentraciones de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ ) sobre las aguas del sector meridional debido a su proximidad a la línea de costa. El efecto de la evapotranspiración también debe ser mayor en esta área, dada la orientación preferente de las laderas hacia el Sur. Este proceso, junto con una mayor presencia de actividad ganadera, explicaría los mayores contenidos de  $\text{NO}_3^-$  medidos en la parte meridional. Los resultados obtenidos, aunque preliminares, contribuirán al conocimiento hidrogeológico del área de estudio y, al mismo tiempo, a la gestión hídrica y protección de los recursos naturales del Parque Natural de Los Alcornocales, en el que se prestará especial atención a los posibles efectos del cambio global sobre los ecosistemas dependientes de las aguas superficiales y subterráneas.



# Caracterización hidrogeológica preliminar de los acuíferos del entorno del río Guadalmanza (Estepona, S España) para la evaluación del uso sostenible de sus recursos hídricos

José Manuel Nieto López<sup>1</sup>, Adrián Palomino Gómez<sup>1</sup>, Sara Espinosa Martínez<sup>1</sup>, Manuel Argamasilla Ruiz<sup>1</sup>, Miguel Ángel Díaz Hurtado<sup>1</sup>, Juan Antonaya Avi<sup>2</sup>, Ana Ortuño Morales<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fundación Centro Andaluz de Investigaciones del Agua (CETAQUA Andalucía)

<sup>2</sup>HIDRALIA, Gestión Integral de Aguas de Andalucía S.A.

<sup>3</sup>AQUATEC, Proyectos para el sector del agua, S.A.U.

Palabras clave: río-acuífero, Costa del Sol, caracterización

**Resumen.** La gestión del agua en zonas costeras con gran demanda turística, en clima mediterráneo, es uno de los grandes retos que afrontar en la actualidad. Estas zonas están habitualmente muy densamente pobladas y presentan grandes fluctuaciones poblacionales, lo que tiene una repercusión importante en la demanda de recursos hídricos. La presencia de varios acuíferos multicapa en el entorno del río Guadalmanza (Costa del Sol Occidental, Marbella) supone una potencial fuente de recursos hídricos para satisfacer la demanda estacional, junto con los recursos superficiales disponibles. No obstante, para llevar a cabo esta explotación de forma sostenible se ha efectuado una caracterización hidrogeológica detallada, en la que se han efectuado campañas de medidas de niveles piezométricos en sondeos, así como medidas de caudal en el río Guadalmanza. Adicionalmente, se han tomado muestras de agua para analizar la composición química e isotópica del agua, así como la concentración de metales pesados. Esta caracterización hidrogeológica ha permitido dilucidar una fuerte relación entre el río Guadalmanza y su acuífero aluvial asociado, muy dependiente de las precipitaciones, lo que muestra una reducida capacidad amortiguadora del recurso. Los análisis químicos, por su parte, muestran una calidad suficiente para su explotación. Estos resultados demuestran la potencial explotación de estos acuíferos, aunque se precisan estudios hidráulicos de mayor detalle para determinar las zonas más apropiadas, así como los caudales máximos extraíbles para garantizar un uso sostenible de los recursos hídricos.



## Claves para la gestión de acuíferos en países en vías de desarrollo: ejemplos de Mozambique

Jordi Guimerà<sup>1</sup>, Salvador Mondlane<sup>2</sup>, Ester Vilanova<sup>1</sup>, Tybaud Goyetche<sup>1</sup>, Noelia Corral<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*GMSC*

Palabras clave: plan de gestión, acuíferos, en vías de desarrollo

**Resumen.** La gestión de los acuíferos en países en vías de desarrollo se encuentra limitada por los recursos disponibles tanto económicos como de capital humano. Estas carencias dificultan la aplicación de sistemáticas que en otros países se encuentran plenamente avanzadas. De esta forma, la aplicación de modelos numéricos, estimaciones de la recarga, caracterización de la composición química o la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos a menudo debe hacerse con muy poca información.

En este contexto, el Banco Mundial ha financiado un proyecto en la provincia de Nacala, en Mozambique, con el objetivo de desarrollar un plan de gestión de aguas subterráneas de los acuíferos de la región, en vistas a una futura expansión de la ciudad como centro de desarrollo industrial y portuario. Para ello, se realizó una búsqueda intensa de información de todo tipo (geológica, hidrológica, hidráulica) se estimó la recarga con entradas de lluvia caracterizada mediante satélite y se elaboró una planificación de las extracciones de agua subterránea en base a herramientas muy sencillas que se pueden implementar en cualquier ordenador personal. Los datos utilizados para las herramientas de planificación consistieron en los niveles medidos en los pozos de extracción, los caudales de explotación y la salinidad medida. Las herramientas son hojas de cálculo pre-programadas para la simulación analítica de la intrusión marina en un campo delimitado de pozos.

Por otro lado, la Dirección Nacional General de Recursos Hídricos de Mozambique (DNGRH) ha desarrollado la red de monitoreo estratégico de los acuíferos del país. Para ello se ha realizado una extensa recopilación de datos a nivel país -lo más difícil de todo el proyecto- y se han implementado toda la información disponible para la caracterización de la vulnerabilidad y la selección de puntos estratégicos para el monitoreo. Se han desarrollado diferentes recomendaciones de periodicidad y medida de parámetros, que la DNGRH implementará de acuerdo con un plan de acción en los próximos años.

Es de esperar que ambas iniciativas redunden en un mejor conocimiento de la hidrogeología y en una toma de decisiones mejor informada en la gestión de los acuíferos de Mozambique.

## Comportamiento hidrogeológico de la laguna hiperalcalina de Caballo Alba (Segovia)

Pedro Huerta<sup>1</sup>, Ildefonso Armenteros<sup>1</sup>, Pedro Carrasco<sup>1</sup>, Clemente Recio<sup>1</sup>, Esther Rodríguez Jiménez<sup>2</sup>, Javier Carrasco<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Salamanca

<sup>2</sup>Confederación hidrográfica del Duero

<sup>3</sup>Técnicas Geofísicas SL

Palabras clave: Caballo Alba, hiperalcalina, humedal, playa-lake

**Resumen.** La laguna de Caballo Alba es una laguna de 0,15 km<sup>2</sup> de superficie que alcanza a tener unos 40 cm de lámina de agua. La laguna está ubicada a 768 m en una cubeta de deflación formada durante el Pleistoceno Medio-Superior y cuya red de drenaje está formada por valles rellenos. Las rocas que afloran dentro de su cuenca de drenaje (4,35 km<sup>2</sup>) consisten en margas, dolomías de las “Facies Cuestas” y terrazas fluviales en la parte más alta formadas por arenas y conglomerados cuarcíticos, las cuales constituyen una secuencia que empieza a los 848 m.

Las lagunas contienen agua desde enero a finales de junio y suelen estar secas el resto del año. Las precipitaciones suponen su principal aporte de agua. Desde finales de mayo hasta que se secan en julio la evaporación produce un aumento de la conductividad eléctrica (CE) de las aguas desde unos 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta 34000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El nivel piezométrico, la CE y la temperatura han sido monitorizados tres veces al día desde octubre de 2020 con una sonda multiparamétrica CTD (Conductivity, Temperature, Depth) a 8 m de profundidad en el piezómetro CA-2 situado dentro de la laguna junto a uno de sus bordes. CA-2 está ranurado desde 1 hasta 10 m de profundidad desde el suelo de la laguna. El piezómetro CA-2 registra descensos del nivel piezométrico que alcanzan 1,2 m de profundidad con respecto al suelo de la laguna a comienzos de noviembre. La comparación del nivel del agua en la laguna y el nivel piezométrico en CA-2 evidencia la existencia de una componente vertical ascendente del flujo subterráneo en invierno y principios de primavera y descendente a finales de primavera y comienzos del verano. La CE varía desde 6000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta 13000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en verano. Tanto las variaciones de nivel piezométrico, como de CE y temperatura en CA-2 registran cambios rápidos en relación con eventos de fuertes precipitaciones que suponen un aumento del nivel piezométrico, descenso de la CE y una leve disminución de la temperatura. Uno de los eventos más destacados ocurre a mediados de enero de 2021 y se corresponde con la fusión de la nieve de la tormenta Filomena.

El piezómetro CA-1 situado en el centro de la laguna y ranurado de 1 a 3,5 m desde el suelo de la laguna registra conductividades de unos 20000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este dato junto con los datos de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEMDT) indican que existe una salmuera bajo la laguna de Caballo Alba. Las aguas subterráneas más superficiales contribuyen a la laguna en pequeña medida aunque son la principal fuente de solutos. Las aguas de esta laguna tienen una composición bicarbonatado clorurada, sódico magnésica.

# Contaminación por nitratos y atenuación natural en acuíferos costeros superficiales vinculados a lagunas costeras: El caso del Baix Ter - La Pletera.

Anna Menció<sup>1</sup>, Eduard Madaula<sup>1</sup>, Warren Meredith<sup>1</sup>, Xavier D. Quintana<sup>2</sup>, Xavier Casamitjana<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*GRECO, Institut d'Ecologia Aquàtica, Universitat de Girona*

<sup>3</sup>*Departamento de Física, Universitat de Girona*

Palabras clave: desnitrificación, relación acuífero - lagunas, isótopos estables

**Resumen.** Los ecosistemas acuáticos costeros se caracterizan por proporcionar un amplio conjunto de servicios ecosistémicos y bienes socio-económicos a las comunidades costeras. Entre ellos, uno de los servicios que proporcionan es su papel como fuentes y sumideros de sustancias, incluyendo nutrientes, materia orgánica y contaminantes. A diferencia de la mayoría de ecosistemas acuáticos, estos ecosistemas se caracterizan porque su producción primaria viene limitada más por el nitrógeno (N) que por el fósforo (P). Por este motivo, son unos ecosistemas especialmente vulnerables a la contaminación por nitrato.

Las lagunas de la Pletera se encuentran situadas al norte de la desembocadura del río Ter (NE de Catalunya), en la depresión tectónica del Baix Empordà. El sistema fluviodeltaico cuaternario de esta zona se originó a partir de la deposición de los sedimentos aluviales del río Ter, así como de otros ríos secundarios, que constituyen el relleno de la depresión. Con una potencia máxima de 50-60 m, en su área central, estos sedimentos presentan tres unidades hidrogeológicas principales: 1) en la zona litoral se encuentra un nivel de 20 m de gravas y arenas cubiertas por 35 m de sedimentos finos (limos y arcillas) en la base de la depresión; 2) en una posición intermedia, hay un nivel de 5 m de potencia de arenas de playa, que se encuentran cubiertas por 35 m de limos y arcillas; y 3) un nivel superficial de 10-20 m de potencia, formado por depósitos aluviales progradantes, que en posiciones próximas a la costa son substituidos por depósitos de marisma.

Las lagunas de la Pletera forman parte de este sistema litoral, al encontrarse vinculadas al nivel acuífero más superficial. Estas lagunas se vieron afectadas por la construcción incompleta de una urbanización (en 1987) y han sido objeto de distintos proyectos Life+ de restauración, con el objetivo de recuperar su funcionalidad ecológica (<http://lifepletera.com/en/life-pletera/LIFE99NAT/E/006386> and [LIFE13NAT/ES/001001](http://lifepletera.com/en/life-pletera/LIFE13NAT/ES/001001)). Una de las principales preocupaciones a nivel de gestión de estas lagunas es la excesiva entrada de

nutrientes y su eutrofización. Por este motivo se ha planteado la necesidad de analizar el origen de la contaminación por nitrato, así como de los distintos procesos que afectan a los compuestos nitrogenados en esta zona, y el papel del acuífero en este proceso. Para ello, se han llevado a cabo un total de 12 campañas de campo mensuales (de enero de 2014 a octubre de 2015) y 9 campañas estacionales (de enero de 2016 a enero de 2018), en las que se ha incluido el análisis hidroquímico (parámetros fisicoquímicos, iones mayoritarios y nutrientes) e isotópico (isótopos estables del agua, nitratos y sulfatos) de muestras de agua de los ríos principales de la zona, el acuífero, las lagunas y el mar; además de la realización de piezometrías (a nivel estacional) y del seguimiento en continuo del nivel de las lagunas, del río (<http://www.gencat.cat/aca>) y del mar (<http://www.meteoestartit.cat>).

Las concentraciones de nutrientes en la zona de estudio concuerdan con la tipología de ecosistema y las presiones humanas que reciben. En las lagunas se detectan las concentraciones más elevadas de carbono orgánico total (TOC), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT), así como de nitrógeno orgánico y amonio, en contraposición con las aguas subterráneas, las cuales presentan los valores más altos de nitrato. Las muestras de agua de mar, son las que presentan las concentraciones más bajas de NT y PT, concordantes con sus bajas concentraciones de nitrato, nitrito y fosfato; y también presentan concentraciones intermedias de TOC y amonio. Finalmente, el río Ter y el Ter Vell (los cursos superficiales de esta zona) presentan concentraciones de NT inferiores a las lagunas, e intermedias o bajas de TOC, fosfato y PT.

La composición de los isótopos del nitrato de las aguas subterráneas presenta valores similares a los que se obtuvieron en el río Ter. En cambio, en el Ter Vell, el agua de mar y las lagunas, no se pudo analizar el contenido isotópico en la mayor parte de las campañas por su baja concentración en nitrato.

Los resultados muestran, por un lado, que la contaminación por nitrato de esta zona está vinculada tanto a la nitrificación de fertilizantes amoniacales, como a la presencia de nitrógeno de tipo orgánico (tanto aguas residuales como purines). Por otro lado, también se detecta la atenuación natural de la contaminación por nitratos en el acuífero, siguiendo el sentido del flujo del agua subterránea. Finalmente, al analizar estos resultados, conjuntamente con las características hidroquímicas del agua subterránea, se observa que este proceso de desnitrificación puede estar producido no sólo por procesos de desnitrificación heterótrofa, sino también por desnitrificación autótrofa vinculada a la oxidación de Fe(II) a Goethita, presente en los sedimentos del acuífero.

Así, si bien en estudios previos se observó que la permanencia de las lagunas dependía de las aportaciones del acuífero, especialmente en los períodos secos, a través de este estudio se ha podido determinar que la atenuación natural del nitrato en el acuífero puede permitir que las aportaciones de agua subterránea a



las lagunas contengan concentraciones muy bajas de este nutriente, atenuando así el proceso de eutrofización.

#### Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado a través de los proyectos Life+ Program from the European Commission (Life Pletera; LIFE13NAT/ES/001001), el Ministerio de Economía y Competitividad (CGL 2016-76024-R AEI/FEDER/UE), el Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2021-1227130B-C53), y el proyecto con financiación de la European Union's Horizon 2020 (Nº869296), The PONDERFUL Project.



# Contribución del deshielo a la recarga de aguas subterráneas en la cuenca del Salar de Atacama, Chile

Sonia Valdivielso Mjangos<sup>1</sup>, Enric Vázquez-Suñé<sup>1</sup>, Juan Ignacio López Moreno<sup>2</sup>, Emilio Custodio Gimena<sup>3</sup>, Rotman Criollo<sup>4</sup>, John W. Pomeroy<sup>5</sup>, Ashkan Hassanzadeh<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC)*

<sup>3</sup>*Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*

<sup>4</sup>*Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA, CSIC-UIB)*

<sup>5</sup>*Centro de Hidrología, Universidad de Saskatchewan*

Palabras clave: Nieve, MODIS, Modelo hidrológico de regiones frías (CRHM), Sublimación

**Resumen.** La cuenca del Salar de Atacama es una de las cuencas endorreicas salinas mejor conocidas del mundo debido al frágil equilibrio entre la extracción de salmuera rica en litio de su núcleo y los ecosistemas únicos de sus lagunas circundantes. Sin embargo, ningún estudio hasta la fecha ha cuantificado la recarga teniendo en cuenta en detalle la componente de deshielo en el balance hídrico de la cuenca. En este trabajo se utiliza información satelital (Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada, MODIS) para caracterizar la dinámica espacial y temporal de la extensión de la capa de nieve y la limitada información meteorológica e hidrológica disponible para simular el espesor del manto de nieve y la hidrología. Con el fin de obtener una primera estimación cuantitativa de la contribución del deshielo al balance hídrico de la subcuenca de Toconao, en el este del Salar de Atacama. Se presta especial atención a comprender mejor el balance energético de la nieve, incluidas las pérdidas por sublimación y ablación por el viento, los procesos de infiltración en suelos congelados y descongelados y el papel del deshielo en la generación de escorrentía superficial y en la recarga directa e indirecta de agua subterránea. Esta simulación se ha realizado mediante el Modelo hidrológico de regiones frías (CRHM), que permite vincular la simulación física adecuada de los procesos hidrológicos para simular cada unidad de respuesta hidrológica.

Se ha obtenido que en la subcuenca de Toconao en 2017, durante el verano se registró la mayor cantidad de precipitaciones del año, principalmente en forma de lluvia y en invierno fue en forma de nieve. Las intensas lluvias del verano produjeron la mayor cantidad de escorrentía e infiltración del año. En invierno, junio, la infiltración fue el doble por nieve que por lluvia. Se produjeron

numerosas nevadas durante el verano y el invierno, sin embargo, la mayor extensión de la capa de nieve fue durante el invierno (60% de la capa de nieve anual). En verano la nieve se localiza por encima de los 4500 m snm mientras que en invierno la capa de nieve cubrió gran parte de la cuenca. La pérdida de nieve transportada por el viento y por la sublimación tuvo poco impacto en el balance hídrico general. Incluso sin datos de precipitación medidos en la zona elevada del área de estudio, los resultados de la nieve simulada en el CRHM se consideran válidos porque coinciden con los resultados de la cubierta de nieve diaria MODIS.

## Criterios para completar la red de control cuantitativa de aguas subterráneas

Jorge Enrique Hornero Díaz<sup>1</sup>, Luis Solís García-Barbón<sup>1</sup>

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

Palabras clave: red de control, piezómetros, manantiales

**Resumen.** La Administración Hidráulica controla una red de aguas subterráneas basada principalmente en piezómetros, continuidad de otra implementada y gestionada por el IGME hasta 1985. Esta red está suministrando una valiosa información para evaluar la respuesta de las masas de agua subterránea (MASB) ante la variabilidad de la recarga y los efectos de las extracciones. La tendencia de disminución de las precipitaciones a consecuencia del cambio climático y sus patrones de ocurrencia espacio-temporal ocasionará previsiblemente un aumento de las afecciones ambientales y podrá afectar la sostenibilidad de los aprovechamientos actuales. En este contexto, los programas de ampliación de las redes de control deben considerar: una valoración del alcance y significación de la red actual basada en las características específicas de los acuíferos y sus relaciones con los ecosistemas acuáticos, y una priorización de los objetivos a controlar y las condiciones técnicas de los sondeos de la red ampliada. En esta ampliación, la condición de complementariedad de las redes piezométrica y de aforo de manantiales permitirá alcanzar los objetivos propuestos con una menor afección a los espacios protegidos y una menor inversión presupuestaria, mejorando en muchos casos el control de los caudales ambientales en cauces sin red específica. Se aportan algunos ejemplos en la demarcación hidrográfica del Segura que ilustran las propuestas que se formulan.



## Definición de la geometría Niebla-Posadas incluido en la MASb de Guillena-Cantillana (provincia de Sevilla) para el diseño de experiencias de recarga gestionada del sector acuífero

José María Ávila Marín<sup>1</sup>, José Manuel Gil Márquez<sup>1</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>1</sup>, Beatriz de la Torre Martínez<sup>1</sup>, Juan José Durán Valsero<sup>2</sup>, Raquel Morales García<sup>2</sup>

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

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

Palabras clave: MAR, Caracterización geológica, Geometría

**Resumen.** Las regiones semiáridas, como el área metropolitana de Sevilla, afrontan una problemática notable en la gestión del agua como consecuencia de la disminución de la cantidad (asociada al cambio climático) y de la pérdida de calidad, al par que aumenta la demanda del recurso. En este escenario, la recarga gestionada de acuíferos (MAR: Managed Aquifer Recharge) se torna una estrategia imprescindible. La selección de las técnicas de MAR y la eficacia de su diseño y aplicación requieren un adecuado conocimiento hidrogeológico, incluido la definición de los límites y la geometría del acuífero.

El sector del acuífero Niebla-Posadas incluido en la MASb de Guillena-Cantillana, situado al N de la ciudad de Sevilla, es una fuente estratégica de recursos hídricos para la ciudad. Se trata de un acuífero constituido por arenas y calcarenitas del Mioceno superior, que se depositaron de manera discordante y transgresiva sobre el sustrato paleozoico de Sierra Morena. La formación acuífera, con varias decenas de metros de espesor, buza hacia el S, donde queda confinada bajo las margas azules del Tortonense y el resto de la serie sedimentaria que rellena la depresión del Guadalquivir.

Los objetivos del presente trabajo son precisar la geometría de este sector del acuífero y determinar su capacidad para almacenar agua de recarga. Para ello, se ha recopilado, tratado e interpretado la información de 135 columnas litológicas de sondeos; se han recopilado y analizado datos de medidas de nivel piezométrico realizadas en el área durante el periodo 1982-2020; y se han tomado medidas de nivel piezométrico con una periodicidad mensual durante los años hidrológicos 2020/2021 y 2021/2022

El análisis de las características geométricas de la MASb de Guillena-Cantillana se ha basado en la elaboración de mapas de isopacas del Mioceno de base e isobatas

del muro y el techo del mismo, y en la realización de un total de 13 cortes geológicos en el área de estudio. A partir de las medidas de nivel piezométrico, se han generado mapas de isopiezas que han permitido establecer el sentido del flujo del agua subterránea. Además, en las series piezométricas disponibles se puede observar un descenso generalizado (de hasta 30 m) en el último cuarto del siglo XX, debido a la extracción de agua para riego, ampliamente desarrollado sobre el acuífero mioceno.

Los resultados indican cierto potencial para aplicar técnicas MAR en este sector. Sin embargo, para definir su viabilidad será necesario conocer las propiedades hidráulicas del acuífero, cuantificar el balance hídrico, establecer modelos conceptuales y numéricos fiables, controlar la calidad de las aguas subterráneas y de la de recarga, y tener en cuenta otros factores sociales y económicos. Todo ello será analizado en fases posteriores del proyecto.



# Determinación de la línea meteórica local utilizando isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ de las precipitaciones en el mayor espacio protegido de España: Parque Natural Sierras de Cazorla, Segura y las Villas. SE of Spain

Antonio Lope Morales González<sup>1</sup>, Rosario Jiménez Espinosa<sup>1</sup>, Antonio González Ramón<sup>2</sup>, Jorge Jódar<sup>2</sup>, Francisco Moral Martos<sup>3</sup>, Fernando Gázquez Sánchez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Jaén

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

<sup>3</sup>Universidad Pablo de Olavide

<sup>4</sup>Universidad de Almería

Palabras clave: Línea Meteórica Mundial, Línea Meteórica Local, Isotopólogo, Sierra de Segura

**Resumen.** El principal aporte hídrico hacia los acuíferos kársticos del Parque Natural Sierras de Cazorla, Segura y las Villas se debe a la recarga procedente de las precipitaciones, que se genera por infiltración tanto de la lluvia como del agua procedente de la fusión nival. En este Espacio Protegido, que presenta una superficie total de 214.519 ha, se encuentra la divisoria hidrológica entre las dos cuencas de mayor relevancia del Sur de España, Guadalquivir y Segura.

Durante el periodo mayo de 2020 hasta marzo de 2022 se han llevado a cabo 30 campañas de muestreo de aguas de precipitación en 8 localizaciones situadas entre 550 y 1809 m a.s.l. Para cada una de las muestras se ha medido el contenido en isotopólogos del agua ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ). Con los resultados obtenidos se ha podido estimar la Línea Meteórica Local (LMWL) y analizar la procedencia de cada uno de los frentes de precipitación acontecidos durante el periodo de muestreo. Al relacionar la LMWL con la Línea Meteórica Mundial (LMM) y la Línea Meteórica del Mediterráneo Occidental (LMMO) se ha observado que en la zona de estudio se produce una mezcla de precipitaciones tanto de origen Atlántico como Mediterráneo.

El análisis en detalle de los frentes de precipitación muestra una alternancia entre los orígenes de la precipitación, predominando en invierno los frentes atlánticos, pero mostrando una proporción similar de ambos orígenes tanto en otoño como en primavera. La LMWL se encuentra situada entre la LMM y la LMMO con una pendiente de +12,85. Esta alternancia en el origen de los frentes de precipitación se debe, en parte, a la alineación montañosa que conforma la zona de estudio de

dirección NE-SO, la cual actúa como barrera ante los eventos de precipitación que llegan a la zona de estudio. Así, los valores isotópicos de los 4 pluviómetros más orientales presentan señales que se alinean con la LMMO, mientras que los otros 4 situados en la zona occidental muestran señales alineadas con la LMM.

# Directrices de recarga gestionada de acuíferos como adaptación al cambio climático en Guatemala

Wener Armando Ochoa Orozco<sup>1</sup>, Bayron Geovany Gonzalez Chavajay<sup>1</sup>, Jorge Iván Cifuentes Castillo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de San Carlos

<sup>2</sup>Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología

Palabras clave: Lluvia, adaptación, acuífero, recarga gestionada

**Resumen.** Guatemala está ubicado en América Central, ubicada geoestratégicamente en la zona de convergencia inter tropical, el cual es un factor que contribuye a la significativa riqueza hídrica con la que cuenta. El objetivo de esta investigación consistió en determinar los lineamientos de gestión del agua subterránea ante los riesgos climáticos como sequía, canículas prolongadas, conflictos por la escasez de agua, etc. Para ello, se consideró como parte del proceso metodológico hacer uso del enfoque cualitativo de la investigación e identificar actores claves. Asimismo, se revisaron bases de datos, información hidroclimática proporcionada por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH), informes científicos y datos proporcionados por otras instituciones oficiales y académicas, lo cual conllevó una revisión bibliográfica extensa que abarcó artículos científicos, informes de organismos internacionales, documentos de trabajos, artículos académicos y estudios referidos al tema.

