CIAS 2026

LIBRO DE RESÚMENES

del 1 al 4 de Julio

Barcelona

Editorial Asociación Internacional de Hidrogeólogos - Grupo Español

Editores:
Albert Soler Gil
Àlex Sendrós Brea-Iglesias
Anna Jurado Elices
Carolina Guardiola-Albert
Enric Vázquez Suñé
J. Jaime Gómez-Hernández
Jose Luque Marín
Rosanna Margalef-Marti
Roser Escuder Botinas
Sonia Valdivielso Mijangos

Editorial:
Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español
ISBN: 978-84-128882-1-8

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

Barcelona acogió del 1 al 4 de julio de 2026 una nueva edición del Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas (CIAS2026), que reunió a investigadores, profesionales, gestores, estudiantes y otros especialistas vinculados al estudio y la gestión de las aguas subterráneas. A lo largo de cuatro jornadas, el congreso constituyó un espacio de intercambio científico y técnico en el que se compartieron conocimientos, experiencias y avances, al tiempo que se reflexionó sobre los desafíos que afronta la hidrogeología en un contexto marcado por el cambio global y la creciente presión sobre los recursos hídricos.

Este volumen recoge los resúmenes de las contribuciones presentadas durante el congreso, tanto en formato de comunicación oral como de póster. En conjunto, ofrecen una visión amplia y actualizada de la investigación, la innovación y la práctica profesional en hidrogeología, y reflejan el compromiso de la comunidad científica y técnica con la comprensión, protección y gestión sostenible de las aguas subterráneas.

Comité Organizador

El comité organizador está formado por un comité local miembros de la Universitat de Barcelona y del Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC y los miembros de la Junta Directiva del Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos.

Comité Organizador Local

Albert Soler Gil	Universitat de Barcelona
Alex Sendrós Brea-Iglesias	Universitat de Barcelona
Anna Jurado Elices	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Enric Vázquez Suñé	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
José Luque Marín	Universitat de Barcelona
Rosanna Margalef-Marti	Universitat de Barcelona
Roser Escuder Botinas	Universitat de Barcelona
Sonia Valdivielso Mijangos	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC

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
Esther Vilanova	Secretaria	Amphos 21
Concepción Pla	Tesorera	Universidad de Alicante
Bartolomé Andreo Navarro	Presidente anterior	Universidad de Málaga
Josep Mas Pla	Vocal	Universitat de Girona
Aranzazu Fidalgo Pelarda	Vocal	Confederación Hidrográfica del Júcar
Sergio Martos Rosillo	Vocal	Instituto Geológico y Minero de España, CSIC
Nuria Naranjo Fernández	Vocal	Universidad de Málaga

Comité Científico:

Albert Folch	Universitat Politècnica de Catalunya
Albert Soler Gil	Universitat de Barcelona
Àlex Sendrós Brea-Iglesias	Universitat de Barcelona
Alfredo Pérez Paricio	Agència Catalana de l'Aigua
Almudena Ordóñez Alonso	Universidad de Oviedo
Ana Maria Castilho	Universidade de Coimbra, Portugal
Ana María Rebollo Baños	Tragsatec
Andrés González Quirós	British Geological Survey
Ángela Vallejos Izquierdo	Universidad de Almería
Anna Jurado Elices	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Anna Menció Domingo	Universidad de Girona
António Chambel	Universidade de Évora
Antonio González Ramón	Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
Aranzazu Fidalgo Pelarda	Confederación Hidrográfica del Júcar
Bartolomé Andreo Navarro	Universidad de Málaga
Beatriz de la Torre Martínez	Universidad de Málaga
Carolina Guardiola Albert	Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
César Andrade	IVAR – Universidade dos Açores, Portugal
Clara Torrentó Aguerri	Universitat de Barcelona
Concepción Pla	Universidad de Alicante
Cristina Domènech Ortí	Universitat de Barcelona
Cristina Valhondo González	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC

Comité Científico:

Damián Sánchez García	Centro Tecnológico del Agua CETAQUA
Daniel Fernàndez García	Universitat Politècnica de Catalunya
Diana Puigserver Cuerda	Universitat de Barcelona
Eduardo Cassiraga	Universitat Politècncia de València
Enric Vázquez Suñé	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Estanislao Pujades Garnes	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Ester Vilanova	Amphos 21
Francisco Javier Elorza Tenreiro	Universidad Politécnica de Madrid
Guillem Solé Marí	Universitat Politècnica de Catalunya
Héctor Aguilera Alonso	Instituto Geológico y Minero de España, CSIC
Helder Chamine	ISEP, Politécnico do Porto, Porto, Portugal
Iñaki Vadillo	Universidad de Málaga
Jaime Gómez-Hernández	Universitat Politècnica de València
Javier Rodrigo Ilarri	Universitat Politècnica de València
Jordi Delgado Martín	Universidade da Coruña
Jordi Palau Capdevila	Universitat de Barcelona
Jorge Loredo Pérez	Universidad de Oviedo
José Angel Sánchez Navarro	Universidad de Zaragoza
José Luque Marín	Universitat de Barcelona
José Manuel Marques	Instituto Superior Técnico, Universidade Lisboa, Portugal
José Miguel Andréu Rodes	Universidad de Alicante
Josep Mas Pla	Universitat de Girona

Comité Científico:

Juan Antonio Barberá Fornell	Universidad de Málaga
Juan José Durán Valsero	Instituto Geológico y Minero de España, CSIC
Juan José Hidalgo	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Laura Scheiber Pages	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Lucia di Stefano	UCM, Fundación Botín
Lucía Ojeda Rodríguez	Universidad de Málaga
Lucía Ortega	International Atomic Energy Agency (IAEA)
Lucila Candela Lledó	IMDEA-Agua
Luis Moreno Merino	Instituto Geológico y Minero de España - CSIC
Lurdes Martínez-Landa	Universitat Politècnica de Catalunya
Marco Dentz	Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
Margarida Antunes	Universidade do Minho, Portugal
Maria Elena Rodrigo Clavero	Universitat Politècnica de València
María Pool Ramírez	Amphos 21
Marisol Manzano Arellano	Universidad Politécnica de Cartagena
Matías Mudarra Martínez	Universidad de Málaga
Michela Trabucchi	Universitat Politècnica de Catalunya
Miguel Ángel Marazuela Calvo	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Miguel Rodríguez Rodríguez	Universidad Pablo de Olavide
Mireia Iglesias Carrera	Agència Catalana de l'Aigua

Comité Científico:

Mònica Rosell Linares	Universitat de Barcelona
Nafiseh Salehi Siavashani	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Neus Otero Pérez	Universitat de Barcelona
Nuno Barreiras	Técnico Lisboa
Nuria Ferrer Ramos	Universitat Politècnica de Catalunya
Paula Rodríguez Escales	Universitat Politècnica de Catalunya
Pedro Martínez Santos	Universidad Complutense de Madrid
Raul Carrey Labarta	Universitat de Barcelona
Ricardo Juncosa Rivera	Universidad de A Coruña
Roberto Espínola	Agència Catalana de l'Aigua
Rosanna Margalef-Martí	Universitat de Barcelona
Rotman Criollo Manjarrez	Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, UIB-CSIC
Sara Espinosa Martínez	Centro Tecnológico del Agua CETAQUA
Sergio Martos Rosillo	Instituto Geológico y Minero de España, CSIC
Sonia Valdivielso Mijangos	Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua - CSIC
Teresa Melo	Instituto Superior Técnico, Universidade Lisboa
Vanessa A. Godoy	Universitat Politècncia de València
Vinyet Solà	COLGEOCAT

Organización y mecenazgo:

Asociación Internacional de Hidrogeólogos
Grupo Español

Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua

Universitat de Barcelona
Facultat de Ciències de la Terra

Con el apoyo de:

Universitat Politècnica de València

International Association of Hydrogeologists
the World-wide Groundwater Organisation

1956 – 2016
Grupo Português da Associação Internacional de Hidrogeólogos

Patrocinan:

iAQUANT
SMART WATER MANAGEMENT

AMPHOS 21
an RSK company

ThermoFisher
SCIENTIFIC

VAN WALT
equipment for soil and water research

Albillia
FLUOROMETERS

VEOLIA

Barcelona Turisme
Convention Bureau

sondeos
martínez
testificación
geofísica

Con la colaboración de:

Con la ayuda de:

ÍNDICE DE CONTRIBUCIONES

¿Cómo ha evolucionado la intrusión marina en el acuífero del delta del Llobregat? Evidencias piezométricas e hidroquímicas en un acuífero clave para Barcelona 17

¿Es posible monitorizar el agua subterránea con satélites? 19

25 años de la red española de vigilancia de isótopos en la precipitación (REVIP): avances y perspectivas 20

A água subterrânea nos Açores: estado das massas de água, qualidade e desafios 22

A Espacialização da Condutividade Hidráulica Saturada em Área de Proteção Ambiental Cárstica, Minas Gerais, Brasil 25

Abastecimiento de agua en zonas rurales atlánticas: estudio hidrogeológico y diseño de soluciones basadas en la naturaleza en aldeas de Ponte Caldelas (Pontevedra) 27

Abordagens hidrogeológicas integradas para uma gestão sustentável da água subterrânea urbana em cenários de alterações climáticas 30

Actuaciones para la mejora en el conocimiento hidrogeológico de las Masas de Agua Subterránea pertenecientes a la provincia de Cuenca en el marco de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana 32

Actualización del conocimiento sobre el contexto hidrogeológico de las lagunas de Alcaudete y su entorno (provincia de Jaén, Sur de España) 35

Actualización hidrogeológica y estado de la intrusión marina en el acuífero costero aluvial del río Fuengirola (provincia de Málaga) para aprovechamiento del agua subterránea en situación de sequía 37

Alcance y limitaciones del método COP en un sistema kárstico: implicaciones para la delimitación de perímetros de protección y necesidad de transitar hacia el método COP+K 40

Análisis de la movilización de fuentes de contaminación por solventes clorados en zonas de baja conductividad hidráulica 42

Análisis de la piezometría en los periodos de sequía del acuífero fluviovolcánico de la Garrotxa (Girona) 44

Análisis de los efectos de las sequías meteorológicas e hidrológicas en lagunas costeras mediterráneas 46

Análisis de los efectos del cambio global durante el periodo 2002-2025 en el acuífero de Motril-Salobreña, Granada 48

Análisis de un evento extraordinario de recarga en el sistema kárstico de la sierra de Líbar desde el embalse de Montejaque (provincia de Málaga) 50

Análisis del comportamiento hidrológico de lagunas temporales en la Albera (Girona) mediante el balance hídrico diario 52

Análisis del efecto marea y ventanas del acuitardo en el transporte de contaminantes en el acuífero de Sardas mediante simulaciones de alta resolución temporal.....54

Análisis espacio-temporal de la contaminación de aguas subterráneas por nitratos en varios acuíferos carbonatados kársticos del N de la provincia de Málaga.....56

Análisis geoeléctrico integrado del sistema pseudokárstico de la Dunita de Medellín (Colombia) para su caracterización hidrogeológica 58

Análisis hidrológico de las lagunas peridunares de Doñana durante el año hidrológico 2024/2025 60

Análisis multiisotópico de la atenuación natural de contaminantes en la interfase agua dulce-salada en el Sistema Acuífero Serres de Llevant- Marina (Mallorca) 62

Aplicación de técnicas de machine learning al análisis de la evolución piezométrica en la cuenca del Duero.....65

Aplicación de un modelo DRASTIC adaptado para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la Plana de Valencia 67

Aplicación del índice de calidad GWQI al acuífero carbonatado de Solana (provincia de Alicante) 69

Aplicaciones educativas interactivas de código abierto para la hidrogeología y la gestión de aguas subterráneas 71

Atenuación Natural de contaminantes en acuíferos ante escenarios de recarga gestionada de acuíferos con agua regenerada en el sistema Fluvio-Deltaico de la Baixa Muga.....75

Atualização do balanço hidrológico da Serra da Estrela com EXCEL-BALAN e análise comparativa com dados de teledeteção.....77

Avaliação do risco de contaminação da água subterrânea no sistema aquífero costeiro de Gabès (Tunísia) 79

Avances en el uso del análisis isotópico de contaminantes emergentes en acuíferos: lecciones de dos casos de estudio.....81

Balance de agua en el suelo de la masa de agua de Castellón de la Plana 83

Biorremediación y mitigación del penacho de contaminación mediante una barrera biorreactiva en un acuífero multicapa complejo contaminado por etenos clorados.....85

Canales ancestrales de infiltración (pesqueras) como solución basada en la naturaleza para la recarga de acuíferos en la vertiente sur de la Sierra de Gredos 87

Caracterización de la contaminación química e identificación de fuentes de recarga en aguas subterráneas urbanas de Barcelona 89

Caracterización de la descarga submarina de aguas subterráneas en acuíferos costeros mediante tomografía de resistividad eléctrica anfibia y análisis de la variación horaria 91

Caracterización de la heterogeneidad hidrogeológica y optimización evolutiva para la inferencia del rango dinámico de agua subterránea 93

Caracterización de la presencia de agua subterránea bajo el Mar Menor (Murcia) mediante tomografía de resistividad eléctrica 95

Caracterización de los acuíferos kársticos de Andalucía basada en índices de renovación del agua subterránea. Resultados preliminares del proyecto AQUA-KARST 97

Caracterización de los mecanismos de ventilación en acuíferos kársticos de las sierras de Líbar y Grazalema (Cádiz-Málaga) mediante monitorización térmica 99

Caracterización geofísica de acuíferos antrópicos mediante tomografía eléctrica en el distrito minero de Linares-La Carolina (Jaén).....101

Caracterización hidrobiogeológica de los manantiales salinos del Vinalopó Medio (Novelda, Alicante).....103

Caracterización hidrogeológica del acuífero de los Gresos d'Areny en la Conca Dellà (Pallars Jussà, Lleida).....105

Caracterización hidrogeológica preliminar del acuífero formado por la alteración de las rocas ígneo-metamórficas de la Plataforma de Toledo. 107

Caracterización hidrogeológica y térmica distribuida para el diseño de campos geotérmicos y posible almacenamiento térmico en el subsuelo, en el marco del proyecto Vielha Smart Multi-RES micro DHC grid. 109

Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de mezcla y reacciones biogeoquímicas en un acuífero costero mediante el método AMAR (Análisis de Mezcla de Aguas y Reacciones).....111

Caracterización hidroquímica de las masas de agua subterránea de la cuenca del Duero mediante el uso del software Q-Facies 113

Caracterización multi-isotópica para trazar las fuentes de nitrato: resultados a escala de país. 115

Caracterización y análisis hidrogeoquímico de la masa de agua subterránea de Tordesillas (Zamora-Valladolid, España) 117

Colonización microbiana y evolución de la eficiencia depurativa en sistemas de tratamiento suelo-acuífero 119

Comprensión de la red de flujo de agua subterránea y de los procesos de desnitrificación en líneas de flujo que descargan al Mar Menor en el humedal de El Carmolí (Campo de Cartagena) 121

Condiciones del permafrost y dinámica de la capa activa en la Meseta Marambio, Isla Marambio (Seymour), Antártida.....123

Consecuencias de la geotermia de baja entalpia en el comportamiento de contaminantes orgánicos traza. Experiencia alrededor del Mercat de Sant Antoni en Barcelona. 125

Contaminantes emergentes en el acuífero kárstico de Yucatán (México): evaluación del impacto urbano de Mérida 127

Control tectónico-litológico de la hidrogeoquímica de los manantiales hiperalcalinos del macizo de peridotitas de Ronda (Málaga, España).....129

Correlación de los componentes hidrogeológicos de un sistema salino ácido: Salar de Gorbea como caso de estudio.....131

Creación de humedales funcionales como estrategia de compensación hídrica de la industria cementera 134

Criterios para el diseño de perímetros de protección contra la contaminación de captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento 136

Cuantificación de la contribución de la recarga natural y los aportes antropogénicos en las aguas superficiales en una cuenca mediterránea: enfoque de mezclas.....138

Curso de especialista en investigación y recuperación de aguas subterráneas y suelos contaminados.....140

De la agricultura tradicional a la recarga gestionada: las zayas de La Valduerna como SbN para la resiliencia hídrica 142

Del TRT al rendimiento anual: sistemas geotérmicos de circuito abierto y cerrado en Barcelona. 144

Delimitación de las áreas de recarga natural en las masas de agua subterránea con la integración de SIG, teledetección y AHP 145

Delimitación de perímetros de protección en medios detríticos y kársticos: retos metodológicos y aplicación práctica en el sistema de abastecimiento de Palma de Mallorca 147

Demostración de un sistema de tratamiento suelo acuífero con barreras reactivas para la eliminación de contaminantes del agua residual tratada 149

Desacoplamiento de transporte y reacciones en el transporte reactivo 151

Desarrollo de sensores virtuales para la detección indirecta de episodios de contaminación en acuíferos kársticos mediante el uso de herramientas de Inteligencia Artificial 153

Desarrollo de un modelo hidrológico e hidrogeológico acoplado de la cuenca del Llobregat para el análisis de interacciones superficie-subsuelo bajo escenarios de cambio climático 155

Desarrollo de un modelo hidrológico integrado totalmente distribuido para simulaciones SW-GW a gran escala 157

Desarrollo de un modelo numérico de flujo subterráneo como base para la remediación del acuífero fracturado de Òdena (España) 159

Descarga de agua subterránea al mar: cuantificación de sus componentes mediante la integración de técnicas 161

Desde la caracterización del emplazamiento hasta el diseño de la remediación: un enfoque integrado para aguas subterráneas contaminadas por nitratos 163

Desnitrificación in situ como estrategia de gestión para mejorar la calidad del agua subterránea en acuíferos costeros mediterráneos: potencial aplicación en recarga artificial 165

Desnitrificación inducida en un acuífero aluvial costero mediante ensayos push-pull (NE de España) 167

Determinación estacional del origen de la contaminación por nitratos en aguas mediante el uso integrado de datos multiisotópicos y de marcadores microbianos 169

Diagnóstico de la colmatación en balsas de infiltración horizontal mediante integración de datos de presión, polarización inducida y Epss 171

Dinámica estacional de múltiples mecanismos de recarga en cuencas mediterráneas montañosas: de la señal isotópica al flujo absoluto 173

Diseño de una red de sensorización hidrogeológica para la conservación de manantiales petrificantes en Orbaneja del Castillo (Burgos) 175

Dispersion on laminar and turbulent network flow 177

Doñana: evolución histórica y situación actual 180

Efectos de la capilaridad y la heterogeneidad hidráulica en el fujo subterráneo saturado-no saturado.....182

Efectos de la heterogeneidad estratificada en la geometría de los lentes de agua dulce y en los procesos de ascenso salino por bombeo en acuíferos insulares.184

Efectos sinérgicos de la sequía extrema y las presiones antropogénicas en la calidad de los manantiales de la provincia de Barcelona 186

El agua subterránea como restricción biofísica en la toma de decisiones económicas: hallazgos preliminares de una revisión sistemática 188

El agua subterránea en la encrucijada: Una mirada a la crisis hídrica en Guanajuato, México 190

El Aula de Hidrogeología en el campo como herramienta de aprendizaje basada en la resolución de problemas 192

El reto de los nitratos en las aguas subterráneas y superficiales en Catalunya: del diagnóstico hidrogeológico a las soluciones basadas en la naturaleza 194

Ensayos de columna para evaluar la eliminación de contaminantes biológicos y orgánicos emergentes en sistemas suelo–acuífero con barreras reactivas.....196

Ensayos piloto para la optimización de la estrategia de biorremediación de un emplazamiento multifoco impactado por etenos clorados 198

Estado químico del acuífero principal del delta del Llobregat en el ámbito de la barrera hidráulica contra la intrusión salina 200

Estimación de la recarga de agua subterránea mediante modelación hidrológica distribuida en una subcuenca del Alto Guadiana.....203

Estimación preliminar de la recarga mediante balance de masas de cloruro (CMB) en los acuíferos de Sierra Morena: Protocolo para depuración de datos hidroquímicos 205

Estimulación de la desnitrificación para optimizar la eliminación de nitratos en escorrentía agrícola en un humedal construido: evaluación isotópica 208

Estrategia de gestión de aguas subterráneas: reglas coordinadas de explotación en nuevas zonas de captación para abastecimiento y recarga gestionada de acuíferos con aguas regeneradas: el caso del paleocanal del río la Muga (Alt Empordà, NE de la Península Ibérica) 210

Estrategia y compromisos de la industria de los materiales de construcción en la gestión responsable del agua.....213

Estrategias para el estudio y monitoreo de aguas subterráneas, mediante el uso de herramientas técnicas y tecnológicas integradas a sistemas IoT en zonas de influencia del corredor minero del departamento del Cesar.....215

Estudio de la recarga del acuífero de la cubeta de la Llagosta 217

Estudio de los contaminantes orgánicos de preocupación emergente en las aguas subterráneas de la cuenca del río Besós.....219

Estudio de los procesos hidrogeológicos en una cuenca volcánica mediante el análisis de manantiales 221

Estudio del riego con aguas regeneradas en el acuífero detrítico del Río Vélez (Málaga): impacto de compuestos inorgánicos y contaminantes emergentes .223

Estudio hidrogeológico para la recarga gestionada de acuíferos con agua regenerada de la EDAR de l'Ampolla y l'Ametlla de Mar y análisis multicriterio de alternativas para determinar el sistema de recarga 225

Estudio multi-isotópico de persulfato ($^{34}S/^{32}S$, $^{18}O/^{16}O$) y tricloroeteno ($^{13}C/^{12}C$, $^{37}Cl/^{35}Cl$) para evaluar la eficiencia de un tratamiento de oxidación avanzada en un emplazamiento contaminado 227

Estudio preliminar de la relación entre las aguas subterráneas y superficiales mediante el análisis de los contaminantes emergentes y el glifosato y AMPA en la cuenca del Guadiana 229

Estudios hidrológicos y modelos de mezcla de aguas para el estudio del drenaje ácido del terraplén del Aparral en la autovía AG-64 (A Coruña).....231

Estudios preliminares para la mejora de la precisión en la medida de tritio en aguas subterráneas con el equipo de centelleo líquido Quantulus GCT 6220...233

Evaluación cuantitativa de opciones de gobernanza para la mejora de la calidad en un acuífero multicapa urbano-costero: caso del delta del Besòs 235

Evaluación de diferentes estrategias para la reducción de la afección por nitratos en aguas subterráneas y suelos de origen industrial y agrícola (proyecto SERENA) 237

Evaluación de la calidad del agua de consumo y sus factores condicionantes en la ciudad de Malabo.....240

Evaluación de la garantía de suministro y calidad del agua a partir de recursos subterráneos, demanda y estrategias de gestión sostenible: el caso de manacor (Mallorca) 242

Evaluación de la hidrogeoquímica natural y antrópica de las aguas subterráneas y superficiales en la cuenca del río Ripoll con herramientas estadísticas. 244

Evaluación de la incertidumbre en la estimación de los recursos termohidrogeológicos con base en soluciones analíticas y numéricas.....246

Evaluación de la recarga gestionada del acuífero de Sa Estremera (Mallorca) .248

Evaluación de la recarga natural en acuíferos kársticos en el mundo 250

Evaluación de los impactos del cambio climático en el balance hidrológico en cuencas de montaña de los Andes 252

Evaluación del estado cuantitativo de acuíferos sobreexplotados a partir de la aplicación de índices estandarizados climáticos (SPEI) e hidrogeológicos (SGI) 254

Evaluación del impacto del cambio climático en la calidad del agua mediante análisis multivariante y aprendizaje automático en la cuenca alta del Guadiana (centro-sur de España) 256

Evaluación del régimen térmico del sistema acuífero Almonte-Marismas mediante perfiles verticales de temperatura.....258

Evaluación integrada del impacto del cambio climático y la propagación de la sequía en la respuesta hidrogeológica de la cuenca del río Mecina (Sierra Nevada) 260

Evaluación isotópica de la eficiencia de la desnitrificación inducida en el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena (Murcia).....262

Evolución hidrogeoquímica del sistema acuífero-río de la cuenca alta del Llobregat durante la sequía y la recuperación hidrológica 264

Exploración de nuevos recursos hídricos subterráneos en Kenia. El caso del acuífero neógeno. 266

Formación continua avanzada en hidrogeología: experiencia de un modelo docente híbrido sincrónico 268

Formación interdisciplinar en gestión de recursos hídricos mediante trabajo de campo: experiencia docente en la cuenca de la Muga 271

Gemelo digital para la gestión sostenible del abastecimiento de Palma: Modelización acoplada de acuíferos bajo escenarios de cambio climático.....273

Generación de conocimiento sobre la contaminación por metales pesados en el agua subterránea del sur de Honduras y su relevancia en la elevada incidencia de enfermedad renal crónica.....275

Gestión avanzada de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca del Besòs: experiencias y avances de los proyectos RECLAM y waterSOS.....278

Gestión sostenible y compartida de recursos hidrotermales frente al cambio climático: método y resultados preliminares del proyecto ThermEcoWat 280

Gravity fingering and solute transport in heterogeneous unsaturated soils under infiltration–evaporation cycles 282

Groundwater DataHub: plataforma interoperable y modelización híbrida para la gestión territorial de aguas subterráneas frente a la sequía en la Costa del Sol Occidental 284

Guía técnica de abatimientos del freático en obras de edificación 286

Herramienta de gestión hidrológica espacial para la prevención de riesgos en humedales mediterráneos: aplicación al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel 288

Hidrodinámica de acuíferos costeros en ambientes hiperáridos: el acuífero Caplina en el desierto de Atacama, sur del Perú 290

Hidrogeología de la Euro-región Mose-Rin (EMR) y modelización de flujo subterráneo para el estudio de viabilidad del Telescopio de Einstein.....292

Hidrogeoquímica del acuífero costero de El Golfo-Nisdafe (El Hierro, Islas Canarias) 294

Hierro y nitrógeno en interacción en un sistema lacustre: implicaciones en la mitigación de la contaminación por nitratos 296

Huella isotópica de la precipitación y la recarga en acuíferos kársticos de la cabecera del Llobregat.....298

Humedales artificiales como medida de mitigación frente a aportes de nitrato en un sistema acuífero–laguna del Mediterráneo 300

Identificación de Unidades Físicas Mitigadoras de nitrato en ecosistemas acuáticos y acuíferos de Cataluña 302

Identificación mediante análisis SIG multicriterio de áreas potenciales para la replicación de sistemas ancestrales de recarga gestionada con acequias de montaña en España peninsular 304

Impacto de la expansión de la geotermia somera en la calidad del agua subterránea: Movilización de elementos traza por el aumento de temperatura 306

Impacto de los incendios forestales en la calidad de las aguas subterráneas: perspectivas de la Sierra de la Culebra (España).....308

Impacto del Cambio Climático en la Cola de Caballo (Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido) 309

Impacto del modelo de Supermanzanas (Superilles) en la calidad del agua urbana: dinámica de metales traza y materia orgánica disuelta en el entorno urbano..312