El crecimiento poblacional y urbanizaciones, exigen mayor demanda de agua provocando decremento de las reservas subterráneas, a tal punto que, según los últimos registros, el descenso promedio de los pozos es de 3 a 25 metros anuales. Hace 20 años los proyectos de perforación oscilaban entre los 400 pies de profundidad máxima, mientras que al año 2022 tienen una profundidad no menor a los 1200 pies. El escurrimiento superficial se estima en 100.7 km<sup>3</sup>/año, con una precipitación media anual de 1800 mm/año, aunque es variable a las regiones orográficas del país. Las directrices planteadas consisten en dos aspectos puntuales: i) Técnicos: previo a recargar un acuífero conocer las características físico químicas y micro bacteriológicas del agua a recargar, sistema de flujo del acuífero, estratigrafía, unidad hidrogeológica y ii) de Gestión: tomar en cuenta desde el inicio del proyecto a todos los actores interesados, partiendo de implementar el Sistema de Consejos de Desarrollo, promover diálogos, acuerdos y consensos.



## Distribución y variabilidad de elementos traza en la laguna de Santa Olalla (Parque Nacional de Doñana)

Ana Fernández Ayuso<sup>1</sup>, Claus Kohfahl<sup>2</sup>, Héctor Aguilera<sup>2</sup>, Miguel Rodríguez Rodríguez<sup>3</sup>, Fernando Ruiz Bermudo<sup>2</sup>, Carmen Serrano Hidalgo<sup>4</sup>, Cecilia Romero Álvarez<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>IGME-CSIC

<sup>3</sup>Universidad Pablo de Olavide

<sup>4</sup>Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid

Palabras clave: variabilidad elementos traza, humedales, Parque Nacional Doñana

**Resumen.** Son muchos los elementos traza que, superando ciertas concentraciones, funcionan como contaminantes potencialmente dañinos en ambientes naturales. Además, debido a los efectos del cambio climático, con el que se podrían aumentar sus concentraciones como consecuencia de una reducción en las precipitaciones, estudiar su dinámica de funcionamiento supone una prioridad. La laguna de Santa Olalla es la única de régimen permanente del conjunto de lagunas peridunares del Parque Nacional de Doñana (Huelva). Hasta el momento, esta laguna ha quedado al margen de la contaminación antrópica dada su localización lejos de campos de cultivo y de emisiones industriales. En este trabajo, se ha estudiado la variabilidad espaciotemporal de elementos traza en el entorno de esta laguna, situada a escasos kilómetros del Océano Atlántico. Además, se ha llevado a cabo un estudio hidroquímico más completo que en otros trabajos previos publicados, para mejorar la caracterización de este humedal protegido. En total, se realizaron cuatro muestreos entre 2017 y 2019. Los resultados muestran cambios sistemáticos y significativos en la distribución de iones minoritarios a lo largo de la línea de flujo, influenciado por la presencia de materia orgánica, que provoca descensos de potencial redox. La variabilidad temporal de los metales traza está relacionada con bajos niveles piezométricos después de periodos considerables de sequía, que ocasionan bajadas de potencial redox y un aumento de las concentraciones de la mayoría de los elementos traza, mientras que los iones mayoritarios mantienen una distribución más constante en el tiempo. En este trabajo se han detectado concentraciones significativamente elevadas de B, As y U (1010, 14.4 y 0.39 µg/l, respectivamente) en el agua de la laguna. Las altas concentraciones de As podrían estar relacionadas con la desorción de oxidhidróxidos de hierro (HFO) debido a un incremento en los

valores de pH y alcalinidad. Por otro lado, el Cu, Zn, Ni, Sb y Tl tuvieron concentraciones más elevadas en el agua de lluvia que en el agua subterránea, revelando una contribución atmosférica de estos elementos. La monitorización de parámetros hidroquímicos en este tipo de enclaves resulta primordial, ya que la disminución de las precipitaciones por el cambio climático podría modificar sus patrones naturales y afectar a ecosistemas dependientes.

## Ejemplos de aplicación de métodos geofísicos en corriente continua (tomografía eléctrica 2D) para la localización de nuevas captaciones de agua subterránea

Antonio González Cantero<sup>1</sup>, Carlos Gata Maya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Gama Geofísica, S.L., C/ Castillo de Fuensaldaña 2, 28232 Las Rozas-Madrid*

Palabras clave: tomografía eléctrica, localización de sondeos, geofísica, caracterización de acuíferos

**Resumen.** Los métodos geofísicos en corriente continua se vienen aplicando para la localización de agua desde hace bastantes décadas. Son métodos de amplio desarrollo que localizan las zonas acuíferas de forma indirecta, es decir, no detectan la presencia de agua, sino que permiten la localización y definición de litologías o estructuras geológicas que puedan albergar agua. De esta forma, con el paso de los años y el amplio desarrollo de los equipos multielectrodo y los softwares de inversión, estas técnicas geofísicas han demostrado ser muy eficaces para la investigación hidrogeológica de acuíferos, así como para la correcta definición de puntos para nuevas captaciones de agua.

Dentro de estos métodos geoeléctricos, la tomografía eléctrica 2D ha permitido un gran avance para este tipo de prospecciones. De la experiencia adquirida se muestra la idoneidad de diferentes dispositivos geoeléctricos, como Wenner-Schlumberger y dipolo-dipolo, según el acuífero que se esté estudiando (niveles suhorizontales o subverticales, zonas de falla o alteración, ...). El tratamiento de los datos y la modelación ha sido realizado con el programa RES2DInv de Geotomo Software, ajustando los parámetros de inversión según el caso de estudio.

Con esta técnica se obtienen secciones 2D de alta resolución de resistividades eléctricas, parámetro que permite una muy buena caracterización de los materiales presentes en la zona de estudio. De esta forma, la tomografía eléctrica nos permite localizar y definir zonas de fracturación o fuerte alteración con posibles acuíferos secundarios en rocas duras (ej. granitos, pizarras, etc.), zonas de alta conductividad hidráulica en acuíferos detríticos (ej. gravas y/o arenas entre materiales impermeables), los límites de acuíferos carbonatados (ej. calizas o dolomías ubicados entre margas o arcillas), etc.

El presente trabajo muestra la aplicación de la tomografía eléctrica 2D para la localización de nuevas captaciones de agua subterránea dentro del territorio español. Se ilustran los resultados de los estudios geofísicos con los procesados de datos y su interpretación, así como con fotografías de los sondeos una vez

realizados. Los resultados que se presentan en el poster corresponden a estudios realizados en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir.



## El extraño viaje de las aguas minerales y termales desde zonas profundas hasta la superficie

Enrique Aracil Ávila<sup>1,2</sup>, Manuel Antunes da Silva<sup>3</sup>, Alcino Sousa Oliveira<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Análisis y Gestión del Subuselo (AGS)*

<sup>2</sup>*Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense De Madrid*

<sup>3</sup>*Superbock Group*

<sup>4</sup>*Universidad Tras Os Montes E Alto Douro*

Palabras clave: aguas termales, aguas minerales, tomografía eléctrica, prospección geofísica

**Resumen.** El desarrollo de las técnicas de prospección geofísica 2D y 3D como la tomografía eléctrica ha permitido obtener una representación muy ajustada de las características geológicas y estructurales del subsuelo. Al ser un método de prospección geoelectrónica, basada en el contraste de la resistividad eléctrica (parámetro opuesto a la conductividad), se refuerza la posibilidad de identificar la presencia o no de agua así como prever, en cierto modo, su carácter mineral y/o termal.

La presencia de agua en el subsuelo, fundamentalmente en entornos de rocas plutónicas y metamórficas, es fácilmente identificable, por lo general, por la importante disminución de la resistividad eléctrica por aquellas zonas por las que circula o en las que se almacena. La diferenciación de su carácter mineral/termal respecto de las aguas menos mineralizadas, menos conductoras, se establece en función de la muy sensible reducción que muestran las primeras respecto a las segundas.

La participación en numerosos proyectos para localización y captación de aguas termales y minerales en España (como es el caso de las termas de Retortillo, provincia de Salamanca) y, sobre todo, en Portugal (área de aguas minerales de Pedras Salgadas y áreas termales de Vidago, Vimioso, Alcafache y Tortosendo), ha permitido disponer de un numeroso archivo de secciones verticales de resistividad del subsuelo hasta casi 300 m de profundidad. Estas investigaciones se han llevado a cabo, siempre, con la técnica de tomografía eléctrica ya que es capaz de adaptarse a diferentes tipos de relieves topográficos, diferentes escalas de trabajo y diferentes y muy variables profundidades de investigación, mucho mejor que otras técnicas de prospección 2D y, fundamentalmente, que otras técnicas de investigación 1D (como SEV o SEDT). Los trabajos que se han analizado se han llevado a cabo con diferentes dispositivos de medida, así como distintos grados de resolución y profundidades de investigación, pero siempre con el

empleo de esta técnica prospectiva, dadas las ventajas anteriormente comentadas que presenta sobre el resto de técnicas.

Estas numerosas secciones muestran las "vías" de circulación de las aguas minerales y termales hasta sus respectivos manantiales lo cual ha permitido identificar desde vías rectilíneas verticales e inclinadas, asociadas a planos de falla simples, hasta vías muy irregulares y sinuosas, asociadas a conjuntos de fallas. Varias de estas secciones han sido posteriormente contrastadas con datos de sondeos, lo que ha permitido corroborar, al tiempo que perfeccionar, las fases de procesado de datos y, sobre todo, de interpretación de los resultados obtenidos para poder "exportarlo" a otros trabajos similares en otras localizaciones.

Estas trayectorias, a veces muy "caprichosas", que siguen estas aguas hasta su afloramiento en superficie refuerza la idea del estudio geofísico previo a la ejecución de un sondeo para localizar el mejor emplazamiento y asegurar la captación y sostenibilidad del recurso.

## El Grupo Tragsa, medio propio de la administración en la gestión y conservación de las aguas subterráneas

Carmen Macías Antequera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A., S.M.E., M.P*

Palabras clave: Tragsa, Tragsatec, hidrogeología, recursos

**Resumen.** Tragsa y Tragsatec (Grupo Tragsa) son medios propios personificados y servicios técnicos de la Administración General del Estado, Comunidades Autónomas y Diputaciones. El grupo de Hidrogeología de la Gerencia de Planificación y Gestión Hídrica de Tragsatec destaca por una trayectoria de casi 30 años coordinando y realizando actividades relacionadas con el estudio y la gestión de los recursos hídricos subterráneos. En los últimos años, este grupo ha crecido significativamente ante la demanda de las administraciones y son numerosos los retos abordados.

El ámbito de los trabajos abarca prácticamente todo el espectro de líneas de actuación en hidrogeología, contando además con el apoyo de otros especialistas y recursos del Grupo Tragsa de manera que los proyectos pueden abordarse de forma integral tanto en el ámbito nacional como internacional. En particular, cabe destacar los proyectos relacionados con las masas de agua subterráneas como unidad de gestión de recursos hídricos subterráneos en la planificación hidrológica española. Estos trabajos pueden consistir en caracterizaciones para la mejora del conocimiento, estudios de ubicación y ejecución de sondeos, automatizaciones para el control de respuestas naturales de acuíferos o apoyo en la elaboración de guías metodológicas para la evaluación del estado o identificación de ecosistemas dependientes del agua subterránea, por poner algunos ejemplos.

También a lo largo de su historia ha abordado trabajos de gran envergadura para una caracterización óptima de sistemas complejos o estudios de detalle. Se puede señalar que en la actualidad se están llevando a cabo, entre otros, estudios hidrogeológicos de detalle para conocer la influencia de la obra de los túneles de Pajares en el medio hídrico, o la caracterización detallada del flujo subterráneo en el entorno del Mar Menor así como la caracterización y modelización de Reservas Naturales Subterráneas o estudios de viabilidad para la recarga artificial en algunos territorios de Gran Canaria.

En la presentación se pretende mostrar una visión general de los servicios del Grupo Tragsa y su estructura organizativa para después particularizar en los recursos, tipos de proyectos y demanda de nuestros clientes en hidrogeología.



# El servicio europeo de monitorización de desplazamientos del terreno, EGMS. Aplicación al estudio de la subsidencia del terreno causada por la explotación de acuíferos

Guadalupe Bru<sup>1</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>1</sup>, Pablo Ezquerro<sup>1</sup>, Marta Béjar-Pizarro<sup>1</sup>, Gerardo Herrera<sup>1</sup>, Héctor Aguilera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IGME-CSIC

Palabras clave: sobreexplotación acuíferos, subsidencia, A-DInSAR

**Resumen.** Una de las problemáticas derivadas de la sobreexplotación de acuíferos es la subsidencia del terreno. La extracción de agua subterránea provoca una disminución de la presión intersticial en sedimentos no consolidados. Como resultado, la tensión ejercida por la carga de los depósitos suprayacentes se transfiere a los contactos grano a grano aumentando la tensión efectiva. Esto puede producir la consolidación del suelo (dependiendo de su compresibilidad) y desplazamientos de la superficie del terreno o subsidencia. Los riesgos asociados a la subsidencia de terreno son la disminución permanente de la capacidad de almacenamiento de agua en los acuíferos, el incremento de la probabilidad de inundaciones y los daños en edificios e infraestructuras. Evaluar la subsidencia del terreno es clave para comprender y modelar de forma acoplada la deformación de los acuíferos y el flujo de agua subterránea.

La interferometría diferencial avanzada de radar de apertura sintética (A-DInSAR) es una técnica de detección remota por satélite ampliamente utilizada para monitorear deformaciones del terreno causadas por distintos fenómenos naturales y artificiales, tales como la subsidencia del terreno debido a la explotación de acuíferos, deslizamientos lentos de ladera, minería subterránea, actividad volcánica y muchos otros. A mediados de 2022 se publicó el European Ground Motion Service (EGMS, <https://egms.land.copernicus.eu/>), financiado por la Comisión Europea en el marco del servicio de monitorización terrestre del programa Copernicus. El EGMS proporciona datos en alta resolución de las deformaciones del terreno en casi todo el territorio europeo (Estados participantes de Copernicus). Representa el sistema de monitoreo de deformaciones más relevante a escala continental jamás desarrollado con la técnica A-DInSAR, con aplicaciones a escalas nacionales, regionales y locales. Este servicio emplea los datos recogidos por la constelación Sentinel-1, que consta de dos satélites SAR en órbita polar con cobertura global y adquisición constante, ya que no se ven afectados por las condiciones atmosféricas ni por el hecho de ser

de día o de noche. Actualmente ofrece medidas de velocidad media de deformaciones calculadas para el periodo febrero de 2015 hasta diciembre de 2020 y series temporales de desplazamientos con una frecuencia de seis días, estando programadas próximas actualizaciones anuales.

En esta comunicación se describirán las principales características del servicio EGMS, cómo consultar los datos, productos disponibles, limitaciones y ejemplos de casos de estudio de subsidencia del terreno inducida por la explotación de aguas subterráneas, tales como el sistema de acuíferos del Alto-Bajo Guadalentín (Murcia), la llanura de Emilia Romagna (Italia) y los alrededores de Tesalónica (Grecia).

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los proyectos RESERVOIR (Programa PRIMA financiado por la Unión Europea dentro de Horizon 2020, no. 1924, Call 2019 Section 1 Water RIA]) y SARAI (PID2020-116540RB-C22 financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033).

# El uso de la teledetección como apoyo a la gestión de las aguas subterráneas en la cuenca del Guadalquivir

Víctor Juan Cifuentes Sánchez<sup>1</sup>, David González Rojas<sup>1</sup>, Emilio Esteban Rodríguez Merino<sup>1</sup>, Alfonso Sancho Miró<sup>1</sup>, Ana María Rebollo Baños<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, O.A.

<sup>2</sup>TRAGSATEC

**Resumen.** La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir tiene como principal objetivo gestionar los recursos hídricos de la demarcación. La actividad y el desarrollo económico de este territorio son muy sensibles a las fluctuaciones de estos recursos, al tener en su actividad económica una fuerte presencia la agricultura de regadío. La existencia de una demanda creciente de un recurso limitado como es el agua obliga a un control más estricto de su consumo.

Para conseguir regular los recursos hídricos de la demarcación, se debe disponer de métodos consistentes, fiables y rápidos, que permitan obtener resultados en un margen relativamente corto de tiempo y a una escala espacial y temporal adecuada para su gestión. Entre los medios actualmente disponibles, la teledetección espacial supone una de las técnicas más prometedoras para esta finalidad, gracias a que proporciona una cobertura espacial y temporal suficientemente detallada.

Para ello, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir está llevando a cabo diversos trabajos de teledetección que permiten tener una completa visión del estado de explotación de las distintas masas de agua subterránea, analizando imágenes tomadas por distintos sensores, principalmente empleado la serie temporal de imágenes de libre distribución de los satélites Sentinel 2.

Entre los distintos trabajos que se están desarrollando destaca la identificación de los cultivos bajo plástico en el entorno de Doñana, que permite el seguimiento y control de las masas de agua subterránea La Rocina, Almonte y Marismas recientemente declaradas como “en riesgo de no alcanzar el buen estado”, según las previsiones de artículo 56 del Texto Refundido de la Ley de Aguas, tras su aprobación en la Junta de gobierno del 16 de julio de 2020 y su publicación en Boletín Oficial del Estado el 24 de agosto de 2020. Estos trabajos se vienen desarrollando desde el año 2016.

Cada año se estudian imágenes de primavera y otoño, utilizando un mosaico formado por varias teselas de Sentinel 2A. Una vez realizado el pre-procesamiento de las imágenes, la metodología empleada consiste en construir

un modelo de aprendizaje automático supervisado, utilizando para ello el algoritmo de clasificación Random Forest, que utiliza un conjunto de 500 árboles de decisión para realizar la clasificación.

Los resultados obtenidos reflejan que la mayor parte de la superficie de cultivos bajo plástico se concentra en la masa de agua de La Rocina, siendo muy baja la presencia de estos en las masas de Almonte, Marismas y Manto Litoral de Doñana. La superficie de cultivos bajo plástico se incrementó en el año 2017 (5.936 ha), manteniéndose más o menos estable en los dos años posteriores (2018-2019) y produciéndose un descenso de estos en la campaña de primavera y otoño de 2020 (5.011 ha), con una leve subida en primavera de 2021 (5.203 ha). Sucesivas campañas indicaran si este descenso de los últimos años se trata de una tendencia o de una variación puntual para este tipo de cultivo.

Por otro lado, se están realizando trabajos de identificación de parcelas en regadío en el Alto Guadiana Menor. Este proyecto comienza en 2020 con la finalidad de proporcionar una información gráfica y alfanumérica en tiempo real de las superficies de cultivos de regadío y su distribución, como consecuencia de la disminución de recursos hídricos que se vienen observando en los últimos años para determinadas masas de aguas subterráneas. La zona de estudio abarca las masas de agua subterráneas La Zarza, Fuencaliente, la Puebla de Don Fabrique, Duda-La Sagra, Orce-María-Cúllar y Sierra de las Estancias.

Al igual que en el caso de los cultivos bajo plástico, para este trabajo se utilizan varias teselas de Sentinel 2<sup>a</sup>. Una vez realizado el pre-procesamiento de las imágenes y la preparación de la máscara de trabajo, la metodología empleada se basa fundamentalmente en la identificación de cultivos en riego a partir del cálculo del índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) en la zona de estudio. Para los cultivos no leñosos (hortícolas y herbáceos), los valores altos del NDVI (alta actividad) se han asimilado a regadío. Se han considerado cultivos de regadío valores iguales o superiores a NDVI 0,4. En el caso de los cultivos leñosos en regadío (olivar, frutales, vid y frutales de cáscara) se han utilizado los datos de coeficiente de riego definidos en el SIGPAC 2021. Concretamente, se han considerado aquellos cultivos leñosos cuyo coeficiente de riego es igual o superior al 10%.

La superficie total de cultivos de regadío en la zona de estudio para la campaña de 2021 es de 4.456,39 ha, correspondientes a cultivos de verano. En la campaña 2020 la superficie de cultivos de regadío era de 4.739,53 ha.

La teledetección aporta dos importantes ventajas. En primer lugar, la inmediatez, gracias a la resolución temporal que tienen las imágenes Sentinel 2. En segundo lugar, a este Organismo le supone un importante ahorro de costes, ya que se reducen los trabajos de campo necesarios y permite tener un conocimiento más preciso de la zona a la hora de realizar inspecciones.

En cuanto al cumplimiento de los objetivos de buen estado de las masas de agua subterránea, los resultados obtenidos por teledetección sirven para



complementar los datos de estado cuantitativo resultantes del análisis piezométrico, para posteriormente, junto con el estado químico, evaluar el estado global de la masa.

Los resultados de estos trabajos confirman una vez más el gran potencial de la teledetección como herramienta de análisis retrospectivo para reconstruir la evolución de determinados parámetros en el tiempo, así como la aportación de datos en tiempo real, proporcionando con ello una valiosa información para la caracterización y conocimiento de las aguas subterráneas de la cuenca.



## Érase una vez el acuífero de la Mancha Oriental

David Sanz<sup>1</sup>, Eduardo Cassiraga<sup>2</sup>, Jaime Gómez-Hernández<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>*Grupo de Hidrogeología. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València*

Palabras clave: Uso intensivo, gestión sostenible, Cuenca del Júcar, sobreexplotación

**Resumen.** Al igual que en otras partes del mundo, el desarrollo socio-económico de muchas regiones de la Península Ibérica desde mediados del siglo XX se debe en gran parte al uso intensivo de las aguas subterráneas para regadío, financiado principalmente por usuarios individuales. Desafortunadamente, esta explotación intensiva de las aguas subterráneas ha creado serios problemas, como la disminución de los niveles de las aguas subterráneas y de su calidad, la desconexión de los cauces de aguas superficiales con el acuífero correspondiente, y otros problemas relacionados con la gestión, como el control y la organización de áreas irrigadas.

Uno de los ejemplos más característicos de esta situación ha ocurrido durante los últimos 60 años en el Sistema Hidrogeológico de la Mancha Oriental (SMO). Este acuífero, uno de los más extensos del sur de Europa con 7,260 km<sup>2</sup>, se localiza en el extremo occidental de la llanura manchega (entre las provincias de Albacete y Cuenca), y pertenece en su totalidad a la cuenca del río Júcar. Desde tiempos remotos, se tiene constancia de la existencia de una superficie piezométrica somera con cotas superiores incluso a las del suelo en determinadas zonas de la Mancha Oriental. De hecho, la villa de Albacete sufría con elevada frecuencia inundaciones con la presencia de humedales permanentes en su entorno (ej. Motilla de la laguna del Acequión). Estos antecedentes promovieron que hace más de medio siglo la Mancha Oriental fuera objeto de especial atención "hidrogeológica" por parte de la Administración del Estado. A partir de los estudios realizados por IRYDA y SGOPI se obtuvieron los primeros datos que confirmaban el potencial hidrogeológico de la zona. Tanto fue así que hasta los medios locales se hacían eco de su importancia con titulares en prensa como "Albacete tiene en su subsuelo un auténtico océano de agua".

Lo anterior, unido al descubrimiento de las bombas sumergibles, el bajo coste de la energía y el alto precio que tenían cultivos como el maíz, intensificó la construcción de perforaciones realizada directamente por particulares y la puesta en regadío de importantes extensiones en la zona. La coincidencia en años

posteriores con la implantación de una nueva legislación del agua en España (Ley de Aguas de 1985), junto con las posibilidades técnicas de los órganos gestores del agua en aquellas fechas, generó graves problemas para la caracterización, regularización y control de aprovechamientos hídricos subterráneos. A pesar de ello, durante los siguientes 40 años se produjo una transformación socioeconómica en la región que se ha debido, en gran medida, al desarrollo del regadío (unas 100,000 hectáreas) gracias al uso generalizado de las aguas subterráneas. En los años 2000 se llegaron a extraer del SMO unos 400 hm<sup>3</sup>/año de agua subterránea de los cuales el 98% se utilizaron para la agricultura de regadío. El volumen extraído no era compatible con los recursos disponibles, lo que unido a algunos periodos de sequía como el de mediados de los 90, provocó un descenso significativo de los niveles piezométricos (hasta 80 m en algunas zonas), y por tanto de las aportaciones del acuífero del SMO al río Júcar.

Ante esta situación, tanto los gestores (Confederación Hidrográfica del Júcar) y los usuarios (Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental) establecieron varias medidas para revertir el deterioro del SMO, entre las que destacaron: a) regularizar los derechos de agua y el control de extracciones mediante el diseño de un plan de explotación de periodicidad anual basado en un acuerdo entre todas las partes interesadas; b) mejorar la eficiencia de los sistemas de riego; c) sustituir (desde 2001) bombeos de aguas subterráneas en varias áreas del SMO por agua superficial procedente de fuera del sistema; d) reemplazar (desde 2003) el suministro de agua subterránea a la ciudad de Albacete por agua del río Júcar procedente del embalse de Alarcón; e) adquirir por parte del estado los derechos de agua de determinados usuarios en periodos de intensa sequía, con el fin de reducir el agua destinada a riego y atenuar la presión sobre los descensos de niveles de agua subterránea y su efecto en el río Júcar. Estas medidas tuvieron su respuesta en una estabilización de los niveles debido al efecto de las medidas de gestión y a los aportes procedentes del río Júcar. Dicha estabilización se encuentra en peligro actualmente debido a la proliferación de pozos de hasta 7.000 m<sup>3</sup>/año (que tienen un tratamiento singular en el proceso de concesión y escapan al control de los pozos con mayores extracciones), que están sirviendo para regar diferentes cultivos leñosos en expansión como el almendro y el pistacho.

Para estudiar la correcta y mejor implementación de las medidas anteriores, gestores y usuarios establecieron un acuerdo de colaboración con las Universidades de Castilla-La Mancha (UCLM) y Politècnica de València (UPV), (estas dos universidades pertenecen a la cuenca del río Júcar), para desarrollar un modelo de flujo subterráneo (MODOS). Dicho modelo se actualiza anualmente en función de las necesidades de modelización y ha permitido tener un conocimiento más detallado del comportamiento del SMO y la distribución espacio-temporal de sus relaciones con el río Júcar, así como las predicciones de futuro de los recursos hídricos de la región, siendo un elemento fundamental en la gestión del SMO.