Impactos antrópicos sobre la hidrología de las lagunas de Lantejuela (Sevilla) y propuesta de restauración hidrológica 314

Impactos de la recarga artificial de acuíferos mediante acequias de careo en la cuenca del río Mecina (Sierra Nevada, España) 316

Indicadores hidrogeológicos de la degradación de humedales mediterráneos en el sur de la Península Ibérica: Influencia de la extracción de aguas subterráneas y variabilidad climática 320

Influência das condições hidrodinâmicas na salinização de sistemas aquíferos costeiros em regiões semi-áridas.....322

Influencia del bombeo en la dinámica de las sequías de aguas subterráneas: análisis mediante índices estandarizados y simulaciones contrafactuales.....325

Integración de ensayos hidráulicos complejos y modelización MODFLOW para la obtención de parámetros individualizados en un acuífero multicapa 328

Inundaciones hidrogeológicas en entornos urbanos kársticos: lecciones aprendidas tras el episodio de lluvias extremas de febrero del 2026 en las sierras de Endrinal y Líbar (provincias de Cádiz y Málaga) 330

Investigaciones relacionadas con la contaminación puntual de las aguas subterráneas. Localización del origen de contaminaciones históricas 332

Destino de los edulcorantes artificiales en acuíferos urbanos: Evaluación de la atenuación natural mediante modelos de mezcla.....333

La contaminación puntual de aguas subterráneas. Pasado, presente y futuro. 335

La contaminación química de acuíferos rurales y estrategias de tratamiento de aguas subterráneas para la obtención de recursos hídricos alternativos.....337

La EUropean Groundwater Monitoring database (EUGM) como base para la contribución ibérica a iniciativas europeas financiadas.....339

La hidrogeología en el diseño del humedal regulable de San Cristobal de La Laguna (Tenerife).....341

La huella isotópica de situaciones meteorológicas extremas en España: una invitación a la colaboración para el estudio del clima y la hidrología con isótopos ambientales.....343

La noción de hidrosistema natural, un concepto útil para la hidrogeología.....345

La recarga de acuíferos como tratamiento complementario del efluente de estaciones de regeneración del agua en el Área Metropolitana de Barcelona .347

La relación río-acuífero en la cuenca alta del río Palancia (Castellón - España) 350

Las aguas subterráneas del sur de Chile: oportunidades y desafíos en un laboratorio natural.....352

Lisímetros de succión pasiva de bajo coste para la estimación de la recarga en el acuífero de Doñana. Análisis de datos obtenidos. 354

Más allá de la línea de costa: Como los datos obtenidos en el mar nos informan del comportamiento de los acuíferos costeros en tierra. 356

Más allá del número de puntos: integración de datos auxiliares y análisis de incertidumbre para mapear el nivel piezométrico en Cataluña 358

Mejora de la Eficiencia Operacional de la Recarga Gestionada de Acuíferos mediante Herramientas Basadas en IA: Proyecto MARCLAIMED 360

Metamodelos híbridos de Bosques Aleatorios y Procesos Gaussianos aplicados a la simulación del transporte reactivo en interacciones entre bentonita y productos de corrosión 362

Metodología integrada de análisis del impacto de los riesgos derivados del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos 364

Metodología integrada para evaluar el impacto del cambio climático sobre las aguas subterráneas y las sequías en España.....366

Métodos lagrangianos para la simulación del transporte reactivo en modelos integrados de agua superficial-subterránea 368

Modelación de flujo y transporte con densidad variable en roca fracturada, excavación del repositorio profundo ONKALO® (Finlandia).....370

Modelación de sistemas kársticos utilizando openKARST 372

Modelación matemática de la contaminación por nitratos en el acuífero de la Plana de Valencia 373

Modelación termo-hidro-mecanica de fracturas preexistentes para mejorar la inyectividad de CO_2 en acuíferos carbonatados de baja permeabilidad.....375

Modelización 3D de flujo y transporte con densidad variable para el diseño de una nueva barrera hidráulica frente a la intrusión salina en el delta del Llobregat .377

Modelización acoplada aguas superficiales–subterráneas en la cuenca del río Besòs para la mejora de las predicciones de escenarios futuros.....379

Modelización de flujo y transporte en humedales construidos para la optimización del tratamiento 381

Modelización de la dinámica redox en un acuífero urbano situado en el delta del río Besòs (NE de la península ibérica) 383

Modelización del flujo subterráneo en el depósito controlado de la Vall d'en Joan (Macizo del Garraf): cuantificación de posibles filtraciones hacia un sistema kárstico.....385

Modelización geológica y de DNAPL 3D e hidroquímica 2D del emplazamiento de Sardas (Sabiñánigo).....387

Modelización hidrogeoquímica como herramienta para comprender los procesos que influyen en la mineralización del agua subterránea en el valle de Rodalquilar, Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar (Almería).....389

Modelización hidromecánica acoplada de asientos inducidos por bombeo en entornos urbanos.....391

Modelización integrada mediante el acoplamiento de procesos hidrológicos e hidrogeológicos para la evaluación de la recarga efectiva, la evapotranspiración y la escorrentía.....393

Modelización numérica avanzada e integración de modelos geológicos 3D, teledetección y aprendizaje automático para la mejora del conocimiento: caso de Xinzo de Limia (NW de España).....395

Modelo conceptual hidrogeológico de los acuíferos jurásicos y cretácico la Sierra de segura (SE de España). 397

Modelo geológico y numérico del Delta del Besòs y la Cubeta de la Llagosta para la gestión de los recursos hídricos subterráneos 399

Modelo hidrogeológico del acuífero de la Plana de Valencia Norte 401

Modelo numérico para la gestión hidrogeológica de un embalse en un entorno minero 403

Monitoreo de la humedad del suelo en charcas temporales mediterraneas con imagenes satelitales SAR 405

Monitoreo satelital InSAR como herramienta clave para la explotación y gestión sostenible de la explotación de acuíferos 407

Monitorización virtual de aguas subterráneas mediante análisis de datos DInSAR y Machine Learning 409

Muestreadores pasivos cerámicos para la monitorización de PFAS en aguas subterráneas y superficiales: aplicación en la cuenca del río Besòs 411

Aplicación de cálculo interactivo para el análisis de datos hidroquímicos desarrollada mediante código abierto (R-Shiny) 413

Origen de los manantiales termales de Alhama de Aragón y Jaraba. Modelización hidrogeológica del flujo regional del sistema geotermal, Cuenca de Almazán, Cordillera Ibérica, España 415

Papel de la zona no saturada y la presencia de distintas especies de plantas en la eliminación de contaminantes en un sistema de tratamiento Suelo-Acuífero ..417

PFAS en aguas subterráneas de Catalunya: hacia una solución destructiva y sostenible. 420

Plan piloto para la implementación de recarga inducida en un sistema de represas ubicado en una microcuenca de la Sierra de las Cruces, México 422

Potencial del análisis isotópico (^{34}S y ^{18}O) del persulfato y sulfato para evaluar la activación del persulfato en tratamientos de oxidación avanzada 424

Predicción de la sensibilidad de los acuíferos costeros a la subida del nivel del mar mediante ERT time-lapse 426

Predicción de transmisividad y respuesta hidráulica en roca cristalina fracturada mediante aprendizaje automático 428

Presencia de contaminantes emergentes en la franja litoral y acuífero del Mar Menor.....430

Presencia de fármacos y antibióticos en las aguas subterráneas de Cataluña ..433

Presencia de microplásticos en aguas superficiales y subterráneas de la Laguna de Gallocanta (SW Aragón, España).....435

Presencia de PFAS en las aguas subterráneas de Cataluña.....437

Presencia y acumulación de contaminantes emergentes en cuencas endorreicas: la Laguna de Gallocanta (SW Aragón, España).....439

Presencia y distribución de contaminantes emergentes (CECs) en acuíferos volcánicos del Valle Central (Costa Rica).....441

Procesos de flujo y transporte en la zona no saturada: Limitaciones de los modelos y experimentos bidimensionales en un mundo tridimensional.....443

Propuesta preliminar del modelo hidrogeológico de la isla mayor del Parque Nacional Marítimo Terrestre de Cabrera como herramienta para mitigar el efecto del Cambio Climático en las aguas subterráneas.....445

Propuestas de mejora en la explotación y el mantenimiento de las balsas de Sant Vicenç dels Horts, Barcelona, Catalunya.....447

Recarga gestionada del acuífero con agua tratada de la EDAR de Cambrils.....451

Relevancia del análisis hidroquímico en la determinación de los límites de las cuencas hidrogeológicas. Cuenca del Salar de Atacama (Chile) 453

Resiliencia de los sistemas hidrogeológicos a las sequías en base a índices estandarizados. Aplicación a las cuencas internas de Cataluña.....455

Resolución en GPU de problemas de transporte reactivo y macrodispersión en medios porosos altamente heterogéneos mediante métodos Eulerianos.....457

Respuesta dinámica del almacenamiento de agua durante sequías meteorológicas.....459

Respuesta hidroquímica a la recarga asociada a eventos de tormenta tras una sequía prolongada en un sistema río–acuífero mediterráneo desconectado ...461

Resultados preliminares del contenido físico-químico e isotópico del agua subterránea en la Cuenca de la Garganta de San Gregorio (Aldeanueva de la Vera, Cáceres).....463

Resultados preliminares del contenido físico-químico e isotópico del agua subterránea en la Cuenca de la Garganta de San Gregorio (Aldeanueva de la Vera, Cáceres).....465

Salinização em agroecossistemas do oásis tunisino: causas, impactes e desafios de gestão.....467

Sensórica y monitoreo de aguas subterráneas urbanas: el proyecto URBANM2O en el caso de estudio de Sant Adrià del Besòs 469

Separación de hidrogramas en una cuenca de llanura mediante EMMA-MIX: el agua de avenida tiene una fracción vieja, pero no muy vieja. 471

Simulación y gestión agéntica de modelos Modflow en una plataforma cloud 473

Soluciones ancestrales basadas en la Naturaleza para la recarga de acuíferos en cauces fluviales: el caso de los tapes ecuatorianos y las boqueras almerienses 475

Subsidencia inducida por explotación de aguas subterráneas y su impacto en infraestructuras críticas: el acuífero del Alto Guadalentín (SE de España) 479

Transporte de calor en fracturas considerando múltiples escenarios de rugosidad 481

Transporte de sedimento en suspensión en acuíferos kársticos e implicaciones como vector de contaminación fecal. El caso de estudio de la Sierra de Ubrique (S España).....483

Tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina mediante sustratos reactivos con caliza y cenizas de combustión de biomasa de olivar 485

Una aplicación a la hidrogeología de emergencia, el caso del incendio forestal de Las Médulas de 2025.....487

Uso de temperatura como trazador y modelización estocástica para el análisis de recarga gestionada.....489

Uso Emergencial dos Recursos Hídricos Subterrâneos em Minas Gerais, Brasil491

Utilización de datos InSAR para la caracterización de acuíferos mediante análisis de series temporales. 493

Valores de Recarga como Indicador de Sobreexplotación de Aguas Subterráneas 495

Variaciones en el almacenamiento de aguas subterránea en acuíferos cuencas montañosas.....497

Visibilizar las aguas subterráneas mediante un modelo físico 499

Visión general del proyecto WATER4MED y su implementación en la cuenca del río Besòs (España) 501

Vulnerabilidad frente al cambio climático de manantiales petrificantes dependientes del agua subterránea en un karst compartimentado: tipologías funcionales y gestión adaptativa en el Geoparque de Las Loras 504

Las páginas en blanco que aparecen en este volumen han sido dejadas intencionadamente para conservar la paginación y la estructura del libro tras la retirada de algunos resúmenes una vez finalizado el proceso de edición.

¿Cómo ha evolucionado la intrusión marina en el acuífero del delta del Llobregat? Evidencias piezométricas e hidroquímicas en un acuífero clave para Barcelona

Jordi Òdena Blanch[1], Laura Blanco Núñez[2], Xavier Alemany Monsó[1]

[1]*Anufra, Soil & Water Consulting*
[2]*Department of Mineralogy, Petrology and Applied Geology, Universitat de Barcelona*

Palabras clave: acuíferos, salinización, piezometría, acuífero aluvial del Llobregat

Resumen. La intrusión marina en el delta del Llobregat constituye uno de los procesos hidrogeológicos más relevantes y complejos de la costa catalana, debido a la combinación de explotación histórica, elevada demanda hídrica y una arquitectura sedimentaria altamente heterogénea. En este contexto, comprender su evolución reciente es esencial para mejorar la gestión del acuífero y anticipar escenarios de vulnerabilidad futura.

El presente estudio desarrolla un análisis integrado basado en series piezométricas, datos hidroquímicos y perfiles verticales de conductividad, complementados con campañas de campo y con la revisión sistemática de bases de datos regionales. Este enfoque permite evaluar de manera conjunta la dinámica del nivel freático, la distribución espacial de la salinidad y la estructura vertical de la interfaz agua dulce–agua salada.

A escala regional, se han analizado mapas de conductividad puntual correspondientes a los últimos quince años en Catalunya. Estos mapas muestran de forma consistente que las conductividades más elevadas se concentran en el acuífero del Llobregat, lo que confirma su carácter singular dentro del conjunto de sistemas costeros catalanes. Este patrón regional justifica la necesidad de un análisis más detallado centrado en este delta.

A escala local, se han elaborado mapas de isoconductividades de los últimos diez años para el acuífero superficial y el profundo. Esta información permite caracterizar la distribución espacial de la salinidad, identificar zonas con persistencia de valores elevados y evaluar posibles cambios en la configuración del sistema. La comparación entre ambos niveles acuíferos aporta información

relevante sobre la estratificación vertical y sobre la conectividad hidráulica entre unidades.

El análisis conjunto de las series piezométricas, los datos hidroquímicos y los perfiles verticales de conductividad permite identificar señales que pueden asociarse a procesos de intrusión marina, mezcla o recuperación. La integración de estas fuentes de información proporciona una base sólida para detectar patrones temporales y espaciales, evaluar la posición relativa de lainterfaz y mejorar la interpretación del comportamiento hidrogeológico del delta.

En conjunto, el trabajo ofrece una visión actualizada y detallada del estado reciente del acuífero del Llobregat y propone indicadores operativos que pueden resultar útiles para el seguimiento y la gestión del sistema en un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos. Este enfoque integrado constituye un paso previo necesario para futuras evaluaciones cuantitativas y para la definición de estrategias de gestión adaptativa.

¿Es posible monitorizar el agua subterránea con satélites?

Carolina Guardiola-Albert[1], Guadalupe Bru[1], Marta Béjar-Pizarro[1], Pablo Ezquerro[2]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*
[2]*Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC)*

Palabras clave: Observación de la Tierra, Sobreexplotación, Subsidencia, Almacenamiento hídrico

Resumen. En los últimos años, los avances en observación de la Tierra han abierto nuevas posibilidades para estudiar los recursos hídricos subterráneos a grandes escalas espaciales. En este trabajo se evalúa el potencial de combinar diferentes observaciones satelitales para analizar la relación entre la evolución del almacenamiento de agua subterránea y la deformación del terreno en España.

Para ello se utilizan productos derivados de Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR), que permiten medir deformaciones milimétricas de la superficie terrestre, junto con estimaciones de variaciones del almacenamiento total de agua procedentes de la misión GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment).

El análisis se realiza para el conjunto de las masas de agua subterránea de las distintas demarcaciones hidrográficas españolas. Como ejemplo, se identifican áreas en las cuencas del Guadalquivir y del Segura donde se observan velocidades de subsidencia de varios milímetros por año coincidentes con tendencias negativas en el almacenamiento hídrico derivado de GRACE. Estos patrones sugieren una relación con la explotación intensiva de los acuíferos.

Los resultados muestran que la integración de observaciones satelitales multisensor permite identificar de forma sistemática zonas donde coexisten subsidencia y pérdida de almacenamiento, constituyendo una herramienta eficaz de diagnóstico preliminar a escala nacional. Este enfoque facilita la detección de áreas potencialmente sobreexplotadas y contribuye a la priorización de medidas para la gestión sostenible de las aguas subterráneas.

Agradecimientos: Subvención de la Dirección General del Agua al IGME-CSIC en el marco del Plan de Acción de Aguas Subterráneas 2025.

25 años de la red española de vigilancia de isótopos en la precipitación (REVIP): avances y perspectivas

Carmen Sánchez Blaya[1], Ana Isabel Infantes Brotons[1], Silvino Castaño Castaño[1], Javier Rodríguez Arévalo[1]

[1]Área de aplicaciones isotópicas (AAI) del centro de estudios de técnicas aplicadas (CETA) del centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX)

Palabras clave: REVIP, Isótopos estables, Tritio

Resumen. La Red Española de Vigilancia de Isótopos en la Precipitación (REVIP) está gestionada por el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA) del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) desde el año 2000. Cuenta con 20 estaciones distribuidas en las principales demarcaciones hidrográficas españolas proporcionando una cobertura representativa de las diferentes zonas geográficas y climáticas del país.

En estas estaciones se obtienen muestras mensuales integradas representativas de la precipitación que posteriormente se analizan en el Área de Aplicaciones Isotópicas (AAI). La determinación de los isótopos estables de la molécula de agua (δ^2H y $\delta^{18}O$) se ha llevado a cabo durante años con un espectrómetro de masas de doble entrada (IRMS). Hoy en día el AAI dispone también de dos espectrómetros laser basados en la metodología CRDS (Cavity Ring-Down Spectroscopy). La determinación de la actividad del tritio se realiza por concentración electrolítica, con detectores de centelleo líquido, modelos Quantulus 1220 y 6220 GCT de Revvity, de muy bajo fondo y optimizados en la ventana de baja energía de emisión beta. La determinación de tritio está acreditada por la Norma UNE-EN ISO/IEC 17025 y actualmente la determinación de isótopos estables se encuentra en fase de acreditación. Para asegurar la calidad de los datos el AAI participa periódicamente en las comparaciones interlaboratorio de isótopos estables (WICO) y de tritio (TRIC) organizadas por el OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica). En tritio también participa a nivel nacional en las comparaciones organizadas por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

Este trabajo pretende dar visibilidad a estos 25 años de funcionamiento de la REVIP durante los cuales esta red ha aportado series suficientemente largas de información isotópica de referencia para el estudio del ciclo hidrológico en España y en el entorno mediterráneo y para estudios de dinámica global atmosférica, al formar parte de la GNIP (Red Global de Isótopos en la Precipitación) del OIEA. La información aportada por la REVIP ayuda a comprender los cambios que se producen en la distribución espacial y temporal de la composición isotópica de las precipitaciones y la huella que los distintos tipos de precipitación dejan en el suelo, en las aguas superficiales y subterráneas y en los ecosistemas. Esto apoya la caracterización de acuíferos mediante el trazado del origen del agua y su datación. Los resultados aportados por esta red son también referencia para estudios e investigaciones multidisciplinares, tanto a nivel nacional como internacional, que incluyen campos como limnología, meteorología, climatología, ecología, certificación de alimentos y estudios forenses. Toda esta información está disponible en el Visor REVIP desarrollado por el AAI, https://revip.cedex.es/

En la estación de Madrid se dispone de datos isotópicos de eventos de precipitación cuyos resultados aportan información relevante para mejorar el conocimiento de procesos meteorológicos extremos que afectan a diferentes zonas de España y que pueden ayudar a identificar y entender las desviaciones bruscas de la huella isotópica que se observa en las aguas de cuencas hidrográficas y acuíferos de respuesta rápida a la precipitación.

A água subterrânea nos Açores: estado das massas de água, qualidade e desafios

César Andrade[1], José Virgílio Cruz[1]

[1]*IVAR – Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, Portugal*

Palabras clave: Açores, Intrusão salina, Águas subterrâneas, Hidroquímica

Resumen. A água subterrânea constitui o principal recurso hídrico do arquipélago dos Açores, assegurando a quase totalidade do abastecimento público e desta forma desempenhando um papel determinante no desenvolvimento económico, social e ambiental da região. A especificidade hidrogeológica das ilhas, de origem vulcânica, confere aos aquíferos características particulares: elevada permeabilidade em formações basálticas, sistemas aquíferos descontínuos, circulação rápida e forte dependência da recarga direta da precipitação. Esta realidade traduz-se simultaneamente em uma elevada disponibilidade média anual e em uma vulnerabilidade intrínseca significativa à contaminação e à sobre-exploração localizada em algumas ilhas do arquipélago dos Açores. O presente estudo tem como objetivo avaliar o estado quantitativo e químico das massas de água subterrânea no arquipélago dos Açores, com base na análise de dados de monitorização, identificando padrões de degradação da qualidade da água, nomeadamente associados à intrusão salina em zonas costeiras.

Para o efeito, e no âmbito da Diretiva-Quadro da Água e dos Planos de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores, encontram-se identificadas diversas massas de água subterrânea distribuídas pelas nove ilhas, sujeitas a programas de monitorização quantitativa e química. De forma geral, o estado quantitativo apresenta-se favorável, beneficiando de um regime pluviométrico abundante. Contudo, a variabilidade interanual da precipitação, a crescente concentração populacional em determinadas zonas costeiras e o aumento da procura associada ao turismo introduzem pressões adicionais que exigem uma gestão prudente e baseada em conhecimento técnico atualizado.

Relativamente ao estado químico, a qualidade da água subterrânea nos Açores, mantém-se globalmente em bom estado, refletindo ainda em algumas ilhas a reduzida industrialização do território. Ainda assim, registam-se situações pontuais de degradação associadas sobretudo a fontes difusas de poluição, com destaque para a atividade agrícola e pecuária intensiva. Adicionalmente, em

zonas de maior pressão agrícola, observam-se concentrações de nitratos que podem ultrapassar os 120 mg/L, refletindo o impacto de fontes difusas de poluição. Acrescem ainda pressões relacionadas com os sistemas de saneamento descentralizados, deposição inadequada de efluentes, bem como fenómenos naturais e antrópicos específicos do contexto insular, como a intrusão salina em zonas costeiras e a influência de sistemas geotérmicos ativos.

Importa, contudo, salientar que a análise dos dados de monitorização evidencia que as ilhas do Pico e da Graciosa apresentam massas de água subterrânea em estado químico medíocre, situação associada a processos de salinização dos aquíferos. A análise dos dados de monitorização evidencia uma degradação localizada da qualidade da água subterrânea, particularmente nestas ilhas, onde se observam tendências consistentes de aumento da mineralização em captações costeiras. Em coerência com estes resultados, as campanhas de monitorização desenvolvidas pelo Governo Regional evidenciam concentrações elevadas de cloretos e aumento da condutividade elétrica com valores de cloretos da ordem de [133–6390 mg/L] e condutividades entre [17–1853 µS/cm] em determinadas captações, particularmente em zonas costeiras, refletindo a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos insulares à intrusão salina. Esta problemática encontra-se frequentemente relacionada com a sobre-exploração localizada, a proximidade ao mar, a reduzida espessura da camada de água doce e a elevada permeabilidade das formações vulcânicas, fatores que facilitam o avanço da água do mar.

Este cenário constitui um sinal de alerta relevante, uma vez que a degradação por salinização tende a ser de difícil reversibilidade e pode comprometer a aptidão da água para consumo humano e outros usos. Em territórios insulares, onde as alternativas de abastecimento são limitadas, a perda de qualidade química representa um risco acrescido para a segurança hídrica.

Os principais desafios para o futuro passam, assim, pelo reforço e modernização das redes de monitorização, pela melhoria do conhecimento conceptual e da modelação dos sistemas aquíferos, pela delimitação e efetiva proteção das zonas de captação e pela promoção de práticas sustentáveis de uso do solo e de gestão do usa da água e consequente da sua extração. A integração das projeções associadas às alterações climáticas, nomeadamente possível alteração nos padrões de precipitação, na recarga e na frequência de períodos de seca, constitui igualmente uma prioridade estratégica, dada a potencial intensificação dos fenómenos de intrusão salina.

Garantir o bom estado das massas de água subterrânea nos Açores implica uma abordagem integrada, preventiva e adaptativa, que articule ciência, planeamento e boa atuação das entidades governamentais. A proteção deste recurso invisível,

mas essencial, é determinante para assegurar a resiliência hídrica do arquipélago dos Açores e a sustentabilidade das gerações futuras.

A Espacialização da Condutividade Hidráulica Saturada em Área de Proteção Ambiental Cárstica, Minas Gerais, Brasil

Jose Augusto Costa Gonçalves[1], Augusto Costa Mahatma Milani[2]

[1]*Universidade Federal de Itajubá*
[2]*Universidade Federal de Viçosa*

Palabras clave: Permeâmetro, Cárste, Ksat, Lagoa Santa

Resumen. A condutividade hidráulica saturada (Ksat), é uma propriedade fundamental para conhecimento da dinâmica da água em solos saturados ou não saturados, O objetivo deste estudo é apresentar e avaliar os resultados das análises estatísticas dos dados provenientes da determinação da permeabilidade de diferentes solos (argissolos, latossolos, gleissolos e cambissolos), da Área de Proteção Ambiental - Cárste de Lagoa Santa, com cerca de 155 Km^2, localizada ao norte da região metropolitana da cidade de Belo Horizonte em Minas Gerais. A região é geologicamente caracterizada por rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí, assentadas sobre rochas graníticas, gnáissicas e migmatíticas do Complexo Belo Horizonte. A hidrogeologia local é definida em quatro unidades hidrogeológicas, considerando da base para o topo: o aquífero fissural de rochas cristalinas do Complexo Belo Horizonte, o aquífero cárstico-fissural de rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas, o aquitardo de rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena e os aquíferos porosos formados pelas coberturas detrito-lateríticas e cenozóicas aluvionares.

Os valores de Ksat, foram determinados por intermédio de um permeâmetro de carga constante e para as análises estatísticas foi utilizado o software R em sua versão 4.4.1. O argissolo (22 amostras), cambissolos (34 amostras) e gleissolo em profundidade (7 amostras) apresentaram distribuições normais de condutividade, tendo como média 1,16 x 10-1 m/d, 6,14 x 10-2 m/d e 1,95 x 10-3 m/d, respectivamente. Em relação aos latossolos (57 amostras) e ao gleissolo superficial (19 amostras), que possuíam distribuição log-normal, pôde-se concluir que existe uma probabilidade de 85,72%, 96,55% e 47,37%, respectivamente, de se encontrar valores de condutividade hidráulica no intervalo de 0,1 x 10-1 m/d a 4 x 10-1 m/d.

Constatou-se ser preferível caracterizar a Ksat em termos de níveis de probabilidade de ocorrência, ao invés de utilizar um valor, como a média ou a mediana, para representar uma área que estará sujeita às mesmas operações de controle de fluxo de água (práticas de irrigação, de drenagem, de controle de lixiviação, de erosão etc.). Portanto, não é apropriado assumir distribuição normal para os valores de condutividade hidráulica saturada em áreas com as características litológicas e hidrogeológicas semelhantes às da região cárstica de Lagoa Santa do estado de Minas Gerais, Brasil. Toda a região apresenta forte heterogeneidade e anisotropia relacionada à diversificada distribuição de tipos de solos e condutos nas rochas subjacentes, determinando grande variação na direção e nos volumes dos deflúvios superficiais e subterrâneos local e regional. O armazenamento e o fluxo subterrâneo são condicionados pela redez de condutos parcialmente conectados a superfícies de surgências, dolinas e cavernas.

Agradecimientos: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023.

Abastecimiento de agua en zonas rurales atlánticas: estudio hidrogeológico y diseño de soluciones basadas en la naturaleza en aldeas de Ponte Caldelas (Pontevedra)

Javier Samper Calvete[1], Marta García Souto[1], Aitor García Tomillo[1], Bruno Pisani Veiga[1], Alba Mon López[1], Acacia Naves García-Rendueles[1], Luis Montenegro Pérez[1]

[1]*Universidade da Coruña, Centro Interdisciplinar de Química y Biología (CICA), A Coruña, España.*

Palabras clave: abastecimiento rural, estudio hidrogeológico, modelo de flujo, soluciones basadas en la naturaleza

Resumen. El abastecimiento de agua en zonas rurales del noroeste de la Península Ibérica presenta importantes retos asociados a la variabilidad estacional de los recursos hídricos, a la limitada capacidad de los sistemas de captación locales y a la creciente demanda en verano por el fuerte aumento de la población estacional y el consumo de agua por la instalación de piscinas particulares.

Se ha desarrollado un estudio hidrogeológico en una cuenca rural piloto situada en Ponte Caldelas (Pontevedra) orientado a desarrollar soluciones sostenibles para el abastecimiento de pequeñas poblaciones rurales. La zona de estudio está situada en la cuenca del río Verdugo a 5 km de la costa y tiene una altitud entre 170 y 445 m con pendientes significativas. La cuenca está cubierta mayoritariamente por masas forestales y se encuentra sobre un macizo granítico del que se observan multitud de afloramientos. El sistema hidrogeológico está formado por acuíferos fracturados en las rocas graníticas, donde los manantiales constituyen la fuente del sistema tradicional de abastecimiento autónomo de los vecinos. El clima es atlántico oceánico y se caracteriza por precipitaciones abundantes y de marcada estacionalidad, que tienen como consecuencia una significativa estacionalidad en los caudales de los manantiales. Durante periodos secos o de sequía y al final de la época estival, la disponibilidad de agua en estos manantiales resulta insuficiente en muchas ocasiones.

Para analizar el funcionamiento del sistema hidrogeológico se han realizado diversos trabajos de campo, incluyendo la perforación de sondeos, la realización de ensayos hidráulicos, campañas de muestreo de aguas subterráneas, la

instalación de una estación meteorológica, la construcción y equipamiento de piezómetros y la monitorización de niveles piezométricos y caudales de los manantiales. Estos datos han permitido caracterizar el comportamiento del acuífero, establecer un modelo conceptual del sistema y proponer una solución para mejorar la garantía de suministro del abastecimiento. La estrategia de gestión es una solución basada en la naturaleza (NbS) que consiste en priorizar el uso de agua de manantiales cuando el caudal y la calidad lo permitan, complementando el suministro mediante la explotación de un pozo de alto rendimiento durante periodos de sequía. El sistema de bombeo se alimenta mediante energía renovable procedente de paneles solares instalados en una pequeña caseta junto al sondeo, e incluye equipos de monitorización continua de caudal y parámetros hidroquímicos. Esta estrategia difiere de la solución tradicional con un pozo de bombeo como captación y un sistema de regulación artificial en que aprovecha la capacidad de almacenamiento natural y regulación hidrológica del acuífero y en que, durante los periodos húmedos, el manantial descarga de forma natural cubriendo la demanda sin necesidad de consumir energía. Alternar manantial y pozo permite adaptarse a la variabilidad natural del sistema, manteniendo caudales ecológicos y evitando sobreexplotaciones.

Con el fin de evaluar la sostenibilidad de la solución propuesta se ha desarrollado un modelo numérico de flujo subterráneo utilizando el código CORE2Dv5, que permite la simulación del flujo saturado y no saturado, el transporte de calor y el transporte reactivo multicomponente de solutos en medios porosos. El dominio del modelo se extiende aguas arriba del núcleo de A Roca hasta la divisoria de cuenca e incluye las cuencas vertientes a los manantiales estudiados y las zonas de captación de los pozos del sistema de abastecimiento. El modelo incluye los pequeños arroyos que funcionan como zonas de descarga en las épocas húmedas, pero se secan durante el verano. La recarga se ha estimado con un modelo de balance hidrometeorológico alimentado con datos de precipitación y temperatura de una estación meteorológica cercana y calibrado con los niveles piezométricos medidos en los pozos. El modelo de flujo ha sido calibrado con datos de caudales de los manantiales y niveles en los pozos. Las simulaciones realizadas permiten analizar la dinámica del acuífero, estimar los descensos piezométricos asociados a los bombeos y evaluar la extensión espacial de los efectos del bombeo. Los resultados preliminares indican que el sistema puede proporcionar un suministro complementario durante periodos secos sin generar descensos significativos del nivel freático ni afectar de forma relevante a los manantiales cercanos.

Este estudio: (1) Demuestra el potencial de las soluciones basadas en la naturaleza combinadas con herramientas de modelización hidrogeológica para mejorar la resiliencia de los sistemas de abastecimiento rurales y (2) Contribuye al desarrollo

de herramientas de planificación hídrica coherentes con las políticas europeas de adaptación al cambio climático. Además, los resultados obtenidos servirán de base para el diseño de sistemas resilientes que favorezcan la autosuficiencia del suministro y la conservación de los ecosistemas acuáticos.

Agradecimientos: Este estudio ha sido financiado por los proyectos GESTA/RACE (TED2021-130315B-I00) y HERCULES (PID2023-153202OB-I00) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España y el Proyecto de Consolidación GRC de la Xunta de Galicia (Ref.: ED431C 2025/55).

Abordagens hidrogeológicas integradas para uma gestão sustentável da água subterrânea urbana em cenários de alterações climáticas

João Miranda[1], Carlos A. Ribeiro[2], Margarida Antunes[3]

[1]*Landscape Laboratory, Rua da Ponte Romana, 4835-095, Guimarães; ICT | Institute of Earth Sciences; University of Minho, Campus de Gualtar, 4710- 057 Braga, Portugal*
[2]*Landscape Laboratory, Rua da Ponte Romana, 4835-095, Guimarães*
[3]*ICT | Institute of Earth Sciences, University of Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal*

Palabras clave: Gestão de aquíferos urbanos, Recursos hídricos sustentáveis, Modelação de água subterrânea, Resiliência Hídrica

Resumen. A água subterrânea representa um recurso estratégico de água doce à escala global, fornecendo um apoio crucial ao abastecimento doméstico, às atividades agrícolas e aos serviços ecossistémicos. No norte de Portugal, a água subterrânea ocorre principalmente em sistemas aquíferos cristalinos fraturados. Embora estes aquíferos tenham uma capacidade de armazenamento relativamente limitada, são amplamente explorados devido à elevada densidade de captações de água subterrânea. A expansão contínua das áreas urbanas, juntamente com a variabilidade esperada associada aos padrões das alterações climáticas, tem suscitado preocupações crescentes relativamente à dinâmica dos processos de recarga, qualidade da água subterrânea e sustentabilidade a longo prazo destes sistemas aquíferos.

Os sistemas de água subterrânea urbanos desenvolvidos em ambientes geológicos cristalinos são particularmente vulneráveis a mudanças no uso do solo e nos regimes hidrológicos. Processos como o impermeabilização do solo associada à urbanização, aumento das taxas de captação de água subterrânea e a presença de potenciais fontes de contaminação associadas às atividades urbanas e agrícolas têm a capacidade de modificar significativamente os padrões de recarga e a qualidade da água subterrânea. Apesar destas pressões, as avaliações atuais são frequentemente limitadas por conjuntos de dados fragmentados e abordagens analíticas específicas do setor, o que limita uma compreensão abrangente dos efeitos cumulativos da expansão urbana e da variabilidade climática projetada na dinâmica dos aquíferos. Consequentemente,

há uma necessidade crescente de integrar quadros metodológicos capazes de combinar a caracterização hidrogeológica, dados de monitorização a longo prazo e análise de cenários climáticos, a fim de apoiar uma avaliação mais robusta da dinâmica do sistema de água subterrânea.

Neste contexto, este projeto visa desenvolver um quadro metodológico para a caracterização e gestão sustentável dos sistemas de água subterrânea urbana em ambientes cristalinos fraturados, utilizando o município de Guimarães como estudo de caso. A abordagem proposta integra investigações detalhadas de hidrogeologia e hidrogeoquímica no terreno, cartografia estrutural e monitorização contínua de parâmetros físicos e químicos essenciais. Além disso, serão incorporados indicadores de teledeteção e conjuntos de dados climáticos para fornecer informações espaciais e temporais complementares. Estes conjuntos de dados serão integrados num modelo hidrogeológico conceptual e numérico para avaliar a dinâmica de recarga, a vulnerabilidade da água subterrânea e os potenciais impactes em diferentes cenários climáticos.

Os resultados esperados deste estudo incluem a identificação de padrões de vulnerabilidade da água subterrânea, a quantificação dos impactes da urbanização nos processos de recarga e na qualidade da água subterrânea e a avaliação da sensibilidade dos aquíferos em diferentes cenários climáticos. Ao integrar conjuntos de dados estruturais, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e climáticos, este estudo visa fornecer uma estrutura robusta de apoio à tomada de decisões para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos em sistemas aquíferos fraturados urbanos. Além disso, espera-se que a abordagem metodológica desenvolvida nesta investigação seja transferível para outros municípios caracterizados por configurações hidrogeológicas comparáveis, contribuindo assim para melhorar a resiliência hídrica urbana face às crescentes pressões ambientais e climáticas.

Agradecimientos: O projeto aqui apresentado é financiado pela FCT através do projeto 2025.00550.BDANA.

Actuaciones para la mejora en el conocimiento hidrogeológico de las Masas de Agua Subterránea pertenecientes a la provincia de Cuenca en el marco de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana

Nicolas Tapia Morales[1], Salvador Bueso Sánchez[1]

[1]*Aquatec/Veolia*

Palabras clave: Modelo conceptual hidrogeológico, Modelo numérico, Gestión de recursos hídricos, Masa de Agua Subterránea

Resumen. Actuaciones para la mejora en el conocimiento hidrogeológico de las Masas de Agua Subterránea pertenecientes a la provincia de Cuenca en el marco de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana.

La cabecera de cuenca del Guadiana está conformada por múltiples Masas de Agua Subterránea hidráulicamente interconectadas y sometidas a diversas presiones derivadas de las actividades económicas que sostienen. La gestión sostenible del agua subterránea requiere considerar la complejidad hidrogeológica del conjunto de Masas, avanzando hacia una modelización integrada de las mismas. Esto proporcionará el marco adecuado para la planificación y gestión sostenible de recursos.

El Proyecto Actuaciones para la mejora en el conocimiento hidrogeológico , desarrollado durante los años 2022 y 2023, tuvo el objetivo principal de generar una mayor y mejor información hidrogeológica de las Masas de Agua Subterráneas pertenecientes a la provincia de Cuenca, en el marco de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana. La ponencia se centra en el enfoque metodológico adoptado para desarrollar el modelo numérico de las Masas Subterráneas del Alto Guadiana como herramienta última para la gestión de recursos subterráneos. Dicho enfoque metodológico se basa en la generación de información de calidad que sea capaz de sustentar los resultados del modelo numérico: procedente tanto de una extensiva revisión de antecedentes, así como del desarrollo de múltiples campañas de campo. Esta metodología pretende que el modelo final consiga simular con precisión la heterogeneidad hidrogeológica y

las interacciones inter-acuífero, garantizando que el modelo refleje tanto la realidad física como los objetivos de gestión.

Las tareas ejecutadas en el marco del proyecto son:

Revisión y análisis de información previa

Instalación de estaciones meteorológicas

Prospección geofísica

Aforos diferenciales

Ensayos de bombeo

Análisis de calidad de aguas subterráneas

Construcción modelo geológico 3D

Conceptualización hidrogeológica

Estimación balance hídrico global

Desarrollo de un modelo numérico hidrogeológico

El modelo numérico final ha sido desarrollado en el código de diferencias finitas MODFLOW. La innovación principal del trabajo reside en la estrategia de modelamiento conjunto de Masas de Agua Subterránea. Cada Masa se calibra individualmente según sus condiciones hidrogeológicas específicas, pero incorpora condiciones de contorno interdependientes para reproducir flujos inter-masa y transferencias regionales. Esta estructura dotó de robustez numérica al modelo, reduciendo complejidad computacional y asegurando coherencia hidráulica a escala regional. La interdependencia entre Masas permite evaluar de manera cuantitativa cómo variaciones de explotación, recarga o recirculación en un sector impactan sobre los restantes, facilitando un análisis integral de la sostenibilidad del sistema. Entre otros aspectos, el modelo numérico permitió cuantificar el balance hídrico anual de cada Masa de Agua Subterránea para el periodo comprendido entre 2002 y 2021.

Los resultados del trabajo muestran que el modelo numérico elaborado mediante el enfoque propuesto constituye una herramienta robusta, flexible y replicable para la gestión sostenible de sistemas hidrogeológicos complejos y compartimentados, transformando el modelo numérico en un soporte de decisión operativo capaz de anticipar riesgos y guiar inversiones en infraestructuras hídricas. El empleo de una información de base representativa y de precisión es el pilar más importante en el que se apoya la representatividad del modelo.

Agradecimientos: Excma. Diputación Provincial de Cuenca

C.U.A.S. Rus-Valdelobos

C.U.A.S. Lillo-Quintanar

C.U.A.S. Sierra de Altomira

Actualización del conocimiento sobre el contexto hidrogeológico de las lagunas de Alcaudete y su entorno (provincia de Jaén, Sur de España)

Adrián Palomino Gómez[1], Matías Mudarra Martínez[1], Bartolomé Andreo Navarro[1]

[1]*Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga*

Palabras clave: Complejo Caótico Subbético, Flujos subterráneos, Humedal, Gestión

Resumen. Los Complejos Caóticos Subbéticos (CCS) constituyen una franja plurikilométrica en la depresión del Guadalquivir formada por afloramientos arcilloso-evaporíticos y bloques de otras litologías (margas, areniscas, calizas, etc.), de edad Triásico a Mioceno, con comportamiento hidrogeológico general de acuitardo. La disolución de las rocas evaporíticas da lugar a karstificación y al desarrollo de morfologías como depresiones, conductos kársticos y manantiales. Las lagunas Honda y del Chinche (T.M. Alcaudete -provincia de Jaén) se encuentran asociadas a este contexto geológico. La presente investigación pretende avanzar en el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico en el entorno de las lagunas y el grado de conexión entre estas y la Sierra de Orbes, situada 2 km al E.

Ambas lagunas, de carácter estacional, reciben aportes de aguas superficiales y subterráneas según las condiciones hidrometeorológicas. Laguna Honda (443 m s.n.m.) muestra un periodo de inundación más prolongado, condicionado por una cuenca endorreica de mayor superficie (0,95 km^2) y una cubeta más profunda. Sus aguas presentan facies hidroquímica clorurada-magnésica, con variaciones de conductividad eléctrica (CE) comprendidas entre 5,96 y 151,40 mS/cm. La laguna del Chinche (449 m s.n.m.) tiene un hidroperiodo más efímero debido a las intervenciones antrópicas que modifican su funcionamiento hídrico natural. La facies hidroquímica es sulfatada sódico-cálcica y la CE varía desde 0,50 a 1,83 mS/cm.

Del análisis de la piezometría en el entorno de las lagunas se deduce la existencia de flujos regionales de agua subterránea desde el NE (cota piezométrica 460 m s.n.m.) y desde el borde occidental de la sierra de Orbes (480 m s.n.m.), hacia los barrancos y arroyos tributarios del río Guadajoz, al O, donde hay pequeños

manantiales salinos (4,71 - 21,60 mS/cm) situados a cota 400 m s.n.m. El agua subterránea adquiere progresivamente mayores valores de mineralización según el sentido de los flujos subterráneos. La construcción de 6 piezómetros (1 a 7 m de profundidad) en la cubeta de la laguna Honda ha permitido identificar la influencia de los aportes subterráneos por su borde este, norte y especialmente sur, donde se detecta descarga de agua subterránea (16,13 a 50,6 mS/cm). En el piezómetro situado en el borde occidental, la cota piezométrica (442 - 440 m s.n.m) se sitúa por debajo de la base de la cubeta (443 m s.n.m). La información piezométrica de la sierra de Orbes sugiere la existencia de una divisoria hidrogeológica a cota 460 m s.n.m cerca de su borde occidental. Esto se corrobora mediante un análisis estadístico multivariante con las muestras de agua tomadas en varios sondeos, cuyo resultado diferencia dos grupos: captaciones de la sierra de Orbes (acuífero calizo jurásico) y captaciones sobre materiales del CCS.

Los resultados muestran la relación existente entre las lagunas y las aguas subterráneas del CCS, si bien no se aprecia conexión hidrogeológica entre el acuífero de la sierra de Orbes y laguna Honda. Este estudio ayuda a definir de manera más precisa el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico de las lagunas de Alcaudete y su entorno, lo cual es imprescindible para avanzar en la gestión de estas.

Agradecimientos: Este trabajo es una contribución al proyecto de Excelencia P20-01118 del PAIDI de la Junta de Andalucía, y al Grupo de Investigación RNM-308 de la Junta de Andalucía.

Actualización hidrogeológica y estado de la intrusión marina en el acuífero costero aluvial del río Fuengirola (provincia de Málaga) para aprovechamiento del agua subterránea en situación de sequía

Beatriz de la Torre Martínez[1], José Francisco Martín Rodríguez[2], Adrián Palomino Gómez[1], Alejandro Millán Madrid[1], Matías Mudarra Martínez[1], Jorge Gil Muñoz[3], Óscar Hilario Ruiz Sánchez[3], Bartolomé Andreo Navarro[1]

[1]Centro de Hidrogeología y Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga
[2]Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada
[3]ACOSOL S.A. Empresa pública de aguas de la Mancomunidad de Municipios de la Costa del Sol

Palabras clave: Acuífero detrítico costero, sequía, piezometría vs conductividad eléctrica, gestión sostenible

Resumen. En las últimas décadas, la situación hidroclimática en Andalucía ha estado marcada por sequías cada vez más frecuentes y prolongadas, lo que ha dado lugar a una reducción significativa de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. En este contexto, varios municipios de la Costa del Sol Occidental (Málaga) han tenido que implementar medidas excepcionales destinadas a reducir el consumo de agua. Además, han explorado alternativas para incorporar recursos hídricos adicionales, de origen subterráneo, al sistema de abastecimiento urbano. Como parte de estas alternativas, se utilizan recursos hídricos procedentes del acuífero detrítico del río Fuengirola. Este estudio evalúa y actualiza la información sobre los estados hidrodinámico e hidroquímico de dicho acuífero, con especial énfasis en la intrusión marina que pueda producirse en periodos de sequía, dado su carácter costero. El objetivo último es plantear estrategias de aprovechamiento sostenible de los recursos subterráneos destinados al abastecimiento urbano en situación de sequía.

El acuífero aluvial del río Fuengirola (9,5 km^2), de carácter libre, está constituido por arenas, gravas y limos, depositados por el río y sus afluentes, sobre sedimentos pliocenos (conglomerados, margas y arenas) de espesor variable.

Ambas formaciones se encuentran conectadas hidráulicamente y apoyadas sobre un sustrato formado por esquistos, pizarras y peridotitas. La heterogeneidad de los materiales detríticos determina cambios de permeabilidad y, por tanto, variaciones en el gradiente piezométrico, la calidad del agua y el rendimiento de las captaciones. La recarga de dicho acuífero proviene de la infiltración del agua de escorrentía que fluye por los cauces superficiales y, en menor medida, de la precipitación directa que tiene lugar sobre el acuífero. Las salidas se producen por bombeo y drenaje subterráneo hacia el mar.

Entre febrero y abril de 2024 se realizaron dos campañas de campo en las que se midió el nivel piezométrico, la conductividad eléctrica y la temperatura del agua en 18 perforaciones. De manera adicional, se dispuso de series temporales de evolución piezométrica y de mineralización de las aguas extraídas en algunos de los sondeos de abastecimiento desde 2021. Los resultados mostraron cotas piezométricas por debajo del nivel del mar hasta 5 km tierra adentro desde la línea de costa, donde se detectó un conoide piezométrico coincidiendo con la ubicación de varios sondeos de explotación. Además, la evolución temporal de la cota piezométrica sugiere la existencia de cierto desfase temporal entre los eventos de recarga y el ascenso de los niveles, así como que son necesarios varios eventos continuados de precipitación para revertir la tendencia descendente anual en las cotas piezométricas.

En cuanto a los aspectos hidroquímicos, la cota piezométrica presentó relación inversa con la conductividad eléctrica de las aguas. El análisis de las series piezométricas y de conductividad eléctrica en los sondeos de abastecimiento indicó que cotas por debajo de -6 m s.n.m. se asocian a valores de 1.500 a 3.300 µS/cm, mientras que cotas superiores a -6 m s.n.m. presentan valores de conductividad eléctrica estables y por debajo de 1.000 µS/cm. A partir de la relación cota piezométrica vs conductividad eléctrica se definieron 3 umbrales: valores inferiores a 2.500 µS/cm, aguas aptas para consumo, entre 2.500 y 8.000 µS/cm, requieren mezcla o tratamiento parcial, y por encima de 8.000 µS/cm, en las que sería necesario aplicar técnicas de desalobración. La representación del volumen bombeado acumulado en uno de los sondeos de abastecimiento vs a la evolución del nivel piezométrico registrado en el mismo punto permite inferir una ecuación que permite estimar el volumen de agua que podría extraerse del acuífero antes de que el agua bombeada alcanzase 2.500 µS/cm, y entre ese valor y 8.000 µS/cm. Así, en el acuífero del río Fuengirola podrían extraerse hasta 6,5 hm^3 de recursos hídricos subterráneos en situación de sequía prolongada y con apenas recarga. De este volumen, 5 hm^3 corresponderían a aguas con conductividad eléctrica < 2.500 µS/cm, mientras que el resto (1,5 hm^3) tendrían valores entre 2.500 y 8.000 µS/cm, por lo que habría que utilizar plantas desalobradoras.

Se concluye que, durante el último periodo de sequía, el acuífero aluvial del río Fuengirola presentó deterioro cuantitativo y cualitativo como consecuencia de la disminución del volumen de entradas y la continuada extracción por bombeo. Para poder hacer una planificación de abastecimiento sostenible en la que se pueda establecer un protocolo de bombeo es necesario realizar registros continuos de nivel piezométrico y conductividad eléctrica en los pozos de extracción. De esta manera, se podrán establecer umbrales y valores críticos que permiten estimar los recursos hídricos aprovechables y, por tanto, mejorar la eficacia de los planes de abastecimiento durante periodos prolongados de déficit hídrico.

Agradecimientos: Este trabajo es una contribución del grupo de investigación RNM-308 del PAIDI de la Junta de Andalucía.

Alcance y limitaciones del método COP en un sistema kárstico: implicaciones para la delimitación de perímetros de protección y necesidad de transitar hacia el método COP+K

Sergio Raúl Durán Laforet[1], Lorena Bermejo Santos[1], Esther Sánchez[1], Elena Abarca[1]

[1]*Amphos 21 Consulting S.L.*

Palabras clave: Contaminación, Karst, Perímetros de protección, Vulnerabilidad

Resumen. La delimitación de perímetros de protección en acuíferos kársticos plantea retos específicos asociados a la heterogeneidad estructural, la infiltración concentrada y la alta conectividad hidráulica asociada a la karstificación. En este contexto, la reciente guía para la delimitación de Perímetros de Protección del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico propone, entre otros, el empleo del método COP como herramienta de cartografía de vulnerabilidad para apoyar la zonificación de perímetros en sistemas kársticos o fisurados. Sin embargo, los propios desarrolladores del método COP y de su extensión COP+K han señalado, en su desarrollo metodológico, una limitación conceptual de partida: COP se orienta a la vulnerabilidad del recurso (resource vulnerability), pero no a la vulnerabilidad de la fuente o captación (source vulnerability), aspecto clave cuando el objetivo es proteger una captación concreta o un manantial. Este trabajo presenta la aplicación del método COP en un sistema kárstico de media montaña del levante mediterráneo, con un desarrollo limitado del endokarst, con predominio de la fisuración. Se analiza, desde la práctica profesional, su alcance y sus limitaciones a la hora de traducir la cartografía de vulnerabilidad en perímetros de protección operativos. Los resultados permiten discriminar zonas con diferente grado de vulnerabilidad, pero también muestran una elevada sensibilidad a la parametrización en contextos donde el grado de karstificación varía espacialmente y la información disponible no permite representar de forma robusta la conectividad real del sistema. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que, en medios kársticos, la mejora metodológica depende necesariamente de un mayor nivel de conocimiento hidrogeológico. Ello requiere reforzar la caracterización del endokarst y de las redes espeleológicas, los estudios de fracturación, los análisis geomorfológicos detallados y el reconocimiento de campo de puntos

preferenciales de infiltración, surgencias, pérdidas y drenajes. La teledetección puede aportar coherencia espacial en la identificación de rasgos kársticos, densidad de fracturas, coberturas, pendientes y sumideros, aunque su utilidad depende de su integración con evidencias directas. Asimismo, la conceptualización hidrogeológica debe incorporar los flujos diferenciales matriz-conducto y apoyarse en la hidroquímica y en la hidrodinámica de los manantiales (respuesta a eventos, recesión y variabilidad estacional) como indicadores funcionales de conectividad y mezcla. De forma particular, se subraya la necesidad de realizar ensayos con trazadores para reducir incertidumbres críticas en acuíferos kársticos, estimar parámetros hidrogeológicos efectivos (velocidades, tiempos de tránsito, dispersión y conectividad entre sumideros y surgencias) y validar el modelo conceptual que sustenta la delimitación de perímetros. En este sentido, el nuevo conocimiento generado en el actual ciclo de investigaciones del Plan de Acción de Aguas Subterráneas puede resultar determinante para avanzar desde una zonificación basada en la vulnerabilidad intrínseca del recurso hacia una delimitación más robusta orientada a la protección de la fuente, facilitando, cuando sea viable, la transición hacia enfoques del tipo COP+K. En conclusión, en sistemas kársticos la fiabilidad de los perímetros de protección depende directamente de la solidez del modelo conceptual y del grado de caracterización hidrogeológica disponible. Por ello, la inversión en conocimiento (trabajo de campo, ensayos de trazadores, análisis de manantiales y teledetección) constituye una condición práctica imprescindible para lograr una protección efectiva.