## Estrategias de bombeo hacia el uso sostenible del acuífero de La Mancha Oriental

Vanessa A. Godoy<sup>1</sup>, J. Jaime Gómez-Hernández<sup>1</sup>

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

**Resumen.** Los acuíferos que sustentan la agricultura de regadío se están agotando en muchas partes del mundo. Aunque la solución más obvia a ese problema es reducir el bombeo cuando no se dispone de fuentes de agua alternativas, el impacto cuantitativo de la reducción del bombeo hacia un uso sostenible de las aguas subterráneas es todo menos obvio. En este trabajo analizamos la respuesta del acuífero de La Mancha Oriental a escenarios de reducción de bombeo con el fin de encontrar caminos para la estabilización de los niveles del acuífero. Aplicamos un enfoque de balance de agua concebido por los geólogos del Servicio Geológico de Kansas, Estados Unidos, en el que la variación en el almacenamiento se obtiene restando el bombeo de la entrada neta, que es la diferencia entre la entrada total y la salida natural. A partir de esto, se explora la correlación entre el bombeo total en un acuífero y el cambio promedio del nivel del agua para evaluar la fiabilidad de los datos, la sostenibilidad del bombeo y las reducciones de bombeo requeridas para estabilizar los niveles del agua. En los análisis se utilizan los cambios en el nivel del agua de 16 pozos medidos anualmente desde 1996 hasta 2014 en el acuífero de La Mancha Oriental. Los datos de precipitación de tres estaciones se utilizan para evaluar la consistencia de los datos de extracción del agua subterránea. Los resultados muestran que la relación entre el cambio de nivel de agua promedio y el bombeo total es lineal, por lo que el método es apropiado para evaluar los datos. Valores negativos del cambio de nivel del agua indican que el acuífero no estuvo en condiciones sostenibles la mayor parte del tiempo. Los resultados también muestran que sería necesario reducir considerablemente el bombeo de agua subterránea para lograr niveles de agua estables. Este trabajo muestra que los datos medidos sobre los cambios en el nivel del agua y el uso del agua pueden brindar información rápida y valiosa sobre la condición del acuífero de La Mancha Oriental, así como su respuesta a escenarios de reducción de bombeo.



# Estudio de la presencia de contaminantes emergentes residuales en las barreras reactivas de sistemas de tratamiento suelo-acuífero (SAT) tras dos años de recarga.

Gerard Quintana<sup>1</sup>, Ferran Margalef<sup>1</sup>, Lurdes Martinez-Landa<sup>2</sup>, Cristina Valhondo<sup>1</sup>, Jesús Carrera<sup>1</sup>, Silvia Díaz Cruz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, CSIC, Barcelona

<sup>2</sup>Unidad Asociada, Grupo de Hidrología Subterránea UPC-CSIC, Barcelona

Palabras clave: SAT, PPCPs, CECs

**Resumen.** La reutilización de las aguas residuales para recarga de acuíferos se ha considerado una solución útil para incrementar la disponibilidad de agua. Actualmente, las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDARs) no tienen la capacidad de eliminar completamente los contaminantes emergentes (CECs), como fármacos y productos de cuidado personal (PPCPs), por lo que su vertido directo en el medio ambiente puede conllevar un riesgo para la salud humana y de los ecosistemas.

El presente estudio está motivado por la mejora de la calidad de las aguas residuales tratadas que se produce en los sistemas de infiltración suelo-acuífero (SAT). El concepto del SAT radica en utilizar el suelo y el acuífero como elementos efectivos para eliminar CECs, patógenos, y otros tóxicos presentes en el agua de infiltración. Dado que la calidad del agua mejora aprovechando los servicios ecosistémicos, principalmente los procesos de adsorción y de biodegradación, se ha estudiado cómo favorecer dichos procesos. Con esta finalidad, se han instalado barreras reactivas consistentes en materiales naturales como astillas de madera o compost vegetal en diferentes proporciones. Para ello, se ha utilizado el efluente secundario de la EDAR de Palamós (Girona) como agua de recarga a 6 sistemas piloto que emulan sistemas de infiltración SAT. En 5 de los sistemas, se han instalado barreras reactivas y en el sexto, no, constituyendo un SAT convencional de arena que se ha utilizado a modo de sistema de referencia. Los sistemas han estado operativos desde 2018 hasta 2020, ambos incluidos.

Para conocer si los contaminantes únicamente se retenían en el suelo o si efectivamente se habían degradado, se desmontaron los materiales de la base de las balsas de infiltración (barreras reactivas o arena) de los seis sistemas SAT y se tomaron muestras a diferentes profundidades. Estas muestras se analizaron para conocer la carga de CECs que contenían. Se evaluó la presencia de 77 CECs incluyendo fármacos, filtros solares, conservantes, plaguicidas y estimulantes no

solo en los materiales de las barreras tomados en el desmantelamiento, sino también de las aguas extraídas de forma secuencial de los materiales de barrera. El análisis de CECs de las muestras de agua, se llevó a cabo mediante extracción en fase sólida en línea acoplada a cromatografía líquida de alto rendimiento y espectrometría de masas en tándem (SPE-HPLC-MS/MS). Para las muestras de los materiales de barrera, se realizó la extracción de los CECs mediante QuEChERS y análisis mediante HPLC-MS/MS.

Los resultados obtenidos indicaron que el uso de barreras reactivas en sistemas SAT mejora la eliminación de CECs para todas las familias de contaminantes. Se observó una distribución diferencial de los CECs entre las aguas más superficiales y las más internas extraídas del material de barrera acorde con su lipofilidad (log de la constante de partición octanol-agua,  $\log K_{ow} > 3.5$ ) y valor de pH de las aguas (en torno a 8). Sin embargo, no se pudo identificar de forma general un sistema que proporcionara un buen rendimiento de eliminación para todos los CECs considerados, ya que según el contaminante de que se trate un sistema de barrera resultó ser más eficiente que otro. Por lo tanto, es imprescindible seguir investigando a fin de perfeccionar el piloto SAT con barrera reactiva para conseguir un sistema que contenga diferentes zonas reactivas para una degradación secuencial del máximo número de CECs.

Agradecimientos:

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto CEX2018-000794-S) y al Consorci d'Aigües Costa Brava Girona (CACBGi) por el acceso a la instalación y el suministro de agua tratada y a BEKOLut®, por el suministro de los kits QuEChERS.



## Estudio hidrogeoquímico y de la radiactividad natural de las aguas del Río de los Horcajos y sus manantiales asociados (Tolox, Málaga)

Sergio Raúl Durán Laforet<sup>1</sup>, Antonio Fermín Castro Gámez<sup>2</sup>, Iñaki Vadillo Pérez<sup>1</sup>, Lucía Ojeda<sup>1</sup>, Sergio Cañete Hidalgo<sup>3</sup>, Pablo Jiménez Gavilán<sup>1</sup>, José Benavente Herrera<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga (UMA)*

<sup>2</sup>*Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía*

<sup>3</sup>*Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Málaga (SCAI)*

<sup>4</sup>*Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada (UGR). Instituto de Investigación del Agua de la Universidad de Granada*

Palabras clave: hidrogeoquímica, peridotitas, radiactividad, radón

**Resumen.** El Río de los Horcajos discurre al Noroeste de la población de Tolox, en Málaga. En su mayor parte atraviesa materiales peridotíticos muy cercanos al contacto con los mármoles que constituyen el núcleo central de la Sierra de las Nieves. Algunos de sus arroyos tributarios, como el Arroyo de las Carnicerías, discurren en su parte alta íntegramente sobre materiales carbonatados. En el valle del río de los Horcajos existen una serie de manantiales con una hidroquímica muy particular: Fuente Amargosa y Fuente Alfaguara, con aguas hiperalcalinas y elevada conductividad eléctrica; Fuente Burbuja, con agua bicarbonatada cálcica y emanaciones de gas; y El Cañuelo, un manantial epiperidotítico, con agua bicarbonatada magnésica que se encuentra en la cabecera del río. Las aguas de dichos manantiales junto con las del río (a la altura de Fuente Alfaguara) se han muestreado sistemáticamente cada dos meses, entre el 2020 y el 2022, en el marco del proyecto de investigación UMA18-FEDERJA-101. Se han analizado los constituyentes mayoritarios, metales y elementos del grupo del platino y tierras raras. Adicionalmente, se ha realizado una campaña de análisis de la radiactividad natural (partículas alfa, beta y gamma) de las aguas de una serie de manantiales hiperalcalinos y epiperidotíticos, entre los cuales se encuentran los cercanos al río de los Horcajos, incluyendo el propio río. Los resultados muestran valores de radiactividad más altos en el río que en los manantiales, lo que puede indicar la existencia de una zona de descarga difusa a lo largo de éste, favorecida por la estructura geológica regional. Con posterioridad, se ha realizado otra campaña, con aforos diferenciales y toma de muestras a lo largo del río a intervalos menores, midiendo parámetros

hidroquímicos, la radiactividad alfa, beta y gamma, y el contenido en radón, con el fin de evaluar la posible descarga difusa a través del lecho del río. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de los análisis de la radiactividad natural de las aguas, los resultados hidroquímicos del río y sus manantiales cercanos (elementos mayoritarios, metales y elementos de grupo del platino) y los valores de radón, estableciendo un modelo sencillo de la descarga en la zona.

## Estudio hidrológico de la laguna de Sobrado de los Monjes (Coruña)

Acacia Naves García-Rendueles<sup>1</sup>, Javier Samper Calvete<sup>1</sup>, Bruno Pisani Veiga<sup>1</sup>, Antonio Paz González<sup>2</sup>, Marcos Lado Liñares<sup>2</sup>, Fernando López Mera<sup>3</sup>, José Ignacio Buján Díaz<sup>3</sup>, Pedro Sánchez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Coruña. Campus de Elviña 15071 A Coruña.*

<sup>2</sup>*Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA). Universidad de Coruña. Campus de Elviña 15071 A Coruña.*

<sup>3</sup>*Aquatica Ingeniería. Rúa do Areal, 42, Vigo. 36201 Pontevedra*

Palabras clave: Humedales, Necesidades hídricas, Sobrado de los Monjes, Modelos hidrológicos

**Resumen.** La laguna de Sobrado dos Monxes está situada en el municipio de Sobrado en una zona rural al Sureste de la provincia de A Coruña. Fue creada en el s. XVI por el monasterio del mismo nombre que construyó un dique para represar las aguas de varios arroyos que constituyen las fuentes del río Tambre. La laguna posiblemente amplió en gran medida un cuerpo de agua menor ya existente y fue utilizada para el abastecimiento del propio monasterio y de varios molinos, para el riego de los cultivos cercanos mediante un sistema de canales y para la cría de truchas para proveer alimentos a los monjes y las aldeas cercanas. El dique fue reforzado y ampliado durante los años cincuenta del s. XX dándole a la laguna su forma actual con una superficie de ~10 ha. No se han encontrado estudios previos de la laguna a excepción de aquellos relacionados con la historia del monasterio o de la fauna y flora existente. Únicamente se han encontrado descripciones de las características de la laguna relacionados con el estudio de las especies de algas existentes. Sin embargo, se trata de la única laguna no costera de cierta entidad en la Demarcación Hidrográfica de Galicia-Costa y es uno de los humedales más importantes de Galicia por la riqueza de su flora y avifauna. Lamentablemente la laguna carece de una figura de protección específica. El objetivo de este trabajo es realizar un estudio hidrológico e hidrogeológico de la laguna para establecer las necesidades hídricas de sus ecosistemas y contribuir a mejorar su gestión y protección.

Se han realizado los siguientes trabajos: (1) La definición de la geometría de la laguna, tanto de su contorno como su batimetría y los puntos de vertido; (2) La identificación y medición de las entradas y salidas de agua a la laguna; (3) La monitorización de los caudales en continuo y la realización de aforos puntuales en las principales entradas, el Rego de Rodelo y el Rego de Fontevirtude, y salidas,

la acequia del convento y el Rego de Rodelo; (4) El seguimiento del nivel en la laguna en continuo y (5) El inventario de pozos y el control de niveles piezométricos en el entorno de la laguna. Se ha elaborado un modelo hidrometeorológico de balance de las cuencas vertientes a la laguna utilizando el código VISUAL-BALAN. Se ha calculado el balance diario en el periodo 2013/14-2021/22 a partir de las series de precipitación y temperatura medidos en la estación meteorológica de la AEMET situada en la zona de estudio y los datos de evaporación medidos en estación cercana. El modelo se ha calibrado con datos de aportaciones a la laguna entre febrero y septiembre de 2022 estimadas a partir de los datos de campo. Se ha preparado también un modelo de balance hídrico en la laguna que considera las aportaciones diarias de las cuencas vertientes calculadas con el modelo hidrológico de aportaciones, la precipitación sobre la lámina de agua y la evaporación en la superficie de la laguna. Este segundo modelo permite estimar el nivel medio diario de la laguna y los caudales de salida en el periodo 2013/14-2021/22 y ha sido calibrado con datos niveles y caudales medidos entre febrero y septiembre de 2022. Además de mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrológico de la laguna, el estudio ha sido muy útil para el análisis de las necesidades hídricas del ecosistema y la definición de medidas de gestión y protección.

**AGRADECIMIENTOS:** Este trabajo se ha realizado dentro del contrato “Actualización del Plan Hidrológico de Galicia-Costa” de la Fundación Universidade da Coruña para Acuática Ingeniería. Nuestro agradecimiento a todo el personal de Acuática Ingeniería y la UDC que participó en los trabajos de campo.

## Evaluación de la afección en el régimen de caudales y la calidad del agua del río Guadaíra (Sevilla) a causa de la explotación de las aguas subterráneas en su cuenca

Francisco Moral Martos<sup>1</sup>, Miguel Rodríguez Rodríguez<sup>1</sup>, Ángel Aguilera Ruiz<sup>1</sup>,  
Antonia Jiménez Rodríguez<sup>1</sup>

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

Palabras clave: explotación de acuíferos, régimen de caudales, calidad del agua

**Resumen.** La cuenca del río Guadaíra, situada en la margen izquierda del bajo Guadalquivir, posee una superficie de 1294 km<sup>2</sup> que se ubican en el sector centro-meridional de la provincia de Sevilla. Se trata de un territorio de baja altitud (cota máxima de 585 msnm en la sierra de Esparteros) y suaves pendientes (2 al 17%), en el que afloran principalmente materiales detríticos de grano fino a medio (lutitas, margas, arenitas, aluviones). La precipitación anual media es de unos 550 mm y la escorrentía total del orden de 120 mm/año, equivalentes a unos recursos hídricos renovables de 155 hm<sup>3</sup>/año.

Durante las últimas décadas el río Guadaíra sufre serios problemas de contaminación, particularmente durante los largos periodos de estiaje, a causa de los bajos caudales y de los vertidos de aguas residuales.

Para determinar la importancia de los aportes de las aguas subterráneas a la red fluvial, en particular durante los estiajes, y la afección ocasionada por la intensa explotación de los acuíferos, se ha llevado a cabo el análisis de los datos históricos de los registros de las estaciones de aforo, climáticas y de control de la calidad del agua, así como de la base de datos de puntos de agua del IGME.

Desde el punto de vista hidrogeológico destacan los acuíferos detríticos de Arahál-Coronil y de Los Alcores, constituidos por arenas, arenitas y limos del Mioceno superior-Plioceno. Estos materiales presentan una geometría tabular y espesores que varían entre 5 y 55 metros. En la cuenca afloran en una superficie próxima a los 220 km<sup>2</sup> y se estima que poseen unos recursos hídricos subterráneos del orden de 15-20 hm<sup>3</sup>/año. Otros materiales de interés acuífero son los depósitos aluviales del bajo Guadaíra, pertenecientes a la llanura aluvial del bajo Guadalquivir (unidad hidrogeológica Sevilla-Carmona), y los depósitos aluviales del Guadaíra medio.

El trabajo de campo permite constatar que la explotación de los acuíferos miocenos originan unas descargas de agua subterránea al río Guadaíra muy poco significativas durante los estiajes, de manera que la red de drenaje superficial

permanece seca o presenta caudales muy bajos, procedentes casi enteramente de los vertidos urbanos. La conductividad eléctrica de las aguas subterráneas suele estar comprendida entre 300 y 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el acuífero de Los Alcores y entre 500 y 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el acuífero Arahal-El Coronil. La salinidad del agua de la red fluvial (CE comprendida entre 1500 y 3500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) parece indicar que los problemas de calidad del agua derivan principalmente de la presencia de sustancias (contaminación orgánica, amonio, fosfatos, nitratos) presentes en las aguas urbanas residuales y pluviales y en los vertidos de la industria agroalimentaria.

## Evaluación de la modelización hidrodinámica en una dimensión del comportamiento del río Júcar a su paso por el acuífero de la Mancha Oriental (SE de España)

Lordanka Dountcheva<sup>1</sup>, David Sanz<sup>1</sup>, Philip Penchev<sup>2</sup>, Eduardo Cassiraga<sup>3</sup>, Vassil Galabov<sup>4</sup>, Juan José Gómez-Alday<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Hidrogeología, Universidad de Castilla – La Mancha, Albacete, España

<sup>2</sup>Institute of Fish Resources - Varna Primorski 4 Blv, 9000 Varna, Bulgaria

<sup>3</sup>Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, España

<sup>4</sup>Department Industrial Automation, Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria

Palabras clave: modelización hidrodinámica 1D, relación río-acuífero, recursos hídricos, gestión

**Resumen.** La presente investigación ofrece una visión detallada de los procesos hidrodinámicos y su distribución espacio-temporal en la cuenca media del río Júcar a su paso por uno de los acuíferos más extensos de la Península Ibérica (acuífero de la Mancha Oriental). Para modelizar el comportamiento hidrodinámico de dicho río se utilizó el módulo hidrodinámico (HD) del software MIKE 11, que simula a nivel diario las profundidades de agua (h) y los caudales circulantes (Q) a lo largo de 121 kilómetros de río (tramo comprendido entre la estaciones de aforo codificadas por la Confederación Hidrográfica del Júcar como 08129-08036-08144) y para un período de 45 años. La construcción del modelo HD se basa en información de referencia sobre la topografía del río y su llanura de inundación. Para ello, sobre la base de la red fluvial se realizó un estudio topográfico de 24 secciones transversales, siendo la distancia mínima entre dos secciones 50 metros y la distancia máxima de 11.210 metros. Las interacciones río-acuífero se han representado como condiciones de contorno dinámicas para 2 tramos, expresadas como diferencia entre los caudales observados entre las 3 estaciones de aforo.

Durante el procedimiento de calibración y validación, el modelo fue simulado inicialmente utilizando el valor por defecto del coeficiente de rugosidad de Manning ( $n = 0,033$ ). Los valores observados y simulados de h y Q en la estación de aforo 08036 (ubicada en el sector central del modelo) presentaron un ajuste con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) significativamente inferior a 0,80. Por lo tanto, tal y como sugieren los criterios de evaluación del rendimiento de modelos hidrodinámicos, era necesaria una calibración más precisa del valor de n

a lo largo del río. En consecuencia,  $n$  se ajustó de manera distribuida para que se produjera la mejor coincidencia entre los valores observados y los simulados de  $h/Q$ . Los valores de  $n$  a lo largo del río oscilan entre 0,02 y 0,04. Para ello se tuvieron en cuenta tanto las características del cauce-lecho del río, como su geología y geomorfología.

Las evaluaciones del error estadístico del modelo HD calibrado para los valores simulados y observados de  $h$  y  $Q$  presentan un  $(R^2)$  superior a 0,96. Los resultados de la validación del modelo se han obtenido para una estación de aforo diferente (código 08132) que sólo ha registrado datos en periodos concretos de estudio. En este caso los valores de  $R^2$  también son superiores a 0,85. La confianza estadística permite comprobar que el modelo HD es útil para entender el comportamiento del río y sus interacciones con el acuífero bajo diferentes escenarios, y además, confirma los distintos comportamientos hidrológicos a lo largo de casi medio siglo.

De esta manera se dispone de un modelo HD del río Júcar en una dimensión que permite conocer con mejor resolución espacio-temporal el comportamiento del río en la zona de interacción con el acuífero. El modelo desarrollado podría ser útil para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos y puede utilizarse para generar series temporales sintéticas de profundidades, niveles, descargas y velocidades del agua en tramos en los que no se dispone de mediciones de aforo con la resolución espacio-temporal deseable (desde metros/segundos hasta kilómetros/meses).



## Experiencia educativa sobre el agua subterránea: “Cuando el suelo se hunde por la sobreexplotación de acuíferos”

Concepción Pla<sup>1</sup>, Roberto Tomás<sup>1</sup>, Javier Valdés-Abellán<sup>1</sup>, María Inés Navarro-Hernández<sup>1</sup>, Miguel Cano<sup>1</sup>, José Luis Pastor<sup>1</sup>, Juan Manuel López-Sánchez<sup>1</sup>, Adrián Riquelme<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Alicante

Palabras clave: subsidencia, divulgación, descenso piezométrico

**Resumen.** El agua subterránea constituye una de las principales fuentes de suministro para uso doméstico y para el riego en muchas partes de España y del mundo. En España los acuíferos cubren más del 90% del territorio español y la estimación de los recursos renovables subterráneos se cuantifica en unos 30.000 hm<sup>3</sup>/año, lo que supone un 35% de los recursos naturales totales. La explotación de aguas subterráneas es de unos 6.000 hm<sup>3</sup> por año. La extracción de agua subterránea para aprovechamiento del recurso debe hacerse bajo pautas de gestión consensuadas por todos los usuarios y sostenibles en el tiempo para evitar las no poco comunes situaciones de sobreexplotación de acuíferos, que se producen cuando los bombeos de agua superan a la recarga natural y que están generando el descenso piezométrico paulatino de los acuíferos a nivel mundial. Entre otras consecuencias de esta sobreexplotación, la subsidencia del terreno producida por la extracción masiva de agua es un fenómeno frecuente en diversas partes del mundo, afectando a zonas tanto urbanizadas como agrícolas. El hundimiento del terreno provoca, entre otras alteraciones, la disminución de la capacidad de almacenamiento de los acuíferos, la generación de grietas en el terreno, daños en las infraestructuras y el aumento del riesgo de inundación. Se estima que el hundimiento del suelo provocado por sobreexplotación de acuíferos podría afectar al 19 % de la población mundial en 2040. Sin embargo, a pesar de los datos anteriores, tanto el agua subterránea como la subsidencia asociada al mal aprovechamiento son cuestiones muy poco conocidas por la población general.

Uno de los primeros pasos para concienciar a la población es hacerlo mediante actividades divulgativas dirigidas a los colectivos de menor edad, que se pueden enfocar bien para su realización dentro de las aulas o bien para su realización en jornadas de divulgación científica, talleres, jornadas educativas, etc. Además, aunque algunas de estas actividades de divulgación estén destinadas a

estudiantes, pueden adaptarse para llegar a grupos de mayor edad y familiares de los más pequeños.

Atendiendo a lo anterior, se plantea una experiencia educativa y de divulgación hidrogeológica para concienciar a la población sobre los problemas derivados de un consumo de agua irracional que conlleve la sobreexplotación de acuíferos y, en último término, la subsidencia del terreno. La experiencia planteada pretende (i) conseguir, por parte del público participante, una visión de la componente subterránea del ciclo hidrológico; (ii) dar a conocer el funcionamiento de un sistema acuífero; (iii) dar a entender el concepto de porosidad y la capacidad de almacenamiento de un acuífero; (iv) dar a entender que los acuíferos son medios vulnerables; y, por último, (v) reflejar el problema de la subsidencia del terreno producida por la sobreexplotación de acuíferos.

Para conseguir estos objetivos, la sesión divulgativa se lleva a cabo por personal cualificado que utiliza material audiovisual que contenga la información sobre los aspectos anteriores. Pero como instrumento fundamental se utiliza una maqueta en 3D que simula el funcionamiento de un acuífero. Esta maqueta, dispone de un sistema de bombeo de agua y disminución del nivel piezométrico, que permite simular el hundimiento del terreno cuando esta extracción es excesiva. Todo esto se plantea como una actividad interactiva en la que el público asistente participa de forma activa.

La experiencia demuestra que tiene una muy buena acogida por el público participante, sirviendo para acercar la hidrogeología a todo tipo de público. Los asistentes confirman el interés de la actividad y despiertan su interés por este campo, aún no demasiado conocido.

# Guía para el diseño, construcción, sellado y clausura de pozos de captación de agua subterránea

Sergio Martos-Rosillo<sup>1</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>1</sup>

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

Palabras clave: Pozos, Normativa, Sondeos

**Resumen.** Esta guía, auspiciada por el Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos, tiene por objetivo ayudar a todas las partes que intervienen en la construcción de un sondeo (incluidos propiedad, dirección de obra, técnicos, empresas y operarios) a hacer que este tipo de obra cumpla con unos mínimos de calidad, con los que aumentar su durabilidad y su relación coste-eficiencia y con los que evitar que los pozos constituyan tanto una vía de contaminación preferencial de los acuíferos como una trampa mortal debido al inadecuado sellado tras su abandono.

En los primeros capítulos se tratan aspectos relativos a la planificación a desarrollar para llevar cabo la construcción de un pozo y los contenidos mínimos que se deben exigir al estudio hidrogeológico previo, necesario para diseñar y poder construir una captación de agua subterránea. En el cuarto capítulo se dan una serie de recomendaciones para el diseño de un sondeo, en función del tipo de formación geológica a perforar. En el quinto se aborda la tramitación legal para la construcción de un pozo en España. Le siguen los contenidos mínimos que deben ser incluidos en el proyecto de este tipo de obra subterránea. El séptimo capítulo es el más extenso dado que en este se dan recomendaciones respecto a las distancias mínimas que se deben respetar entre el sondeo y posibles focos de contaminación, se indica cómo se debe realizar el control geológico e hidrogeológico a realizar durante la construcción de un sondeo, se tratan aspectos relativos al entubado, engravillado y cementación de los sondeos, a los ensayos de bombeo y a la protección sanitaria y la desinfección total del pozo una vez acabado. Se recomienda cómo y qué contenido debe tener el informe final de un pozo en el octavo capítulo. En el noveno se abordan cuando y como se debe abandonar un pozo y como ha de clausurarse para evitar caídas en su interior y para impedir que el pozo sea una vía de contaminación del agua subterránea. La memoria de este libro está acompañada con una serie de anexos donde se incluyen distintos estadillos, una recopilación de normativa internacional relacionada con la construcción y clausura de pozos y la cualificación requerida a nivel internacional para las empresas y el personal dedicado a la construcción de sondeos de captación y/o recarga de agua subterránea.