Análisis de la movilización de fuentes de contaminación por solventes clorados en zonas de baja conductividad hidráulica

Alberto Millán Martos[1], José Guadalupe Montero Ramírez[1], Jofre Herrero Ferran[1], Cristina Villanova de Benavent[1], Patricia Cabello López[1], Amparo Cortés Lucas[1], Joaquim Farguell Pérez[1], Magdalena Grifoll Ruiz[1], Emilio Orejudo Ramírez[2], Sergi Latres i Simó[3], Diana Puigserver Cuerda[1]

[1]*Universitat de Barcelona*
[2]*Agència Catalana de l'Aigua*
[3]*Agència de Residus de Catalunya*

Palabras clave: Remediación de acuíferos

Resumen. Los compuestos orgánicos más densos que el agua, conocidos en la literatura anglosajona como Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPL), tienden a acumularse en los acuitardos basales, donde la baja conductividad hidráulica, la difusión molecular hacia el interior de la matriz y el transporte advectivo limitado favorecen su persistencia durante largos periodos de tiempo. Aunque los acuitardos se consideran a menudo barreras para la remediación, las heterogeneidades texturales internas, como interestratificaciones de arenas gruesas y gravas finas, pueden incrementar localmente la transmisividad y generar zonas de transición redox donde tienen lugar procesos bióticos y abióticos acoplados.

Este estudio evalúa una estrategia in situ destinada a activar estas zonas reactivas en un acuitardo afectado por DNAPL situado al sur de Figueres (Cataluña, España), contaminado por percloroetileno (PCE), tricloroetileno (TCE), cis-dicloroetileno (cDCE) y algunos contaminantes emergentes. Una caracterización detallada basada en la realización de sondeos con recuperación continua de testigo permitió delimitar la distribución del DNAPL, los contrastes litológicos, las fases minerales y las comunidades microbianas autóctonas. Este análisis permitió identificar niveles interestratificados de arenas medias a gravas finas donde los procesos de atenuación natural presentan potencial para la degradación de cloroetenos.

Con el objetivo de potenciar estos procesos, se llevó a cabo una inyección a baja presión de EHC® Reagent, un reactivo compuesto por hierro cero-valente (ZVI)

combinado con carbono orgánico como agente bioestimulador, aplicada en intervalos seleccionados para estimular la decloración reductiva preservando la estructura de la formación. La intervención promovió el desarrollo de dominios bioactivos caracterizados por oscilaciones redox y la coexistencia de condiciones aeróbicas y anaeróbicas. Estas condiciones favorecieron la actividad de microorganismos implicados en procesos de decloración reductiva, como Dehaloccoides spp., así como de comunidades microbianas asociadas a procesos oxidativos, y promovieron ciclos de precipitación–disolución de minerales de hierro y manganeso de neoformación que contribuyen adicionalmente a la degradación abiótica, generando minerales ricos en sulfuros y green rust.

La presencia de estas zonas adaptadas a condiciones redox variables favorece una mayor resiliencia de los procesos de remediación frente a fluctuaciones hidrológicas asociadas a eventos extremos de sequía o inundación.

El seguimiento posterior a la inyección, mediante testificación continua y muestreo de aguas subterráneas en piezómetros multinivel CMT instalados en la zona de tratamiento y aguas abajo de la misma, permitió evaluar la distribución de los reactivos y la evolución de la calidad del agua subterránea. Los resultados muestran un incremento significativo de las tasas de degradación de los cloroetenos mediante vías tanto reductivas como oxidativas, lo que se traduce en una mayor eficiencia en los procesos de descontaminación. Como resultado de esta actuación, se consiguió alrededor de un 80% y un 97% de movilización de PCE y TCE en zonas de inyección en sedimentos y aguas.

Para disminuir el efecto rebote, reducir la carga contaminante que puede penetrar a unidades hidrogeológicas es clave, en especial, las que se sitúan a mayor profundidad ya que la migración a través de estas unidades puede contaminar acuíferos confinados que tienen un uso preferente para abastecimiento. Por este motivo, recuperar estos recursos hídricos estratégicos delante de escenarios de sequías cada vez más recurrentes debe convertirse en una vía prioritaria. Por último y a nivel de gestión, este tipo de metodologías favorecen un sistema de remediación eficiente y sostenible, en términos energéticos, y de emisión de gases de efecto invernadero.

En conjunto, los resultados indican que las unidades de baja permeabilidad que contienen niveles interestratificados más permeables pueden transformarse en zonas reactivas mediante intervenciones mínimamente invasivas. Estos resultados respaldan el potencial de los acuitardos como medios favorecedores para el desarrollo de soluciones basadas en la naturaleza para la gestión de fuentes DNAPL y la remediación sostenible de contaminantes persistentes y emergentes.

Análisis de la piezometría en los periodos de sequía del acuífero fluviovolcánico de la Garrotxa (Girona)

Joan Bach Plaza[1], Emili Bassols Isamat[2]

[1]*Unitat de Geodinàmica Externa i d'Hidrogeologia. Universitat Autònoma de Barcelona.*
[2]*Àrea de Patrimoni Natural del Parc Natural de la Zona Volcànica de la Garrotxa.*

Palabras clave: sequía, evolución piezométrica, acuífero fluviovolcánico, cambio climático

Resumen. En el contexto en el que el cambio climático va a favorecer los episodios meteorológicos extremos, se presenta el análisis de la evolución piezométrica, en las situaciones de sequía, del acuífero fluviovolcánico de la comarca de la Garrotxa, realizado a partir de los datos que el Parque Natural de la Zona Volcánica de la Garrotxa (PNZVG) viene registrando desde el año 2005, mediante la monitorización con sensores automáticos de nivel.

El acuífero fluviovolcánico es fruto de la interacción entre la actividad volcánica y la dinámica fluviotorrencial que han 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. Los recursos hídricos utilizados en la Garrotxa, para todos los usos, provienen casi exclusivamente de las aguas subterráneas. Anualmente se extraen en la zona de la Garrotxa alrededor de unos 12 hm^3 anuales, de los que un 87% proceden del acuífero fluviovolcánico.

Para caracterizar los períodos de sequía, que han tenido lugar en esta zona, se ha calculado el SPI (índice de precipitación estandarizado) de 12 meses, de la secuencia de datos de precipitación de 36 años, desde 1990 a 2025 (Estación 0390D-Olot). También se ha realizado un balance hídrico diario con los datos meteorológicos de las estaciones de la zona.

El análisis detallado de los datos piezométricos de este acuífero, mediante el uso de sensores automáticos de presión para la medida en continuo del nivel, pone de relieve que, en los dos períodos principales de sequía evaluados de los últimos 36 años, el de 2005 a 2008, con valores de SPI de hasta -2,5 y el de 2021-2024, con valores de SPI de -2, se han producido descensos considerables del nivel

piezométrico, de más de 12 m, que necesitan precipitaciones por encima de la media pluviométrica, de unos 940 mm y recargas superiores a los 400 mm, para recuperar la situación inicial de nivel alto. El análisis de la oscilación piezométrica se ha realizado en dos zonas con dos tipologías distintas de explotación de las aguas subterráneas.

Aunque de momento no hay indicadores claros de sobreexplotación en toda la extensión del acuífero fluviovolcánico, si se empieza a observar en la evolución piezométrica de la zona de Olot una recta de regresión con una tendencia negativa. En general, se evidencia una cierta fragilidad del acuífero para recuperar los niveles piezométricos considerados altos, en las condiciones de extracción actual, que puede ser un aviso para las situaciones futuras de disminución de las precipitaciones en el contexto del cambio climático o para el aumento de extracciones de este acuífero.

Análisis de los efectos de las sequías meteorológicas e hidrológicas en lagunas costeras mediterráneas

Gisela Gonzalvo Henry[1], Warren Gordon Meredith[2], Edurad Madaula Izquierdo[1], Mireia Jiménez Llobet[1], Xavier De Quintana Pou[3], Valentina Amore[3], Anna Menció Domingo[1]

[1]*Grup de Geologia Aplicada i Ambiental (GAiA), Departamento Ciencias Ambientales, Universitat de Girona, Girona, España*
[2]*Instituto Catalan de Investigación del Agua (ICRA), Girona, España.*
[3]*Instituto de Ecología Acuática (IEA), Departamento de Ciencias Ambientales, Universitat de Girona, Girona, España.*

Palabras clave: Índices de sequía, Conectividad hidrológica, Sistemas acuífero-laguna costeros, Respuesta ecologica

Resumen. El cambio climático y las presiones antropogénicas, como los cambios de uso del suelo y la alteración de los regímenes hidrológicos, pueden modificar de forma significativa la disponibilidad y la dinámica del agua en sistemas costeros mediterráneos. La zona el Baix Ter (NE de España), caracterizada por un clima mediterráneo y una marcada irregularidad interanual, constituye un área especialmente vulnerable a la sequía, con posibles efectos sobre los recursos hídricos subterráneos que sostienen humedales y lagunas costeras.

Este estudio evalúa la propagación de la señal de sequía entre las variables meteorológicas, hidrológicas, y ecológicas del Baix Ter. Para ello se integraron series de precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, caudales fluviales, niveles piezométricos y variables ecológicas, para desarrollar índices multiescala de sequía: el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI), el Índice de Sequía de Caudal (SDI), aplicado a los ríos Daró y Ter, y el Índice Estandarizado de Nivel Freático (SGI). El análisis ecológico se centró en dos lagunas costeras con regímenes hidrológicos contrastados: Ter Vell, con aportes superficiales asociados a un cauce intermitente, y Fra Ramon, dependiente de las aportaciones subterráneas.

Los resultados muestran una tendencia al aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación durante el periodo 1950-2024, con una

intensificación de los episodios secos en las últimas décadas. Sin embargo, la respuesta del sistema no se explica de forma directa por la precipitación mensual aislada, sino por señales integradas en el tiempo y moduladas por la conectividad hidrológica. Las relaciones más consistentes se obtienen a escalas temporales de varios meses, lo que sugiere una respuesta amortiguada y con memoria, característica de sistemas acuífero-laguna. Además, las tablas de umbrales permiten traducir los índices SPI, SPEI, SDI y SGI a condiciones observadas de precipitación, caudal y nivel freático, mostrando que un mismo grado de sequía no se expresa de igual forma en todas las estaciones ni en todos los elementos del sistema.

A escala espacial, se distingue un sistema subterráneo superficial, más ligado a la dinámica local y al Daró, y otro más profundo, más relacionado con el Ter y con señales hidrológicas de carácter más regional y persistente. El análisis estacional refuerza esta interpretación: invierno y primavera muestran un predominio del control hidrológico integrado, mientras que en verano aumenta el peso relativo de la temperatura, a través de la evapotranspiración potencial y el SPEI, especialmente en las respuestas más superficiales.

Este marco hidrológico proporciona la base para interpretar la distinta vulnerabilidad ecológica de las lagunas costeras del Baix Ter frente a sequías más frecuentes e intensas. De forma preliminar, Fra Ramon muestra relaciones más consistentes con indicadores piezométricos e hidrológicos integrados, mientras que Ter Vell presenta una respuesta más estacional y dependiente de la escala temporal, lo que sugiere distintos grados de acoplamiento entre la dinámica ecológica y el funcionamiento hidrológico del sistema.

Agradecimientos: Este estudio se ha realizado en el marco del consorcio internacional colaborativo de proyectos TREASURE (PCI2024-153436), financiado en el marco de Joint Transnational Call of the Water4All European Partnership 2022 (Comisión Europea y Agencia Estatal de Investigación (AEI) – Agencia Estatal de Investigación de España): «Gestión de los recursos hídricos: resiliencia, adaptación y mitigación de eventos hidroclimáticos extremos e instrumentos de gestión». También ha contado con el apoyo de la subvención AquiPondSys (PID2023-147186OB-I00), financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por «ERDF+ A way of making Europe». La subvención AquiPondSys también ha financiado el contrato de E. Madaula (PAS-PR-171/24) y la subvención PREP2023-001170 concedida a G. Gonzalvo-Henry.

Análisis de los efectos del cambio global durante el periodo 2002-2025 en el acuífero de Motril-Salobreña, Granada

Christian Montoro-Paredes[1], Sachin Karan[2], María Luisa Calvache[1], Ana Susino-Súnico[1], Carlos Duque[1]

[1]*Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Granada, España*
[2]*Departamento de Geoquímica, Servicio Geológico de Dinamarca y Groenlandia, Copenhague, Dinamarca*

Palabras clave: cambio global, recarga, acuífero de Motril-Salobreña

Resumen. Los recursos hídricos en acuíferos costeros en regiones semiáridas están amenazados por los efectos del cambio global. Esta investigación tiene como objetivo analizar los efectos del cambio global en el acuífero detrítico costero de Motril-Salobreña (Granada) en el periodo 2002-2025 a través de las modificaciones en los usos del suelo, la evolución de los niveles piezométricos y el balance hídrico. Estos componentes han sido incorporados en un modelo numérico hidrogeológico de densidad variable como herramienta de análisis integrado. El cambio global en esta investigación incluye las modificaciones tanto antrópicas como climáticas que tienen un impacto sobre la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos. Durante el periodo de estudio, el 16% de los suelos agrícolas fueron convertidos a zonas urbanas, industriales, recreativas o abandonadas y, en 2005, se produjo el fin del histórico cultivo de la caña de azúcar que, en este año, todavía representaba el 20% de la superficie agrícola total. La mayor parte de esta superficie fue transformada a cultivos de hortalizas, zonas recreativas o abandonadas. A partir de 2006, los cultivos bajo invernadero aumentaron su extensión 3.4 veces hasta representar actualmente el 16% de la superficie total. Estas modificaciones antrópicas forman parte del cambio global e influyen en la recarga del acuífero. Los efectos en el acuífero se observan en el 70% de los pozos de observación con un registro histórico representativo. Esto muestra una tendencia negativa de descenso de nivel con magnitudes de hasta 8 m desde el año 2010 que, adicionalmente, fue un año excepcionalmente lluvioso. El balance hídrico indica que las principales entradas de agua dulce se distribuyen de forma proporcional entre la recarga superficial, la recarga lateral y el río Guadalfeo. La recarga superficial se ha reducido un 41% entre la primera y la segunda mitad del periodo que, para esta componente, además de los cambios

en los usos del suelo y tipo de cultivo, incluye una tendencia de las precipitaciones negativa con un promedio lineal de reducción de 7 mm/a. Así mismo, el río Guadalfeo, a pesar de que su régimen está regulado por la presa de Rules representa el 35% del total de las entradas de agua dulce del acuífero. La principal salida del acuífero es natural y se corresponde con la descarga al mar Mediterráneo seguida de las salidas antrópicas (bombeos) que se han incrementado en un 50% y, actualmente, representan aproximadamente 1/3 de los recursos hídricos subterráneos disponibles. Esta proporción y la no afectación a ecosistemas asociados ni evidencias de intrusión salina llevan a considerar al acuífero de Motril-Salobreña como en buen estado cuantitativo, en consistencia con el último Plan Hidrológico 2022-2027. Sin embargo, la evolución del estrés hídrico, especialmente desde el año 2010, muestra una tendencia en aumento. Esta tendencia se asocia parcialmente a los efectos del cambio global y afecta a la resiliencia futura de la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo. La clasificación actual simplificada de los Planes Hidrológicos sobre el estado cuantitativo de los recursos hídricos subterráneos puede ser insuficiente para la gestión a largo plazo de los acuíferos costeros afectados por el cambio global. El no tener en cuenta las tendencias históricas tiene un impacto directo en la planificación hidrológica que, en sistemas con tiempos de respuesta relativamente lentos como los acuíferos detríticos costeros, puede acabar afectando a la sostenibilidad futura del recurso.

Agradecimientos: Estos resultados han sido obtenidos parcialmente del proyecto PCI2024 – 153503 financiado por el MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea.

Análisis de un evento extraordinario de recarga en el sistema kárstico de la sierra de Líbar desde el embalse de Montejaque (provincia de Málaga)

Mercedes Vélez Nicolás[1], Verónica Ruiz Ortiz[2], Marcia Salazar Rojas[3], José Luis Yanes Conde[4], Francisco Moral Martos[4], Sergio Martos Rosillo[5], Santiago García López[3]

[1]*Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Universidad Complutense de Madrid*
[2]*Dpto. de Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil. Universidad de Cádiz*
[3]*Dpto. de Ciencias de la Tierra. Universidad de Cádiz*
[4]*Dpto. Sistemas Físicos, Químicos y Naturales. Universidad Pablo de Olavide*
[5]*IGME-CSIC (Sede Granada)*

Palabras clave: Recarga de acuíferos, Evento pluviométrico extraordinario, Sistema kárstico, Fugas de embalse

Resumen. En este trabajo se analiza la evolución temporal del caudal infiltrado desde el embalse de Montejaque al acuífero kárstico de la Sierra de Líbar, en el sector de Hundidero-Gato, durante los primeros meses del año 2026. La presa de Montejaque, de 84 m de altura sobre cimientos y 36 hm^3 de capacidad, está situada en el río Guadares. Se trata de una infraestructura fallida que nunca ha entrado en funcionamiento debido a las importantes fugas que se producen en su vaso como consecuencia de la elevada permeabilidad de las calizas jurásicas en las que se asienta. La precipitación registrada entre el 14 de enero y el 13 de febrero de 2026 en la estación meteorológica de Grazalema, situada en el extremo occidental de la cuenca del río Guadares (44 km^2), ascendió a 2266 mm. Durante dicho periodo, se contabilizaron ocho jornadas con precipitaciones por encima de los 100 mm, destacando un registro diario máximo de 544. La cuantiosa escorrentía generada en la cuenca hizo que la presa se llenara, por primera vez en 102 años desde su construcción. El nivel de embalse llegó a situarse a solo 22 cm de la coronación, aunque tal y como estaba contemplado en el proyecto de la obra, el aliviadero contuvo la crecida evacuando 200 m^3/s durante algo menos de 24 horas, que se infiltraron 300 metros aguas abajo, en el sumidero de la cueva del Hundidero. Este episodio constituye un evento de recarga extraordinario, de forma que en el plazo de pocas semanas se ha transferido de forma localizada un gran volumen de escorrentía al acuífero kárstico. Desde el 14/02/2026 se está

monitorizando en continuo mediante registradores automáticos la evolución del nivel del embalse, que desciende a razón de 0,5 m/día. Adicionalmente, se controla el caudal de entrada a través del río Guadares mediante técnicas fotográficas y aforos directos con molinete. El objetivo del trabajo es cuantificar la infiltración aplicando el método de balance y relacionar su evolución temporal con la evolución de la carga hidráulica y la superficie permeable inundada en el embalse. Datos previos obtenidos en una crecida de menor magnitud en 2013 permitieron evaluar la transferencia al acuífero en un rango de valores comprendido entre 4 m^3/s cuando el embalse se hallaba al 15% de su capacidad y 0,35 m^3/s con el embalse prácticamente vacío (<0,25% de su capacidad). Sin embargo, en este evento se han determinado caudales de infiltración próximos a 7 m^3/s con el embalse a plena capacidad. Adicionalmente, se comparan los valores de infiltración obtenidos con los correspondientes a 1928, en la primera puesta en carga tras la finalización de la obra, que resultaron algo inferiores.

Análisis del comportamiento hidrológico de lagunas temporales en la Albera (Girona) mediante el balance hídrico diario

Anna Menció Domingo[1], Joana Mencos Bellpuig[1], Maria Casamitjana Causa[1], Eduard Madaula Izquierdo[2], Gisela Gonzalvo Henry[1], Xavier Casamitjana Vila[3], Carles Roqué Pau[1]

[1]*Grup de Recerca en Geologia Aplicada i Ambiental (GAiA), Universitat de Girona*
[2]*Unitat de Geodinàmica Externa i Hidrogeologia, Universitat Autònoma de Barcelona*
[3]*Grup de Recerca en Física Ambiental, Universitat de Girona*

Palabras clave: lagunas temporales, balance hídrico, paisaje granítico, ecosistemas acuáticos asociados

Resumen. Las lagunas temporales son elementos clave de la conectividad del paisaje azul y proporcionan múltiples servicios ecosistémicos, incluyendo hábitats críticos para especies acuáticas y semiacuáticas, regulación del ciclo hidrológico y contribuciones a la mitigación y adaptación al cambio climático. Actúan como sumideros y fuentes de nutrientes, materia orgánica y contaminantes, desempeñando un papel fundamental en la dinámica biogeoquímica del entorno. A pesar de su relevancia, estas masas de agua son uno de los componentes menos estudiados de los ecosistemas acuáticos y, a menudo, permanecen excluidas de la planificación hidrológica y de la gestión territorial.

En la vertiente sur del macizo de la Albera (NE de España) se han desarrollado más de 240 depresiones, asociadas a una topografía multicóncava típica de los paisajes graníticos modelados sobre roca poco meteorizada. Algunas de estas depresiones albergan lagunas de alto valor ecológico y geológico, representando ecosistemas frágiles y sensibles a cambios hidrológicos y climáticos. Desde la perspectiva hidrogeológica, estas lagunas se consideran ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas, ya que reciben aportes del acuífero granítico subyacente que pueden ser continuos, estacionales u ocasionales. Estos aportes son críticos para la estructura, el funcionamiento y la persistencia de los ecosistemas, especialmente durante periodos secos. Parte de las lagunas ha sido alterada por infraestructuras de drenaje, construidas entre los siglos XVIII y XIX para transformar humedales en terrenos agrícolas, modificando su hidrología natural.

Para evaluar los factores que controlan la dinámica de inundación y la resiliencia frente a sequías, se realizó un estudio hidrológico en siete lagunas con hidroperíodos variables y distintos niveles de alteración. Se registró el nivel y la temperatura del agua durante 2024–2025 a intervalos de una hora mediante dataloggers Tera Diver® (van Essen). Se recopilaron también datos meteorológicos diarios de dos estaciones cercanas (Cabanes y embalse de Darnius-Boadella), gestionadas por el Servicio Meteorológico de Cataluña, para estimar entradas y salidas de agua y realizar balances hídricos precisos. La batimetría se obtuvo mediante la tercera cobertura LiDAR de Cataluña (CCCC e ICGC, 2025), con una nube de puntos georreferenciada de densidad mínima de 8 puntos/m² y ortoimagen de 15 cm. Los datos se procesaron con MiraMon© v.10 para generar un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y calcular las características físicas de las lagunas.

Los resultados muestran que, tras episodios de tormenta, las lagunas con drenaje artificial presentan tasas de salida significativamente más elevadas durante el llenado inicial. Los aportes de agua subterránea resultan esenciales para mantener las lagunas durante los periodos secos, asegurando su persistencia ecológica. La resiliencia frente a los impactos del cambio climático depende directamente de su conexión con el acuífero subyacente. Finalmente, el descenso del nivel freático incrementa el drenaje subterráneo hasta el secado, afectando tanto a lagunas con drenaje artificial como a las que carecen de él. La eliminación de estas estructuras permitiría restaurar la dinámica hidrológica natural y mejorar la resiliencia frente a sequías, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos asociados.

Agradecimientos: Este estudio se ha llevado a cabo en el marco del proyecto internacional TREASURE (PCI2024-153436), financiado a través de la Joint Transnational Call of Water4All European Partnership 2022 (European Commission and the Agencia Estatal de Investigación (AEI) – Spanish State Research Agency): Management of water resources: resilience, adaptation and mitigation to hydroclimatic extreme events and management tools . Asimismo, ha sido financiado por el proyecto AquiPondSys (PID2023-147186OB-100), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER+), "Una manera de hacer Europa . El proyecto AquiPondSys ha financiado también el contrato de E. Madaula (PAS-PR-171/24) y el contrato predoctoral PREP2023-001170 de G. Gonzalvo-Henry.

Análisis del efecto marea y ventanas del acuitardo en el transporte de contaminantes en el acuífero de Sardas mediante simulaciones de alta resolución temporal

Brais Sobral[1], Javier Samper[1], Joaquín Guadaño[2], Jorge Gómez[2], Javier San Román[3], Felipe Delgado[3], Jesús Fernández[4]

[1]*Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos. Centro Interdisciplinar de Química e Bioloxía (CICA). Universidade da Coruña. Campus de Elviña, A Coruña, 15071, Spain*
[2]*Empresa para la Gestión de Residuos Industriales, S.A., S.M.E., M.P., EMGRISA, C/ Santiago Rusiñol 12, 28040 Madrid , Spain*
[3]*Confederación Hidrográfico del Ebro. Paseo Sagasta, 24-26, 50071, Zaragoza, Spain*
[4]*Servicio de Prevención y Corrección de la Contaminación del Suelo, Dirección General de Calidad Ambiental, Departamento de Medio Ambiente y Turismo, Gobierno de Aragón. San pedro Nolasco, 7, 50071 Zaragoza, Spain*

Palabras clave: HCH, Efecto marea, aquitard window, aluvial

Resumen. La gestión de la contaminación por hexaclorociclohexano (HCH) en el entorno del vertedero de Sardas (Huesca) ha afectado al acuífero aluvial del río Gállego, suponiendo un riesgo ambiental para el embalse de Sabiñánigo. El aluvial se compone de un acuífero semiconfinado de gravas y arenas y un acuitardo de sedimentos de colmatación y limos aluviales. El acuífero está sometido a un efecto marea provocado por las fluctuaciones del nivel del embalse. En este trabajo se presenta un modelo de flujo y transporte transitorio de alta resolución temporal con incrementos de tiempo de 30' que analiza el impacto del efecto marea y de las heterogeneidades a pequeña escala del acuitardo (aquitard windows). Los datos de campo y los resultados del modelo indican que el bajo gradiente hidráulico facilita la inversión periódica de la dirección del flujo provocada por el efecto marea. Los resultados del modelo de alta resolución temporal muestran que la descarga de HCH al embalse presenta picos pronunciados de flujo másico durante los descensos bruscos del nivel del embalse. Además, las ventanas en el acuitardo (zonas de alta permeabilidad) actúan como vías de flujo de descarga preferente de HCH, que pueden llegar a

aumentar entre 3,7 y 6,2 veces la descarga anual de HCH respecto al modelo que considera un acuitardo homogéneo. Estos resultados ponen de manifiesto que los modelos en régimen estacionario y los modelos transitorios de baja resolución temporal (incremento de tiempo diario) son insuficientes para la evaluación del riesgo de contaminación. Por el contrario, los modelos que consideran la alta resolución temporal y las ventanas el acuitardo constituyen una mejora considerable para la gestión eficaz de acuíferos aluviales afectados por efectos de marea.

Agradecimientos: Este estudio se ha realizado en el marco de contratos de investigación financiados por la Confederación Hidrográfica del Ebro y EMGRISA, empresa adjudicataria de un contrato del Gobierno de Aragón para la hidrogeología del vertedero de Sardas. También se ha contado con financiación del Proyecto HERCULES (PID2023-153202OB-I00) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España y del Proyecto de Consolidación GRC de la Xunta de Galicia (Ref.: ED431C 2025/55).

Análisis espacio-temporal de la contaminación de aguas subterráneas por nitratos en varios acuíferos carbonatados kársticos del N de la provincia de Málaga

Álvaro Romero Sencianes[1], Jaime Fernández Ortega[1], Juan Antonio Barberá Fornell[1], Bartolomé Andreo Navarro[1]

[1]*Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA)*

Palabras clave: Contaminación por nitratos, aguas subterráneas, acuíferos carbonatados kársticos, Abastecimiento urbano

Resumen. En la presente investigación, se pretende evaluar la evolución de compuestos nitrogenados (NO_3^-) en las aguas subterráneas, a lo largo de las últimas décadas, en cuatro acuíferos carbonatados kársticos del N de Málaga. En concreto, se investigan los acuíferos de las sierras de 1) Los Merinos-Colorado-Carrasco, 2) Teba-Peñarrubia, 3) Los Caballos y 4) Archidona, cuyas aguas se destinan al abastecimiento de poblaciones rurales cercanas. Para alcanzar dicho objetivo, se han recopilado datos hidroquímicos (NO_3^-, Cl^- y SO_4^{2-}) históricos (1980-2024) que se han actualizado con otros obtenidos de nuevos muestreos de aguas superficiales y subterráneas (2025-2026). Esta información se ha utilizado para analizar el impacto de las principales presiones antrópicas del entorno sobre las aguas subterráneas, a partir de la aplicación de técnicas hidroquímicas (ratios iónicos) y de análisis de tendencias (test de Mann-Kendall) de las series de datos de NO_3^- disueltos en agua.

El análisis del medio físico realizado en las áreas kársticas seleccionadas ha puesto de manifiesto el amplio desarrollo de la superficie destinada al regadío en las proximidades de las captaciones para consumo urbano en los acuíferos de las sierras de Archidona (120 ha), Teba-Peñarrubia (320 ha) y Los Caballos (1600 ha). En estos dos últimos acuíferos, también existen en la actualidad otro tipo de presiones (más de una veintena de explotaciones ganaderas y vertidos incontrolados de purines) en las proximidades de los sistemas kársticos. Ello ha provocado el aumento generalizado de las concentraciones de NO_3^- desde la década de los ochenta hasta la actualidad en todas las captaciones destinadas al abastecimiento urbano corroborado con el análisis de tendencias ($p<0,001$). Las mayores concentraciones de NO_3^- (>50 mg/l) se registran en la sierra de los

Caballos, donde se exceden estos valores por el cambio de uso del suelo y la conexión hidrogeológica con otro acuífero, mientras que en la captación de agua para consumo de Villanueva de Tapia (sierra de Archidona) se encuentran cercanas al límite, donde en momentos puntuales se superan dichos valores.

En el acuífero de Teba y Peñarrubia, la interacción entre las aguas del arroyo de la Venta (con alta carga contaminante) y las aguas subterráneas drenadas por la surgencia principal, permite la mezcla de aguas y, como resultado un aumento de la concentración de NO_3^- (así como de Cl^- y SO_4^{2-}) en las aguas de consumo destinadas a la población de Teba. Los acuíferos de Los Merinos-Colorado-Carrasco son los menos afectados por la presencia de este tipo de compuestos, aunque los contenidos iónicos en sus aguas, las menos mineralizadas de todas, pueden llegar a ser significativos tras las primeras lluvias efectivas del año. Se sugieren diferentes orígenes de este ion en las aguas subterráneas de los acuíferos investigados: origen natural con indicios de leve afectación por actividad ganadera aislada (Los Merinos-Colorado-Carrasco), proveniente de prácticas agrícolas y de vertidos urbanos parcialmente depurados (sierras de los Caballos y Archidona) y procedente de ganadería extensiva y acúmulo de purines en balsas (Teba-Peñarrubia). Este estudio ofrece una visión preliminar del estado químico actual de los acuíferos investigados y proporciona información a partir de la cual mejorar la planificación de usos del suelo y las estrategias de protección de captaciones destinadas al abastecimiento urbano.

Análisis geoeléctrico integrado del sistema pseudokárstico de la Dunita de Medellín (Colombia) para su caracterización hidrogeológica

Juan Esteban Montoya Moreno[1], Gaspar Monsalve Mejía[1], Marcela Jaramillo Uribe[2]

[1]*Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*
[2]*Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Eafit*

Resumen. La Dunita de Medellín es una unidad geológica localizada en sector oriental de la subregión del Valle de Aburrá, en el departamento de Antioquia (Colombia), la cual corresponde a una faja de rocas ultramáficas en forma de cuña, orientada en sentido NNW y compuesta predominantemente por olivino, con diferentes grados de alteración a serpentina. En el bloque sur de esta unidad se ha documentado un desarrollo significativo de geoformas pseudokársticas, entendidas como formas del relieve similares al karst, pero originadas principalmente por procesos mecánicos y no por disolución de rocas solubles. Estas geoformas son resultado de factores climáticos, litológicos y estructurales, características que influyen significativamente en su comportamiento hidrogeológico y cuyo potencial aún no ha sido plenamente explorado.

La importancia de estos sistemas pseudokársticos desde una perspectiva hidrogeológica radica en su capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea. Estos suelen presentar una alta porosidad secundaria generada principalmente por procesos de disolución selectiva de minerales o por una intensa fracturación tectónica, lo cual facilita la interconexión de discontinuidades y propicia la formación de flujos preferenciales.

Por otra parte, la escasez de investigaciones enfocadas en la Dunita de Medellín genera vacíos significativos en la comprensión de sus características, tales como la geometría, extensión del sistema pseudokárstico, los mecanismos de recarga, tránsito y descarga; y su capacidad real como acuífero. En este contexto, el uso de métodos geofísicos no invasivos, especialmente la prospección geoeléctrica, se presenta como una herramienta valiosa para abordar estos vacíos de conocimiento. Este trabajo busca integrar información geofísica, estructural y fisicoquímica, con el fin de proponer una interpretación coherente sobre la dinámica hidrogeológica de este sistema y la importancia del estudio reside en

contribuir al entendimiento de una unidad hidrogeológica local de relevancia para la región.

Para esta investigación se utilizaron los datos de 20 tomografías de resistividad eléctrica (TRE) espacialmente distribuidas sobre la unidad de interés y zonas adyacentes, además de la evaluación de la evolución de las propiedades en el tiempo (time-lapse) y la inclusión de medidas de polarización inducida (IP) en una de las líneas de los ensayos. Estos resultados fueron correlacionados con un inventario de 1.521 geoformas pseudokársticas, trazos de fallas y lineamientos, observaciones geológicas y parámetros físico – químicos in situ en puntos de agua subterránea.

Los análisis permitieron identificar una respuesta geoeléctrica típica del sistema pseudokárstico de la Dunita, que se diferencia con los modelos de resistividad de las unidades geológicas adyacentes. En el área interés fue posible identificar la presencia de zonas poco resistivas (< 150 ohm.m), con formas elípticas, sin continuidad lateral, que contrastan con un entorno más resistivo y que se extienden desde la parte superficial del terreno, alcanzando profundidades variables entre 2 y 30 m y una extensión lateral de hasta 50 m. No se evidencia la presencia de un nivel freático continuo y en este caso el agua puede desplazarse a través de estas geoformas ampliadas por disolución y fracturamiento, donde el flujo puede comportarse más como un sistema de drenaje subterráneo, mientras que el macizo rocoso circundante puede permanecer relativamente seco o con baja saturación. Este comportamiento es consistente con los parámetros físico - químicos medidos in situ, particularmente con los bajos valores de conductividad eléctrica registrados, inferiores a 140 µS/cm, los cuales sugieren cortos tiempos de residencia y un tránsito rápido del agua a través de estas estructuras preferenciales.

Análisis hidrológico de las lagunas peridunares de Doñana durante el año hidrológico 2024/2025

Miguel Rodríguez-Rodríguez[1], José Luís Yanes[1], Francisco Moral[1], Alejandro Jiménez-Bonilla[1]

[1]*Universidad Pablo de Olavide*

Palabras clave: monitorización hidrológica, cambio climática, Doñana, lagunas

Resumen. En este trabajo se analiza el estado hidrológico de las lagunas peridunares del Parque Nacional de Doñana (PND) durante el año hidrológico (2024/2025) y se establece una comparación con los registros obtenidos desde que la Universidad Pablo de Olavide monitoriza dicho ecosistema (año 2015/2016). El objetivo es doble, por una parte evaluar los factores climáticos y antrópicos que han condicionado la recuperación del hidroperiodo tras las lluvias de este último año hidrológico y, en segundo lugar, analizar los mecanismos que condicionan a corto y largo plazo la conservación de estos sistemas lagunares. Para ello, se registran niveles y temperatura del agua cada tres horas en las principales lagunas peridunares y en piezómetros adyacentes, además de conductividad eléctrica del agua de manera periódica y/o continua. Complementariamente, se mide la precipitación y la temperatura del aire en la estación meteorológica del Palacio de Doñana.

El año hidrológico 2024/25, con una precipitación superior a la media en el PND (520 mm/año para el periodo 1978-2024), ha favorecido una incipiente recuperación del hidroperiodo en los sistemas lagunares. El estiaje de 2025 fue el primero desde 2022 en el que la laguna de Santa Olalla ha mantenido una lámina de agua considerable, con una profundidad cercana al metro al final del verano, recuperando su carácter semipermanente. La precipitación acumulada durante el año hidrológico 2024/2025 fue de 676 mm, pero concentrada en octubre y marzo (67%), junto a una anomalía térmica de +2,15 °C. Esta distribución explica la recuperación rápida de niveles seguida de descensos estivales sostenidos.

La respuesta espacial del sistema fue heterogénea: las lagunas del sector oriental, las más alejadas de Matalascañas, registraron máximos históricos e hidroperiodos prolongados (nivel máximo 1,8 m de profundidad o 6,38 m s.n.m, en la laguna de Santa Olalla). Los piezómetros de ese sector también alcanzaron máximos, con niveles por encima de la superficie del terreno incluso al final del verano. En contraste, en el sector occidental las lagunas presentaron un periodo de

inundación breve, especialmente la laguna de Zahíllo, que se comportó como laguna de recarga (nivel máximo de 0,45 m). La laguna de Taraje mostró un comportamiento transicional manteniéndose inundada hasta mediados de julio pero con un hidroperiodo inferior al de los primeros años del proyecto (nivel máximo 0,96 m).

En conjunto, 2024/25 evidencia una recuperación parcial del sistema tras la sequía, pero también una creciente asimetría espacial vinculada a forzamientos climáticos (precipitación concentrada, mayor ETR) y presiones locales (efectos de extracciones en el entorno de Matalascañas). La monitorización de alta frecuencia y la integración de series suficientemente largas con datos de alta resolución temporal aportan un marco robusto para diferenciar señales climáticas y antrópicas y orientar la gestión adaptativa del acuífero y la conservación de las lagunas peridunares de Doñana.

Agradecimientos: Convenio entre la Universidad Pablo de Olavide y la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir: "Monitorizacion hidrológica y modelización de la relación laguna-acuífero en humedales de la demarcación hidrográfica del Guadalquivir (lagunas de los mantos eólicos de Doñana)".

Análisis multiisotópico de la atenuación natural de contaminantes en la interfase agua dulce-salada en el Sistema Acuífero Serres de Llevant-Marina (Mallorca)

Diana Puigserver[1], Jordi Giménez[2], Josep María Carmona[1], Alberto Millán[1], Joaquim Vila[1], Magdalena Grifoll Ruiz [1], Balbina Nogales[3], Joan Fornós[3]

[1]*Universitat de Barcelona*
[2]*Direcció General de Recursos hídrics de les Illes Balears*
[3]*Universitat de les Illes Balears*

Palabras clave: Interfase agua dulce-salada, Atenuación natural de contaminantes, Procesos biogeoquímicos

Resumen. Las aguas subterráneas constituyen un recurso esencial para el desarrollo humano, económico y ambiental. Sin embargo, se encuentran sometidas a una presión creciente derivada de la actividad antropogénica y del cambio climático, lo que incrementa la vulnerabilidad de los acuíferos y los riesgos asociados a su calidad y disponibilidad. En regiones costeras, la sobreexplotación y el ascenso del nivel del mar favorecen procesos de intrusión marina que alteran la dinámica hidrogeoquímica de los acuíferos y comprometen su uso para abastecimiento y actividades agrícolas. En este contexto, la identificación de procesos naturales capaces de atenuar contaminantes resulta clave para el desarrollo de estrategias de gestión sostenible de los recursos hídricos. Los acuíferos carbonatados kársticos tienen un papel especialmente relevante, ya que suministran entre el 10 y el 25 % del agua potable mundial. No obstante, su elevada heterogeneidad estructural, la presencia de sistemas de doble o triple porosidad y su alta conectividad hidráulica los hacen particularmente vulnerables a la contaminación y a la intrusión marina. En estos sistemas, las zonas de interfase entre agua dulce y agua salada constituyen entornos hidrogeoquímicos complejos donde se desarrollan gradientes fisicoquímicos y redox que pueden favorecer procesos de atenuación natural de contaminantes. Estas zonas pueden actuar como filtros biogeoquímicos naturales y representar ejemplos de soluciones basadas en la naturaleza para la protección de la calidad de las aguas subterráneas. En este trabajo se analiza el papel de la interfase agua dulce–salada como zona reactiva de atenuación natural en el sistema acuífero kárstico costero

Serres de Llevant–Marina de Llevant, situado en el sector oriental de Mallorca (Mediterráneo occidental). Este sistema está constituido por calizas y dolomías jurásicas y calcarenitas miocénicas fuertemente karstificadas, con transmisividades elevadas (200–850 m²/día) y una importante conectividad hidráulica asociada a fracturas y cavidades kársticas. La principal hipótesis de trabajo plantea que la interfase agua dulce–salada constituye un ecotono donde coexisten microorganismos con metabolismos oxidativos y reductivos capaces de favorecer la degradación natural de contaminantes presentes en las aguas subterráneas. Para evaluar esta hipótesis se realizaron campañas de muestreo en la red de control de la Dirección General de Recursos Hídricos de las Islas Baleares, junto con perfiles en profundidad de temperatura y conductividad eléctrica y muestreos discretos en piezómetros representativos de la zona de interfase. Las muestras fueron analizadas mediante técnicas geoquímicas, isotópicas y microbiológicas con el objetivo de caracterizar los procesos de mezcla, las reacciones redox y la composición de las comunidades microbianas presentes en el acuífero. Los resultados muestran una clara zonación redox asociada al avance de la intrusión marina. En las zonas interiores del acuífero predominan condiciones oxidantes (150 y 200 mV), mientras que en los sectores costeros el potencial redox disminuye progresivamente hasta alcanzar condiciones reductoras (-100 a 50 mV) en la zona de mezcla agua dulce–salada. En esta zona se observa una relación inversa entre la conductividad eléctrica (varia en una misma profundidad a lo largo del año de 28 mS/cm a 35 mS/cm en el acuífero superior y 33 mS/cm a 40 mS/cm en el acuífero inferior) y el potencial redox, indicando el desarrollo de ambientes reductores asociados al incremento de la salinidad. Las concentraciones de nitrato presentan una elevada variabilidad espacial (con valores de 75-100 mg/l en las zonas más oxidantes y 1,14-10 mg/L en las zonas más reductora) y su composición isotópica indica un origen mayoritariamente antropogénico asociado a actividades ganaderas. El enriquecimiento isotópico progresivo a lo largo del flujo subterráneo, junto con la disminución de las concentraciones de nitrato en zonas reductoras, evidencia la ocurrencia de procesos de desnitrificación. Asimismo, se detectan incrementos en las concentraciones de manganeso y evidencias isotópicas de procesos de sulfato-reducción en profundidad, lo que confirma el desarrollo de condiciones fuertemente reductoras. Los análisis microbiológicos revelan una elevada diversidad de microorganismos en la zona de interfase, incluyendo especies capaces de degradar materia orgànica, reducir nitratos (como por ejemplo, Flavobacterium, Pseudomonas, Aquabacterium, Hydrogenophaga) y sulfatos, inmovilizar metal·les y degradar contaminantes emergentes. En conjunto, los resultados indican que la zona de mezcla agua dulce–salada actúa como una zona biogeoquímicamente reactiva con un elevado potencial de atenuación natural de contaminantes. Estos resultados respaldan el papel de la interfase como un

elemento clave en la protección de la calidad de las aguas subterráneas en sistemas kársticos costeros y ponen de manifiesto su potencial como solución basada en la naturaleza para la gestión sostenible de acuíferos vulnerables frente al cambio climático.

Agradecimientos: Proyecto financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) PID2020-112720GB-I00

Aplicación de técnicas de machine learning al análisis de la evolución piezométrica en la cuenca del Duero

Manuel Rodríguez del Rosario[1], Héctor Aguilera Alonso[2], África de la Hera-Portillo[2], Víctor Gómez-Escalonilla[1], Olga García Menéndez[2], Luis Moreno Merino[2], Pedro Martínez-Santos[1]

[1]*Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. C/José Antonio Novais 12. 28040 Madrid, Spain*
[2]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid)*

Palabras clave: Machine learning, Clustering, Niveles piezométricos, Cuenca del Duero

Resumen. En la cuenca del Duero, la más extensa de la Península Ibérica, el agua subterránea constituye un recurso estratégico desde el punto de vista ambiental y socioeconómico, al abastecer aproximadamente a dos tercios de los núcleos de población y sostener gran parte de las actividades agrícolas y ganaderas. Sin embargo, el incremento de la superficie de regadío y la intensificación del bombeo desde finales de la década de 1960 han provocado descensos piezométricos significativos, la progresiva desconexión de humedales y cauces de pequeño y mediano tamaño, así como un aumento de la vulnerabilidad frente a la contaminación difusa de origen agrícola. Según el vigente Plan Hidrológico de la Demarcación, varias masas de agua subterránea presentan problemas de sobreexplotación. En particular, cuatro masas de agua se encuentran en mal estado cuantitativo, lo que representa alrededor del 11 % de la superficie total de la cuenca (aproximadamente 9000 km^2).

En este contexto, la comprensión de la evolución temporal y espacial de los niveles piezométricos resulta fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos. El presente estudio tiene como objetivo aplicar técnicas de machine learning para analizar dicha evolución y mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrodinámico de los acuíferos. Para ello, se dispone de una red de control piezométrico gestionada por la Confederación Hidrográfica del Duero, compuesta por más de 600 puntos de control distribuidos

por toda la cuenca y representativos de las diferentes masas de agua subterránea. El periodo de estudio abarca desde 2013 hasta 2023.

Para llevar a cabo esta investigación, se abordó la presencia de datos faltantes en las series temporales mediante técnicas de imputación basadas en machine learning, con el objetivo de completar las series piezométricas y garantizar la consistencia del análisis temporal. Posteriormente, se aplicaron técnicas de clustering para agrupar los puntos de control en función de la similitud en la evolución de los niveles piezométricos.

Los resultados preliminares permiten identificar diferentes patrones de comportamiento hidrológico dentro de la cuenca. Se distinguen grupos de piezómetros que muestran tendencias de estabilización de niveles, otros caracterizados por una marcada variabilidad estacional e interanual, así como zonas donde se observan tendencias de ascenso o descenso sostenido de los niveles piezométricos. La aplicación de estas técnicas facilita la interpretación de grandes volúmenes de datos piezométricos y la identificación de zonas con dinámicas hidrológicas diferenciadas. En conjunto, esta metodología constituye una herramienta útil para mejorar la planificación, gestión y conservación de los recursos hídricos subterráneos.

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España mediante la ayuda de investigación PID2021-124018OB-I00 y por el proyecto europeo STARS4Water. El proyecto STARS4Water recibió financiación del Programa Marco de Investigación e Innovación Horizonte Europa de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención n.º 101059372. Los autores agradecen a la Confederación Hidrográfica del Duero por proporcionar acceso a los datos.

Aplicación de un modelo DRASTIC adaptado para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la Plana de Valencia

Angie Stefany Oviedo-Pineda[1], Claudia Patricia Romero-Hernández[1], María Elena Rodrigo-Clavero[1], Javier Rodrigo-Ilarri[1]

[1]*Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València (UPV), 46022, Valencia, España.*

Palabras clave: vulnerabilidad, acuíferos, contaminación, DRASTIC

Resumen. Se presenta una propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas en el sistema acuífero de la Plana de Valencia mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), a partir de una adaptación del método DRASTIC a la cartografía oficial disponible en la Comunitat Valenciana. El estudio parte de la necesidad de disponer de herramientas de diagnóstico espacial aplicables a contextos con fuerte presión antrópica, donde la protección preventiva del recurso subterráneo resulta prioritaria. El objetivo principal consiste en generar una cartografía de vulnerabilidad del acuífero de la Plana de Valencia, en sus sectores Norte y Sur, mediante un procedimiento replicable que combine criterios hidrogeológicos y variables territoriales obtenidas de fuentes institucionales.

La metodología se basa en la formulación DRASTIC clásica, integrada por siete parámetros ponderados, pero incorpora una adaptación de dos de ellos para adecuarse a la información disponible y mejorar la representatividad territorial del índice. El índice final se obtiene mediante la integración en SIG de información procedente de la red piezométrica de la Confederación Hidrográfica del Júcar, PATRICOVA, GeoCV25, COScv, el modelo digital de elevación y cartografía temática institucional.

Los resultados muestran que el índice de vulnerabilidad oscila entre 63 y 193, permitiendo clasificar el territorio desde categorías de vulnerabilidad muy baja-baja hasta alta-muy alta. La distribución espacial obtenida indica que el 55,20 % del área presenta vulnerabilidad media, el 36,88 % vulnerabilidad alta a muy alta y el 7,92 % vulnerabilidad baja o muy baja. Las zonas más vulnerables se localizan preferentemente en sectores con nivel freático somero, materiales más permeables y condiciones favorables para la transferencia hidráulica, reforzadas

por usos del suelo con mayor potencial de carga contaminante. Destacan, en este sentido, sectores llanos vinculados a corredores fluviales y litologías detríticas permeables, mientras que las áreas dominadas por materiales finos muestran un comportamiento relativamente más protector.

La comparación con la cartografía oficial de vulnerabilidad de la Generalitat Valenciana (COPUT) evidencia una coherencia general en la distribución espacial por clases, aunque el modelo ajustado incrementa la proporción de áreas clasificadas como de vulnerabilidad alta a muy alta frente a la cartografía oficial, reduciendo la clase media. Este comportamiento sugiere que la incorporación de proxies territoriales, como los usos del suelo y la accesibilidad del acuífero, tiende a producir una zonificación más conservadora en sectores sometidos a mayor presión o conectividad. En consecuencia, la metodología desarrollada constituye una herramienta técnicamente consistente para la priorización espacial de medidas preventivas, el apoyo a la ordenación del territorio, la delimitación de áreas sensibles y el diseño de redes de monitorización de la calidad del agua subterránea. No obstante, se recomienda como fase posterior la validación cuantitativa del índice mediante su contraste con observaciones de calidad del agua, como nitratos o conductividad eléctrica, con objeto de reforzar su capacidad explicativa y su utilidad en la gestión hidroambiental.

Aplicación del índice de calidad GWQI al acuífero carbonatado de Solana (provincia de Alicante)

Víctor Sala-Sala[1], José Miguel Andreu Rodes[2], María Belén Almendro-Candel[1], Ana Pérez-Gimeno[1], Juan Antonio Barberá Fornell[3], Bartolomé Andreo Navarro[3]

[1]*Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente, Universidad Miguel Hernández de Elche, España*
[2]*Departamento de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente, Universidad de Alicante, España*
[3]*Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, España*

Palabras clave: Acuífero kárstico, Índices de calidad química, Recursos hídricos, Alto Vinalopó

Resumen. La evaluación de la calidad química del agua para abastecimiento urbano es un aspecto indispensable para la gestión sostenible y protección de los recursos hídricos, fundamentalmente en las regiones con alta presión y disponibilidad limitada. Los índices de calidad integran múltiples parámetros hidroquímicos en un solo valor numérico, lo que facilita la interpretación espacial y temporal de los resultados. Entre ellos, el Groundwater Quality Index (GWQI), específicamente formulado para aguas subterráneas, destaca por su enfoque ponderado que permite clasificar las aguas en rangos de calidad operativos para la gestión. El objetivo del presente trabajo es aplicar dicha metodología a las aguas subterráneas del acuífero de Solana, situado en el NO de la provincia de Alicante, a partir de información hidroquímica reciente. Se trata de un acuífero carbonatado, de unos 280 km^2 de extensión, constituido principalmente por calizas y dolomías cretácicas, que afloran en los relieves (sierras de Solana y La Villa), mientras que en los valles quedan cubiertos por margas miocenas y los depósitos cuaternarios. El agua subterránea se ha utilizado, tradicionalmente, tanto para regadío como para abastecimiento, aunque su explotación intensiva durante décadas ha causado descensos piezométricos superiores al centenar de metros. Durante los meses de julio de 2024 y febrero y julio de 2025 se han llevado a cabo campañas de muestreo de aguas subterráneas en 20-25 sondeos de explotación distribuidos por todo el acuífero. Posteriormente, se han efectuado análisis químicos en los laboratorios de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH) y del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). El cálculo del GWQI se basa en la integración ponderada de

los parámetros específicos del agua subterránea (pH, TDS, Ca2+, Mg2+, Na+, K+, HCO3-, Cl-, NO3-, SO42- y F-) y los valores guía procedentes de normativas internacionales de calidad del agua potable establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), Directiva 98/83/CE y RD 3/2023. Para cada parámetro, se calcula un subíndice de calidad como el cociente entre la concentración medida del parámetro y su umbral permitido, expresando el resultado en porcentaje. Posteriormente, se calcula el peso relativo de cada parámetro según su importancia medioambiental y sanitaria, y se multiplica por el índice de calidad anteriormente calculado. Esto da lugar al subíndice contribuyente, que refleja cuánto aporta cada parámetro al valor del índice final. El valor del GWQI se obtiene sumando todos los subíndices contribuyentes de cada parámetro. La clasificación distingue cinco niveles de calidad: excelente (<50), buena (50-100), media (100-150), pobre (150-200) y muy pobre (>200). Los valores de GWQI obtenidos para los datos hidroquímicos de la campaña de julio de 2024 (25 muestras) varían entre 32,5 y 72,8, con un valor medio de 44,0 ± 9,5; entre 32,7 y 74,1 y una media de 44,7 ± 9,8 para la campaña de febrero de 2025 (22 muestras); y entre 32,5 y 74,9, con una media de 45,2 ± 9,5, para la última campaña realizada en julio de 2025 (20 muestras). Esto indica que, en las tres campañas, entre el 84 y 80% de las muestras pueden ser catalogadas como aguas excelentes, mientras que el resto de las muestras (16-20%) se clasifican como aguas buenas. Los valores más elevados del índice GWQI en el acuífero se localizan en los sondeos próximos al límite occidental. Estos resultados indican una fuerte estabilidad temporal y espacial. Dominan las categorías de calidad química excelentes y buenas, y no se observan indicios de deterioro de su potabilidad a pesar de los descensos piezométricos experimentados en el pasado. Desde el punto de vista espacial, los pozos situados en el sector occidental del acuífero son los que presentan GWQI más elevados, debido a las concentraciones de SO42- (≈ 80-89 mg/L) y Cl- (≈ 224-248 mg/L). Este aumento del GWQI podría relacionarse con la influencia de los terrenos evaporíticos del Triásico Keuper, situados cerca del límite en este sector. De manera puntual en la cabecera del acuífero se pierde la catalogación de excelente y pasa a buena, debido a valores de nitratos próximos al umbral permitido para abastecimiento (50 mg/L). Este hecho podría señalar una zona de entrada de agua (recarga) desde niveles permeables superiores, en los que se desarrolla una intensa actividad humana. En definitiva, la aplicación del índice GWQI proporciona una visión rápida y sintética pero muy fiable de la calidad del agua del acuífero de Solana, ya que integra la información de múltiples parámetros hidroquímicos. Además, constituye una herramienta útil para la toma de decisiones, debido a que permite reconocer los sectores más vulnerables a las afecciones naturales y antrópicas.