## Hidrogeodía 2022: Una experiencia renovada en la divulgación de las aguas subterráneas

Almudena de la Losa Román<sup>1</sup>, Concepción Pla<sup>2</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante (UA)*

Palabras clave: Hidrogeodía, divulgación, aguas subterráneas

**Resumen.** Este año 2022, Naciones Unidas (UN) ha decidido que el Día Mundial del Agua 2022 se centrara en las aguas subterráneas. Con el lema “Aguas subterráneas, hacer visible lo invisible”, el principal objetivo ha sido evidenciar su importancia y reivindicar una gestión adecuada y eficaz. Por ello, desde el Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GE), este año la actividad de divulgación de la importancia de las aguas subterráneas, conocida como Hidrogeodía se ha visto reforzada.

Durante los dos años de pandemia, el Hidrogeodía se tuvo que reinventar. Aunque en el año 2020 no se pudo llevar a cabo la experiencia, en 2021, gracias a la ayuda de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), el Hidrogeodía pudo acercarse a los lugares de visita a través de videos divulgativos con rutas virtuales. Esta iniciativa nos permitió llegar a más gente y, además, integrar en esta actividad a todas aquellas personas con problemas de movilidad o discapacidad auditiva.

El año 2022 ha sido el año de los reencuentros. El Hidrogeodía ha vuelto al campo y se ha podido disfrutar de nuevo del contacto de la gente. Se ha celebrado la actividad en 21 provincias españolas y Andorra. Además, el Hidrogeodía ha ampliado sus fronteras, llevando la iniciativa a países de Iberoamérica, colaborando con esta experiencia piloto en Guatemala y Chile. Cada una de las actividades desarrolladas dentro de esta jornada ha variado en función de la localización, aunque lo más común ha sido el desarrollo de un recorrido hidrogeológico o visita, o la celebración de una jornada con alguna conferencia temática o actividades aplicadas. En general, ha tenido una muy buena acogida entre los casi 1500 asistentes, con una participación mayor de personas comprendidas en un rango de edad entre 40-60 años.

Todo el material divulgativo generado durante estas actividades está disponible desde la página web mencionada (<http://www.aih-ge.org/hidrogeodia-2022/>) pudiéndose utilizar por otras instituciones interesadas como por ejemplo centros educativos, profesionales que quieran realizar itinerarios turísticos relacionados con aspectos hidrogeológicos y de este modo promover el conocimiento de las

zonas seleccionadas, y poner en valor los aspectos relacionados con el patrimonio natural e histórico-cultural del entorno visitado.

Por otra parte, para hacer más partícipes a los asistentes de los diferentes Hidrogeodías del papel e importancia de las aguas subterráneas, se ha llevado a cabo el I Concurso de fotografía hidrogeológica. Para ello, las personas interesadas han podido subir a Twitter alguna fotografía tomada durante el Hidrogeodía, con temática hidrogeológica. Tras una votación en esta plataforma, las fotos publicadas en el concurso se podrán utilizar para dar difusión a la actividad en la Web de la AIH-GE y redes sociales.

Además, desde la AIH y dando difusión desde el Hidrogeodía, se ha impulsado otra actividad novedosa, el Concurso del Agua Subterránea, dirigido a estudiantes de primaria y secundaria. El objetivo del concurso ha sido fomentar en todo el territorio nacional la divulgación de las aguas subterráneas entre los más pequeños. La participación ha consistido en la elaboración de dibujos o videos, pudiéndose realizar de manera individual o en equipo. En ambos casos, se debía de dar respuesta a la cuestión de qué significaba el agua subterránea para cada uno de ellos.

# Influencia del aporte de agua subterránea en el régimen térmico de un río de alta montaña semiárida. La cuenca del río Alhorí (Sierra Nevada, Sur de España)

Ana Fernández Ayuso<sup>1</sup>, Antonio González Ramón<sup>2</sup>, Thomas Zakaluk<sup>2</sup>, Jorge Jódar<sup>2</sup>, Miguel Rodríguez Rodríguez<sup>3</sup>, Javier Lambán<sup>2</sup>, Sergio Martos-Rosillo<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>IGME-CSIC

<sup>3</sup>Universidad Pablo de Olavide

Palabras clave: cuenca de alta montaña, régimen térmico, relaciones aguas superficiales-aguas subterráneas

**Resumen.** El régimen de comportamiento de los ríos de alta montaña en zonas semiáridas es muy sensible a los procesos de cambio climático, cuestión que tiene una especial repercusión en los ecosistemas acuáticos asociados. El aumento de la temperatura media del aire, en las cuencas hidrológicas de Sierra Nevada en el sur de España, está adelantando el pico nival del hidrograma de sus ríos. A su vez, el mayor número de tormentas anuales durante los periodos de estiaje genera importantes variaciones en el caudal y en la temperatura del agua superficial. En este trabajo, se presentan los resultados del seguimiento y análisis de los datos de caudal, temperatura del agua y temperatura del aire a lo largo de la cabecera del río Alhorí, situado en la falda norte de Sierra Nevada, en el término municipal de Jerez del Marquesado (Granada). En los 3300 m que discurren desde su nacimiento (un manantial ubicado en el pie de una morrena) hasta la estación de aforo, el rango altitudinal es de 1226 m (2665-1500 m s.n.m.). En este tramo se ha controlado el caudal del río y la temperatura del agua superficial en cuatro secciones. La temperatura media y la desviación estándar del agua en el manantial de cabecera es de  $3.95 \pm 0.20$  °C. Aguas abajo, en los otros tres puntos de control de la temperatura se han instalado sensores a tres profundidades (20, 0 y -15 cm respecto al lecho del río). La temperatura media y la desviación estándar asociada del agua superficial está comprendida entre  $4.54 \pm 4.14$  y  $7.55 \pm 4.32$  °C, a 2050 y 1500 m s.n.m. respectivamente. En estos mismos puntos de control, a -15 cm de profundidad, la temperatura media del agua es de  $4.58 \pm 4.42$  y  $6.59 \pm 3.86$  °C, respectivamente. El análisis de esta información, junto con los datos monitorizados de caudal y temperatura del aire durante dos años, ha permitido establecer el modelo conceptual de funcionamiento hidrológico e

hidrogeológico de esta cuenca de alta montaña y analizar el importante papel que tiene el agua subterránea en el control de la temperatura del agua del río.



## La aplicación de las técnicas geofísicas para emplazar sondeos de agua termal

Enrique Aracil Ávila<sup>1,2</sup>, Filipe Luis Gonçalves<sup>3</sup>, Manuel Antunes da Silva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Análisis y Gestión del Subsuelo, S.L. (AGS)

<sup>2</sup>Facultad de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid

<sup>3</sup>Companhía de Banhos de Vizela

<sup>4</sup>Consultor Hidrogeólogo

Palabras clave: AGUA TERMAL, TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA, PROSPECCIÓN GEOFÍSICA, GRANITOS

**Resumen.** En la localidad de Vizela, en la parte Norte de Portugal a escasos kilómetros al sur de Guimarães, existe una zona termal, el Balneario de Águas de Vizela, situada cerca del río del mismo nombre, cuyo aprovechamiento de aguas termales procede de varias captaciones. Estas captaciones son antiguas, de diferentes profundidades y en diferente estado de conservación y eficiencia y se localizan en diferentes puntos en el entorno del Balneario pero, por lo general, están distantes.

La necesidad de reactivar su funcionamiento pasaba, entre otros aspectos, por mejorar las captaciones y, sobre todo, incrementar el caudal con el fin de garantizar un suministro continuo, abundante y caliente. Para ello se llevó a cabo un análisis geológico y estructural de la zona de investigación, un estudio de los datos de sondeos existentes y una campaña de prospección geofísica profunda. El estudio geológico permitió enmarcarlo dentro de un macizo granítico, concretamente los monzogranitos biotíticos porfiroides de grano grueso correspondientes a la Formación tarditectónica de Granitos de Guimarães e Sto. Tirso, cerca de su contacto oriental con la Formación de Granodioritas de Felgueiras. Este conjunto plutónico se encuentra afectado por una intensa red de fracturas, generalmente asociadas a dos familias principales, cercanas a NE-SW y a NW-SE, que se manifiestan geomorfológicamente en el encajamiento del río Vizela.

Para el estudio del subsuelo se realizó una campaña de prospección geofísica mediante perfiles de tomografía eléctrica con dispositivo de medida polo-dipolo con el fin de potenciar la identificación de planos de fractura más o menos verticales y, fundamentalmente, alcanzar (y superar) los 250 m de profundidad solicitados, alcanzándose hasta 280 m en el tercio central de todos los perfiles. La disposición de los perfiles fue muy compleja, dado que se trata de un entorno urbano, y se trazaron con direcciones variables con el fin de poder “atravesar” las fallas de diferentes direcciones presentes en la zona.

La interpretación conjunta de los perfiles geofísicos con los datos geológicos permitió identificar unas anomalías de alta conductividad asociadas a planos de fractura y a posibles contactos situados a diferentes profundidades, que se interpretaron como debidas a la existencia de aguas termales asociadas a dichos planos de fractura y contactos. Con la correlación de estos planos conductores entre diferentes perfiles se generó un mapa de fracturas del subsuelo y un mapa de anomalías conductoras asociadas, lo que permitió definir tres posibles emplazamientos para los sondeos de investigación y captación de las esperadas aguas termales.

La perforación del primero de los sondeos en el primer emplazamiento que se consideró más adecuado, cerca de las instalaciones del Balneario, permitió alcanzar el objetivo perseguido ya que el resultado fue un sondeo artesiano, con un caudal de 10 m<sup>3</sup>/hora y con una temperatura de 58°C. Este resultado refuerza la defensa de la realización de estudios geológicos combinados con estudios geofísicos del subsuelo previamente a la perforación de un sondeo de captación.

## La gestión avanzada de agua subterránea para hacer frente a los nuevos retos climáticos

Alberto Barrera García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AQUATEC

**Resumen.** Los modelos de simulación numérica son ampliamente utilizados para la gestión y planificación de los recursos hídricos y permiten reproducir en condiciones controladas los fenómenos que se producen en la naturaleza, para así, poder realizar simulaciones de escenarios futuros e intervenir o poner medios con suficiente antelación para afrontar determinadas situaciones con mayores garantías.

Disponer de una aplicación que integre modelos de simulación de acuíferos desde una aplicación web permite: 1) acercar al usuario la posibilidad de elaborar sus propios escenarios futuros y conocer las consecuencias de determinados cambios en la situación del acuífero, 2) incrementar la transparencia en el uso de modelos al poder ser visualizado/utilizado por distintos agentes interesados, 3) disponer de modelos lo más actualizados posibles integrando información en tiempo real. Bajo este escenario, se ha creado la aplicación “Aquifer Supervision” para realizar una gestión de los recursos subterráneos a escala de grupo de pozos y/o de acuífero.

Está basada en el alojamiento en la nube de modelos numéricos de flujo de aguas subterráneas, siendo el alojamiento del modelo numérico dinámico, esto es, con capacidad de cálculo. Esto otorga la capacidad de visualización en tiempo real del estado del acuífero y simular distintos escenarios futuros, tales como la incorporación de nuevos pozos, escasez de recursos, afección de procesos de contaminación, etc.

La funcionalidad de la plataforma Aquifer Supervision contempla los cuatro elementos críticos requeridos para realizar una gestión integrada de aguas subterráneas, concretamente:

- 1) Gestión de datos. Permite el acceso y la visualización en tiempo real de datos y posibilita, así mismo, la realización de un análisis estadístico avanzado de las series temporales y la visualización georreferenciada de la evolución temporal de las diversas variables medidas como niveles piezométricos, concentración de solutos disueltos, etc. Las variables medidas pueden estar o no asociadas al modelo numérico.
- 2) Gestión del recurso hídrico disponible en el acuífero. Incluye la visualización de los resultados del modelo en base a la evolución espaciotemporal de la variable

de estado del modelo numérico (i.e. niveles y/o concentraciones), y en base a la evolución temporal de los diferentes términos del balance de masas del modelo. Estos últimos se pueden dar integrados espacialmente para todo el ámbito del modelo o para una distribución espacial específica en zonas de balance, para las cuales se presenta también la evolución temporal de las transferencias laterales entre ellas.

3) Planificación del recurso hídrico disponible en el acuífero. Permite simular complejos escenarios futuros.

4) Colaboración. La plataforma es un sistema de apoyo a la toma de decisiones que maximiza la colaboración entre las partes interesadas en la gestión de los recursos disponibles en el acuífero (Comunidades de Usuarios, Confederaciones Hidrográficas, etc.), proporcionando transparencia a los usuarios del acuífero sobre la gestión que se hace de este.

## La gestión de las aguas subterráneas en el “Parc Natural de la Zona Volcànica de la Garrotxa”

Joan Bach Plaza<sup>1</sup>, Emili Bassols Isamat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Unitat de Geodinàmica Externa i d’Hidrogeologia. Universitat Autònoma de Barcelona.*

<sup>2</sup>*Responsable del Àrea de Patrimoni Natural del Parc Natural de la Zona Volcànica de la Garrotxa.*

Palabras clave: Gestión aguas subterráneas, Espacios naturales protegidos, Redes de control, Cuencas experimentales

**Resumen.** El “Parc Natural de la Zona Volcànica de la Garrotxa” es un espacio natural protegido situado en los Pirineos orientales, dentro de la comarca de la Garrotxa, en la provincia de Girona. En el año 1982 se declaró Paraje Natural de Interés Nacional y en el año 1985, la ley de espacios naturales recalificó la zona como Parque Natural. El interés principal de conservación es el paisaje volcánico, con más de 40 conos volcánicos y numerosas coladas de lava, formados a finales del cuaternario. La interacción entre la actividad volcánica y la dinámica fluvio-torrencial ha dado lugar a un espesor de materiales cuaternarios que pueden superar los 100 m. Este conjunto de materiales forma un acuífero multicapa con numerosas surgencias que dan lugar a humedales y a una red de rieras que confluyen en el río Fluvià, la principal arteria fluvial del Parque.

La peculiaridad de este Parque Natural es el alto grado de antropización (en el interior del parque viven 40.000 personas), así como la importante actividad económica, industrial y agropecuaria. Los recursos hídricos utilizados para todos los usos son exclusivamente las aguas subterráneas. Anualmente se extraen en la zona de la Garrotxa alrededor de unos 12 hm<sup>3</sup>. Así pues, el reto de la gestión de las aguas subterráneas, por parte de los gestores del Parque, es hacer compatible las necesidades de cantidad y calidad de recursos hídricos para la población, en sus diversos usos: doméstico, industrial y agrícola, junto al mantenimiento de los ecosistemas naturales, basados en las surgencias del sistema acuífero y en los caudales ecológicos de las rieras y ríos.

En esta comunicación se presentan las líneas de gestión que se siguen para conocer mejor los recursos hídricos disponibles y poder hacer frente al reto de conocer mejor el comportamiento del acuífero, desde el inicio del programa general de estudio de la hidrogeología del Parque en el año 1994 hasta la actualidad. Las actuaciones más destacadas realizadas y los resultados obtenidos son los siguientes:

-A partir de la confección de un inventario de puntos de agua, se definieron unas redes de seguimiento de la cantidad y la calidad a intervalos trimestrales de la zona del Parque y de las áreas de influencia. El seguimiento hidroquímico realizado puso de relieve la existencia de zonas con concentraciones elevadas de nitratos. Esta información contribuyó a la declaración de los municipios del Parque como zona vulnerable a la contaminación por nitratos, en diciembre de 2004. Por su parte, la red de piezometría refleja una cierta fragilidad del sistema acuífero, recupera los niveles en los años de pluviometría muy superior a la media, pero se observan oscilaciones superiores a los 10 m en los años secos. A raíz de la inclusión a las zonas vulnerables de nitratos, las redes de hidroquímica y de piezometría pasaron a depender directamente de la “Agencia Catalana de l’Aigua” (ACA) a partir del año 2006.

-Un avance en el control de la piezometría fue la incorporación en el año 2005 de sensores automáticos de medición del nivel del agua a escala horaria. La red de sensores continua en la actualidad y constituye una información relevante para entender el funcionamiento de los distintos niveles del sistema acuífero multicapa. Se dispone de más de 15 años de datos en continuo que se relacionan con la cuantificación de la recarga por las precipitaciones. Esta información permite ayudar a la toma de decisiones en los informes preceptivos que elaboran los técnicos del Parque Natural, con relación a las nuevas solicitudes de aprovechamiento de agua.

-Para comprobar si en condiciones de fertilización controlada se producen excedentes de nitrógeno en la zona saturada, desde el año 2008 se procedió a controlar la cuenca experimental de la Vall dels Arcs (Santa Pau) de 4,6 km<sup>2</sup> de superficie. Dispone como puntos de control de tres piezómetros, dos pozos y tres manantiales. Los resultados obtenidos indican una influencia en el nivel más superficial, con concentraciones superiores a los 100 mg/l, pero no en los niveles profundos.

-También se realiza un control de las surgencias que alimentan los principales humedales del Parque, en la zona de la Moixina y recientemente en la zona de Verlets. En la primera se inició la medida del caudal en los canales que se generan a la salida de los manantiales a finales del año 2014. Se instalaron escalas limnimétricas y se calculó la curva de gasto de cada punto. Las medidas a escala semanal permiten observar las variaciones de caudal relacionadas con las precipitaciones y la actividad antrópica.

-Por último, cabe mencionar que los gestores del Parque participan en la gestión del acuífero ya que deben presentar sus informes razonados ante las nuevas solicitudes de aprovechamientos hídricos en el interior del Parque Natural y en su área de influencia hidrológica. Para la confección de estos informes es de gran valor la información obtenida a partir de los estudios y seguimientos mencionados.

Esperamos que, este estudio del sistema hidrogeológico realizado en el “Parc Natural de la Zona Volcànica de la Garrotxa”, pueda servir de ejemplo para la gestión de los recursos hídricos de otros espacios naturales protegidos.





## La importancia de las aguas subterráneas en la cooperación y el desarrollo: algunos retos y experiencias.

María Casado Sáenz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Energías Sin Fronteras*

Palabras clave: Cooperación y desarrollo, Lago Turkana, Unidad rehabilitación de pozos

**Resumen.** Se presentará dentro de la sección de “Cooperación en aguas subterráneas” para el desarrollo, una experiencia personal en cooperación y voluntariado en materia de las aguas subterráneas tanto en organizaciones que trabajan en regiones alejadas del mundo menos favorecidas, así como otras también desfavorecidas dentro de nuestro propio país.

Se explicarán algunos de los proyectos más relevantes desarrollados durante los últimos 8 años sobre todo en el continentes de africano. Se enfatiza toda la labor previa que puede llevarse a cabo desde el propio puesto de trabajo evitando costosos desplazamientos a las zonas de trabajo y se pone en valor, y gracias a las nuevas tecnologías, el asesoramiento y seguimiento de los proyectos desde la distancia.

Se expondrán distintos trabajos en cooperación con un denominador común que es el carácter de voluntariado, es decir son proyectos que se realizan buscando beneficios generales para la sociedad prescindiendo de los intereses o beneficios personales. Con este tipo de trabajo se benefician pequeñas comunidades en desarrollo, con pocos recursos, pero que pueden contar con la experiencia de técnicos que de forma altruista comparten sus conocimientos y su tiempo. Es importante que las iniciativas surjan de dentro de las propias comunidades y que la ayuda externa se solicite cuando sea considerada necesaria por dichas comunidades.

Se presentará como proyecto relevante el llevado a cabo en África, en la zona del lago Turkana, región entre Kenia y Etiopía, zona extensa y muy afectada por la falta de recursos hídricos. Se expondrán los resultados tangibles de esta cooperación como son la construcción de captaciones de agua subterránea y represas, así como la más necesaria si cabe, de una unidad de rehabilitación de pozos. Se expondrán las experiencias sobre transmisión de conocimientos hidrogeológicos a los integrantes de la comunidad.

Se mostrarán ejemplos de cómo se han potenciado las relaciones y reuniones “on-line” entre representantes de las comunidades y los voluntarios de los proyectos, desde puntos muy alejados del planeta y de forma habitual, que ha permitido

realizar buenos seguimientos de los trabajos. Se han promovido incluso cursos de formación contando con voluntarios especialistas de diferentes disciplinas y complementarios a los trabajos hidrogeológicos.

Se referirán otras experiencias en cooperación que, a diferencia de las anteriores, han sido tenidas en nuestro país y en especial en algunas zonas que los medios han denominado “España vaciada”. En estas zonas es patente ya, la proliferación de proyectos poco sostenibles desde el punto de vista hidrogeológico y ambiental. Con frecuencia pequeños ayuntamientos requieren de la colaboración, asesoramiento y ayuda de expertos en aguas subterráneas pero que no pueden contratar por falta de recursos. Es otra cara de la cooperación y del voluntariado, muy necesaria por ejemplo en la presentación de alegaciones a los diferentes órganos sustantivos y también en la realización de estudios de viabilidad.

# La reutilización de las aguas regeneradas y biosólidos, base de la economía circular en la cuenca del río La Villa de la República de Panamá.

Valentina Opolenko<sup>1</sup>, Antonia Jiménez Rodríguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC)*

<sup>2</sup>*Universidad Pablo de Olavide (UPO)*

Palabras clave: Agua residual, Riego, Biosólido, Humedal artificial

**Resumen.** El agua es un tema que se ha convertido últimamente en algo complejo y problemático; particularmente, si la demanda global sobrepasa la disponibilidad. A pesar de que Panamá, como país tropical, comparte un ambiente caracterizado por una aparente abundancia de agua, ésta se encuentra distribuida en forma muy desigual, tanto espacial como temporalmente. Precisamente, esta visión errónea de abundancia del agua en el país, ha llevado a un patrón de extracción que no contempla su uso racional y conservación, la preservación de cuencas, ni las necesidades de otros grupos de población en condiciones más vulnerables. Sin duda, la agricultura, por ser uno de los mayores usuarios de agua, seguirá siendo el sector clave para su manejo y también para mantener la seguridad alimentaria en Panamá.

Este alarmante escenario de escasez de agua refleja la situación que confrontan casi todas las cuencas hidrográficas del país en materia de gestión de los recursos hídricos. Por lo tanto, el creciente déficit hídrico obliga a buscar nuevas fuentes no tradicionales de abastecimiento, siendo el agua residual una de ellas. Con respecto al aprovechamiento de las aguas residuales, no es un secreto que el mismo todavía se considera en Panamá como una técnica desconocida por gran parte de la población, debido a la poca difusión existente y conocimientos en general. Esto indica una apremiante necesidad del país de alinearse con las tendencias mundiales en materia de la gestión responsable de recursos hídricos, incluyendo el uso de las aguas residuales y de sus subproductos como biosólidos. En este sentido, para desarrollar lo expuesto es necesario la aplicación de conocimiento científico al recurso hídrico y al medio ambiente que nos permitan caminar hacia una economía circular y un futuro sostenible y eficiente, sin olvidar que el cambio climático nos obliga a replantear el uso de agua regenerada; es decir, gestionarla eficientemente y de manera integral. En cuanto a la reutilización de los fangos biológicos procedentes del proceso de depuración, estos pueden

emplearse, tras su adecuado tratamiento, con fines agrícolas como fertilizantes o para la restauración de suelos degradados.

Para enfrentar los retos planteados y aportar al desarrollo del país, el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), con la cooperación de la Universidad Pablo de Olavide (UPO) de Sevilla y la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), realizaron recientemente como primera etapa la investigación “Potencialidad de uso de aguas servidas para riego y recarga de acuíferos: cuenca del río La Villa” e iniciaron la segunda etapa denominada “Análisis de viabilidad y uso seguro de aguas regeneradas y biosólidos en agricultura y restauración de suelos degradados en la cuenca del río La Villa”, financiada por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT). El área del estudio se localiza en la vertiente del Pacífico de la Península de Azuero y forma parte del Arco Seco de Panamá, reconocido como zona crítica sujeta a intensos procesos de sequías y degradación de suelos. El objetivo principal de esta investigación, es el de evaluar la sostenibilidad y viabilidad de riego y las técnicas de la recarga artificial de acuíferos en la parte baja de la cuenca del río La Villa, mediante el uso de aguas residuales tratadas, así como de lodos procedentes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), localizada en la ciudad de Chitré. La PTAR cuenta con una oferta de recolección y tratamiento de 27 mil m<sup>3</sup>/día de agua y con la posibilidad de ampliación a futuro a 42 mil m<sup>3</sup>/día, potenciales para su posterior recuperación por procesos naturales y uso como fuente alternativa de agua.

La metodología que se aplicó durante la investigación en la primera etapa, fue un análisis multidisciplinario que comprendió el diagnóstico biofísico y socioeconómico del área de estudio, complementado con el desarrollo experimental, lo que facilitó establecer la factibilidad de implementación en Panamá de soluciones tecnológicas como la reutilización directa con fines de riego de aguas depuradas en humedales artificiales tipo subsuperficial (HAFSS) y recarga superficial de acuíferos de manera indirecta, por medio de la infiltración de excedentes durante el riego con estas aguas mejoradas. El estudio consistió en el uso del pasto Alemán (*Echinochloa polystachya*) y del pasto Tanner (*Brachiaria arrecta*), sembrados en módulos experimentales para mejorar la calidad de agua de salida de la PTAR. El trabajo realizado tuvo éxito en su desarrollo, ya que permitió, a través de los análisis del efluente retenido en los módulos experimentales con fines de mejoras, establecer el nivel de remoción de los contaminantes del agua postratada con la ayuda del sustrato y la vegetación seleccionada, que ha sido entre 30 y 50%, quedando sus parámetros fisicoquímicos por debajo de los límites permisibles de la norma nacional vigente para el uso de agua postratada con fines de riego superficial de forrajeras y cultivos no comestibles.