Agradecimientos: Este trabajo se enmarca dentro de los resultados del Proyecto de Generación de Conocimiento del Plan Estatal de Investigación REVOKER (PID2023-151910OB-100)

Aplicaciones educativas interactivas de código abierto para la hidrogeología y la gestión de aguas subterráneas

Oriol Bertran[1], Daniel Fernàndez-Garcia[1], Thomas Reimann[2]

[1]*Department of Civil and Environmental Engineering (DECA), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain. Associated Unit: Hydrogeology Group (UPC-CSIC), Barcelona, Spain*
[2]*TU Dresden, Institute for Groundwater Management, 01062 Dresden, Germany*

Palabras clave: Educación superior en hidrogeología, Recursos educativos interactivos, Código abierto

Resumen. La hidrogeología, pese a su relevancia estratégica como principal reserva de agua dulce accesible, mantiene una presencia limitada tanto en la percepción social como en la formación universitaria. Su enseñanza implica abordar sistemas complejos caracterizados por procesos no observables directamente y una fuerte componente cuantitativa, lo que dificulta el desarrollo de competencias específicas en este ámbito. Esta complejidad hace necesario el desarrollo de enfoques pedagógicos que faciliten la comprensión del medio subterráneo. En este contexto, los recursos digitales interactivos se presentan como una herramienta eficaz para mejorar el aprendizaje de estos sistemas. Este trabajo describe el diseño e implementación de diversas aplicaciones educativas orientadas a la visualización y análisis de procesos hidrogeológicos, en continuo desarrollo desde noviembre de 2022, en el marco del proyecto europeo Erasmus+ de educación superior iNUX. Las herramientas, desarrolladas en Python e integradas en entornos web mediante HTML, CSS y JavaScript, permiten su uso flexible en distintos contextos formativos, incluyendo docencia de grado, máster y formación especializada. A partir de diversos casos de estudio, se evalúa su utilidad tanto en aprendizaje autónomo como en docencia presencial, principalmente en TU Dresden, Universitat Politècnica de Catalunya, Göteborgs Universitet y Universität Graz. Asimismo, se destaca el potencial del código abierto para favorecer la reutilización, adaptación y evolución de estos recursos dentro de la comunidad académica. Los códigos se encuentran disponibles en GitHub (https://github.com/gw-inux) y diferentes herramientas pueden consultarse también a través del apartado "Educación Interactiva" de The Groundwater Project.

Agradecimientos: La iniciativa iNUX ha sido posible gracias a la financiación de la Unión Europea en el marco del programa Erasmus+ (Proyecto n.º 2022-1-DE01-KA220-HED-000090088)

Atenuación Natural de contaminantes en acuíferos ante escenarios de recarga gestionada de acuíferos con agua regenerada en el sistema Fluvio-Deltaico de la Baixa Muga

Diana Puigserver[1], Laura Rincón[1], Humbert Salgado[1], Samuel Hernández[1], Núria López[1], Marta Rusiñol[1], Silvia Bofill[1], Jofre Herrero[1], José Francisco García[1]

[1]*Universitat de Barcelona*

Palabras clave: Recarga Gestionada de Acuíferos, Aguas regeneradas, Contaminantes emergentes, Indicadores microbiológicos

Resumen. La recarga gestionada de acuíferos (MAR) con agua regenerada se utiliza para aumentar la disponibilidad de agua subterránea y reducir efectos del cambio climático y la intrusión marina en acuíferos costeros. Aunque existen riesgos para la calidad del agua y los ecosistemas, muchos acuíferos pueden eliminar contaminantes de forma natural mediante procesos físicos, químicos y biológicos, lo que permite optimizar y reducir los tratamientos previos necesarios.

Este estudio evalúa el potencial de atenuación natural de contaminantes emergentes e indicadores microbiológicos en los acuíferos aluviales de la cuenca baja del río Muga (NE de España), ante un posible escenario de inyección de agua regenerada procedente de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Empuriabrava. El sistema de tratamiento incluye un tratamiento terciario basado en humedales construidos superficiales. Con el objetivo de caracterizar la calidad del agua regenerada, se llevó a cabo un seguimiento estacional durante 2025 del agua a la entrada y salida del sistema de humedales, analizando parámetros fisicoquímicos, contaminantes emergentes e indicadores microbiológicos (E. coli, enterococos, Clostridium perfringens y adenovirus humanos).

Los resultados muestran una mejora progresiva de la calidad del agua a lo largo del sistema de tratamiento, con una reducción de nutrientes y un incremento del oxígeno disuelto. Los valores medios en el efluente fueron de 1,6 ± 0,5 mg/L de fósforo, 1,5 ± 1,6 mg/L de nitrógeno Kjeldahl total y 5,8 ± 2,8 mg/L de oxígeno disuelto. Sin embargo, debido a su funcionamiento como sistema semi-natural, algunos parámetros asociados al crecimiento algal presentan incrementos puntuales, como los sólidos en suspensión y la turbidez. En cuanto a los

indicadores microbiológicos, el efluente presenta reducciones significativas, con valores medios de 138 ± 197 UFC/100 mL para E. coli (98%), 2515 ± 2554 UFC/100 mL para coliformes totales (91%), 136 ± 120 UFC/100 mL para enterococos (94%), 73 ± 102 UFC/100 mL para Clostridium perfringens (74%) y 125 ± 199 CG/mL para adenovirus humanos (87%). Las concentraciones medias de sólidos en suspensión y E. coli se mantienen dentro de los umbrales establecidos para determinados usos ambientales o agrícolas con contacto restringido. No obstante, la elevada variabilidad interanual observada, especialmente durante el periodo estival, evidencia que los procesos internos del humedal influyen significativamente en la calidad final del agua, pudiendo comprometer de forma puntual el cumplimiento de los estándares más exigentes establecidos para riego agrícola o recarga ambiental (calidades R.A+ y U.A+) según la normativa española reciente.

Paralelamente, se caracterizó el agua subterránea de los acuíferos superior (libre) e inferior (confinado) en la zona de transición entre agua dulce y salada. De los contaminantes emergentes incluidos en la Directiva (UE) 2024/3019 se detectaron 41 compuestos, de los cuales 30 se identificaron en el agua regenerada y 6 en el agua subterránea. Entre los compuestos presentes en ambos medios destacan avobenzona, octocrileno, benzofenona-3, octisalato, benzotriazol e irbesartán.

En la zona prevista de inyección se perforó un sondeo con recuperación de testigo continuo, posteriormente equipado como piezómetro ranurado a 10 y 18 m de profundidad para poder llevar a cabo la inyecció del agua regenerada en cada uno de los acuíferos de forma independiente.

Los sedimentos recuperados se utilizaron para realizar experimentos de microcosmos destinados a evaluar la atenuación potencial de contaminantes emergentes (carbamazepina, venlafaxina, octisalato, benzotriazol, climbazol, irbesartán, metoprolol, octocrileno y benzofenona-3) y de indicadores microbiológicos presentes en el agua regenerada.

Los resultados preliminares de los ensayos de microcosmos indican que los sedimentos del acuífero presentan capacidad para atenuar parcialmente diversos contaminantes emergentes y microorganismos

indicadores. Asimismo, se identifican condiciones hidrogeoquímicas que podrían favorecer estos procesos, lo que sugiere que determinadas estrategias de gestión del acuífero podrían incrementar las tasas de degradación durante la recarga, aspecto que será evaluado en el futuro ensayo piloto de MAR.

Agradecimientos: La investigación cuenta con la financiación del proyecto ClimEx-PE (PCI2024-153522 - Water4All)

Atualização do balanço hidrológico da Serra da Estrela com EXCEL-BALAN e análise comparativa com dados de teledeteção

Bruno Pisani Veiga[1], Jorge Espinha-Marques[2], Javier Samper Calvete[1], Brais Sobral Areán[1]

[1]Centro Interdisciplinar de Química e Bioloxía (CICA), ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña, España
[2]Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Portugal

Resumen. A parte mais elevada da bacia da Serra da Estrela constitui um sistema hidrológico de montanha de grande interesse devido à importância estratégica dos seus recursos hídricos, aos processos nivais e ao papel combinado da escorrência superficial, do fluxo hipodérmico e da recarga subterrânea. Este trabalho apresenta uma nova avaliação dos recursos hídricos da bacia do Zêzere a montante de Manteigas, tomando como ponto de partida o modelo hidrológico semidistribuído aplicado originalmente ao período 1986–1995. Nesse estudo, a bacia foi representada por nove sub-bacias, incorporando a variação altitudinal da precipitação e da temperatura, o que permitiu melhorar substancialmente a simulação dos caudais à saída da bacia em comparação com um modelo agregado. Os resultados obtidos mostraram que o fluxo hipodérmico é o principal componente do escoamento, com valores entre 41 e 55% da precipitação anual, enquanto a recarga média anual se situa entre 11 e 15%.

A principal novidade metodológica deste trabalho é a apresentação de uma nova versão do código BALAN, programada integralmente em ambiente Excel, denominada EXCEL BALAN, concebida para facilitar a rastreabilidade dos dados, a transparência do cálculo, a versatilidade e a aplicabilidade em estudos hidrológicos de bacias com disponibilidade limitada de informação. A partir do modelo conceptual anterior, atualiza-se e estende-se o balanço hidrológico de 1995 até 2025. A análise das tendências das séries temporais do escoamento e da acumulação e fusão nival de 30 anos de duração a diferentes altitudes, através do teste de Mann-Kendall, representa um importante avanço no conhecimento dos recursos hídricos num contexto de variabilidade climática e de possíveis alterações no regime nival. Como terceira contribuição, o trabalho apresenta uma comparação preliminar dos resultados do modelo com informação proveniente de imagens de satélite, utilizando dados de teledeteção de cobertura nival para avaliar a coerência espacial e temporal da acumulação e da fusão de neve

simuladas. O trabalho constitui, assim, um avanço significativo na avaliação integrada dos recursos hídricos da Serra da Estrela mediante uma ferramenta operativa, atualizada e validada.

Agradecimientos: Este estudo foi financiado pelos projetos HERCULES (PID2023 153202OB I00) do Ministério da Ciência e Inovação de Espanha e pelo Projeto de Consolidação GRC da Xunta de Galicia (Ref.: ED431C 2025/55), assim como por fundos da FCT — Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., projetos UIDB/04683/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDB/04683/2020) e UIDP/04683/2020 (https://doi.org/10.54499/UIDP/04683/2020).

Avaliação do risco de contaminação da água subterrânea no sistema aquífero costeiro de Gabès (Tunísia)

Margarida Antunes[1], Bilel Abdelkarim[2], Msaddak Msaddak[3], Yahia Moumni[4], Najeh Bouarrouj[4], Abir Khaskhoussi[4], Belgacem Agoubi[5]

[1]*ICT | Institute of Earth Sciences, University of Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal*
[2]*Higher Institute of Water Sciences and Techniques, University of Gabes, University Campus, 6033 Gabes Applied Hydrosciences Laboratory, Tunisia; ICT| Institute of Earth Sciences, University of Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal*
[3]*Higher Institute of Water Sciences and Techniques, University of Gabes, University Campus, 6033 Gabes Applied Hydrosciences Laboratory, Tunisia*
[4]*Faculty of Sciences of Tunis, University of Tunis El Manar, Tunis, 2092, Tunisia; Institute of Earth Sciences, University of Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal*
[5]*Higher Institute of Water Sciences and Techniques, University of Gabes, University Campus, 6033 Gabes Applied -Hydrosciences Laboratory, Tunisia*

Palabras clave: Nitratos, Elementos potencialmente tóxicos, Índice de Qualidade da Água, Zonas semiáridas

Resumen. A contaminação da água subterrânea constitui um problema ambiental e de saúde pública, particularmente relevante em regiões áridas e semiáridas, onde os recursos hídricos são escassos e sujeitos a pressões naturais e antrópicas. A região costeira de Gabès (Sul Tunísia) representa um exemplo significativo desta problemática, devido à combinação de fatores como o clima árido, a intrusão salina, a agricultura intensiva, as descargas industriais associadas principalmente à indústria química e de transformação de fosfatos, e a crescente urbanização. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a qualidade da água subterrânea e identificar a distribuição espacial do risco de contaminação por nitratos e Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), incluindo arsénio, crómio, níquel e chumbo, no sistema aquífero costeiro de Gabès.

A metodologia adotada baseia-se numa abordagem integrada que combina trabalho de campo, análise hidrogeoquímica e técnicas de geoprocessamento em

Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foram recolhidas 24 amostras de água subterrânea, em março de 2022, nas quais foram medidos parâmetros físico-químicos in situ (e.g. temperatura, pH, Condutividade Elétrica, potencial redox e turbidez). Posteriormente, as amostras foram analisadas em laboratório e determinada a concentração de nitrato e dos EPT selecionados. A avaliação da contaminação e do risco potencial foi obtida através de aplicação de índices hidrogeoquímicos - Índice de Poluição por Nitrato (NPI), Índice de Poluição por Metais Pesados (HPI), Índice de Avaliação de Metais Pesados (HEI), Grau de Contaminação (Cd) e Índice de Qualidade da Água (WQI). Estes índices foram posteriormente integrados num sistema de análise multicritério (MCDM), permitindo gerar um índice integrado de risco de contaminação e mapear a sua distribuição espacial através de ferramentas SIG.

Os resultados evidenciam uma forte variabilidade espacial na qualidade da água subterrânea na área de estudo. As concentrações mais elevadas de nitratos e EPT foram identificadas principalmente nos setores este e centro-este do sistema aquífero, onde se verificam valores elevados de Cr, Ni, Pb e nitrato. Estas áreas correspondem a hotspots de contaminação associados sobretudo a agricultura intensiva, elevada densidade urbana e ocorrência de atividades industriais. Em contraste, as zonas sul e oeste apresentam melhores condições de qualidade da água, refletindo uma menor pressão antrópica e características hidrogeológicas mais favoráveis à proteção natural do aquífero.

A integração dos diferentes índices de qualidade da água permite identificar de forma consistente as áreas mais vulneráveis e compreender a influência combinada dos fatores naturais e das atividades humanas na distribuição espacial dos contaminantes, podendo ser aplicada em outros aquíferos costeiros de regiões mediterrânicas e de clima árido.

Os resultados evidenciam a necessidade de implementar programas de monitorização contínua, bem como estratégias de mitigação e gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

Agradecimientos: The work is included in the framework of the UID/04683/2025, https://doi.org/10.54499/UID/04683/2025, through FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

Avances en el uso del análisis isotópico de contaminantes emergentes en acuíferos: lecciones de dos casos de estudio

Clara Torrentó[1], Rafaela Nascimento[2], Martí Vinyes-Nadal[2], Nil Caballero[2], Neus Otero[1]

[1]*Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), 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 i Franquès s/n, Barcelona 08028, Spain. Serra Húnter Fellowship, Generalitat de Catalunya, Spain*
[2]*Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), 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 i Franquès s/n, Barcelona 08028, Spain*

Resumen. Mientras que el análisis isotópico de compuestos específicos (CSIA, de sus siglas en inglés) está ampliamente consolidado para identificar fuentes de contaminación y evaluar procesos de degradación de hidrocarburos y disolventes halogenados, su aplicación a contaminantes de preocupación emergente en aguas subterráneas sigue siendo todavía incipiente. Esta limitación se debe tanto a desafíos analíticos, como las típicas bajas concentraciones o la elevada polaridad de muchos emergentes, como a lagunas en el conocimiento de sus vías de degradación y del fraccionamiento isotópico asociado. Como consecuencia, aún existen pocos estudios que evalúen la aplicabilidad del CSIA a estos compuestos en condiciones reales de campo.

El objetivo de este trabajo es evaluar la aplicabilidad del CSIA al estudio de contaminantes emergentes en acuíferos mediante dos estudios de campo con distintas condiciones hidrogeológicas y escenarios de contaminación. Los casos analizados abarcan un escenario de contaminación puntual, con fuentes definidas y concentraciones relativamente elevadas, y un sistema afectado por contaminación difusa, donde los compuestos se encuentran en concentraciones cercanas a los límites de detección analítica. En ambos estudios fue necesario desarrollar y optimizar métodos analíticos y de extracción y preconcentración para aguas y muestras sólidas, incluyendo extracciones de gran volumen y etapas específicas de purificación de extractos compatibles con el análisis isotópico.

El primer caso se centra en un acuífero carbonatado fracturado afectado por la actividad histórica de una fábrica de productos fitosanitarios, donde se investigó el destino del insecticida organoclorado metoxicloro. Se realizaron campañas de muestreo de agua subterránea, suspensiones sólido-líquidas obtenidas del fondo de piezómetros y sedimentos de la zona saturada obtenidos a partir de testigos de sondeos, requiriendo extracciones de hasta 20 L por muestra. El análisis combinado de los isótopos de carbono y cloro permitió identificar cambios isotópicos coherentes con procesos de decloración reductiva, aportando evidencias de degradación in situ y permitiendo la cuantificación del grado de atenuación natural en el acuífero.

El segundo caso se desarrolló en un acuífero aluvial somero hidráulicamente conectado a un río y afectado por aportes de efluentes de depuradora, donde se investigó el comportamiento de una mezcla de fármacos, pesticidas, contaminantes industriales y compuestos de estilo de vida presentes en concentraciones traza. Se llevaron a cabo campañas de muestreo en puntos de agua superficial y subterránea, con volúmenes de extracción superiores a 20 L. Aunque se logró acumular masa suficiente de algunos contaminantes, la aplicación de CSIA se vio limitada por las bajas concentraciones y por la complejidad de la matriz, que provocó interferencias cromatográficas e impidió la obtención de relaciones isotópicas fiables. Estos resultados evidencian la necesidad de incorporar etapas específicas de purificación de extractos para permitir la aplicación de CSIA en escenarios de contaminación difusa.

Ambos estudios ponen de manifiesto tanto el potencial como las limitaciones actuales del CSIA para contaminantes emergentes y contribuyen a avanzar hacia su aplicación en estudios de campo y en la gestión de la contaminación en acuíferos.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por los proyectos que se detallan a continuación. WATERCLIMATE (2023-CLIMA00101), financiado por el Departament de Recerca i Universitats, el Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural y el Fons Climàtic de la Generalitat de Catalunya. ISOTRACE (PID2022-139911OB-C41), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE. PASITO (CNS2022-135543), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR. UPWATER (Horizon Europe 101081807), financiado por la Unión Europea.

Balance de agua en el suelo de la masa de agua de Castellón de la Plana

Esteban Hormigo Sánchez[1], Arnau Puig Borrell[1], Olga Raventós Ortega[1], Luis Calvo Buelga[1], José Vicente Clausell Borja[2], Inés Beltrán[3]

[1]*iAquant*
[2]*FACSA*
[3]*Ayuntamiento de Castellón de la Plana*

Palabras clave: iAquant, WaterPyBal, Balance Hídrico, Castellón de la Plana

Resumen. La estimación de la recarga y de los distintos componentes del balance hídrico constituye un elemento clave para la comprensión del funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos y para la construcción de modelos numéricos de flujo subterráneo. En este contexto, se ha desarrollado un balance de agua en el suelo para la masa de agua de Castellón de la Plana mediante el software WaterPyBal, con el objetivo de cuantificar los principales procesos hidrológicos y proporcionar información de entrada para la calibración de un modelo hidrogeológico regional.

El balance se ha realizado para el periodo comprendido entre octubre de 2009 y diciembre de 2024, integrando información meteorológica, edáfica y de usos del suelo. El modelo se implementó sobre una malla raster de 250 × 250 m que cubre la totalidad de la cuenca, utilizando el sistema de referencia ETRS89 / UTM zona 30N. Los datos meteorológicos procedentes de 13 estaciones fueron interpolados espacialmente mediante el método de inverso de la distancia (IDW), permitiendo generar series diarias de precipitación y temperatura para todo el dominio de cálculo.

La evapotranspiración potencial fue estimada mediante el método de Hargreaves, mientras que la evapotranspiración real se calculó en función de la reserva de agua en el suelo (SWR), definida a partir de la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y el espesor radicular asociado a los distintos usos del suelo. La infiltración y la escorrentía se estimaron mediante el método del número de curva del Soil Conservation Service adaptado a las condiciones locales.

El modelo desarrollado proporciona una herramienta robusta para la cuantificación espacial y temporal de la recarga y constituye una base fundamental para el desarrollo y calibración de modelos hidrogeológicos

regionales orientados a la gestión sostenible de las aguas subterráneas en la masa de agua de Castellón de la Plana.

Agradecimientos: El estudio ha sido financiado por el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico en el marco del PERTE digitalización del ciclo del agua Orden TED/919/2023, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, financiado por la unión europea NextGenerationEU (PCAUII00100).

Biorremediación y mitigación del penacho de contaminación mediante una barrera biorreactiva en un acuífero multicapa complejo contaminado por etenos clorados

David Garriga[1], Foix Soler-Balaguer[1], Marçal Bosch[1]

[1]*Litoclean, S.L.*

Palabras clave: barrera reactiva, bioestimulación, etenos clorados, aguas subterráneas

Resumen. El acuífero superficial de un emplazamiento industrial ubicado en una zona de elevado valor ambiental y social (cerca de la costa, área protegida, y acuífero profundo en explotación para el abastecimiento de agua) está gravemente contaminado por los etenos clorados PCE, TCE, cis-1,2-DCE y CV. Las investigaciones previas (caracterización del emplazamiento y ensayos piloto) confirmaron que la bioestimulación mediante el uso de enmiendas orgánicas sería la mejor estrategia de remediación para el acuífero y transformar el PCE hasta el compuesto inocuo eteno.

Con el objetivo de optimizar el aporte de enmiendas y maximizar la eficiencia del proceso, el proyecto de biorremediación de la zona saturada se planteó de distinta forma para las diferentes zonas del penacho identificadas. Se consideró la casuística del sitio en estudio y las tres unidades hidrogeológicas más relevantes (una de limos y arcillas, asociada al acuífero somero; y una constituida por gravas de base aluvial, y otra de materiales jurásicos, con carniolas o brechas carbonatadas según la zona, ambas asociadas al acuífero profundo).

La adición de la enmienda (un sustrato orgánico fermentable), dirigida a ambos acuíferos, se implementó estratégicamente, según la trayectoria y el destino del penacho, el modelo conceptual del sitio (MCS) y los objetivos de remediación. En la zona foco, donde los etenos clorados predominan en la capa de arcilla limosa (acuífero superficial), la enmienda se inyectó a través de los piezómetros instalados para promover la biodegradación y minimizar la migración con el flujo de agua subterránea. Siguiendo la trayectoria de la pluma hacia el pozo de explotación del acuífero profundo, se instaló una barrera biorreactiva en el borde exterior de la zona foco. La barrera estuvo constituida por tres series de

piezómetros, cada una dirigida a cada unidad hidrogeológica. Las inyecciones de enmienda se dirigieron a los clorados adsorbidos en las arcillas limosas, pero también a aquellos que, potencialmente, migraban con el flujo de agua subterránea desde la zona foco, a través de las gravas y del acuífero profundo. Finalmente, se instalaron varios piezómetros centinela aguas abajo de la barrera reactiva y aguas arriba del pozo de explotación, para monitorear los etenos clorados, generalmente siguiendo un enfoque de atenuación natural monitorizada, si bien se ha realizado alguna inyección puntual. El seguimiento del progreso y eficiencia del tratamiento de biorremediación incluye el análisis de los siguientes parámetros en aguas subterráneas: 1) datos hidrogeoquímicos (concentraciones de etenos clorados y eteno, iones mayoritarios, pH, oxígeno disuelto y ácidos grasos volátiles, entre otros); 2) biomarcadores moleculares para la decloración reductiva de los compuestos de interés, y 3) la composición isotópica de carbono estable (δ13C) del cis-1,2-DCE.

La evaluación de los datos ha mostrado resultados prometedores para este complejo proyecto de biorremediación. Se han observado reducciones claras de los compuestos originales PCE y TCE, y un aumento tanto en las concentraciones del gas eteno, como en los biomarcadores moleculares objetivo, confirmando la decloración completa de los etenos clorados. Sin embargo, en algunas áreas, las concentraciones de clorados aún evidencian repuntes de los compuestos adsorbidos en el suelo, confirmado por los análisis isotópicos de carbono. Este trabajo es un ejemplo de un estudio de caso real y complejo donde el MCS y el contexto ambiental y social fueron de gran relevancia al diseñar la estrategia de biorremediación. El progreso del proyecto y los resultados obtenidos se presentarán en la conferencia.

El proyecto de investigación previo a este estudio se presentó en el congreso CIAS 2024 y las pruebas de tratabilidad de laboratorio y los ensayos piloto a escala de campo que confirmaron la viabilidad y eficiencia de esta estrategia se presentarán también como resumen en esta conferencia CIAS 2026, en este caso para un póster.

Canales ancestrales de infiltración (pesqueras) como solución basada en la naturaleza para la recarga de acuíferos en la vertiente sur de la Sierra de Gredos

Héctor Aguilera Alonso[1], Ana Fernández-Ayuso[2], Blas Ramos Rodríguez[1], Nuria Naranjo Fernández[1], Thomas Zakaluk[1], Carlos Marín Lechado[1], Antonio González Ramón[1], Jorge Jódar Bermúdez[1], Rocío Huertas Méndez[4], Almudena de la Losa Román[1], José María Martín Civantos[3], Sergio Martos Rosillo[1]

[1]IGME
[2]UAM
[3]UGR

Palabras clave: Recarga artificial, Soluciones Basadas en la Naturaleza, Siembra y Cosecha del Agua, HBV

Resumen. Las acequias de infiltración en la zona de La Vera (Cáceres), conocidas localmente como pesqueras, representan un enfoque ancestral de Siembra y Cosecha del Agua (SyCA) para la gestión del agua en las laderas montañosas graníticas de la Sierra de Gredos. En este trabajo se cuantificó el impacto de las pesqueras rehabilitadas en la recarga de acuíferos y en el caudal base del río durante de la estación seca mediante una combinación de análisis de archivos históricos, cartografía participativa, restauración con voluntariado, monitoreo hidrometeorológico continuo (noviembre de 2023 – septiembre de 2025) y modelización lluvia-escorrentía. Se monitorizaron cuatro pesqueras reactivadas, con una infiltración media estimada de aproximadamente 2 hm^3/año durante el periodo de estudio. Las simulaciones con el modelo HBV indican que la recarga procedente de las pesqueras representa una fracción sustancial (39 %) de la recarga total de la cuenca y contribuye de manera significativa a los caudales estivales.

Las limitaciones operativas observadas en el campo incluyeron la obstrucción de las tomas, roturas de los canales durante lluvias extremas y una conectividad variable de los canales con las zonas de alteración. Sin embargo, el mantenimiento comunitario (esto es, el de la comunidad de regantes Ocho Caños

y los grupos de voluntariado) mitigó en parte estos problemas. En comparación con ejemplos globales de recarga gestionada de acuíferos mediante técnicas de derivación e infiltración en cauces, las pesqueras presentan caudales y eficiencias de infiltración dentro de los rangos documentados, si bien estos resultados están fuertemente condicionados por la hidrogeología local y los esfuerzos de mantenimiento. Se concluye que las pesqueras rehabilitadas constituyen una Solución basada en la Naturaleza (SbN) de bajo costo que proporciona múltiples beneficios colaterales (almacenamiento de agua subterránea, recuperación del paisaje cultural y soporte a los ecosistemas) cuando se integra en marcos de gobernanza transdisciplinarios y liderados por la comunidad.

Agradecimientos: 2023/96: Inventario y caracterización de sistemas ancestrales de siembra y cosecha de agua para la adaptación al cambio climático (WASHA). Fundación Biodiversidad.

PID2022-140092OB-I00: Acequias de Infiltración como Soluciones Basadas en la Naturaleza para la Transición Ecológica (INCHA). Duración: 2023-2026. Entidad financiadora: Ministerio de Ciencia e Innovación. Proyectos de Generación de Conocimiento 2022. Entidades participantes: IGME-CSIC, UPO, UAM, UCalgary, USGS.

Caracterización de la contaminación química e identificación de fuentes de recarga en aguas subterráneas urbanas de Barcelona

Santiago Gómez-Herrera[1], Estanislao Pujades[1], Monica Enrich[2], Victoria Osorio[1], Anna Jurado[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Jordi Girona 18-26, 08034 Barcelona (España)*
[2]*Barcelona Cicle de l'Aigua SA (BCASA), C/de l'Acer 16, 08038 Barcelona (España)*

Palabras clave: Acuíferos urbanos, Contaminantes orgánicos, Fuentes de recarga

Resumen. La ciudad de Barcelona presenta una elevada densidad poblacional que, junto con los efectos del cambio climático y las sequías recurrentes, están aumentando la presión sobre los recursos hídricos debido al incremento de la demanda y la disminución de su disponibilidad. En este contexto, las aguas subterráneas urbanas son fuente alternativa potencial, aunque la presencia de mezclas complejas de contaminantes químicos orgánicos condiciona su aprovechamiento. Este estudio realiza una evaluación integral de las aguas subterráneas mediante técnicas analíticas avanzadas y la aplicación de herramientas de estadística multivariada para caracterizar su perfil de contaminación, identificar fuentes de recarga y explorar posibles procesos de degradación/atenuación en el acuífero. Para ello, se realizaron 6 campañas de muestreo mensuales (oct 2024 – mar 2025) en las aguas subterráneas de una zona piloto ubicada en el llano de Barcelona, que presenta una explotación activa del acuífero y alta urbanización. Se recolectaron 54 muestras en 9 puntos de observación para el análisis de iones mayoritarios y minoritarios, carbono orgánico disuelto, metales traza y contaminantes orgánicos, incluyendo residuos de fármacos, pesticidas, edulcorantes, entre otros. Además, se midieron en campo parámetros fisicoquímicos como alcalinidad, oxígeno disuelto, pH, temperatura y conductividad eléctrica. Se aplicaron análisis multivariados para identificar posibles patrones hidrogeoquímicos y se incluyó un modelo de mezcla para estimar las contribuciones relativas de distintas fuentes de recarga mediante trazadores químicos. De los 80 contaminantes orgánicos analizados, todos fueron detectados en al menos una de las muestras, evidenciando la presencia de mezclas químicamente complejas en el acuífero. Asimismo, 8 compuestos fueron ubicuos con amplios rangos de concentración (p.ej. <LOQ–300 ng/L). Los residuos

de compuestos industriales y los aditivos alimentarios dominaron la carga media de contaminantes, destacando sustancias pseudo-persistentes como la melamina. Los patrones espaciales muestran una distribución heterogénea con puntos hotspots de contaminación situados en tramos iniciales del gradiente de flujo. Temporalmente se observa una variabilidad marcada entre campañas, con valores mayores en campañas iniciales/intermedias; por ejemplo, el herbicida diuron muestra una disminución progresiva de C1 (0.824 ng/L) a C6 (0.516 ng/L). El modelo de mezcla consideró tres fuentes de recarga: dos de origen antropogénico, correspondientes a infiltraciones del sistema de alcantarillado (SW) y pérdidas de la red de agua potable (LLOB), y una de origen natural, que es la recarga que ocurre en la zona no urbana (REC). Los resultados indican un sistema dominado por aportes urbanos, con contribuciones medias del 42% para SW y del 21% para LLOB. Finalmente, la recarga natural en Collserola, representa, en promedio, el 37% del agua residente del acuífero, aunque con una marcada variabilidad temporal entre campañas. El boro, seguido por cloruro, sodio y sulfato, destacaron como trazadores de agua residual. Cuando compuestos orgánicos como acetaminofén o bisfenol-A son incorporados en el modelo, sus concentraciones medidas son menores a las estimadas sugiriendo procesos de dilución y atenuación bajo las condiciones oxidantes características del acuífero. En conjunto, estos hallazgos confirman impactos antropogénicos evidentes con señales de dilución/atenuación de contaminantes a lo largo del flujo, proporcionando información clave para evaluar su potencial como fuente de abastecimiento.

Agradecimientos: SGH agradece el apoyo de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) y del FSE+ a través del proyecto CEX2018-000794-S-20-1. AJ y SGH agradecen al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España por la ayuda a través del proyecto WATERPOLLUT (PID2022-138556OB-C21). VO agradece el apoyo recibido por medio del contrato Ramón y Cajal (RyC2021-034685-I) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España.

Caracterización de la descarga submarina de aguas subterráneas en acuíferos costeros mediante tomografía de resistividad eléctrica anfibia y análisis de la variación horaria

Jose Tur-Piedra[1], Marc Diego-Feliu[1], Juanjo Ledo[2], Maria Muñoz-Pinyol[3], Bella Almillategui[1], Pilar Queralt[4], Alex Marcuello[4], Valentí Rodellas[3], Albert Folch[1]

[1]*Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental (DECA), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Grup d'Hidrologia Subterrània (UPC-CSIC), Barcelona*
[2]*Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid, Madrid*
[3]*Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra*
[4]*Institut de Recerca Geomodels, Universitat de Barcelona, Barcelona*

Palabras clave: Descarga submarina de aguas subterráneas (SGD), Tomografía de resistividad eléctrica, Acuíferos costeros

Resumen. La descarga submarina de aguas subterráneas (Submarine Groundwater Discharge, SGD) es un proceso clave en la interacción entre acuíferos costeros y el medio marino, con implicaciones en la dinámica hidrogeoquímica de los sistemas litorales. Este trabajo tiene como objetivo caracterizar la SGD a lo largo del continuo tierra–mar en dos contextos hidrogeológicos distintos, uno detrítico y otro kárstico, en la costa noreste de la península Ibérica.

Para ello, se aplicó Tomografía de Resistividad Eléctrica Anfibia a lo largo de transectos que abarcan las zonas emergida y sumergida de la playa. Las adquisiciones geofísicas se repitieron a intervalos horarios durante campañas realizadas en otoño de 2023 y en marzo de 2024. Los datos geofísicos se complementaron con muestreo de agua intersticial, incluyendo medidas de salinidad y temperatura, mediciones de descarga mediante infiltrómetros y monitorización del nivel del mar con sensores CTD, con el objetivo de validar la distribución de salinidad en el subsuelo y los patrones de descarga.

Los resultados muestran comportamientos distintos entre ambos sistemas. En el entorno kárstico se identifican valores elevados de resistividad asociados a vías preferenciales de descarga de agua dulce, controladas por fracturas y conductos,

lo que genera una marcada heterogeneidad espacial. Por el contrario, el sistema detrítico presenta patrones de descarga más difusos y gradientes de salinidad más graduales. Las variaciones temporales de resistividad se correlacionan con pequeñas fluctuaciones del nivel del mar (<10 cm), lo que sugiere que cambios menores en los gradientes hidráulicos modulan la mezcla entre agua dulce y agua marina.

Estos resultados destacan el potencial de la tomografía de resistividad eléctrica para la caracterización hidrogeológica de acuíferos costeros y el análisis de la dinámica de la SGD en ambientes micromareales.

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada por la Agència Catalana de l'Aigua (ACA210/18/00007) y por los proyectos MUCHOGUSTO (PID2022-140862OB-C21/C22), financiados por MCIN/AEI y FEDER Una manera de hacer Europa . J. Tur-Piedra agradece el apoyo de la beca FI-2022 de la Generalitat de Catalunya (2022FI_B_00601).

Caracterización de la heterogeneidad hidrogeológica y optimización evolutiva para la inferencia del rango dinámico de agua subterránea

Abraham Peraza[1], Jorge López-Rebollo[1], Susana Del Pozo[1], Diego González-Aguilera[1]

[1]*Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad de Salamanca. Hornos Caleros, 50, 05003, Ávila, España*

Palabras clave: Rango Dinámico, Heterogeneidad, Inferencia, Optimización Evolutiva

Resumen. La caracterización de acuíferos a escala regional mediante métodos satelitales presenta como principal desafío la heterogeneidad espacial y escalar. En un mismo sistema es común la coexistencia de rangos dinámicos extremos del nivel piezométrico: desde oscilaciones superiores a los 10 metros en zonas kársticas altamente transmisivas, hasta variaciones submétricas en acuíferos confinados. Al entrenar arquitecturas globales de inteligencia artificial con datos no estandarizados, las funciones de pérdida se sesgan hacia los sectores con mayor amplitud de oscilación. Esta asimetría matemática complica el entrenamiento, ya que ignora la dinámica de las áreas más estables y limita drásticamente su capacidad predictiva general.

Para superar esta limitación, se presenta el desarrollo de un avanzado motor de inferencia diseñado para predecir la escala de variación piezométrica. El objetivo central es inferir la magnitud de las fluctuaciones hidrogeológicas en ubicaciones carentes de instrumentación, estimando la desviación estándar esperada del nivel freático local. Metodológicamente, se ha implementado un algoritmo de Optimización Evolutiva Diferencial Autoadaptativa que explora y consolida patrones de similitud dentro de un espacio métrico multidimensional de cuatro ejes: litología, geografía, uso del suelo y el novedoso índice multiescalar Satellite-In-Ratio (SIR).

A diferencia de los métodos de interpolación espacial geoestadísticos tradicionales, que operan fundamentalmente en un dominio euclidiano

bidimensional, este modelo evolutivo identifica "vecinos análogos" en un entorno multidimensional. Esta conceptualización permite al sistema identificar como puntos de referencia piezómetros geográficamente distantes, pero con comportamientos hidrogeológicos, litológicos y presiones antrópicas casi idénticos, superando así las severas limitaciones inherentes a la mera proximidad física.

Entre los descriptores analizados, la litología emerge como el factor de control dominante, al condicionar parámetros hidráulicos clave de la roca, como la transmisividad. Por su parte, la variable SIR establece una relación analítica entre las anomalías de almacenamiento de agua subterránea (derivadas de la misión satelital gravimétrica GRACE) y la humedad del suelo superficial. Este índice resulta fundamental para discriminar si las variaciones de masa observadas responden a la dinámica del acuífero profundo o a procesos de la zona vadosa. Finalmente, el componente antrópico se integra mediante la clasificación de usos del suelo, permitiendo al algoritmo ponderar el impacto de las extracciones por bombeo agrícola sobre la volatilidad hidráulica local.

Para asegurar la máxima generalización y mitigar el riesgo de sobreajuste, el sistema ejecuta miles de generaciones evolutivas, seleccionando los cincuenta modelos de mayor rendimiento y adoptando la mediana de sus predicciones. Sometido a un riguroso esquema de validación cruzada espacial anidada (Nested Leave-One-Out) en el sistema del Campo de Montiel (Guadiana, España), el motor de inferencia alcanzó una notable precisión (R de Pearson = 0.903; Error Medio Absoluto = 0.456 m). Estos resultados certifican la capacidad del sistema para predecir variabilidades a través de múltiples órdenes de magnitud sin incurrir en sesgos sistemáticos. Esta inferencia precisa del rango dinámico permite desnormalizar modelos temporales y reconstruir íntegramente series piezométricas en zonas ciegas, ofreciendo a los gestores una herramienta operativa y escalable para la planificación de los recursos hídricos subterráneos.

Caracterización de la presencia de agua subterránea bajo el Mar Menor (Murcia) mediante tomografía de resistividad eléctrica

Edison Steven Morales Sotaminga[1], Marcos Antonio Martínez Segura[1], Pedro Martínez Pagán[1], Francisco Gilabert Cervera[1], Valentí Rodellas Vila[2], Marisol Manzano Arellano[1]

[1]*Universidad Politécnica de Cartagena*
[2]*Universitat Autònoma de Barcelona*

Palabras clave: Mar Menor, Campo de Cartagena, Acuífero cuaternario, Tomografía de resistividad eléctrica

Resumen. La cuenca del Mar Menor (Región de Murcia) ha sido objeto de estudios multidisciplinares en los últimos años, motivados por el importante estado de degradación del ecosistema marino tras la ocurrencia de varios episodios de eutrofización. La caracterización hidrogeológica tiene gran relevancia dado que la descarga de agua subterránea es una de las vías de entrada de agua y nutrientes en la laguna, e influye sobre la calidad del agua y de los ecosistemas. La descarga de agua subterránea puede tener lugar tanto en el contacto tierra-mar como por descarga submarina. La exploración de la posible existencia de agua subterránea dulce en las formaciones geológicas bajo el Mar Menor se ha abordado en el marco de los proyectos INPUT (PID2019-110311RB-C22; UPCT y UAB), REMEDIATE (TED2021-131005B-C32; UPCT, UAB y UdG) y WINDERS (TED2021-130710B-I00; UPCT y UAB) mediante distintas técnicas, una de ellas la geofísica. En el año 2023 se realizaron 4 transectos tierra-mar con tomografía de resistividad eléctrica. Los datos obtenidos se complementaron con datos litológicos y de salinidad del agua de sondeos propios realizados cerca de la costa y de cada transecto. Integrando toda la información, se localizó y delimitó la geometría de cuerpos de agua subterránea bajo el Mar Menor hasta unos 70-80 m de la línea de costa. El trabajo se realizó en abril y noviembre, obteniéndose resultados consistentes. Para explorar la posible extensión de esos cuerpos de agua subterránea dulce bajo la laguna, en junio de 2025 se realizaron dos perfiles de tomografía de resistividad eléctrica marina frente a dos de los transectos tierra-mar del año anterior, uno situado en la Marina del Carmolí y otro en La Hita. El trabajo consistió en la medida de la resistividad eléctrica en profundidad mediante el arrastre de electrodos sobre la superficie marina con una

embarcación. Los transectos tienen orientación oeste-este y una extensión total de 8,7 km y 3,9 km en el Carmolí y La Hita, respectivamente. Aplicando un algoritmo de inversión a las medidas de resistividad aparente se obtuvieron perfiles de resistividad invertida que alcanzan una profundidad de 20 m bajo el nivel del mar.

Los resultados muestran que bajo el fondo marino existe una capa de al menos 10 m de espesor con una resistividad mucho mayor que la que corresponde al agua de la laguna y a los sedimentos con agua de mar. La resistividad de la capa disminuye mar adentro hasta homogeneizarse con los valores de las capas superiores e inferiores, lo que ocurre a unos 2 km mar adentro frente a La Hita y unos 6 km frente a El Carmolí. Esta capa se asocia a la presencia de agua subterránea procedente del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena; su progresiva desaparición hacia el este indicaría que la zona de mezcla con el agua de mar de los sedimentos es bastante extensa. Aunque los resultados son provisionales, su consistencia sugiere que existe agua subterránea dulce y salobre bajo una superficie notable del Mar Menor y recomienda extender el estudio a toda la laguna.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el contexto de los proyectos INPUT (PID2019-110311RB-C22), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033; REMEDIATE (TED2021-131005B-C32), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y NextGenerationEU/PRTR; y WINDERS (TED2021-130710B-I00), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y NextGenerationEU/PRTR.

Caracterización de los acuíferos kársticos de Andalucía basada en índices de renovación del agua subterránea. Resultados preliminares del proyecto AQUA-KARST

Antonio González Ramón[1], Ana Ruiz Constán[1], Sergio Martos Rosillo[1], Carlos Marín Lechado[1], Antonio Pedrera[1], Jesús García Senz[1], Fernando García Bermudo[1], Concepción Fernández Leyva[1], Jorge Jódar[1], Antonio Lope Morales González[1], Mónica Reyes Urquiza[1], Irene Marín Carrillo[1], Carolina Guardiola Albert[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España-CSIC*

Palabras clave: tiempo de residencia, karst, recursos, reservas

Resumen. Los acuíferos kársticos de Andalucía presentan, en general, elevadas tasas de recarga y alta capacidad de almacenamiento, aunque también son especialmente vulnerables a la sobreexplotación y la contaminación. Una gestión adecuada de estos acuíferos requiere del conocimiento de su geometría, como paso previo para cuantificar el volumen de sus reservas y definir otros parámetros que condicionarán su explotación. Gran parte de los acuíferos andaluces fueron estudiados entre los años 60 y 80 del pasado siglo y desde entonces apenas se han producido avances significativos en su caracterización hidrogeológica, a pesar de que se ha mejorado su conocimiento geológico y de que las metodologías empleadas entonces para la evaluación de sus recursos hídricos ya no se consideran las más adecuadas. En las últimas décadas, los avances se han limitado a estudios puntuales de algunos acuíferos, generalmente motivados por problemas derivados de una intensa explotación o afectados por contaminación. Tradicionalmente, las instituciones planificadoras y gestoras del agua han evaluado el grado de explotación de un acuífero en función de la relación entre recarga y explotación. Sin embargo, este enfoque presenta importantes limitaciones, tanto por la dificultad de estimar con precisión las extracciones, como por la elevada variabilidad temporal de la recarga y la incertidumbre asociada a su cálculo. Además, en muchas ocasiones el descenso de la superficie piezométrica está relacionado con una situación de desequilibrio hídrico entre la recarga y la extracción. En este sentido, es necesario tener en cuenta que cualquier explotación de un acuífero inicia una fase de desequilibrio en la que el

agua extraída procede del almacenamiento. Tras la perturbación, el tiempo necesario para alcanzar un nuevo estado de equilibrio depende directamente de la capacidad de almacenamiento del acuífero, es decir, de las dimensiones de la zona saturada y de la difusividad hidráulica. Por esta razón, las mismas ratios de extracción/recarga pueden producir efectos radicalmente diferentes en acuíferos con poca o con alta capacidad de almacenamiento, generando en el primer caso graves problemas, que son apenas apreciables en el segundo caso. En este contexto, uno de los principales objetivos del proyecto AQUA-KARST es abordar, de manera integral, una valoración de recursos y reservas hídricas de todos los acuíferos kársticos de Andalucía, con el fin de definir un índice de sostenibilidad y resiliencia frente a la explotación y las sequías. Este índice, de carácter adimensional, se obtiene a partir de datos relativamente accesibles, proporcionando información sobre el estado del acuífero y las posibles tendencias y/o impactos que le afectan. El índice aplicado es el denominado Periodo de Renovación (PR), basado en la relación entre el almacenamiento de agua en el acuífero y su recarga anual media. Hasta el momento se han identificado 238 compartimentos en acuíferos kársticos andaluces con almacenamientos de agua diferenciados e independientes, que suponen aproximadamente el 90% del total. El volumen de reservas evaluados a partir de la porosidad de la roca almacén y de su extensión es de más de 1 x 104 hm^3, con una recarga media anual de unos 2000 hm^3. El índice PR calculado tiene una media de 87 años, pero con valores muy dispares comprendidos entre 2 años, en el caso de acuíferos con pequeñas reservas y recursos, y más de 5000 años en acuíferos extensos, con enormes almacenamientos, pero con recursos muy escasos debido a que sus superficies de afloramiento son reducidas.

Agradecimientos: El proyecto AQUA-KARST (PLSQ-2023–00284) es un proyecto obtenido por el IGME-CSIC y financiado con fondos europeos que se incluye en la convocatoria de subvenciones en régimen de concurrencia competitiva, para desarrollar soluciones innovadoras frente a la sequía, en el marco del PLAnd sequía Andalucía para el año 2023.

Caracterización de los mecanismos de ventilación en acuíferos kársticos de las sierras de Líbar y Grazalema (Cádiz-Málaga) mediante monitorización térmica

José Luis Yanes Conde[1], Francisco Moral Martos[1]

[1]*Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales. Universidad Pablo de Olavide. Av. Rectora Rosario Valpuesta Fernández, 1, 41089 Dos Hermanas, Sevilla, España*

Palabras clave: Ventilación kárstica, Zona vadosa, Efecto chimenea, Monitorización térmica

Resumen. En medios geológicos de baja permeabilidad, el gradiente geotérmico está controlado fundamentalmente por la conducción de calor a través del medio rocoso. Sin embargo, en sistemas kársticos, la porosidad secundaria favorece la circulación de fluidos que pueden modificar significativamente dicho gradiente térmico. Si bien la dinámica del agua subterránea en los sistemas carbonáticos ha sido ampliamente estudiada, la circulación de aire en la zona vadosa de estos acuíferos no ha sido analizada con tanto detalle, en buena medida debido a la dificultad de monitorizar y caracterizar estos flujos a escala de sistema. No obstante, la dinámica del aire en el karst puede ser muy relevante, no solo desde el punto de vista térmico sino también en el transporte y distribución del CO_2 dentro del sistema, condicionando tanto la hidrogeoquímica del agua subterránea como la intensidad de los procesos de karstificación.

En el presente trabajo se analiza el régimen de ventilación de varios sistemas kársticos representativos en las sierras de Líbar y Grazalema mediante la monitorización continua de la temperatura del aire en diferentes conductos distribuidos a lo largo del macizo. El registro abarca dos años con medidas de temperatura cada tres horas en conductos situados a distintas altitudes y con diferentes características geomorfológicas. La serie obtenida ha sido analizada junto a registros meteorológicos externos (temperatura del aire, precipitación, presión atmosférica y velocidad del viento), con el objetivo de identificar los mecanismos dominantes de ventilación a escala de sistema y su variabilidad espacial y temporal.

Los resultados muestran tres patrones estacionales en la ventilación del sistema: un régimen estival, un régimen invernal y un régimen transicional durante primavera y otoño. Esta dinámica del aire está determinada principalmente por la ventilación convectiva dominada por el efecto chimenea. No obstante, este mecanismo está condicionado por la presencia de fuertes gradientes térmicos que, en el clima de la zona de estudio, se limitan al periodo estival. Durante el periodo frío el gradiente térmico disminuye y la ventilación convectiva se debilita, observándose una mayor influencia del bombeo barométrico y de episodios de viento que generan pulsos de ventilación de menor intensidad. Asimismo, los resultados evidencian una notable heterogeneidad espacial en el comportamiento de los sistemas monitorizados, relacionada principalmente con su posición topográfica, las características geomorfológicas de su entorno, las dimensiones de los conductos y su conectividad interna al sistema kárstico.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que la ventilación del karst actúa como un mecanismo relevante en climas con una marcada estacionalidad, pudiendo desempeñar un papel equiparable al de la circulación de agua en el control del régimen térmico del macizo. Asimismo, la circulación de aire en la zona vadosa puede condicionar el transporte de CO_2 dentro del sistema, incluso durante periodos de escasa recarga hídrica. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de la monitorización térmica como herramienta para caracterizar la dinámica de ventilación en acuíferos kársticos y su influencia en los procesos hidrogeoquímicos asociados.

Caracterización geofísica de acuíferos antrópicos mediante tomografía eléctrica en el distrito minero de Linares-La Carolina (Jaén)

Isabella Sánchez-Sosa[1], M. Carmen Hidalgo[1], F. Javier Rey[1], F. José Martínez-Moreno[2], M. José de la Torre[1]

[1]Universidad de Jaén. Dpto. de Geología/CEACTEMA. Campus Científico Tecnológico de Linares. 23700 Linares (Jaén-España).
[2]Universidad Complutense de Madrid, Dpto de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Facultad de Ciencias Geológicas. 28040 Madrid (España).

Palabras clave: Hueco minero, Acuífero antrópico, Tomografía eléctrica, Riesgo geológico

Resumen. En el distrito minero de Linares-La Carolina (Jaén), la histórica explotación de filones de sulfuros metálicos ha generado una vasta red de pozos y galerías que, tras el cese de la actividad minera, han configurado un acuífero antrópico de importancia regional. La geofísica de superficie, y específicamente la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), destaca por su capacidad para cartografiar estas cavidades de forma no invasiva.

El objetivo principal de este trabajo es la delimitación de los huecos mineros residuales en el extremo meridional de la concesión minera de Arrayanes. Se ha empleado la tomografía eléctrica como sistema multielectrodo para la adquisición de perfiles con 96 electrodos y utilizando configuraciones Wenner-Schlumberger. Este diseño permite optimizar la resolución lateral y la profundidad de investigación necesarias para detectar las zonas de filones, las galerías asociadas y los huecos resultantes de la explotación. Además, en este sector se dispone de información sobre las antiguas labores mineras en el subsuelo, que ha sido utilizada como herramienta de correlación y verificación de los datos geofísicos.

Los resultados obtenidos muestran la presencia de anomalías geofísicas alineadas que se correlacionan con las antiguas trayectorias del filón. En los sectores no explotados, las zonas de filón suelen presentar una intensa fracturación, que se caracteriza por una bajada de la resistividad en la roca de caja. Por el contrario, en aquellos sectores donde el filón fue explotado, y coincidiendo con la zona no saturada del macizo, los huecos rellenos de aire ofrecen valores muy altos de

resistividad. La investigación alcanza la segunda galería (unos 29 m de profundidad), utilizada antiguamente como socavón de drenaje, pero que hoy día está muy por encima del nivel piezométrico. Pese a no alcanzarse la zona saturada, el estudio presenta un especial interés en la evaluación de riesgos geotécnicos en el sector.