Los resultados de esta investigación indican que al utilizar el agua postratada en humedales artificiales a gran escala, se podrá realizar el riego agrícola durante la

estación seca de unas 780 hectáreas de pasto Tanner, que tiene la capacidad de producir entre 25-30 toneladas de MS/ha/año, con un contenido del 8-10% de proteína, o de pasto Alemán, que genera de 20 a 25 toneladas de forraje verde/corte/ha, con contenidos de proteína entre 10-13%. Y sí se aplica el pastoreo continuo en parcelas, con una rotación cada 28 días, sería factible alimentar con este pasto a unos 30 mil bovinos durante la peor época del año, creando así los beneficios sociales, económicos y ecosistémicos para habitantes de la cuenca. Mientras tanto, la segunda etapa de la investigación ya se inició con la construcción de las parcelas experimentales, siembra de maíz y pasto, así como la caracterización física, química y microbiológica del biosólido, con el fin de establecer la viabilidad de su uso como fertilizante en estas especies.

De esta manera, se puede concluir que el postratamiento de las aguas residuales permite generar un agua con alto valor nutricional apta para el riego agrícola, favorece a la recarga de acuíferos por infiltración de excedentes de este riego, y biosólidos como abonos orgánicos con un gran potencial de uso en la regeneración de suelos degradados. Todo esto sumado a los beneficios adicionales que conlleva el reúso de aguas residuales para la salud humana, el desarrollo y la sostenibilidad ambiental, contribuyendo a una mayor seguridad alimentaria e hídrica de la parte baja de la cuenca del río La Villa, estableciendo, al mismo tiempo, las bases de la estrategia y líneas de actuación de la economía circular en el sector agroalimentario en materia de las aguas depuradas y su reutilización.



## Mejora de la red hidrométrica de manantiales

Carlos González Trabanco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*

Palabras clave: Manantiales, automatización, red de seguimiento, cuantitativo

**Resumen.** El programa de seguimiento del estado cuantitativo de las aguas subterráneas en España está formado por una red piezométrica y por una red hidrométrica de manantiales. La red de seguimiento piezométrico ha sido objeto a lo largo de los años desde su implantación de varios proyectos tanto para la ampliación del número de puntos de control, como para el mantenimiento de los ya existentes y la automatización del proceso de medición de niveles en los mismos. Sin embargo, no ha ocurrido de la misma forma con la red de seguimiento hidrométrico de manantiales.

En la actualidad la Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico ha impulsado un proyecto para la mejora de esta red hidrométrica de manantiales. Este proyecto tiene previsto su comienzo a principios de 2023 y tendrá un horizonte temporal de dos años, siendo su objetivo, automatizar el proceso de medida de caudal en aproximadamente 170 manantiales e integrar estos datos en los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) de las Confederaciones Hidrográficas.

Los trabajos que se llevarán a cabo consisten, en primer lugar, en la adecuación de las secciones de medida mediante la realización de obra civil para la construcción de secciones de aforo, o el acondicionamiento de una sección natural del cauce, de forma que permitan obtener unas buenas condiciones para la medición de las surgencias de aguas subterráneas.

En segundo lugar, se instalarán distintos sensores de telemedida de forma que se automatice el aforo de los manantiales y se posibilite el envío de esta información a los SAIH de las Confederaciones Hidrográficas.

Por tanto, este proyecto supondrá una ampliación la red de seguimiento del estado cuantitativo de las aguas subterráneas, aumentando la cantidad de información proporcionada por esta, y permitiendo de esta manera mejorar la evaluación del estado cuantitativo de las masas de agua subterránea.





## Modelo 2D de flujo y transporte de HCH en el aluvial del río Gállego aguas abajo del vertedero de Sardas (Huesca)

Javier Samper Calvete<sup>1</sup>, Brais Sobral Areán<sup>1</sup>, Luis Montenegro Pérez<sup>2</sup>, Jorge Gómez Pérez<sup>3</sup>, Joaquín Guadaño Corrales<sup>3</sup>

<sup>1</sup>E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UDC. Coruña

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA). UDC. Coruña

<sup>3</sup>EMGRISA, EMPRESA PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES, S.A. Santiago Rusiñol, 12 · 28040 Madrid (España)

Palabras clave: Lindano, Modelos de transporte, Sardas (Sabiñánigo, Huesca)

**Resumen.** El lindano, uno de los isómeros del hexaclorociclohexano (HCH), se utilizó como pesticida en todo el mundo en la segunda mitad del siglo XX. El lindano y varios isómeros del HCH son persistentes en el medio ambiente, se bioacumulan en los organismos vivos y son tóxicos para la salud humana y el medio ambiente. Por ello, han sido incluidos en la lista de contaminantes orgánicos persistentes. La fábrica de lindano de INQUINOSA en Sabiñánigo (España) funcionó desde 1975 hasta 1992. INQUINOSA produjo más de 150.000 t de residuos con alto contenido en lindano, HCH (hexaclorociclohexano) y otros compuestos organoclorados (COCs). Estos residuos, en forma de polvo y líquido, se vertieron de forma incontrolada en el vertedero de Sardas. El vertedero de Sardas se localiza en la margen izquierda del río Gállego, a menos de 500 m del vaso del embalse de Sabiñánigo sobre las margas de Larrés sin impermeabilizar. El vertedero se selló en 1997, aunque de forma deficiente. En el año 2009 se detectó la presencia de fase libre de organoclorados (HCH y otros) en la parcela ubicada al pie del vertedero cerca del embalse de Sabiñánigo y del río Gállego.

Se ha elaborado un modelo 2D en planta de flujo subterráneo en el aluvial del río Gállego en la parte del emplazamiento de Sardas situada entre la presa de Sabiñánigo y la zona situada aguas arriba del puente de la carretera N-330 afectada por la variación de niveles del embalse. El dominio se ha discretizado con una malla 2D de elementos finitos triangulares. Se han calibrado las entradas de agua procedentes de la terraza fluvio-glacial en la margen derecha e izquierda y los coeficientes de goteo de las descargas al embalse de Sabiñánigo y por debajo de la presa. Los resultados del modelo confirman que:

- 1) Las oscilaciones del nivel del embalse producen un efecto marea en los hidrogramas de niveles en el acuífero aluvial
- 2) Las oscilaciones del nivel del embalse se transmiten de forma amortiguada y con un cierto desfase a las oscilaciones piezométricas en las aguas

subterráneas. El desfase y la amortiguación de los niveles atestiguan que el aluvial no está en contacto hidráulico directo con las aguas del embalse de Sabiñánigo. Entre las arenas y gravas del aluvial se interponen los sedimentos de colmatación del embalse y los limos naturales de la terraza.

3) En la cola del embalse, el acuífero descarga al embalse a través de los sedimentos y los limos en situaciones de niveles del embalse medios y bajos. La dirección del flujo cambia transitoriamente durante algunas cuando los niveles del embalse superan los niveles en el acuífero

4) En la zona del embalse situada cerca de la presa de Sabiñánigo, el flujo subterráneo el es siempre desde el embalse hacia el acuífero.

5) El acuífero aluvial descarga aguas abajo en el río Gállego por debajo de la cimentación de la presa.

También, se ha realizado un modelo de transporte de HCH disuelto. El modelo se basa en la hipótesis de que el HCH disuelto está en equilibrio con el HCH sorbido en las fases sólidas del acuífero. La relación de equilibrio entre las concentraciones del HCH disuelto y el HCH en la fase sólida se ha simulado mediante un coeficiente de distribución,  $K_d$ , constante. Se ha comprobado que la aureola de concentración de HCH calculada es muy sensible al coeficiente de distribución. Además, se ha comprobado que, con las hipótesis del modelo actual, el coeficiente de distribución "efectivo" es menor que el determinado por Lorenzo et al. (2020) en el laboratorio sobre muestras de tamaño grueso. El modelo calibrado se ha utilizado para evaluar el flujo másico descarga de HCH disuelto al embalse. El flujo másico descarga es muy sensible al  $K_d$ . Para  $K_d = 10$  L/kg, el flujo másico medio anual de HCH es igual a 2.1 kg/año. Para  $K_d \geq 30$  L/kg el flujo másico es casi nulo. No se dispone de datos medidos de HCH en los sedimentos de colmatación que permitan contrastar estos cálculos. No obstante, los flujos másicos calculados son globalmente coherentes con los flujos másicos de HCH medidos en las aguas de descarga del embalse (a través de un canal de derivación para una central hidroeléctrica) y en el río Gállego aguas abajo en el embalse de Jabarrella.

Agradecimientos: El estudio que se presenta en este informe se ha realizado en el marco de dos contratos de investigación de la Fundación de la Universidad de A Coruña con la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y con la Empresa para la Gestión de Residuos Industriales, S.A., S.M.E., M.P., EMGRISA, adjudicataria del Seguimiento Hidrogeológico del vertedero de Sardas promovido por el Gobierno de Aragón. Se agradece todo el apoyo recibido por parte de los técnicos de la CHE (Javier San Román y Felipe Delgado), del Gobierno de Aragón (Elena Cano y Jesús Fernández) y EMGRISA (Raúl López).

## Modelo 2D para estudiar la posible amenaza de intrusión salina en el acuífero Almonte-Marismas.

Carmen Serrano Hidalgo<sup>1</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>2</sup>, Ana Fernández Ayuso<sup>3</sup>, Javier Heredia Díaz<sup>2</sup>, Francisco Javier Elorza Tenreiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Universidad Politécnica de Madrid. Instituto Geológico y Minero de España*

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

<sup>3</sup>*Universidad Autónoma de Madrid*

<sup>4</sup>*Universidad Politécnica de Madrid*

Palabras clave: Intrusión salina, Modelo densidad variable, SUTRA 3.0, Parque Nacional de Doñana

**Resumen.** El sistema acuífero Almonte-Marismas es una formación detrítica aluvial compuesta por arenas y gravas de origen fluvial, deltaico y marino. En este acuífero se basa la sostenibilidad de los recursos hídricos del Espacio Natural de Doñana. Debido a ello ha sido el objeto de numerosos estudios, pues el papel fundamental que desempeña para los sistemas ecológicos existentes en Espacio Natural se encuentra amenazado por la sobreexplotación que sufre para atender las demandas de riego agrícola y de abastecimiento del enclave turístico de Matalascañas. En este sentido, en agosto del 2020 en el BOE se publicó el riesgo de no alcanzar un buen estado cuantitativo las masas de aguas subterránea de La Rocina, Almonte y Marismas, las tres en los límites del Parque Nacional. Hace casi 30 años se realizaron estudios (Custodio, 1993) que advertían sobre las depresiones del nivel freático en las capas más profundas del acuífero generadas por los conos de bombeo y, en consecuencia, del potencial riesgo de intrusión salina en un futuro próximo.

Si bien hasta el momento no hay evidencias de que se haya producido intrusión marina en la zona de Matalascañas, el objetivo del presente estudio es analizar el riesgo potencial de intrusión debido a las extracciones en el acuífero, tanto las costeras como las agrícolas, y a la posible disminución de la recarga en el marco del cambio global. Para ello se ha representado un modelo conceptual sintético del acuífero en una sección vertical 2D, cuyo dominio abarca parte del Océano Atlántico, la zona turística, y se extiende 4 km tierra adentro. Las simulaciones numéricas se han realizado con un modelo de flujo de densidad variable desarrollado con el código de SUTRA 3.0 (Provost, A.M. and Voss, C.I., 2019) utilizando la interfaz gráfica Modelmuse (Winston, R.B., 2022). Se ha realizado un ajuste de los niveles simulados y medidos en distintos piezómetros. La simulación

realizada refleja que el avance de la cuña de intrusión no llega a la zona de bombeos, lo que corrobora la ausencia de intrusión salina.

## Modelo 3D de flujo en régimen transitorio del vertedero de Sardas (Huesca)

Javier Samper Calvete<sup>1</sup>, [Brais Sobral Areán](#)<sup>1</sup>, Bruno Pisani Veiga<sup>1</sup>, Luis Montenegro Pérez<sup>2</sup>, Jorge Gómez Pérez<sup>3</sup>, Joaquín Guadaño Corrales<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Coruña. Campus de Elviña 15071 A Coruña.*

<sup>2</sup>*Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA). Universidad de Coruña. Campus de Elviña 15071 A Coruña.*

<sup>3</sup>*EMGRISA, EMPRESA PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES, S.A. Santiago Rusiñol, 12 · 28040 Madrid (España)*

Palabras clave: Modelos de flujo, Vertedero, Sardas (Sabiñánigo, Huesca)

**Resumen.** El lindano, uno de los isómeros del hexaclorociclohexano (HCH), se utilizó como pesticida en todo el mundo en la segunda mitad del siglo XX. El lindano y varios isómeros del HCH son persistentes en el medio ambiente, se bioacumulan en los organismos vivos y son tóxicos para la salud humana y el medio ambiente. Por ello, han sido incluidos en la lista de contaminantes orgánicos persistentes. La fábrica de lindano de INQUINOSA en Sabiñánigo (España) funcionó desde 1975 hasta 1992 y produjo más de 150.000 t de residuos con alto contenido en lindano, HCH (hexaclorociclohexano) y otros compuestos organoclorados (COCs). Estos residuos, en forma de polvo y líquido, se vertieron de forma incontrolada en el vertedero de Sardas. El vertedero de Sardas se localiza en la margen izquierda del río Gállego, a menos de 500 m del vaso del embalse de Sabiñánigo sobre las margas de Larrés sin impermeabilizar. El vertedero se selló de forma deficiente en 1997. En el año 2009 se detectó la presencia de fase libre de organoclorados (HCH y otros) en la parcela ubicada al pie del vertedero y a escasos metros del embalse de Sabiñánigo y del río Gállego. En este trabajo se presenta un modelo 3D de flujo del vertedero para simular el flujo en régimen transitorio en el vertedero de Sardas y sus inmediaciones en el periodo comprendido entre el 1/10/2011 y el 07/06/2021. Se ha utilizado el código MODFLOW 6. Las entradas de agua al vertedero se producen en las zonas más bajas de la pantalla perimetral que presenta defectos de construcción. La recarga a través de la capa de cobertera es de menor magnitud que las restantes entradas. Los valores diarios de las entradas de agua se han estimado mediante un modelo hidrológico de balance realizado con el código VISUAL-BALAN. Las salidas de agua del vertedero se producen en forma de flujo subterráneo por debajo de la pantalla frontal a través de la capa más superficial de las margas que está alterada, fracturada y descomprimida, en las zonas más bajas de las cunetas

perimetrales y mediante bombeos cíclicos en un pozo de extracción (pozo S37). Para la calibración de los parámetros del modelo se ha contado con los hidrogramas de niveles medidos en 40 sondeos perforados en el vertedero y sus alrededores, los datos proporcionados por varios ensayos de bombeo con registros de descensos en pozos de observación y los datos de caudales drenados en las cunetas. Los resultados del modelo 3D de flujo en el vertedero de Sardas han permitido confirmar las hipótesis previas sobre los caudales y las principales zonas de entradas y salidas de agua en el vertedero. También ha servido de base para la elaboración de un modelo preliminar de transporte de COCs en el vertedero y la evaluación de posibles soluciones e infraestructuras para la reducción y eliminación de las entradas de agua al vertedero.

Agradecimientos: El estudio que se presenta en este informe se ha realizado en el marco de contratos de investigación de la Fundación de la Universidad de A Coruña con la Empresa para la Gestión de Residuos Industriales, S.A., S.M.E., M.P., EMGRISA, adjudicataria del Seguimiento Hidrogeológico del vertedero de Sardas promovido por el Gobierno de Aragón. Se agradece todo el apoyo recibido por parte de los técnicos de la Confederación Hidrográfica del Ebro (Javier San Román y Felipe Delgado), del Gobierno de Aragón (Elena Cano y Jesús Fernández) y EMGRISA (Raúl López).

## Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero costero Manglaralto en Ecuador

Francisco Javier Montalván Toala<sup>1</sup>, Paul Carrión Mero<sup>2</sup>, Francisco Carreño Conde<sup>3</sup>, Joselyne Solórzano Chauca<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), La Libertad 240204, Ecuador

<sup>2</sup>Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), ESPOL Polytechnic University, Guayaquil P.O. Box 09-01-5863, Ecuador

<sup>3</sup>Department of Biology and Geology, Physics and Inorganic Chemistry, Higher School of Experimental Sciences and Technology, Rey Juan Carlos University, c/Tulipán s/n, 28933 Móstoles, Spain

Palabras clave: Hidroquímica, Isótopos ambientales, Recarga, Intrusión salina

**Resumen.** La cada vez mayor concentración de núcleos de población asentada en las zonas de costa alrededor del mundo, hace que los acuíferos costeros jueguen un papel muy importante para el desarrollo social, económico y ambiental puesto que se está incrementando sensiblemente el consumo de recursos hídricos, con la consiguiente descenso de los niveles piezométricos disminuyan, favoreciendo el avance de la intrusión salina hacia el acuífero. En concreto, la península de Santa Elena (PSE) se encuentra ubicada en la costa central del Ecuador y esta región presenta dos fuentes de abastecimiento de agua: el sur (área urbana) que proviene de la cuenca del río Guayas por el trasvase Daule-Santa Elena; y en el norte, donde es exclusiva de los acuíferos costeros emplazados en el sector. El acuífero libre Manglaralto, está conformado por materiales aluviales del Holoceno, con niveles piezométricos de 1.72 m.s.n.m. en los pozos próximos al mar, a los 23.1 m.s.n.m. en los pozos en el interior de la cuenca. La gestión del agua es administrada por la Junta Administradora de Agua Potable Regional de Manglaralto (JAAPMAN) que posee 12 pozos perforados, abasteciendo a las comunidades de Montañita, Manglaralto, Río Chico, Cadeate, San Antonio y Libertador Bolívar, las que alcanzan aproximadamente 23.586 personas, utilizándose principalmente en abastecimiento urbano. En esta zona su economía se basa en la pesca, el turismo y la gastronomía. El objetivo de este trabajo es proponer un modelo conceptual hidrogeológico por medio de técnicas hidroquímicas, isotópicas e hidrogeológicas para el conocimiento de la dinámica del flujo subterráneo en el acuífero. La metodología utilizada fue la siguiente: i) información base, ii) técnicas de caracterización hidrogeológica, que comprendió estudios hidroquímicos por diagrama de Piper, relación cloruro/bromuro, diagrama de Facies de Evolución Hidroquímica (HFE-D) y caracterización de

isótopos estables ( $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ ), iii) Correlación y propuesta de modelo conceptual. Los resultados indican la presencia de la intrusión salina en el acuífero, procesos de mezcla e intercambio iónico. La caracterización del acuífero establece el posible funcionamiento dinámico de los flujos subterráneos que discurren en la cuenca. Los resultados de isótopos estables  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ , indican que la recarga se da por infiltración de la precipitación en las terrazas aluviales de gravas y arenas que conforman el acuífero, proponiendo que el agua del acuífero es de distintos eventos de precipitaciones, que se mezclan en el trayecto del flujo. También, parte del agua que se infiltra se evapora en la zona no saturada. Los estudios hidroquímicos muestran que durante la época de recarga, el acuífero se refresca produciendo procesos de intercambio catiónico directo, con ello que aguas de tipo cálcico pasen a sódico. La intrusión de agua de mar, estaría presente en los pozos más próximos a la costa, esto por el tipo de agua que presentan (Ca-Cl), debido en mayor medida a la explotación excesiva para abastecimiento de la población. A todo esto, hay que sumar que en el borde de la costa, donde se asienta la población, los pozos sépticos tienen fugas, que hacen que con el proceso de intrusión el agua de mar, se mezclen las aguas residuales con el agua del subsuelo, aumentando la contaminación de los recursos hídricos disponibles.



# Modelo de flujo del ATDM: Gestión de la explotación de aguas subterráneas y mejora del conocimiento del acuífero

Isabel Martínez<sup>1</sup>, Raúl Nogueras<sup>1</sup>, José Antonio Iglesias<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Canal de Isabel II

Palabras clave: Modelización, ATDM, Canal de Isabel II, Pozos

**Resumen.** Canal de Isabel II (CYII) cuenta con una red de control piezométrico distribuida a lo largo del Acuífero Terciario Detrítico de Madrid (ATDM) y del Acuífero Cretácico de Torrelaguna (ACCT) compuesta por 68 piezómetros que permite controlar el comportamiento hidrogeológico de las masas de agua subterráneas en las que CYII dispone de concesiones de agua distribuidas en 73 pozos.

Los pozos y piezómetros se encuentran equipados con sensores piezorresistivos que comunican con el sistema de telecontrol de CYII, y pueden ser consultados desde la aplicación interna NOVATA. La frecuencia de adquisición de datos se realiza cada 2 minutos lo que permite tener control de los niveles dinámicos del acuífero cuando los pozos entran en funcionamiento.

Toda la información obtenida por los sensores de los pozos (volumen, caudal, nivel, energía, temperatura...) se almacena con frecuencia diaria en la base de datos de aguas subterráneas, cuyo nombre es TEXAS. Esta herramienta permite consultar y descargar datos con históricos almacenados desde hace casi 25 años. Esta base de datos ha permitido la construcción de un modelo de flujo del ATDM que permita realizar diferentes escenarios de simulación de explotación de aguas subterráneas. El modelo es una herramienta de ayuda a la toma de decisión en la gestión de los recursos hídricos.

El modelo tiene una extensión de 4.000 km<sup>2</sup>, se ha elaborado con el software comercial Visual Modflow Flex y para su construcción se ha recopilado información interna, estudios hidrogeológicos, informes constructivos de pozos y piezómetros de CYII, información abierta de diferentes organismos públicos: Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT), Instituto Geográfico Nacional (IGN) o el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO) entre otros. Con carácter anual el modelo es revisado, actualizado y recalibrado con los puntos de control existentes.

Este modelo permite conocer la hidrodinámica del acuífero en las tres masas de agua de la Comunidad de Madrid. El principal reto radica en el mantenimiento anual del mismo y en el incremento del conocimiento de los niveles del acuífero en aquellas zonas en las que no hay información a partir de la construcción de

nuevos piezómetros y con ayuda de imágenes satelitales que permitan inferir las variaciones temporales del nivel piezométrico.

# Modelos de Inteligencia Artificial como herramientas de alerta temprana para la gestión de los recursos hídricos

Aitor Iraola<sup>1</sup>, Maria Pool<sup>1</sup>, Albert Nardi<sup>1</sup>, Agustí Figueras<sup>2</sup>, Ester Aguilera<sup>1</sup>, Ester Vilanova<sup>1</sup>, Jorge Molinero<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*ABM Consulting*

Palabras clave: Machine Learning, Redes neuronales convolucionales, Redes neuronales recurrentes

**Resumen.** La aplicación de métodos de inteligencia artificial y algoritmos de machine learning (ML) ha experimentado un gran auge en muy diversas aplicaciones prácticas, y el ámbito de las aguas subterráneas no es ajeno a dichos desarrollos. Estos algoritmos son muy eficientes para extraer información contenida en series de datos y predecir la evolución de fenómenos de interés para la práctica medioambiental en general e hidrogeológica en particular. En este estudio se presentan dos aplicaciones de modelos de ML a escala de cuenca que permiten definir plataformas de alerta temprana para la gestión de los recursos hídricos. En primer lugar, se presenta un modelo basado en redes neuronales convolucionales con una arquitectura encoder-decoder, estructura que se utiliza para abordar problemas de reconstrucción de imágenes y captura de patrones. Dicho modelo, entrenado y validado mediante grandes bases de datos generadas por modelos hidráulicos convencionales, permite predecir las zonas de mayor probabilidad de avenidas e inundaciones ante eventos de precipitación máxima en un tramo del río Segre. El cálculo se puede efectuar a partir de hidrogramas teóricos, de datos en tiempo real o incluso en base a las predicciones meteorológicas disponibles. La segunda aplicación se basa en el desarrollo de una herramienta de alerta temprana para detectar episodios de contaminación en el río Llobregat. El modelo desarrollado se basa en algoritmos de redes neuronales recurrentes que permiten generar memoria a partir de datos temporales secuenciales. Dicho algoritmo se ha entrenado y validado mediante series de datos históricos y permite predecir la salinidad del río Llobregat cerca de su desembocadura (San Joan d’Espí) a partir de los datos de caudales en el río en la parte alta de la cuenca. El modelo presentado es capaz de reproducir con alta precisión y baja incertidumbre toda la serie histórica muestreada (con errores relativos menores al 5%) presentando una alta capacidad para predecir eventos de contaminación en el río con tiempos de anticipación de 24 horas, conformando de esta manera una herramienta de alerta temprana.



# Nuevas herramientas informáticas para la interpretación y gestión de variables hidrogeológicas

Luis Moreno Merino<sup>1</sup>, Héctor Aguilera Alonso<sup>1</sup>, Almudena de la Losa Román<sup>1</sup>, Amalia Romero Prados<sup>1</sup>

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

Palabras clave: software hidroquímica, interpretación ensayos infiltración, Machine learning

**Resumen.** El progreso tecnológico, la reducción del costo del instrumental y técnicas analíticas, la diversificación de las fuentes de datos (satélites, sensores remotos, etc.) junto al crecimiento de la capacidad de almacenamiento de las bases de datos y el acceso cada vez más sencillo a las mismas ha tenido como consecuencia un crecimiento exponencial en la información hidrogeológica disponible. Una de las líneas de trabajo del grupo de Investigación HYGLO-Lab (Hidrogeología Ambiental y Cambio Global) del CN-IGME (CSIC) se centra en el desarrollo de nuevas herramientas para el análisis gráfico, cartográfico y estadístico de este tipo de información. El desarrollo comenzó con el software INAQUAS que permite el cálculo de parámetros hidroquímicos y la realización de gráficos en una hoja de datos Excel. Con el tiempo, este tipo de herramienta se ha demostrado insuficiente para analizar bases de datos extensas, lo que ha dado pie al desarrollo de utilidades como D-Piper que muestra la densidad de distribución de los análisis en el diagrama de Piper y permite así representar conjuntos de análisis de cualquier tamaño. En esta línea está en desarrollo la aplicación Q-Facies que transforma la facies de conjuntos de análisis en una variable continua y con ello, posibilita analizar la evolución espacial o temporal de las facies de forma cuantitativa. En el campo del estudio de la zona no saturada (ZNS) se está desarrollando la herramienta R-Infiltrometry, cuya principal aplicación es la visualización e interpretación de test de permeabilidad de la ZNS mediante infiltrómetros de anillo sencillo. La combinación de los ensayos de infiltración con herramientas basadas en machine learning (redes neuronales artificiales) y geoestadística, ha permitido ampliar la información proporcionada por los ensayos puntuales y elaborar mapas de conductividad hidráulica saturada del suelo en la zona del Pla de Sant Jordi (Mallorca) con aplicación en la gestión y planificación del uso del suelo de forma mucho más eficaz y económica que los métodos tradicionales. Por otro lado, el machine learning también se ha empleado con éxito para encontrar relaciones y patrones en conjuntos de datos

hidroquímicos con los que la estadística convencional no lo hacía, por ejemplo, en la discriminación de aguas emvasadas y aguas subterráneas de abastecimiento. Todas las herramientas y aplicaciones anteriormente descritas están publicadas o en proceso de estarlo, y son de libre distribución y uso: D-Piper y Q-Facies (programados en lenguaje Python), INAQUAS y R-Infiltrometry (implementados en hojas de cálculo Excel) y los modelos de machine learning (implementados en R y Python).

## Optimización de redes de control piezométrico mediante cluster de series temporales

Mara Meggiorin<sup>1</sup>, [Nuria Naranjo-Fernández](#)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ramboll Italy Srl. Viale Edoardo Jenner, 53, 20159 Milano MI, Italia.

<sup>2</sup>Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). Edificio de Investigación Ada Byron. Módulo B, 1ª Planta. C/Arquitecto Francisco Peñalosa, 18. 29590 Málaga y Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid (UCM). Calle de

Palabras clave: Cluster, optimización de red de control, Piezometría, series temporales

**Resumen.** La existencia de redes de control eficientes en sistemas acuíferos a escala regional es esencial para asegurar tanto la gestión apropiada de los recursos hídricos subterráneos como su calidad y protección. La aplicación de técnicas estadísticas avanzadas que estudien en profundidad las series temporales de piezometría recogidas por estas redes de control pueden aportar información muy valiosa sobre la evolución de la piezometría en el tiempo. Además, mediante sus análisis en profundidad es posible detectar la redundancia en los datos que se obtienen de las mismas.

La metodología propuesta ha sido aplicada en un acuífero de unos 600 km<sup>2</sup> situado en la llanura del Véneto (Noreste de Italia). Se trata de un acuífero libre que presenta áreas caracterizadas por intercalaciones que generan un comportamiento de acuífero multicapa. Posee una red de control de 59 sensores que han sido tratados a través del paquete tsclust de R para realizar un cluster de series temporales. Se han reconocido patrones redundantes en 30 de los 59 sensores, es decir, sensores que registran la misma variación en los niveles piezométricos del acuífero (variabilidad temporal similar). De estos resultados se puede deducir que se podrían reducir a la mitad los sensores necesarios para dar soporte a la red de control piezométrico en este caso de estudio. Los sensores redundantes podrían ser redistribuidos espacialmente llegando a conseguir una optimización máxima del diseño y de los recursos ya existentes en una red, además de tener la posibilidad de conocer la respuesta del acuífero en zonas que no habían sido monitoreadas previamente.

Las ventajas principales obtenidas de la aplicación del cluster de series temporales han sido: (i) la metodología utilizada es gratuita y de libre acceso, estando disponible para su aplicación en otras zonas de estudio, (ii) el potencial ahorro en recursos económicos y (iii) brindar la posibilidad de, o bien replanificar

especialmente los sensores de la red de control, o bien eliminarlos, evitando la duplicidad de información.

Del desarrollo de este trabajo se extrae como principal reflexión que mediante la aplicación de herramientas estadísticas avanzadas, que no suponen una inversión económica, cabe la posibilidad de optimizar al máximo una red de control piezométrica que ya posea una trayectoria de medidas temporales suficientes. Se destaca que una red de control debe ser un sistema vivo, dinámico y flexible, que permita la reubicación espacial de los sensores con la finalidad de obtener la mejor caracterización posible del comportamiento del acuífero objeto de estudio.



## Origen hidrogeológico del agua mineral rica en CO<sub>2</sub> de Vilajuïga (Pirineos Orientales, Alt Empordà)

Josep Mas-Pla<sup>2</sup>, David Brusi<sup>1</sup>, Carles Roqué<sup>1</sup>, David Soler<sup>1</sup>, Anna Menció<sup>1</sup>, Josep M. Costa<sup>1</sup>, Manel Zamorano<sup>1</sup>, Warren Meredith<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Centre de Recerca en Geologia i Cartografia Ambiental (Geocamb), Universitat de Girona*

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

Palabras clave: Agua rica en CO<sub>2</sub>, Vilajuïga, Pirineos orientales

**Resumen.** El agua mineral de Vilajuïga (Pirineos Orientales, Alt Empordà) debe su singularidad a una emanación de CO<sub>2</sub> geogénico que modifica la hidroquímica de las aguas subterráneas para producir un tipo de agua subterránea única en este entorno geológico de reconocido valor patrimonial. En esta comunicación se presenta el modelo hidrogeológico conceptual de este manantial cuya existencia se asocia a la intersección de dos elementos estructurales: la falla de la Valleta y la falla de Garriguella-Roses. El primero proporciona el cabalgamiento de rocas metamórficas sobre rocas ígneas. Esta estructura aprovecha un nivel de pizarras ampelíticas que, desde una perspectiva hidrogeológica, actúan como una capa confinante. La falla normal de Garriguella-Roses originada durante el Neógeno permite el ascenso de CO<sub>2</sub> geogénico asociado a vestigios de la actividad volcánica neógena. La mezcla de agua subterránea de ambas unidades hidrogeológicas de rocas metamórficas e ígneas, más la presencia local de CO<sub>2</sub>, origina un agua subterránea de facies HCO<sub>3</sub>-Na que aún mantiene CO<sub>2</sub> libre en solución. La interacción con la fase gaseosa está restringida en la intersección de las dos fallas. La datación por radiocarbono, después de corregir el efecto del carbono geogénico, estima una edad de 8.000 años BP. Sin embargo, su bajo contenido en tritio (0,7 UT) indica que el agua de Vilajuïga es una mezcla de agua subterránea "más antigua" recargada en las rocas metamórficas de la Serra de la Albera y "más joven" de las rocas ígneas de la Serra de Rodes, sobre un área de recarga conjunta de unos 45 km<sup>2</sup> y una altitud máxima de 600 m snm, según datos piezométricos e isotópicos.

Financiación. - Aigües Minerals de Vilajuïga, SA, firma del Grupo Grifols.



## Presencia y aislamiento de bacterias degradadoras de atrazina en un sistema acuífero-lagunar hipersalino.

Paula Sánchez Olivares<sup>1</sup>, Yolanda Espín Montoro<sup>1</sup>, Gustavo Martínez-Couque<sup>1</sup>, Beatriz Toledo<sup>1</sup>, Zaira Castellanos<sup>1</sup>, José Antonio Fernández-Pérez<sup>1</sup>, Manuel Álvarez-Ortí<sup>1</sup>, Juan José Gómez-Alday<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Castilla-La Mancha

Palabras clave: Aislamiento, Atrazina

**Resumen.** El área de estudio, la laguna de Pétrola, es uno de los humedales hipersalinos más representativos de Castilla-La Mancha y constituye un punto clave de biodiversidad. En consecuencia, se le ha conferido diversas figuras de protección regionales, nacionales e internacionales, tales como Lugar de Importancia Comunitaria (Unión Europea, 1997), Zona de Especial Protección de Aves (ES0000153) y Reserva Natural (DOCM 26/2003). El sistema acuífero-laguna hipersalina está ubicado en una cuenca endorreica, la cual se extiende hasta los 43 km<sup>2</sup>. La laguna, con una extensión de unos 2 km<sup>2</sup> en aguas altas, forma la zona de descarga de un acuífero libre desarrollado en depósitos fundamentalmente terrígenos de edad Cretácico inferior. La agricultura es el principal uso del suelo (75%) de la cuenca. Una parte de los fertilizantes y pesticidas aplicados pueden alcanzar la masa de agua a través de la escorrentía superficial y subterránea. En la zona de estudio se ha detectado el pesticida atrazina, una sustancia prioritaria, a pesar de estar prohibido en España hace 15 años. El herbicida atrazina se ha usado amplia y globalmente, aunque se ha demostrado que su persistencia, solubilidad, movilidad y su consideración de disruptor endocrino lo lleva a ser una amenaza para la contaminación de las masas de aguas y el mantenimiento de los ecosistemas. En el sistema acuífero-lagunar de estudio se han alcanzado concentraciones de atrazina de hasta 195,01 ng/L (noviembre 2019), en las aguas superficiales, y hasta 264,43 ng/L (abril 2018) en arroyos que drenan el acuífero. En la degradación de la atrazina tiene predominancia los procesos biológicos, tales como la biorremediación enzimática mediada por microorganismos que en ocasiones operan en entornos pobres en nutrientes, como las aguas subterráneas. La exposición prolongada de los microorganismos a compuestos xenobióticos puede conducir a la adaptación de su mecanismo metabólico, portando así genes encargados en la degradación de contaminantes orgánicos. El objetivo de este trabajo es el aislamiento de bacterias degradadoras de atrazina presentes en las aguas subterráneas y superficiales del sistema acuífero-lagunar

de Pétrola, a través de un medio de cultivo selectivo enriquecido con atrazina y/o citrato de sodio. Para ello, se recolectó de forma estéril agua subterránea y superficial utilizando, en el primero caso, un piezómetro surgente situado en el vaso lagunar con la zona de admisión a 38 m de profundidad. Posteriormente, se llevó a cabo una incubación durante 47 días de 5 mL de agua subterránea en 45 mL de medio de cultivo "atrazine-mineral-salt" (AMS) modificado. La concentración de atrazina se monitorizó periódicamente mediante submuestras de 3 mL y su análisis en un cromatógrafo de gases 7890B con detector de masas 5977A (Agilent, EEUU).

Se sembraron 100 µL de cultivo, por triplicado, en placas con medio de cultivo AMS sólido (adicionando 15 g/L de agar bacteriano). El crecimiento bacteriano se controló a diario. Las bacterias visualmente diferentes se aislaron hasta conseguir su cultivo puro. La extracción de ADN se realizó mediante un protocolo modificado de fenol:cloroformo:alcohol isoamílico para la posterior amplificación por PCR del gen ARNr 16S. Los amplicones purificados se enviaron para su secuenciación (Macrogen, Madrid). Tras cada aplicación, se controló la calidad y pureza de los productos resultantes mediante electroforesis y espectrofotometría. Las secuencias obtenidas se procesaron para eliminar regiones de baja calidad, se contrastaron con las bases de datos de referencia de bacterias a través de la herramienta BLASTn y, finalmente, se identificaron taxonómicamente.

La metodología aplicada permitió la identificación de bacterias degradadoras de atrazina. En función del porcentaje de similitud obtenido por las secuencias se pueden consolidar el taxón de especie (>98,65%), género (>97%) y familia (<97%). En el agua subterránea se han encontrado las especies *Bradyrhizobium embrapense* y *Brevundimonas aurantiaca*. Además, se ha encontrado una bacteria similar a *Paracoccus chinensis*. En el agua superficial se han identificado dos especies, *Stenotrophomonas rhizophila* y *Pseudomonas chloritidismutans*. En este caso, se han encontrado tres bacterias similares a *Bradyrhizobium embrapense*, *Fusobacterium periodonticum* y *Brevundimonas kwangchunensis*. Las bacterias con menor similitud se pueden considerar como nuevas cepas.

Los resultados obtenidos permiten pensar en la existencia de procesos de biodegradación de atrazina en el sistema a través de bacterias que se han adaptado a la utilización de este contaminante como fuente de carbono y nitrógeno. El estudio de estas bacterias puede contribuir a la mejora de procesos empleados en tecnologías de biorremediación de aguas contaminadas.

## Primeros avances en la metodología para la identificación de la fuente de alimentación histórica de humedales secos

Javier Heredia Díaz<sup>1</sup>, Luis Moreno Merino<sup>1</sup>, Héctor Aguilera Alonso<sup>1</sup>, África de la Hera Portillo<sup>1</sup>, Rosa Mediavilla López<sup>1</sup>, Miguel Llorente Isidro<sup>1</sup>

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

Palabras clave: Humedales secos, Hidroquímica, Sedimentos, Cuenca del Duero

**Resumen.** Existen humedales temporales, con hidroperíodos extensos, o en los que la explotación de los recursos hídricos ha afectado sustancialmente su esquema natural de alimentación de forma que habitualmente se encuentran secos. En mucho de estos casos no se cuenta con registros históricos de niveles de agua libre o piezométricos. La conjunción de estos dos factores, humedales secos y falta de datos, dificulta, cuando no imposibilita, identificar su fuente de alimentación histórica: las aguas subterráneas, en el caso de humedales hipogénicos, o la escorrentía superficial, en los epigénicos o en los mixtos. Este hecho va en detrimento de una gestión de los recursos hídricos ambientalmente consistente, cuando la toma de decisiones tiene como objetivo recuperar la funcionalidad hídrica de los humedales.

En pos de solventar las dificultades señaladas, se está desarrollando una metodología que permita, de forma simple, económica y rápida, determinar si un humedal actualmente seco es, o ha sido, epigénico, hipogénico o mixto. La metodología se basa en el análisis de la composición iónica del extracto en agua del sedimento que forma el lecho del humedal y de los sedimentos recogidos en un punto topográficamente elevado de su entorno, fuera de la cubeta. Las muestras de suelos en ambos emplazamientos se toman a diferentes niveles (10 cm, somero, y 20 cm, profundo). La similitud y/o la diferencia iónica entre las cuatro muestras permite inferir la fuente de alimentación del humedal. Al identificar la fuente de alimentación de un humedal, se puede plantear con cierta consistencia una hipótesis -a grandes rasgos- sobre el patrón de flujo "histórico", haya sido éste natural o antrópico.

La metodología se esbozó conceptualmente en el marco del Proyecto europeo NAIAD (NAture Insurance value: Assessment and Demonstration, No. 730497), ya finalizado. En 2020 se tomaron muestras de sedimentos en 16 lagunas de la MASb de Medina del Campo (cuenca del Duero) para probar la consistencia y viabilidad de la metodología. En el 75 % de ellas, el análisis de la composición aniónica y catiónica coincide en la conclusión sobre el origen de los aportes. En el 19 % de las lagunas restantes, aniones y cationes indican aportes diferentes, y en sólo una

laguna se obtiene un resultado disímil. Los resultados son coherentes con los modelos conceptuales de circulación del flujo de la MASb de Medina y con la dinámica de los nitratos de origen agrícola en el entorno de las lagunas. La coherencia encontrada ha permitido validar, en una primera aproximación, la metodología propuesta. En futuros trabajos se espera poder acrecentar el número de lagunas muestreadas y contrastar esta metodología con otras ya establecidas.

## Recarga gestionada en un acuífero detrítico costero con agua regenerada mediante balsas de infiltración en Marbella (Málaga, España): proyecto LIFE Matrix

Sara Espinosa Martínez<sup>1</sup>, Juan Antonio Barberá Fornell<sup>2</sup>, Lucía Sánchez<sup>2</sup>, Belén Miranda<sup>3</sup>, Javier Iniesta<sup>3</sup>, Beatriz de la Loma<sup>4</sup>, Manuel Argamasilla Ruiz<sup>1</sup>, Sergio Martín<sup>3</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Cetaqua Andalucía. C/ Severo Ochoa, 7, 29590 - Málaga (España).*

<sup>2</sup>*Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). C/Arquitecto Francisco Peñalosa, 18. Campus Teatinos, 29010-Málaga (Spain).*

<sup>3</sup>*ACOSOL (Empresa pública de aguas de la Mancomunidad de Municipios de la Costa del Sol) N-340, Km. 190,7, 29604 Marbella*

<sup>4</sup>*Cetaqua Barcelona. Ctra. d'Esplugues, 75, 08940 Cornellà de Llobregat*

Palabras clave: Recarga Gestionada de Acuíferos, Estrés hídrico, Agua Regenerada, Gestión del Riesgo

**Resumen.** En la última década, las sequías se han vuelto más frecuentes en la UE, donde más de un tercio de su territorio está experimentando estrés hídrico, particularmente intenso en aquellas regiones con demandas estacionales que comprometen la disponibilidad de recursos hídricos de origen natural. La recarga gestionada de acuíferos con aguas regeneradas tiene claros beneficios, entre los que se incluyen algunos como la reducción de gases de efecto invernadero (si se compara con otras técnicas, dado el menor consumo energético), así como la mejora de la calidad y la cantidad del agua subterránea. No obstante, la recarga con este tipo de aguas puede llegar a ser compleja en cuanto a su implantación, en función de su calidad y la incertidumbre sobre el riesgo sobre los usos finales de la misma, ya que no existen límites estandarizados en la UE.

El proyecto LIFE Matrix pretende demostrar la viabilidad técnica, medioambiental y sanitaria de la recarga gestionada de acuíferos con agua regenerada mediante balsas de infiltración para incrementar la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos y mejorar el estado de las masas de agua subterránea en el contexto de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) en zonas con estrés hídrico.

La solución Matrix propuesta consiste en la combinación de tres componentes: físico, digital y de gobernanza, cuyos objetivos principales son: (1) validar la solución técnica para la recarga de acuíferos mediante balsas de infiltración que combinan tecnologías basadas en la capacidad del medio natural y en el tratamiento adicional del agua ("nature based solutions"); (2) integrar toda la

información resultante en un sistema de soporte a la decisión (SSD) para la gestión del riesgo sanitario y medioambiental, la estimación del impacto socio-económico y la optimización de la operación del sistema de recarga; y (3) desarrollar guías metodológicas estableciendo directrices que contribuyan estandarizar este sistema de recarga con agua regenerada bajo un marco legal o regulatorio nacional y europeo.

El área piloto se encuentra en la EDAR La Víbora (Marbella). Esta zona está sometida a estrés hídrico con un Índice de Explotación del Agua de 1,3 y el consumo de agua llega a duplicarse e, incluso, triplicarse en época estival debido al turismo. En Marbella únicamente el 10% del agua residual depurada es reutilizada, por lo que existe un gran potencial para impulsar la recarga gestionada de acuíferos con aguas regeneradas, lo que permitirá a su vez reducir la dependencia de otros recursos hídricos alternativos, con la consiguiente disminución de los costes energéticos y emisiones de gases de efecto invernadero asociados.



## Relación entre el la dinámica de gases y las aguas de goteo en la cueva del Rull (Vall d'Ebo, Alicante)

María Candela Ruiz<sup>1</sup>, Concepción Pla<sup>2</sup>, Sara Gil Oncina<sup>1</sup>, Noé García Martínez<sup>1</sup>, David Benavente<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante.*

<sup>2</sup>*Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante.*

Palabras clave: Cueva, Karst, Alicante, Geoquímica

**Resumen.** Los sistemas kársticos se desarrollan sobre rocas solubles, principalmente carbonatos. Su formación se debe a la elevada solubilidad de los carbonatos en aguas naturales y a la presencia de una porosidad secundaria altamente desarrollada que favorece el drenaje subterráneo. En el ambiente vadoso somero, o epikarst, predominan los procesos de infiltración de agua, responsables de la formación de las cavidades kársticas, o cuevas, entendidas como macroporos desarrollados por procesos de disolución en las matrices carbonatadas. Las cuevas están separadas de la atmósfera exterior por el sistema suelo – roca. Se caracterizan por presentar una alta estabilidad microclimática y constituyen un sistema geoquímico en el que interaccionan las fases líquida, sólida y gaseosa (interacción agua–roca–aire).

La cueva del Rull se ubica en Vall d'Ebo (noreste de la provincia de Alicante) y su roca encajante está compuesta por materiales conglomeráticos pertenecientes al Mioceno superior, que constituyen el relleno del valle en que se encuentra el pueblo de Vall d'Ebo. Es una cueva que cuenta con una superficie aproximada de 1535 m<sup>2</sup> y con distintos niveles de altura. Las condiciones de la atmósfera dentro de la cueva definen, en un ciclo anual, dos estados diferenciados marcados por la magnitud de los procesos de ventilación y difusión gaseosa que actúan a través del sistema suelo – roca que separa la atmósfera exterior de la atmósfera interior de la cueva. En invierno, el CO<sub>2</sub> y <sup>222</sup>Rn en la cueva alcanzan concentraciones mínimas (450 ppm y 400 Bq/m<sup>3</sup>, respectivamente) mientras que en verano estas concentraciones aumentan en un orden de magnitud para ambos gases. Además, en el interior de la cueva, la relación entre la dinámica gaseosa y la variación de los parámetros hidrogeoquímicos se hace evidente a lo largo del ciclo anual.

La cueva del Rull tiene goteos activos de intensidad variable cuya actividad está vinculada con la ocurrencia de precipitaciones. El agua procedente de los goteos tiene naturaleza bicarbonatada cálcica, consecuencia de la interacción agua – roca como principal agente de control. La concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en el

agua de goteo varía en función de la concentración del CO<sub>2</sub> del aire de la cueva, que, dentro de un ciclo anual, alcanza los máximos valores entre junio y septiembre. Además, la variación de la actividad de <sup>222</sup>Rn disuelto en las aguas de goteo, medida mediante cámara de ionización, también responde a la evolución de la dinámica atmosférica de la cueva.

El objetivo de este estudio es incorporar la variable hidrológica al estudio de la cueva del Rull, para comprender de manera integral el efecto de la dinámica de los gases presentes en el interior de la cueva sobre el agua, y su posible papel como agente de transporte de iones en solución.

# Renaturalización de aguas deterioradas mediante recarga artificial de acuíferos: logros y desafíos futuros

Cristina Valhondo<sup>1,3</sup>, Jesús Carrera<sup>1,3</sup>, Lurdes Martínez-Landa<sup>2,3</sup>, Silvia Díaz Cruz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, CSIC, Barcelona*

<sup>2</sup>*Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, UPC, Barcelona*

<sup>3</sup>*Unidad Asociada, Grupo de Hidrología subterránea UPC-CSIC, Barcelona*

Palabras clave: Recarga Gestionada de Acuíferos, Reutilización, Gestión recursos hídricos, Renaturalización

**Resumen.** El crecimiento de la población mundial y el cambio climático han producido un incremento en el uso del agua. En este marco, el desajuste espacial y temporal entre la oferta y la demanda es el responsable de la grave escasez en la que se encuentran regiones áridas y semiáridas. El único recurso realmente disponible en muchas de estas regiones es el agua subterránea, por lo que su uso ha aumentado considerablemente desde la década de 1960, generando descensos en los niveles. Estos descensos llevan asociados efectos adversos tales como intrusión marina, pérdida de las funciones ecológicas de ecosistemas asociados a aguas subterráneas, y/o problemas de subducción del terreno.

Es evidente que en la gestión de los recursos hídricos es necesario incluir la reutilización del agua, ya que “la sociedad ya no puede darse el lujo de usar el agua una sola vez”. Sin embargo, para la reutilización del agua es necesario garantizar una calidad que no se obtiene mediante los tratamientos convencionales, y garantizarla, además, a ser posible, mediante tratamientos naturales que no requieran el uso de productos químicos y que no la generen residuos adicionales.

En este contexto, la recarga artificial de acuíferos (RA) se posiciona como una opción cada vez más realista porque aumenta los recursos hídricos subterráneos disponibles y mejora de la calidad del agua de recarga. Las fuentes de agua habituales para la recarga artificial (efluentes secundarios o terciarios de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs), y ríos afectados por dichos efluentes) presentan una calidad inferior a las aguas subterráneas. La calidad del agua recargada mejora durante su paso por el suelo y se reducen los sólidos en suspensión, los nutrientes, los patógenos, la materia orgánica y algunos contaminantes orgánicos emergentes, tales como fármacos y productos de cuidado personal. Los principales procesos que intervienen en esta mejora del agua recargada son la adsorción y la biodegradación. Numerosos factores pueden afectar a estos procesos, aunque muchos de ellos escapan al posible control y

manipulación. Sin embargo, ambos procesos pueden favorecerse con la instalación de barreras reactivas en las balsas de infiltración.

Al devolver el agua a los ciclos hidrológicos naturales, la recarga artificial aborda no solo la escasez de agua, sino también la recuperación de los servicios ambientales de los cuerpos de agua superficiales que dependen de la descarga de aguas subterráneas. Pero, para garantizar el éxito en la implementación de proyectos de recarga artificial es necesario contar con una buena acogida de la opinión pública y poder garantizar la reducción de contaminantes emergentes tales como la resistencia antibiótica.

## Replicas a escala piloto de sistemas de recarga artificial para el tratamiento de efluentes de depuradora

Lurdes Martínez-Landa<sup>1,3</sup>, Cristina Valhondo<sup>2,3</sup>, Albert Contreras<sup>2</sup>, Gerard Quintana<sup>2</sup>, Silvia Díaz Cruz<sup>2</sup>, Jesús Carrera<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, UPC, Barcelona*

<sup>2</sup>*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, CSIC, Barcelona*

<sup>3</sup>*Unidad Asociada, Grupo de Hidrología subterránea UPC-CSIC, Barcelona*

Palabras clave: Recarga Gestionada, Acuíferos, Barreras Reactivas, Renaturalización

**Resumen.** El aumento de población lleva asociado un incremento en la demanda de agua que requiere el desarrollo de estrategias medioambientalmente sostenibles enfocadas a la reutilización. La recarga artificial de acuíferos (MAR) a través de balsas de infiltración mejora la calidad del agua recargada e incrementa los recursos hídricos, por lo que su aplicación (con fines diversos) está en aumento.

Los estudios de sistemas MAR con diferentes fines, características y condiciones son muchos y variados. En la mejora de la calidad del agua recargada intervienen varios procesos que pueden estimularse mediante la instalación de barreras reactivas en las balsas de infiltración. Las barreras reactivas diseñadas con este fin consisten en una mezcla de sedimentos del acuífero, materia orgánica de origen vegetal y otros componentes minoritarios, que favorecen diversos mecanismos de retención y el desarrollo de comunidades microbianas que degradan un amplio rango de contaminantes. Para estudiar el papel de este tipo de barreras reactivas en la mejora de la calidad del agua recargadas se construyeron 6 réplicas de sistemas de tratamiento suelo-acuífero (SAT) en una EDAR. Cada sistema tiene una superficie de recarga de 3.5 m<sup>2</sup> situada sobre un acuífero de 1.5 m de profundidad, 15 m de longitud y 2.3 m de anchura. Los sistemas se alimentan con el efluente del tratamiento secundario de la EDAR. Estos sistemas se pusieron en marcha en enero de 2018 y estuvieron funcionando hasta noviembre de 2020. Durante estos 3 años se realizaron 9 períodos de recarga, en los que se recargó un promedio de 900 m<sup>3</sup> por sistema, y un total de 13 campañas de muestreo para controlar la evolución de la calidad del agua recargada a lo largo de los sistemas en base a datos de cationes y aniones mayoritarios, contaminantes orgánicos emergentes, patógenos, toxicidad y resistencia antibiótica. Además se muestreó el material de las barreras reactivas, tras tres años de operaciones, para estudiar

la retención de contaminantes y su papel a la hora de favorecer el desarrollo de comunidades microbianas.

Todos los sistemas han demostrado ser eficientes en la eliminación de contaminantes y retención de indicadores patógenos. La presencia de barreras reactivas favorece la eliminación de contaminantes emergentes y modifica las comunidades microbianas presentes en el medio, sin embargo no repercuten significativamente sobre la retención de indicadores de patógenos.

Agradecimientos:

Al ACA por el proyecto RESTORA (ACA210/18/00040), a la Agencia Española de Investigación Proyecto Severo Ochoa (CEX2018-000794-S), al Ministerio de Ciencia e Investigación por el proyecto MONOPOLIOS (RTI2018-101990-B-100, MINECO/FEDER), así como el water JPI MARADENTRO (PCI2019-103603 y PCI2019-103425), y al AGAUR-SGR2017-1485. Queremos agradecer al Consorci d'Aigües de la Costa Brava Girona (CACBGi) por el acceso a la EDAR.

## Reservas naturales subterráneas

Laura Garrido Sobrados<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico*

Palabras clave: Reservas Naturales Subterráneas

### **Resumen.** Reservas Naturales Subterráneas

El Catálogo Nacional de Reservas Hidrológicas, que cuenta en la actualidad con 222 reservas naturales exclusivamente fluviales, va a incorporar 22 reservas naturales subterráneas, equivalentes a una superficie de 1.077,11 km<sup>2</sup> en 8 cuencas intercomunitarias.

Las reservas naturales subterráneas se han seleccionado por ser representativas en relación a su origen, características geológicas e hidrogeológicas y su conexión con ecosistemas asociados, además de cumplir con:

- Naturalidad con el objetivo de proteger los recursos hídricos y calidad del agua subterránea, en la medida de lo posible. Se priorizaron zonas en régimen natural (actual o futuro), con la menor incidencia de la actividad humana posible.
- Presencia de surgencias permanentes de forma que la medida continuada de su caudal pueda ser utilizado para analizar los efectos del cambio climático en las aguas subterráneas, a partir de las tendencias en la evolución de los volúmenes subterráneos drenados.

El objetivo principal es su preservación, para lo que se ha empezado con la elaboración de documentos de medidas de gestión iniciales, que contemplan:

- Actividades de conservación y mejora del estado de la reserva hidrológica, a través de la identificación de las principales presiones y de las medidas de gestión asociadas.
- Actividades de evaluación y seguimiento del estado de la reserva hidrológica, incluyendo los efectos del cambio climático.
- Actividades de puesta en valor de las reservas hidrológicas de la cuenca.
- Indicadores de seguimiento de las actividades.

Las medidas que se adopten quedarán incorporadas en los planes hidrológicos a través de los programas de medidas.

Los efectos del cambio climático es una de las actividades de evaluación y seguimiento esenciales, dada la naturalidad de las reservas naturales subterráneas. Además, se abordará el seguimiento del estado de las reservas, de su régimen de caudales y otras variables meteorológicas, así como la colaboración con el resto de administraciones públicas en el seguimiento de hábitats y especies relevantes para la conservación de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (EDAS).





## Resultados del prototipo a escala real de GRA del proyecto MarAdentro

Pilar Icaran<sup>4</sup>, Victor Monsalvo<sup>4</sup>, Patricio Hermostilla<sup>4</sup>, Xavier Sanchez-Vila<sup>1</sup>, Paula Rodriguez<sup>1</sup>, Lurdes Martinez-Landa<sup>1,3</sup>, Cristina Valhondo<sup>2,3</sup>, G Quintana<sup>2</sup>, Silvia Díaz Cruz<sup>2</sup>, Jesus Carrera<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>UPC

<sup>2</sup>IDAEA

<sup>3</sup>UPC-CSIC unidad asociada

<sup>4</sup>Aqualia S.A.

Palabras clave: recarga, contaminantes, modelos numéricos, costes

**Resumen.** La recarga gestionada de acuíferos a través de balsas (SAT) aprovecha los diferentes ambientes que se producen cuando las aguas regeneradas atraviesan la zona no saturada en su paso hacia el acuífero y durante el flujo en el acuífero. La eliminación de contaminantes mejora al añadir una barrera reactiva (rbSAT) compuesta por sedimentos del acuífero mezclados con materia orgánica de origen vegetal (astillas de madera y compost), junto con una pequeña proporción de materiales adsorbentes (zeolita y carbón vegetal), colocada en la base de las balsas de recarga. La barrera favorece la creación de ambientes propicios para el crecimiento de comunidades bacterianas que degradarán los contaminantes.

Las EDARs tratan diariamente grandes volúmenes de aguas que, después de su tratamiento devuelven al medio, a través de los cauces de ríos (recarga difusa desde el lecho) o al mar. La recarga a través de los sistemas rbSAT, proporciona la oportunidad de tratar los efluentes de las depuradoras y así, recuperar los ecosistemas y proporcionar agua de calidad a los usuarios del acuífero, con un consumo limitado de energía y productos químicos

Con este objetivo, en el marco del proyecto MARadentro se estudia la recarga gestionada utilizando sistemas rbSAT, concretamente esta ponencia versará en las pruebas de campo a escala real.

Basándose en lo observado en el laboratorio y a escala piloto se ha diseñado un prototipo, las balsas se han construido junto a la EDAR de Medina del Campo (Valladolid), y se recargan con los efluentes de la depuradora. El diseño del sistema de recarga consiste en dos balsas de 150 m<sup>2</sup> cada una, con la barrera reactiva en su base, y 8 piezómetros de control distribuidos para el control de la recarga.

Se mostrarán resultados de la evaluación de suelos para la elección del mas propicio para la realización del prototipo del proyecto MARAdentro, la fase de

excavación y construcción tanto de la zona de infiltración como de los piezómetros de control y de la instrumentación instalada para su monitorización. Se presentarán también los modelos numéricos previos a la construcción del prototipo elaborados por la Universidad Politécnica de Catalunya en base a experimentación previa, para comprender y predecir el destino de los iones, así como de los contaminantes durante la Recarga Gestionada de Acuíferos (RGA) y finalmente se compararán económicamente diversos sistemas de tratamiento terciario de agua residual urbana depurada respecto al tratamiento implantado en el proyecto MARAdentro subvencionado por CDTI en el marco de Water JPI 2018 Joint Call.

## Retención de atrazina mediante procesos de adsorción en sedimento orgánico reciente de la laguna hipersalina de Pétrola (Albacete).

Diego Salcedo Celada<sup>1</sup>, Beatriz Toledo<sup>1</sup>, Zaira Castellanos<sup>1</sup>, Gustavo Martínez-Couque<sup>1</sup>, Yolanda Espín Montoro<sup>1</sup>, Vicens Martí<sup>2</sup>, Juan José Gómez-Alday<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Desarrollo Regional de Albacete. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM)*

<sup>2</sup>*Department of Chemical Engineering. Universitat Politècnica de Catalunya*

Palabras clave: atrazina, laguna, adsorción, sedimento

**Resumen.** La presencia de pesticidas en las masas de agua es uno de los principales problemas de degradación de la calidad de los recursos hídricos a escala global. Uno de los herbicidas más usados a escala europea ha sido la atrazina (ATZ), un disruptor endocrino cuya prohibición en España data de 2007. A pesar de su prohibición es uno de los pesticidas que más aparece en las masas de agua monitorizadas a escala europea donde se puede encontrar disuelta sobrepasando los valores máximos admisibles (0,1 µg/L). Un caso de estudio donde se constata su elevada persistencia es la reserva natural de la Laguna de Pétrola (30 km SE de Albacete); esta laguna constituye la zona de descarga del acuífero libre y se trata de uno de los sistemas hipersalinos más representativos de Castilla-La Mancha. El contraste de salinidades entre el agua superficial y el agua del acuífero conduce a un flujo por diferencia de densidades que favorece el transporte de especies químicas, como la ATZ, desde el agua superficial a otras zonas del acuífero. Algunos arroyos, que vierten al vaso lagunar, contienen ATZ (Conc. Máx.= 0,243 µg/L, punto de control 2652, 25/11/2019). Entre los procesos que pueden reducir la masa de ATZ en el sistema natural se encuentra su adsorción en el sedimento orgánico que se extiende sobre unos 2 km<sup>2</sup> en el fondo lagunar. La investigación sobre los procesos de adsorción y desorción es de gran interés ya que puede ayudar a entender la distribución y movilidad de ATZ en el medio.

Se realizó un experimento de tipo “Bach” donde se emplearon tubos de polipropileno (50 mL) en agitación continua (48 h), en oscuridad y condiciones de esterilidad, con una razón sedimento orgánico húmedo/agua laguna de 1:10. Se añadieron 10 ppm de ATZ. La muestra de sedimento posee un 17,8% de C-orgánico y un 31,0% de arcillas (19,1% illita, 11,2% caolinita y 0,7% clorita). Los resultados indican que la adsorción se produce rápidamente, en las primeras 4h (30,1% ads), y alcanza el equilibrio a las 16 h (19,5% ads). Los datos se ajustan bien a un modelo de pseudo-segundo orden (R<sup>2</sup> 0,97; K<sub>2</sub> 0,001 g/µg min) lo que

sugiere que el proceso estuvo controlado por la sorción química. La transferencia de masa ( $R_2$  entre 0,83-0,89) condiciona también la tasa de adsorción. El coeficiente de distribución ( $K_d$ ) de la ATZ (4,37 L/kg) señala una fuerte afinidad de la ATZ por el sedimento en el cual la materia orgánica ( $K_{oc}=24,53$  L/kg) va a jugar un papel importante en el proceso de adsorción. No obstante, el  $K_{oc}$  encontrado es menor que los publicados para sedimentos y suelos con % de C-orgánico menores. Por tanto, otros factores (presencia de arcillas, salinidad, pH neutro, formación de agregados, heterogeneidad de los sitios de adsorción, competencia con la matriz orgánica acuosa o  $T_{eq}$  no real) pueden participar en el proceso de adsorción. El sedimento constituye un sustrato orgánico capaz de adsorber 44,24  $\mu\text{g/g}$  ATZ. Este valor implica que 1 mm de sedimento ( $d= 2,62$  g/cm<sup>3</sup>) puede retener de forma potencial 232 Kg ATZ (considerando el proceso irreversible). La elevada capacidad de retención puede impedir que la ATZ alcance otras zonas del acuífero a través del flujo de densidades.

## Retos en la gestión del agua desde la perspectiva del nexo agua-energía-alimentación-medioambiente y la integración de tecnologías de observación de la tierra.

José González Piqueras<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Castilla-La Mancha

**Resumen.** El agua es un recurso estratégico desde el punto de vista agrícola, de suministro alimentario, y socioeconómico. Por este motivo el desarrollo de herramientas de gestión en las zonas donde el acceso a los recursos hídricos está amenazado resulta imprescindible para garantizar su sostenibilidad. Durante la última década se han hecho importantes esfuerzos para entender las interacciones del nexo entre agua, energía, alimentación y clima (WEFC) como un marco de desarrollo sostenible y seguro de los recursos. Estas interacciones se dan en diferentes escalas espaciales, desde los sistemas rurales a urbanos, la competencia entre sectores agronómico y energético, o la influencia en los patrones del clima. La relación entre agua y los sectores del nexo ocurren en múltiples dimensiones como la ecología, industria, socioeconomía y la política. La estrategia para abordar estas interacciones de forma integrada pasa por tener en cuenta la dimensión social, y establecer alianzas entre los actores involucrados en este proceso para garantizar la sostenibilidad entre los sectores, particularmente el uso sostenible del agua. En este escenario juega un papel fundamental la agricultura y el uso de las herramientas tecnológicas disponibles actualmente, como son la observación de la tierra y la gestión de la información mediante herramientas WEBGIS.

Este ha sido la principal motivación en el uso de la teledetección para identificar el uso del agua en agricultura, así como su cuantificación. Desde el acceso de los primeros programas Landsat de NASA hasta el moderno programa Copernicus de la ESA, se han aplicado las series temporales de imágenes para la identificación de los usos de suelo. Estos datos son una entrada fundamental en los modelos hidrológicos para obtener el uso distribuido del agua, particularmente en el sector agrícola del regadío. Uno de los ejemplos más relevante ha sido su aplicación en los últimos treinta años dentro del acuífero Mancha Oriental dentro de la cuenca Hidrográfica del Júcar, ubicado principalmente en la provincia de Albacete. La disposición de la secuencia de imágenes a través de servidores con acceso online por parte de los responsables en la gestión del agua, como Junta de Regantes y Confederación, así como los propios agricultores, ha facilitado la transparencia y fiabilidad en la toma de decisiones. Así, se ha convertido en una herramienta de

indudable utilidad actualmente. Este modelo de gestión está siendo utilizada en otras zonas alrededor del mundo, con importantes avances en el desarrollo de nuevas metodologías, como es la implementación de algoritmos de inteligencia artificial y su orientación a futuros escenarios de cambio climático.

La implementación de toda la información existente y proveniente de distintas fuentes como los datos de observación de la tierra, bases de datos cartográficas de suelo, datos climáticos, indicadores de riesgo, o socioeconómicos en modelos dinámicos supone una herramienta de gran ayuda en la toma de decisiones. Con este objetivo se está desarrollando el proyecto Europeo REXUS (Managing Resilient Nexus Systems Through Participatory systems Dynamics Modelling, [www.therexusproject.eu](http://www.therexusproject.eu)) cuyo objetivo es el desarrollo y puesta en práctica de metodologías que faciliten la transición hacia una gestión integrada del nexo Agua-Energía-Alimentación-Clima. Bajo este objetivo estas metodologías se están desarrollando en cinco zonas piloto alrededor del mundo.

## Retos del regadío sostenible ante un escenario de escasez de agua

José M<sup>a</sup> Tarjuelo Martín-Benito<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Centro Regional de Estudios del Agua (CREA) de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM)*

**Resumen.** El nexo agua-producción de alimentos es clave para fortalecer la seguridad alimentaria teniendo en cuenta que para 2050 se estima que se necesitará un 50-60% más de alimentos para abastecer a la población mundial. El problema es que esto debe conseguirse con cada vez menor disponibilidad de agua para para la agricultura (por prioridades del uso urbano y medioambiental) y en una situación de demanda creciente, al ser el agua imprescindible para garantizar la rentabilidad y sostenibilidad de la agricultura.

El principal reto al que se enfrenta el sistema agrario en regiones semiáridas como Castilla-La Mancha (CLM) es desarrollar sistemas de producción sostenibles, respetuosos con el medio ambiente, y que sean capaces de hacer frente a los efectos del cambio climático, con períodos de sequía más prolongados, una mayor incidencia de olas de calor y una disminución de las precipitaciones. Para afrontar este reto son necesarios modelos de Ayuda en la Toma de Decisiones (ATD), que son herramientas diseñadas para orientar a los gestores y usuarios sobre cuál es la mejor opción posible, dependiendo del escenario propuesto, en entornos complejos de elevada variabilidad. Estas herramientas son también necesarias para desarrollar políticas encaminadas a mejorar la resiliencia de los sistemas agrícolas a las amenazas ligadas al cambio climático y a la variabilidad de precios de los productos agrícolas en un mercado cada vez más globalizado.

Estos modelos de ATD deben abordar al menos:

- La determinación de las necesidades de agua de los cultivos con el mayor nivel de precisión posible, incluida la aplicación de técnicas de riego deficitario controlado (RDC), así como ayudar a los agricultores a que sean capaces de implementar en su explotación una programación de riegos optimizada que permita maximizar la productividad agronómica (producción) y económica (margen bruto) del agua de lluvia y de riego.
- La optimización del diseño y manejo de los sistemas de riego, buscando reducir el consumo de agua (mejorando la eficiencia de riego) y de la energía que lleva asociada (extracción de acuíferos, desalinización, depuración y aplicación con el riego a presión (aspersión y goteo)), utilizando sistemas de riego que estén

bien diseñados, manejados y conservados para poder conseguir una alta uniformidad de riego.

- Mejorar los sistemas de asignación y gestión de los recursos hídricos renovables de forma justa, equitativa y transparente, utilizando criterios económicos y sociales en un marco de sostenibilidad. Para ello es necesario realizar, con rigor científico y transparencia, estudios que permitan identificar los recursos hídricos superficiales y subterráneos disponibles y su distribución espacial, con ayuda de modelos que permitan hacer un seguimiento continuo de su evolución temporal.
- Mejorar la formación, información y asesoramiento de los agricultores, para que sean capaces de aplicar las tecnologías, herramientas y modelos de ATD ya disponibles para conseguir que la mejora de la productividad del agua sea una realidad.
- Utilizar plataformas Web-GIS para transferir y compartir información y tecnología con los usuarios finales en tiempo real, dentro de un proceso de retroalimentación (INTERNET).

Todo esto debe hacerse de forma coordinada con la optimización del resto de factores ligadas a la producción agraria como el manejo de la fertilidad del suelo, la protección de cultivos y el material vegetal disponibles, buscando el que sea más productivo y resistente a plagas, enfermedades, sequías, etc., y aprovechando al máximo las potencialidades del material vegetal autóctono.

El uso de estas tecnologías para mejorar la productividad agronómica y económica del agua en zonas con escasez de recursos hídricos como CLM, contribuirá además a: la creación de empleos directos e indirectos para técnicos cualificados, facilitando la integración de los jóvenes en el contexto rural; mantener y diversificar los ingresos de los agricultores con la posibilidad de mejorar la rotación de cultivos; mantener la población en las zonas rurales, facilitando el relevo generacional de jóvenes agricultores que verán condiciones de trabajo más cómodas; prevenir el abandono de tierras y la desertificación, mejorando la calidad de vida de los agricultores a través de la capacitación en nuevas tecnologías. Además, al promover el uso de nuevas tecnologías, se requerirán muchos otros servicios de apoyo (análisis de negocios, canales de distribución, marketing y comunicación, etc.) que también contribuirán a una mayor demanda de profesionales.

Esta es precisamente la finalidad del proyecto europeo SUPROMED (Producción sostenible en el agro-ecosistema Mediterráneo), financiado por la fundación PRIMA (Alianza para la Investigación e Innovación en el Área del Mediterráneo), que está coordinado por el grupo de investigación "Agronomía e Ingeniería del Riego" del Centro Regional de Estudios del Agua (CREA) de la Universidad de Castilla-La Mancha.



# Simulación de sequías futuras (2030-2059) en el área de Doñana utilizando diferentes índices aplicados a los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 del IPCC.

María José Montes Vega<sup>1</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>2</sup>, Miguel Rodríguez Rodríguez<sup>1</sup>

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

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

Palabras clave: Aguas subterráneas, Cambio climático, Sequía

**Resumen.** Se espera que el cambio climático influya en la intensidad y la ocurrencia de las sequías y desafíe la capacidad de adaptarse y mitigar dichos cambios. Desarrollar una metodología para mejorar el uso sostenible del agua en un entorno estresado, como es Doñana, es de vital importancia. En este estudio hemos calculado uno de los indicadores más utilizados en la gestión de los recursos hídricos, el SPI (Índice Estandarizado de Precipitaciones), basado únicamente en la precipitación. Sin embargo, si queremos considerar los efectos del cambio climático, es importante incluir datos de temperatura además de los registros de lluvia, por lo que hemos calculado también el SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración) que incluye tanto registros de precipitación como de evapotranspiración. Finalmente, también se ha calculado un Índice de Recarga de Sequía de Aguas Subterráneas (GRDI) para poder compararlo con los indicadores climáticos anteriores. El índice GRDI es particularmente interesante en el caso del Parque Nacional de Doñana (PND), donde la recarga de aguas subterráneas es la principal entrada de agua para muchos de los ecosistemas de Valor Universal Excepcional (VUE) del PND, por lo que esta investigación podría añadir una nueva perspectiva en la integración de los efectos del cambio climático. En este trabajo presentamos los resultados obtenidos tras aplicar los índices SPI, SPEI y GRDI para los años 2030 a 2059 en la zona de las lagunas peridunares del manto eólico de Doñana (Huelva) según diferentes escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5). Los análisis realizados muestran un incremento significativo en las temperaturas máximas y mínimas, lo que conllevaría a una disminución de la tasa de recarga debido al aumento de la evapotranspiración. La media de las precipitaciones también disminuye significativamente. Los índices muestran, para la serie 2030-2059, dos períodos de sequía importantes, así como dos períodos húmedos significativos. Estos resultados podrían servir como una herramienta para adoptar medidas de

mitigación adecuadas por parte de la administración competente y adoptar una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) sólida en la cuenca.

# Sistemas ancestrales de recarga artificial de acuíferos en cuencas de alta montaña desarrolladas en rocas duras. Río Mecina, Sierra Nevada, España

Thomas Zakaluk<sup>1</sup>, Jorge Jódar<sup>1</sup>, Antonio González-Ramón<sup>1</sup>, José María Martín-Civantos<sup>2</sup>, Luís Javier Lambán<sup>1</sup>, Sergio Martos-Rosillo<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>MEMOLab, Universidad de Granada, España

Palabras clave: recarga de acuíferos, acequias de careo, monitoreo hidrológico, soluciones basadas en la naturaleza

**Resumen.** La recarga artificial de acuíferos mediante acequias de careo es una solución tecnológica orientada a la gestión integral del recurso hídrico, la cual puede ayudar a paliar la creciente inseguridad hídrica de muchas regiones del mundo. Pese a su interés, el desarrollo de las técnicas de recarga artificial en zonas de alta montaña ha sido muy limitado hasta la fecha. No es el caso de Sierra Nevada, en el sur de España, donde estudios actuales apuntan que la recarga de acuíferos mediante acequias de careo se ha aplicado de forma continuada desde hace 1200 años.

Este sistema de recarga, conocido como “careo”, consiste, principalmente, en derivar el agua de deshielo en la cabecera de los ríos de Sierra Nevada. Esta agua se transporta e infiltra en el terreno, utilizando para ello una red de acequias excavadas y sin revestir, conocidas localmente como acequias de careo. La red de acequias de Sierra Nevada, cuenta con más de 750 km cartografiados, y sorprende, principalmente, por dos motivos: (1) se trata de sistemas de recarga artificial en rocas duras, muy poco habituales; y (2) se desarrolla en zonas con unas condiciones climáticas semiáridas, en las que la precipitación es muy limitada durante el periodo de estiaje, y donde además existen importantes periodos de sequía interanuales. No obstante, la recarga de acuíferos mediante acequias de careo ha permitido desarrollar y mantener extensas zonas de agricultura intensiva en Sierra Nevada.

En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación de la recarga artificial realizada mediante las acequias de careo, a escala de cuenca hidrológica, en el río Mecina (1042-2618 m s.n.m), en la vertiente sur de Sierra Nevada, correspondientes a los años hidrológicos 2020/21 y 2021/22

Para la evaluación de la recarga mediante las acequias de careo se ha instalado un sistema de control semi-automatizado que comprende una amplia variedad de sensores y métodos de medida adaptados a las particularidades de cada acequia. Se ha evaluado la recarga artificial que se produce en los 14,6 km de las dos principales acequias de careo de la cuenca, y se ha comparado este valor con el de la recarga total media del periodo 1970-2014, determinada con un modelo combinado de precipitación-aportación (HBV) y balance de agua (VI-ETo) para toda la cuenca hidrológica. La recarga artificial producida durante los años hidrológicos 2020/21 y 2021/22 ha sido de 2,08 y 3,73 hm<sup>3</sup>/año, respectivamente, lo que supone un 33,1 y un 59,4 % de la recarga total media de la cuenca hidrológica.

Este trabajo demuestra que las acequias de careo son verdaderas soluciones basadas en el conocimiento ecológico local, que ya en épocas pasadas incrementaron la resiliencia de las comunidades frente a los cambios sociales y en el clima, y por tanto podrán considerarse como posible estrategia de adaptación al cambio climático en el futuro.

Agradecimientos: este estudio se ha realizado en el marco del proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía "Sistemas históricos de manejo de agua y servicios ambientales de regulación hídrica. Eficiencia y multifuncionalidad en el contexto de cambio global y cambio climático" (Ref. P18-RT-3836, Convocatoria 2018 de proyectos I+D+I PAIDI), del proyecto "Impacto, seguimiento y evaluación del cambio climático y global en los recursos hídricos en Parques Nacionales de alta montaña", del Convenio Específico de Colaboración entre la Diputación Provincial de Granada y el IGME-CSIC y de la Red del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) "Siembra y Cosecha del Agua en Áreas Naturales Protegidas". Además, agradecemos el apoyo continuo de la comunidad de regantes de San Isidro (Mecina Bombarón).

## Soluciones ancestrales basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Las zayas de La Valduerna (León).

Víctor M. del Barrio Beato<sup>1</sup>, Juan F. de Benito Muñoz<sup>2</sup>, José A. Ventura González<sup>3</sup>, Sergio Martos-Rosillo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Confederación Hidrográfica del Duero*

<sup>2</sup>*ANALIZAAGUA*

<sup>3</sup>*Consulta Privado*

<sup>4</sup>*Instituto Geológico y Minero de España-CSIC*

Palabras clave: Recarga, Siembra y Cosecha del Agua, Solución Basada en la Naturaleza, Ecohidrología

**Resumen.** En la comarca de La Valduerna (León) se utiliza un complejo sistema de manejo del agua esencial para garantizar el regadío y el abastecimiento a la población. En este sistema, operativo desde al menos el siglo XVIII, las aguas superficiales derivadas por una extensa red de acequias, conocidas localmente como zayas, son utilizadas para el regadío y para la recarga del acuífero detrítico que se extiende por el interfluvio existente entre los ríos Duerna y Peces. La recarga artificial de este sistema se realiza mediante la infiltración del agua que discurre por las zayas, en su trayecto desde el río Duerna al Peces, y, una vez en el Peces, de forma natural, dado el carácter perdedor del río, y de forma inducida, por la explotación de los numerosos pozos existentes en el acuífero detrítico (se trata, en su mayoría de pozos excavados a mano de escasa profundidad).

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio hidrogeológico realizado por la Confederación Hidrográfica del Duero, en el que se realiza una caracterización hidrogeológica e hidrodinámica del acuífero detrítico superficial de La Valduerna y se presentan los resultados de una prueba de recarga, que se extendió durante un periodo de 15 días y en el que se utilizaron las principales zayas del sistema, recargando un volumen de 0,7 hm<sup>3</sup>. Esta forma de manejo ancestral del agua es un ejemplo de Solución Basada en la Naturaleza para la Gestión del Agua, que funciona con la fuerza de la gravedad, con materiales locales, que presta importantes servicios ecosistémicos para la agricultura y para abastecimiento, entre otros, y que contribuye al mantenimiento de la vegetación de ribera y al aumento de la biodiversidad. Una investigación más detallada de este sistema podría permitir que este pasara a ser el segundo sitio demostrativo de España, donde UNESCO reconocería un manejo ecohidrológico del agua.



# Una fusión de bosques aleatorios y el filtro de Kalman para mejorar la modelación inversa

J. Jaime Gómez-Hernández<sup>1</sup>, Vanessa A. Godoy<sup>1</sup>, Gian F. Napa-García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València*

Palabras clave: filtro de Kalman, bosques aleatorios, modelación estocástica inversa

**Resumen.** Uno de los puntos débiles del filtro de Kalman es que las sucesivas correcciones de los parámetros están basadas en combinaciones lineales de las discrepancias entre predicciones y observaciones. Sustituir esta combinación lineal por una no lineal que pueda captar relaciones no lineales entre parámetros y variables de estado puede mejorar esas correcciones y resultar en un mejor método de inversión.

Se presenta el "Ensemble Random Forest Filter" como una alternativa al filtro de Kalman de conjuntos en el que la corrección de las conductividades hidráulicas en cada paso de observación es sustituida por un algoritmo de bosques aleatorios. Se demuestra que este método es superior al filtro de Kalman de conjuntos.





## Una herramienta de código abierto para generar cortes geológicos en 3D: Geopropy

Ashkan Hassanzadeh<sup>1</sup>, Enric Vázquez-Suñé<sup>1</sup>, Mercè Corbella<sup>2</sup>, Rotman Criollo<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Departament de Geologia*

<sup>3</sup>*Mediterranean Institute for Advanced Studies (IMEDEA, CSIC-UIB)*

Palabras clave: Python, Corte geologico, Decision making

**Resumen.** Los cortes geológicos juegan un papel importante en los estudios medioambientales. En general, los modelos subterráneos pueden ser generados por métodos implícitos o explícitos. En este trabajo presentamos una herramienta híbrida que replica los pasos que un geólogo sigue para generar un corte geológico, teniendo en cuenta los datos disponibles, sin utilizar cálculos matemáticos complejos y algoritmos de interpolación. Geopropy detecta e identifica las áreas con un posible resultado geológico de aquellos con múltiples escenarios geológicos posibles. En caso de las áreas con un posible resultado, el algoritmo procede a generar las unidades geológicas automáticamente. En otros casos, Geopropy pide al usuario decisiones o más datos dependiendo de la complejidad del corte geológico. También existe la opción de completar las unidades geológicas manualmente. Después, el algoritmo termina de crear las unidades geológicas, teniendo en cuenta todos los datos introducidos. Los resultados son cortes geológicos en 3D en formato de archivos de shape, en forma de puntos, polígonos y líneas que se comprueban con datos introducidos para evitar inconsistencias. Los archivos de shape generados por Geopropy crean la posibilidad de post procesar los resultados en las aplicaciones de SIG. También se puede usar estos archivos en el proceso de generar modelos numéricos subterráneos. Geopropy es una librería de Python para ayudar al usuario a crear modelos explícitos con los objetivos de detectar las áreas complejas y alcanzar resultados simples, consistentes y rápidos.



# Uso de los análisis isotópicos ( $^{13}\text{C}$ , $^{37}\text{Cl}$ ) en etenos clorados para la evaluación de la biorremediación mediante la inyección de aceite vegetal emulsionado en un acuífero contaminado

Sergio Gil-Villalba<sup>1</sup>, Mònica Rosell<sup>1</sup>, Jesica M. Soder-Walz<sup>2</sup>, Jordi Corregidor<sup>3</sup>, Miguel A. Vallecillo<sup>3</sup>, Andrea Tirado<sup>3</sup>, Orfan Shouakar-Stash<sup>4</sup>, Miriam Guivernau<sup>5</sup>, Marc Viñas<sup>5</sup>, Jordi Palau<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Grup MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Geomicrobiologia, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Institut de Recerca de l'Aigua (IdRA), Universitat de Barcelona (UB), Martí Franquès s/n, 08028

<sup>2</sup>Departament d'Enginyeria Química, Biològica i Ambiental, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Carrer de les Sitges s/n, Bellaterra, España

<sup>3</sup>Environmental Resources Management Iberia SAU (ERM), Portal de l'Àngel 36, 08002 Barcelona, España

<sup>4</sup>Isotope Tracer Technologies Inc., Waterloo, Ontario N2V 1Z5, Canada. Department of Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L 3G1, Canada

<sup>5</sup>GIRO Joint Research Unit IRTA-UPC, IRTA, Torre Marimon, Caldes de Montbui E-08140, España

Palabras clave: Remediación, Isótopos, Deshalogenación reductiva, Disolventes clorados

**Resumen.** La biorremediación es una alternativa económicamente viable para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con disolventes clorados. Esta técnica utiliza la capacidad metabólica de determinadas poblaciones microbianas para transformar los contaminantes del agua subterránea. En los últimos años se ha investigado la fisiología y bioquímica de los mecanismos de biodegradación, principalmente a escala de laboratorio. Sin embargo, el estudio detallado de los procesos que ocurren durante la biorremediación in situ, a escala de campo, es aún limitado.

El presente estudio utiliza un enfoque múltiple para ampliar el conocimiento en procesos de bioestimulación de deshalogenación reductiva microbiana in situ de etenos clorados en condiciones anaerobias. Concretamente, este estudio se ha realizado durante un tratamiento de bioestimulación mediante la inyección de aceite vegetal emulsionado (EVO de sus siglas en inglés), vitamina B12 y lactato, en un acuífero libre detrítico contaminado con etenos clorados. La evaluación de

la eficacia del tratamiento y la determinación de la vía de biodegradación se llevaron a cabo mediante un estudio multidisciplinar que incluyó: i) análisis isotópico de carbono y cloro en compuestos específicos ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{37}\text{Cl}$  – CSIA, por sus siglas en inglés), ii) información hidroquímica y iii) análisis molecular de la comunidad bacteriana (cuantificación de Dehalococoides totales y genes funcionales ligados a procesos de dehalogenación reductiva). El aceite vegetal emulsionado pretende incrementar la biodisponibilidad de ácidos orgánicos e  $\text{H}_2$  in situ, actuando como fuente de electrones a lo largo del tiempo, así como mantener unas condiciones reductoras en el agua subterránea a largo plazo, a diferencia de otros tratamientos utilizados frecuentemente donde las reinyecciones son a menudo necesarias, p.ej. lactato.

Simultáneamente a la aplicación del tratamiento de estimulación en el campo, durante este estudio se llevaron a cabo diferentes experimentos en el laboratorio. Se realizaron experimentos tipo “batch” con microcosmos, utilizando la comunidad bacteriana autóctona del acuífero. Se prepararon diferentes experimentos en paralelo, inyectando percloroetileno (PCE), tricloroetileno (TCE) o dicloroetileno (DCE), respectivamente, como contaminante inicial y lactato para reproducir las condiciones de biodegradación en el acuífero. Esto permitió caracterizar el patrón de fraccionamiento isotópico dual (C-Cl) y evaluar el crecimiento bacteriano asociado, siendo estos resultados de utilidad para evaluar los datos de campo. Además, se realizaron experimentos abióticos para evaluar el posible fraccionamiento isotópico asociado a la distribución de los etenos clorados entre la fase acuosa y la fase oleosa (EVO). Con este fin, una solución control con PCE, TCE y DCE se puso en contacto con EVO a través de una membrana de diálisis. Los cambios en la concentración y en la composición isotópica se midieron a las 12 y 48 horas. Resultados preliminares descartan cambios significativos en la composición isotópica del carbono asociados a la distribución de los contaminantes entre la fase acuosa y la fase oleosa.

La evaluación del tratamiento de bioestimulación in situ se realizó mediante el monitoreo de 11 piezómetros durante 12 meses (en 5 campañas de muestreo). Se analizaron los cambios en la concentración y composición isotópica C-Cl de los etenos clorados, en las poblaciones bacterianas y en los parámetros hidroquímicos. Los resultados preliminares muestran un rápido descenso en las concentraciones de PCE y TCE. El balance isotópico de los etenos clorados, PCE, TCE, DCE y cloruro de vinilo (VC), muestra un elevado enriquecimiento en el isótopo pesado ( $^{13}\text{C}$ ), alcanzando en algunos pozos cambios en valores  $\delta^{13}\text{C}$  superiores a +30%. Estos resultados son consistentes con los análisis de concentración e indican un elevado grado de biodegradación. El análisis isotópico dual C-Cl sugiere que el mecanismo de biodegradación de los etenos clorados en el campo es el mismo que el observado en los experimentos con microcosmos, permitiendo a su vez el uso de los factores de enriquecimiento isotópico determinados en el laboratorio para la cuantificación de la biodegradación en el

acuífero. Finalmente, el incremento de las poblaciones bacterianas totales, de *Dehalococcoides* sp. y de genes funcionales, confirman que la bioestimulación fue efectiva y específica a favor de procesos de deshalogenación reductiva. Los resultados muestran que la capacidad de biodegradación se mantiene 12 meses después de la inyección.



# Uso del modelo matemático del acuífero Almonte-Marismas con ModelMuse como apoyo a la planificación hidrológica de las aguas subterráneas en Doñana

Ana Rebollo Baños<sup>1</sup>, Víctor Juan Cifuentes Sánchez<sup>2</sup>, Carolina Guardiola-Albert<sup>3</sup>, David González Rojas<sup>2</sup>, Emilio Esteban Rodríguez Merino<sup>2</sup>, Alfonso Sancho Miró<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TRAGSATEC

<sup>2</sup>Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

<sup>3</sup>Instituto Geológico y Minero de España - CSIC

Palabras clave: Doñana, Modelo Matemático, Planificación Hidrológica, Gestión de las Aguas Subterráneas

**Resumen.** Desde el año 2012 se vienen suscribiendo sucesivos convenios entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el IGME como apoyo a la planificación hidrológica de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. En el marco de esta colaboración los acuíferos de Doñana han ocupado un lugar principal donde se ha venido desarrollando y actualizando el modelo matemático de Doñana, ya que es una de las herramientas fundamentales para la gestión de los recursos subterráneos en la Planificación Hidrológica. Dentro del actual convenio de colaboración, la CHG, con el apoyo del IGME, ha procedido a actualizar el modelo hidrogeológico de flujo existente con la interfaz gráfica ModelMuse, modelo matemático de uso público desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Se trata de una interfaz visual, muy intuitiva y de fácil manejo que implementa la herramienta MODFLOW. La finalidad perseguida es facilitar a la CHG, como administración competente en la gestión del agua en el ámbito de Doñana, disponga de herramientas de simulación que sirvan de apoyo para la toma de decisiones de carácter hidrogeológico respecto a la predicción de los riesgos asociados a diferentes estrategias de gestión de los acuíferos.

En este tercer ciclo de Planificación (2022-2027) la CHG, en el marco de sus competencias, tiene unos objetivos marcados para mitigar los problemas que presentan los recursos hídricos en Doñana y su entorno mediante diferentes medidas y actuaciones. En el presente trabajo se exponen las diferentes simulaciones realizadas con el modelo matemático de Doñana para reproducir el posible comportamiento de los niveles piezométricos según las diferentes actuaciones planteadas en la Planificación Hidrológica con vistas a estimar su evolución en un escenario tendencial.

La primera alternativa comprende un conjunto de actuaciones ya en marcha: cierre de extracciones ilegales, sustitución de aguas subterráneas por superficiales en la cabecera del arroyo de La Rocina, cese de extracciones en Los Mimbrales y reubicación de sondeos en Matalascañas. Con la simulación realizada se observa una recuperación muy significativa de los niveles piezométricos en las zonas contempladas, y por otro lado el desplazamiento del cono de bombeo en Matalascañas con ascensos en la piezometría de las lagunas afectadas, sobre todo Charco del Toro y en menor medida Taraje y Zahillo.

La segunda alternativa comprende un conjunto de actuaciones adicionales a la anterior consistentes en la sustitución de aguas subterráneas por superficiales: recrecimiento del embalse del Agrio, trasvase de 19,99 hm<sup>3</sup> desde las cuencas del Guadiana y TOP previsto por la Ley 10/2018 y cambio del abastecimiento de Matalascañas mediante trasvase desde la ETAP de Moguer. La actuación del Agrio aumentaría el nivel piezométrico en el cono de depresión de Los Hatos, lo mismo ocurriría en la zona situada al Este de El Rocío con la aportación del trasvase donde el efecto sería mayor. La sustitución en la cuenca de La Rocina provocaría un ascenso de los niveles que se redundarían en un incremento de los caudales de su red fluvial. Y la aportación a Matalascañas provocaría ascensos en el entorno, y favorecería la recuperación del sector más occidental de las lagunas peridunares de Doñana.

Los resultados ponen en evidencia la utilidad del uso del modelo matemático como apoyo en la toma de decisiones con respecto a la gestión de las aguas subterráneas.



## Utilización de ensayos de trazadores reactivos para la caracterización de un sistema de recarga artificial

Jesús Carrera<sup>1,3</sup>, Lurdes Martínez-Landa<sup>2,3</sup>, Jesús Aguirre Ramos<sup>1</sup>, Albert Contreras<sup>1</sup>, Cristina Valhondo<sup>1,3</sup>, Gerard Quintana<sup>1</sup>, Sara Ortiz<sup>1</sup>, Silvia Díaz Cruz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, CSIC, Barcelona*

<sup>2</sup>*Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, UPC, Barcelona*

<sup>3</sup>*Unidad Asociada, Grupo de Hidrología subterránea UPC-CSIC, Barcelona*

Palabras clave: trazador reactivo, recarga artificial, aguas regeneradas, barreras reactivas

**Resumen.** La recarga artificial mediante balsas de infiltración es una tecnología útil para reciclar aguas regeneradas de efluentes de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) favoreciendo así la recuperación de acuíferos y de ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas. La instalación de barreras reactivas en la base de las balsas de infiltración ha demostrado ser una medida muy efectiva para la renaturalización del agua recargada ya que potencia los procesos que tienen lugar durante el paso del agua por el terreno relacionados con la eliminación de contaminantes. Las barreras reactivas están formadas por los sedimentos del acuífero y sustratos orgánicos (MO) de origen vegetal (madera y compost) a partes iguales en volumen, además de otros componentes minoritarios (arcilla, carbón vegetal, etc.). El principal objetivo de esta composición es generar un amplio abanico de lugares de adsorción y aportar carbono orgánico disuelto para fomentar un amplio espectro de condiciones redox, favoreciendo así que se degraden contaminantes diversos. Las reacciones físico-bio-geo-químicas que se producen dan lugar a cambios tanto en el agua recargada como en el medio poroso durante las operaciones de recarga.

Estas reacciones pueden provocar colmatación por crecimiento de biopelículas o filtración de partículas, eliminación de compuestos orgánicos debido a procesos de biodegradación y cambios en los patrones de flujo preferenciales debido a un cambio en la distribución del contenido de agua dentro de la zona no saturada. Todos estos cambios modifican el transporte de los contaminantes a lo largo del sistema y su distribución del tiempo de residencia y pueden ser evaluados mediante las curvas de llegada en ensayos de trazadores. De manera adicional, el uso de trazadores reactivos puede aportar información sobre efectividad de los mecanismos de retención (adsorción y absorción) y degradación.

Con este objetivo hemos realizado ensayos combinando trazadores con diferentes propiedades en 6 sistemas piloto a escala decamétrica alimentados con el efluente de una EDAR costera. Como trazadores conservativos se utilizaron la salinidad, EDTA de Cu y ácido AminoG para ver: 1) los tiempos de tránsito a lo largo de los sistemas y 2) el papel que juega el contenido de agua de la zona no saturada en el transporte. Para evaluar la capacidad de sorción de la MO de la barrera reactiva se utilizó Rodamina-WT, que quedan adsorbidos en la materia orgánica (biopelículas y madera). La capacidad de degradación de cada sistema se evaluó mediante la cuantificación de BTEX con diversa degradabilidad. Finalmente, se utilizaron microesferas de carboxilato de 200nm para reproducir el transporte de coloides (patógenos y nanoplasticos) a lo largo de los sistemas. Los resultados de estos ensayos dibujan una imagen del comportamiento de los sistemas en un momento dado. Después de dos años de funcionamiento de los SAT se repetirán algunos de estos ensayos para obtener los cambios en la eficiencia de los sistemas debidos a la degradación de la parte orgánica de la barrera reactiva y al crecimiento del biofilm en diferentes partes de los sistemas (barrera, acuífero). El uso conjunto de trazadores “clasicos” y “reactivos” es por tanto una estrategia util para caracterizar los sistemas de recarga artificial.





## Índice de autores

- A. Godoy, 63  
Abarca, 23  
Aguilera, 47, 55, 109  
Aguilera Alonso, 3, 111, 119  
Aguilera Ruiz, 71  
Aguirre Ramos, 155  
Álvarez-Ortí, 117  
Andreo Navarro, 9, 11, 25, 41, 121  
Andreu, 1  
Antonaya Avi, 27  
Antunes da Silva, 51, 83  
Aracil Ávila, 51, 83  
Argamasilla Ruiz, 27, 121  
Armenteros, 31  
Ávila Marín, 41  
Bach Plaza, 87  
Balcázar, 13  
Barberá Fornell, 25, 121  
Barrera García, 85  
Bassols Isamat, 87  
Béjar-Pizarro, 55  
Bellot, 1  
Benavente, 123  
Benavente Herrera, 67  
Borrego, 13  
Bru, 55  
Brusi, 115  
Buján Díaz, 69  
Cañete Hidalgo, 67  
Cano, 75  
Carrasco, 31  
Carrasco Martín, 9, 11  
Carreño Conde, 105  
Carrera, 65, 125, 127, 131, 155  
Carrión Mero, 105  
Casado Sáenz, 91  
Casamitjana, 5, 33  
Cassiraga, 61, 73  
Castellanos, 117, 133  
Castro Gámez, 67  
Catalán, 13  
Celic, 13  
Cifuentes Castillo, 45  
Cifuentes Sánchez, 9, 11, 57, 153  
Contreras, 127, 155  
Corbella, 147  
Corral, 29  
Corregidor, 149  
Costa, 115  
Criollo, 37, 147  
Cueto-Felgueroso, 23  
Custodio Gimena, 37  
D. Quintana, 5, 33  
de Benito Muñoz, 143  
de la Hera Portillo, 119  
de la Loma, 121  
de la Losa Román, 3, 79, 111  
de la Torre Martínez, 41  
del Barrio Beato, 143  
Díaz Cruz, 65, 125, 127, 131, 155  
Díaz Hurtado, 27  
Dountcheva, 17, 73  
Durán Laforet, 67  
Durán Valsero, 9, 11, 41  
Elorza Tenreiro, 101  
Espín Montoro, 117, 133  
Espinosa Martínez, 27, 121  
Ezquerro, 55  
Farré, 13  
Fernández, 21  
Fernández Ayuso, 47, 81, 101  
Fernández-Mejuto, 1  
Fernández-Pérez, 117  
Figueras, 109  
Galabov, 73  
García Martínez, 123  
García-Sánchez, 1  
Garrido Sobrados, 129

Gata Maya, 49  
Gázquez Sánchez, 43  
Gil Márquez, 41  
Gil Oncina, 123  
Gil-Villalba, 149  
Godoy, 145  
Gómez Pérez, 99, 103  
Gómez-Alday, 17, 61, 73, 117, 133  
Gómez-Hernández, 61, 63, 145  
Gonçalves, 83  
González Cantero, 49  
Gonzalez Chavajay, 45  
González de Aguilar Etchemendi, 25  
González Piqueras, 135  
González Ramón, 43, 81  
González Rojas, 9, 11, 57, 153  
González Trabanco, 97  
González-Ramón, 141  
Goyetche, 29  
Gros, 13  
Guadaño Corrales, 99, 103  
Guardiola-Albert, 55, 77, 79, 101, 139, 153  
Guimerà, 29  
Guivernau, 149  
Hassanzadeh, 37, 147  
Heredia Díaz, 101, 119  
Hermosilla, 131  
Herrera, 55  
Hornero Díaz, 39  
Huerta, 31  
Icaran, 131  
Iglesias, 107  
Iniesta, 121  
Iraola, 109  
Jiménez Espinosa, 43  
Jiménez Gavilán, 67  
Jiménez Rodríguez, 71, 93  
Jódar, 43, 81, 141  
Kohfahl, 47  
Lado Liñares, 69  
Lambán, 81, 141  
Lentijo Robledo, 15, 19  
Llorente Isidro, 119  
López Mera, 69  
López Moreno, 37  
López Vázquez, 15  
López-Sánchez, 75  
Macías Antequera, 53  
Madaula, 5, 33  
Margalef, 65  
Martí, 133  
Martín, 17, 121  
Martín-Civantos, 141  
Martínez, 107  
Martínez-Couque, 117, 133  
Martinez-Landa, 65, 125, 127, 131, 155  
Martos-Rosillo, 77, 81, 141, 143  
Mas-Pla, 13, 115  
Mediavilla López, 119  
Meggiorin, 113  
Menció, 5, 33, 115  
Menghini, 21  
Meredith, 5, 33, 115  
Miranda, 121  
Molinero, 109  
Mon López, 15, 19  
Mondlane, 29  
Monsalvo, 131  
Montalván Toala, 105  
Montenegro Pérez, 99, 103  
Montes Vega, 139  
Moral Martos, 43, 71  
Morales García, 41  
Morales González, 43  
Moreno Merino, 3, 111, 119  
Mударra Martínez, 9, 11  
Napa-García, 145  
Naranja-Fernández, 113  
Nardj, 109  
Navarro-Hernández, 75  
Naves García-Rendueles, 69  
Nieto López, 27

Nogueras, 107  
Ochoa Orozco, 45  
Ojeda, 67  
Opolenko, 93  
Ortiz, 155  
Ortuño Morales, 27  
Palau, 149  
Palomino Gómez, 27  
Pastor, 75  
Paz González, 69  
Penchev, 73  
Petrovic, 13  
Pieretti, 23  
Pisani Veiga, 15, 69, 103  
Pla, 75, 79, 123  
Pomeroy, 37  
Pool, 109  
Quintana, 65, 127, 131, 155  
Rebollo Baños, 57, 153  
Recio, 31  
Riquelme, 75  
Rodríguez, 131  
Rodríguez, 17  
Rodríguez Jiménez, 31  
Rodríguez Merino, 57, 153  
Rodríguez Rodríguez, 47, 71, 81, 139  
Romero Álvarez, 47  
Romero Prados, 111  
Roqué, 5, 115  
Rosell, 149  
Rovira Medina, 9, 11  
Ruiz, 123  
Ruiz Bermudo, 47  
Salcedo, 17  
Salcedo Celada, 133  
Samper Calvete, 15, 19, 69, 99, 103  
Samper Pilar, 15, 19  
Sánchez, 69, 121  
Sánchez Olivares, 117  
Sánchez-Melsió, 13  
Sanchez-Vila, 131  
Sancho Miró, 57, 153  
Sanz, 17, 61, 73  
Serrano Hidalgo, 47, 101  
Shouakar-Stash, 149  
Sobral Areán, 99, 103  
Soder-Walz, 149  
Soler, 115  
Solis García-Barbón, 39  
Solórzano Chauca, 105  
Sousa Oliveira, 51  
Tarjuelo Martín-Benito, 137  
Tirado, 149  
Toledo, 117, 133  
Tomás, 75  
Vadillo Pérez, 67  
Valdés-Abellán, 75  
Valdivielso Mjangos, 37  
Valhondo, 65, 125, 127, 131, 155  
Vallecillo, 149  
Vázquez-Suñé, 37, 147  
Ventura González, 143  
Viezzoli, 21  
Vilanova, 29, 109  
Viñas, 149  
Yang, 19  
Zakaluk, 81, 141  
Zamorano, 115  
Zarroca, 5