Agradecimientos: El trabajo se enmarca en el proyecto de investigación PID2021-123506OB-I00 de la Agencia Estatal de Investigación (MICIU/AEI/ 10.13039/501100011033). También se recibió financiación de la Universidad de Jaén (Plan propio de Investigación y Transferencia de Conocimiento R.1.d)

Caracterización hidrobiogeológica de los manantiales salinos del Vinalopó Medio (Novelda, Alicante)

José Miguel Andreu[1], Valentín Gangloff[1], Víctor Sala-Sala[2], Miguel Fernández-Mejuto[3], Ernesto García-Sánchez[2], Fernando Santos[1], Josefa Antón[1]

[1]*Universidad de Alicante*
[2]*Universidad Miguel Hernández de Elche*
[3]*Diputación de Alicante. Universidad de Alicante*

Palabras clave: aguas salinas, manantiales, triásico keuper, Vinalopó

Resumen. En la comarca del Vinalopó Medio, al NW de la localidad de Novelda (provincia de Alicante), hay una serie de surgencias salinas que presentan características singulares a pesar de que se encuentran relativamente próximas, pues la distancia que las separa es inferior a 5 km. Actualmente, son 4 los manantiales principales (Clot Negre, Clot Rojo, Font Salada y Font Dulce), si bien, además de estos manantiales puntuales se observan en el entorno algunos pequeños rezumes de escasa aportación. En el pasado, también hubo otro manantial, Salinetes, actualmente seco, pero cuyas aguas fueron aprovechadas durante casi un siglo por una instalación de balneoterapia (Balneario de Salinetes). Hoy en día, el uso del agua de estos manantiales es puramente ambiental-recreativo y el conjunto de sus aguas terminan llegando al río Vinalopó, generando un incremento de salinidad significativo en sus aguas.

Desde el punto de vista geológico, todos estos manantiales se encuentran emplazados en materiales triásicos del Keuper. Estos materiales, formados por arcillas y yesos principalmente, han sido asociados a un accidente tectónico que afecta al zócalo, por el que se produce su extrusión diapírica que rompe la continuidad de los relieves y materiales a ambos lados de la depresión del Vinalopó. La presencia de estas surgencias en los materiales triásicos corrobora la existencia de flujo de agua por su interior, contraponiéndose a su consideración de barreras hidrogeológicas impermeables.

El principal objetivo del presente trabajo ha sido realizar una caracterización hidroquímica y microbiológica preliminar de estas surgencias. Para ello se realizaron cuatro campañas de campo entre mayo de 2024 y junio de 2025 en las que, además de medir la salinidad y temperatura, se tomaron muestras de agua

para su posterior análisis en el laboratorio, tanto desde el punto de vista fisicoquímico como microbiológico.

Los resultados obtenidos muestran que todos los manantiales presentan temperaturas relativamente próximas y constantes comprendidas entre 20 y 21ºC, valor ligeramente superior a la temperatura media del lugar 18ºC, lo que apunta a cierta circulación profunda. Sin embargo, su mineralización es más variable. Los valores medios de conductividad eléctrica (a 25°C) varían entre 160.000 µS/cm en Clot Rojo y 9.000 µS/cm en Font Dulce. En todos los casos sus aguas presentan facies cloruradas sódicas excepto en Font Dulce que es mixta respecto a los cationes. Los altos valores medios de cloruro (entre 101 y 1,5 g/L) y sulfato (entre 6,3 y 1,7 g/L) implica la disolución de halita y yeso, a pesar de que la primera no aflore en el entorno. Por otro lado, los contenidos de nitratos en todas las aguas son inferiores a 6 mg/L, lo que descarta procesos de contaminación. Una característica particular de Clot Rojo es la turbidez pardo-rojiza que presenta el agua a su salida, donde las concentraciones de hierro son de 0,8 mg/L, siendo menores en el resto de manantiales.

En cuanto a los resultados de los análisis microbiológicos, obtenidos mediante recuentos y metagenómica, muestran un complejo ecosistema hipersalino. En los manantiales más salinos se detectan alrededor de 105 y 106 procariotas y virus por mililitro, respectivamente. En cuanto a su diversidad, predominan los miembros del dominio Bacteria sobre las arqueas, y se detecta un microbioma core constituido por un 22% de géneros microbianos detectados en todas las muestras. A nivel funcional, muchos microorganismos llevarían a cabo oxidaciones y/o reducciones de compuestos de nitrógeno o azufre, participando activamente en los ciclos biogeoquímicos de sus correspondientes sistemas.

El origen del agua que alimenta estos manantiales no se conoce, si bien la hipótesis más plausible parece estar relacionada con la transferencia de agua de los relieves carbonatados que contactan los materiales triásicos. Estos últimos presentarían vías de escape por donde circularía el agua enriqueciéndose en sales hasta llegar a la superficie.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación realizado dentro del marco del proyecto CONECTIVITY (PID2024-158829NB-C41).

Caracterización hidrogeológica del acuífero de los Gresos d'Areny en la Conca Dellà (Pallars Jussà, Lleida)

Estrella Carrero-Carralero[1], Manel Pascual i Diaz[1], Roberto Gómez de Liaño Pierna[1], Lucía Moreno Montes[1], Josep Maria Màsich Polo[1]

[1]DGFAS Departament de Química, Física, Ciències Ambientals i del Sòl ETSEAFiV Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agroalimentària i Forestal i de Veterinària

Palabras clave: hidrogeología, acuífero, gestión sostenible del agua, variabilidad climática

Resumen. La Conca Dellà, encuadrada en la masa de agua subterránea Tremp-Isona (ES091MSBT038), alberga uno de los acuíferos confinados más relevantes de la cuenca del Ebro: el acuífero de los Gresos d'Areny. El presente trabajo expone los resultados de su caracterización hidrogeológica, con especial atención a su valor estratégico como recurso hídrico en un contexto de creciente variabilidad climática.

El acuífero se desarrolla en los materiales del Grupo Areny, areniscas, cuarzoarenitas y calcarenitas maastrichtienses de cementación carbonatada, confinados por la potente serie de lutitas versicolores de la Facies Garumniana, que puede superar los 400 m de espesor en el centro de la cuenca. El sistema se presenta surgente en numerosos puntos del sector norte y central, con niveles piezométricos de hasta -28,1 m.c.a. en el pozo de Conques.

La recarga se produce por infiltración del agua precipitada sobre tres afloramientos principales: flanco sur del sinclinal (25 km^2), flanco norte (27,9 km^2) y anticlinal de Isona en la Serra Mitjana (12,57 km^2), siendo este último la zona más activa por su intensa fracturación y karstificación. La recarga media anual estimada es de 10,76 hm^3/año, coherente con los 11,78 hm^3/año del tercer ciclo del Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro. El año de máxima recarga fue 2018 (con precipitación de 880,5 mm en Sant Romà d'Abella), mientras que 2023, año de sequía extrema, generó una recarga mínima de 4,35 hm^3/año, evidenciando la elevada sensibilidad del sistema a la variabilidad pluviométrica.

El flujo subterráneo presenta dirección general E-O hacia la Noguera Pallaresa y el embalse de Terradets. La descarga natural se distribuye entre los Estanys de

Basturs (1,10 hm^3/año), los ríos Abella y Conques (2,12 hm^3/año), la Noguera Pallaresa y el embalse de Terradets (3,88 hm^3/año) y fuentes (0,30 hm^3/año). Las demandas actuales, abastecimiento urbano, agricultura y ganadería, ascienden a 3,356 hm^3/año, concentradas en el sector norte. Los sectores central y meridional de la cuenca permanecen prácticamente sin explotar, representando una reserva hídrica estratégica de primer orden.

Las aguas son bicarbonatadas cálcicas de alta calidad (conductividad 310-500 µS/cm, nitratos inferiores a 2 ppm), con vulnerabilidad a la contaminación muy baja o nula gracias al confinamiento garumniano. El análisis de isótopos estables de oxígeno-18 y deuterio sitúa las áreas de recarga entre los 800 y 1.100 m sobre el nivel del mar, con tiempos de tránsito cortos coherentes con un sistema de circulación rápida.

Para consolidar la gestión sostenible del acuífero se propone: instalar una estación meteorológica automatizada en la finca Bon Repós (sobre 1.100 m s.n.m.) sobre el afloramiento sur; implantar una red de sensores de nivel continuo en los ríos Abella, Conques y Noguera Pallaresa; ejecutar 2-3 sondeos de investigación en los sectores central y meridional de la cuenca; instalar sensores de nivel en los Estanys de Basturs; y desarrollar la caracterización isotópica de la lluvia a distintas cotas para delimitar las áreas de recarga y apoyar la modelización numérica del flujo.

Los resultados preliminares ponen de manifiesto la elevada sensibilidad del sistema frente a eventos climáticos extremos y evidencian la necesidad de profundizar en su estudio y seguimiento, dada su importancia estratégica para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Caracterización hidrogeológica preliminar del acuífero formado por la alteración de las rocas ígneo-metamórficas de la Plataforma de Toledo.

Miguel Martín-Loeches Garrido[1], Silvia Martínez Pérez[1], Antonio Sastre Merlín[1], Ana María Gómez Salgado[1], Eugenio Molina Navarro[1], Víctor Gómez-Escalonilla[2]

[1]*Universidad de Alcalá*
[2]*Universidad Complutense de Madrid*

Palabras clave: Acuífero superficial, Hidrogeoquímica, Cuantificación de la recarga, Contaminación

Resumen. Entre el río Tajo y las elevaciones apalachenses de los Montes de Toledo, en el borde sur de la cuenca del Tajo, se extiende la Plataforma de Toledo, elevada unos 100 m por encima de la ciudad de Toledo y ocupando un área de 1530 km^2 donde se desarrolla una actividad agropecuaria muy intensa; presenta una altitud media de 700 msnm y una pendiente promedio cercana al 7 %. La precipitación anual media en esta región se sitúa entre 400 y 500 mm, aunque en las sierras de su borde sur puede llegar a 650 mm. Los materiales objeto de estudio están formados por la alteración del basamento ígneo-metamórfico en esta plataforma, así como por depósitos detríticos de edad Cenozoico que los cubren en determinados sectores; su espesor puede llegar a los 50 m y es de extensión lateral discontinua. Este material, a pesar de poseer cierto potencial hidrogeológico, no ha sido tradicionalmente reconocido como Masa de Agua Subterránea (MAS), ni como Unidad Hidrogeológica por el IGME y el MITECO, aunque es explotado por la población a través de numerosas captaciones de uso local; recientemente, la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) sí lo ha incluido como parte de una nueva MAS.

Se realiza un estudio clásico desde el punto de vista hidrogeológico que incluye un inventario de puntos de agua (109 puntos), análisis químicos e isotópicos (O-18 y D), estimación de la recarga anual (por el método del balance de cloruros), realización de cortes hidrogeológicos por las principales transversales de la región, y posterior interpretación de los resultados. Se ha construido un mapa de unidades hidrogeomorfológicas de la plataforma con valoración cualitativa del potencial hidrogeológico de las unidades diferenciadas, sobresaliendo la alteración, aunque su delimitación precisa aún se encuentra en estudio.

Las facies hidrogeoquímicas dominantes son HCO_3 (SO_4) - Ca (Na) y SO_4 - Ca y su salinidad es alta. Las conductividades medidas superan en muchos pozos los 1000 µS/cm, debido sobre todo a la evaporación, tal como indican los contenidos de O-18 y D. Además, puntualmente, existen valores superiores a 3000 µS/cm, que se explican por contaminación procedente de industrias ganaderas. La presencia de nitratos en el agua subterránea debido al uso de fertilizantes agrícolas es muy frecuente y acusada, alcanzando concentraciones de hasta 520 mg/L. La recarga media anual obtenida es de 9 hm^3 sobre la superficie alterada en su cartografía preliminar, volumen de agua que es descargado lentamente hacia los cauces, ya que se observa caudal base en estos durante los estiajes. Estas circunstancias muestran la necesidad de profundizar en el estudio de la región desde el punto de vista hidrogeológico para ayudar a la gestión y la protección del recurso.

Como conclusión preliminar, la unidad estudiada puede considerarse un sistema acuífero funcional dentro del contexto hidrogeológico de la región, con un papel relevante en la regulación del intercambio entre las aguas subterráneas y superficiales. Su comportamiento evidencia una dinámica compleja condicionada por la interacción con actividades antrópicas.

Agradecimientos: Este estudio ha sido sufragado por Suntory Beverage and Food España.

Caracterización hidrogeológica y térmica distribuida para el diseño de campos geotérmicos y posible almacenamiento térmico en el subsuelo, en el marco del proyecto Vielha Smart Multi-RES micro DHC grid.

Victor Camps[1], Ignasi Herms[1], Guillem Piris[2], Jordi García-Céspedes[1], Georgina Arnó[1], Montse Colomer[1], Sandra Armengol[1], Albert Macau[1], Juvenal Andrés[1], Fabian Bellmunt[1], Anna Gabàs[1]

[1]*Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*
[2]*Conselh Generau d'Aran*

Palabras clave: Caracterización hidrológica, Geotermia somera, DTRT / ADTRT

Resumen. En sistemas de intercambio geotérmico con elevada demanda de calefacción puede producirse a largo plazo un desequilibrio térmico del subsuelo debido a la extracción neta de calor. Este enfriamiento progresivo puede comprometer la eficiencia del sistema, especialmente en entornos de baja temperatura natural, haciendo necesarias estrategias de compensación como el almacenamiento térmico en el subsuelo UTES (Underground Thermal Energy Storage) o la regeneración térmica estacional -por ejemplo, mediante aportes de energía solar-.

El diseño de estas soluciones requiere una adecuada caracterización hidrogeológica y térmica del medio, ya que el transporte de calor está condicionado por procesos de advección y dispersión asociados al flujo subterráneo que pueden reducir la eficacia del almacenamiento térmico. Parámetros como la conductividad hidráulica, la porosidad eficaz y la dispersividad resultan clave para evaluar la viabilidad y eficiencia del almacenamiento térmico.

El proyecto Vielha Smart Multi-RES micro DHC grid tiene como objetivo implementar una micro-red de distrito de 5ª generación de calefacción y refrigeración basada en geotermia somera hibridada con energía solar fotovoltaica, promovida por el Conselh Generau d'Aran con la asistencia técnica del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Para ello, se ha llevado a

cabo una campaña específica de caracterización hidrogeológica y térmica del subsuelo orientada al dimensionamiento del campo de captación geotérmico.

La zona de estudio situada en la Val d'Aran, está formada por depósitos cuaternarios fluviales y glaciares sobre un basamento paleozoico (devónicos). Para caracterizar el emplazamiento se ejecutaron cuatro sondeos: dos geotérmicos de 100m de profundidad instrumentados con sensores distribuidos de temperatura y fibra óptica, y dos de reconocimiento geológico con recuperación de testigo continuo de 25 y 100m de profundidad. En los sondeos geotérmicos se realizaron ensayos TRT y DTRT (Distributed Thermal Response Tests), así como un ensayo ADTRT (Activated Distributed Thermal Response Test). Los sondeos de reconocimiento geológico se equiparon con piezómetros de control y en el sondeo de 100 metros se realizó una testificación geofísica. Además, se instalaron sistemas de monitorización continua de temperatura y nivel piezométrico mediante el sistema NetMon© del ICGC, permitiendo obtener series temporales para el seguimiento y análisis conjunto del comportamiento térmico e hidráulico del subsuelo. Además, se realizó un ensayo de mini bombeo en un piezómetro de control.

Los resultados obtenidos indican una baja permeabilidad en el sustrato paleozoico, junto con una marcada heterogeneidad hidrogeológica del medio. La interpretación de los ensayos térmicos distribuidos (DTRT y ADTRT) ha permitido obtener perfiles verticales de conductividad térmica del terreno que se contrastan satisfactoriamente con valores equivalentes obtenidos por métodos tradicionales. Asimismo, la integración de los datos térmicos ha permitido estimar de forma distribuida la velocidad de flujo subterráneo.

Estos resultados permiten mejorar el dimensionamiento del campo de captación y evaluar la necesidad de almacenamiento térmico del acuífero, aportando criterios clave para garantizar la sostenibilidad térmica del sistema en el marco de la red de climatización proyectada.

Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de mezcla y reacciones biogeoquímicas en un acuífero costero mediante el método AMAR (Análisis de Mezcla de Aguas y Reacciones)

Bella Almillategui[1], Maarten W. Saaltink[1], Valentí Rodellas Vila[3], Jose Tur-Piedra[1], Marc Diego-Feliu[1], Jesús Carrera[2], Albert Folch[1]

[1]*Grupo de Hidrología Subterránea (GHS), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*
[2]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*
[3]*Departamento de Física, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)*

Palabras clave: acuiferos costeros, intrusión marina, procesos hidrobiogeoquímicos, descarga submarina de agua subterránea

Resumen. En los acuíferos costeros se mezcla el agua subterránea dulce con el agua de mar. Dependiendo de la heterogeneidad hidráulica del acuífero, esta mezcla puede ser muy activa. Cuando además existe heterogeneidad química, se desencadenan reacciones hidro-bio-geoquímicas que afectan a la composición química del agua residente y de las descargas al mar.

El objetivo de este trabajo es evaluar los efectos de la mezcla entre las aguas subterráneas dulce y marina sobre los procesos biogeoquímicos reactivos que modifican la composición de las descargas de agua subterránea (DAS) en el acuífero aluvial de la Riera de Argentona, al noreste de Barcelona. Hidrogeológicamente, el sistema presenta una estructura multicapa donde niveles someros y profundos muestran comportamientos hidrogeoquímicos diferenciados, condicionados por capas de limos que generan flujos preferenciales y modulan la distribución espacial de los procesos biogeoquímicos.

En el área experimental, de 30 por 100 m, existe una instalación monitorizada desde 2014. Esta red consta de 24 piezómetros distribuidos en 4 nidos con 4 piezómetros cada uno, por intervalos de profundidad a 10 m, 20 m, 15 m y 25 m, además de 4 piezómetros individuales, equipados con sensores que registran datos cada 15 minutos.

Se realizaron campañas de muestreo en el invierno 2021 y el verano 2022, en las que se analizaron datos hidrogeoquímicos para (1) identificar las aguas extremo, (2) reconocer los principales procesos biogeoquímicos y (3) cuantificar la distribución espacial y temporal de las proporciones de mezcla y de las cantidades de las diversas reacciones químicas. Para ello se aplicó un enfoque combinado basado en el método AMAR (Análisis de Mezcla de Aguas y Reacciones, o rEMMA).

Los resultados indican un sistema acuífero dominado principalmente por la mezcla entre agua subterránea continental y marina, con diferencias hidrogeoquímicas que reflejan los procesos reactivos. En los niveles someros (10-15 m) se observa un predominio de los procesos de recarga y mezcla de agua subterránea continental con agua marina, junto con procesos biogeoquímicos activos asociados a condiciones redox variables y a la presencia de materia orgánica disuelta. Los niveles profundos (20-25 m) muestran desviaciones sistemáticas respecto a la mezcla conservativa, presentando picos de amonio y variabilidad en las concentraciones de elementos traza en algunos pozos profundos. En conjunto, el sistema refleja una evolución hidrogeoquímica controlada por procesos como el intercambio catiónico, la meteorización de aluminosilicatos y reacciones redox asociadas a Fe, Mn y al ciclo de N (nitrificación y desnitrificación).

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno de España, bajo el proyecto MUltiscale CHaracterization Of GroUndwater and Solutes discharge into The Ocean MUCHOGUSTO (PID2022-140862OB-C21/C22) y B.A. es financiada por una beca doctoral SENACYT del Gobierno de Panamá (BIDP-I-2020-016)

Caracterización hidroquímica de las masas de agua subterránea de la cuenca del Duero mediante el uso del software Q-Facies

Manuel Rodríguez del Rosario[1], Héctor Aguilera Alonso[2], África de la Hera-Portillo[2], Víctor Gómez-Escalonilla[1], Olga García Menéndez[2], Luis Moreno Merino[2], Pedro Martínez-Santos[1]

[1]*Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. C/José Antonio Novais 12. 28040 Madrid, Spain*

[2]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid)*

Palabras clave: Hidrogeoquímica, Aguas subterráneas, Cuenca del Duero

Resumen. La cuenca del Duero constituye un sistema hidrogeológico complejo formado por la interacción de diferentes unidades geológicas y sistemas acuíferos. Desde el punto de vista hidrogeológico, se distinguen acuíferos carbonatados fracturados o karstificados, acuíferos detríticos someros y profundos desarrollados en el relleno sedimentario terciario de la depresión del Duero —que constituyen un sistema multicapa heterogéneo y anisótropo— y acuíferos ígneos y metamórficos fracturados asociados al basamento. Esta complejidad hidrogeológica da lugar a una notable variabilidad en la composición química de las aguas subterráneas, resultado de procesos de recarga, circulación, interacción agua-roca y mezcla de aguas.

En este contexto, este trabajo tiene como objetivo analizar la distribución espacial y la evolución temporal de las facies hidroquímicas con el fin de mejorar la comprensión de la dinámica hidrogeoquímica de las masas de agua subterránea de la cuenca del Duero y contribuir al desarrollo de un modelo conceptual del sistema hidrogeológico.

Para este estudio se utilizaron datos procedentes de la Red de control del estado químico de las Aguas Subterráneas gestionada por la Confederación Hidrográfica del Duero, compuesta por más de 500 puntos de monitoreo distribuidos por toda la cuenca. El conjunto de datos incluye análisis químicos de aguas subterráneas correspondientes al periodo 2006-2023, con información sobre las

concentraciones de los principales cationes y aniones. A partir de estos datos, y con el fin de facilitar su interpretación, se empleó el software Q-Facies (González-Jiménez et al., 2023) para analizar la distribución de las muestras en diagramas de Piper y cuantificar la variabilidad hidroquímica mediante distintos índices estadísticos de diversidad y dispersión, así como índices de forma y orientación que permiten identificar procesos hidrogeoquímicos.

Los resultados muestran la presencia de diferentes facies hidroquímicas asociadas a distintos contextos hidrogeológicos dentro de la cuenca. La aplicación del software Q-Facies permitió realizar una interpretación sistemática y eficiente de un gran conjunto de datos hidroquímicos, facilitando la identificación de tipologías de agua, su distribución espacial a escala de cuenca y el análisis de su variabilidad temporal. Se identificaron patrones espaciales y temporales de facies hidroquímicas asociados a diferentes procesos hidrogeoquímicos, como mezcla de aguas, interacción agua-roca y tiempos de residencia. En conjunto, los resultados contribuyen a mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrogeoquímico de las aguas subterráneas en la cuenca del Duero.

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España mediante la ayuda de investigación PID2021-124018OB-I00 y por el proyecto europeo STARS4Water. El proyecto STARS4Water recibió financiación del Programa Marco de Investigación e Innovación Horizonte Europa de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención n.º 101059372. Los autores agradecen a la Confederación Hidrográfica del Duero por proporcionar acceso a los datos.

Caracterización multi-isotópica para trazar las fuentes de nitrato: resultados a escala de país.

Neus Otero[1], Dídac Navarro-Ciurana[2], Laura Culí[2], Albert Soler[3], Leopoldo Pena[4], Ester Garcia-Solsona[4], Alberto García-Gscheidle[5], Ana Belén Yuste[5]

[1]*GRC MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia – MAGH, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona. Pla Serra Hunter, Generalitat de Catalunya*
[2]*GRC MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia – MAGH, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona. Departamet de Geologia, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona.*
[3]*GRC MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia – MAGH, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona.*
[4]*GRC Geociències Marines, Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona*
[5]*Gerencia Planificación y Gestión Hídrica, TRAGSATEC, S.A, Madrid, Spain*

Palabras clave: Contaminación nitrato, Geoquímica Isotópica

Resumen. La contaminación por nitrato (NO_3^-) es un problema generalizado que afecta a las masas de agua superficiales y subterráneas en todo el mundo. Dicha contaminación deriva de fuentes difusas, como la aplicación de fertilizantes sintéticos y orgánicos, y de fuentes puntuales, como los efluentes de estaciones depuradoras de aguas residuales y/o las fugas de fosas sépticas. A pesar de las medidas implementadas desde 1991 para minimizar la contaminación por nitratos en los recursos hídricos (Directiva 91/676/CEE), las concentraciones de nitrato superan con frecuencia los umbrales establecidos para aguas superficiales (25 mg/L) y subterráneas (37,5 mg/L) (RD 47/2022). En España, la concentración media en aguas subterráneas ha oscilado entre 25 y 30 mg/L en los últimos 10 años, con algunas zonas donde más del 50% de las masas de agua están clasificadas con mal estado químico debido al NO_3^-. La identificación precisa de las fuentes de contaminación y una comprensión detallada de los procesos que afectan a los contaminantes son claves para desarrollar prácticas de gestión eficaces para la preservación de la calidad del agua.

La aplicación de análisis multi-isotópicos puede proporcionar información sobre las fuentes de NO_3^- y sus vías de transformación. Este estudio presenta los resultados de la caracterización química e isotópica de aguas subterráneas en las zonas declaradas en España como vulnerables a la contaminación por nitratos (ZVN). En el estudio se incluyeron un total de 1367 muestras (526 de aguas superficiales y 841 de aguas subterráneas), en un esfuerzo sin precedentes por contribuir al conocimiento de las fuentes y procesos relacionados con el nitrato a escala nacional. Las campañas de muestreo se realizaron a lo largo de 2023. Los parámetros químicos analizados fueron los iones mayoritarios y los compuestos nitrogenados (NO_3^-, NO_2^- y NH_4^+), junto con una caracterización multi-isotópica que incluyó $\delta^{15}N$ y $\delta^{18}O$ del NO_3^- disuelto en todas las muestras, y $\delta^{34}S$ y $\delta^{18}O$ del sulfato disuelto (SO_4^{2-}) y $\delta^{11}B$ del boro disuelto (B) en un subconjunto de muestras. Las presiones agronómicas y urbanas se utilizaron para acotar las posibles fuentes de NO_3^- en cada zona, y esta información se comparó con los resultados isotópicos. El principal objetivo del proyecto fue proporcionar a los gestores de los recursos hídricos información sobre la fuente predominante de NO_3^- en cada ZVN.

Los resultados de la concentración de NO_3^- en aguas superficiales mostraron que en el 64 % de las muestras los valores estaban por debajo del umbral de 25 mg/L para aguas superficiales, y el 36 % de las muestras superaban este umbral. En cuanto a las aguas subterráneas, el 27 % de las muestras presentaron concentraciones de NO_3^- por debajo del umbral de 37,5 mg/L, mientras que el 73,1 % presentaron valores superiores. El enfoque multi-isotópico permitió identificar la fuente principal de NO_3^- en las muestras estudiadas. En conjunto, el 40 % de las muestras tenían un origen vinculado a fertilizantes químicos, y el 37 % mostraban un origen mixto con contribución de fertilizantes y residuos ganaderos (21 %), fertilizantes y aguas residuales (8 %) o las tres fuentes (10 %). Aproximadamente un 16 % de las muestras tenían un origen orgánico, ya fuera asociado a residuos ganaderos (5 %), a aguas residuales (3 %) o a ambas fuentes (8 %). En un 5 % de las muestras los resultados no fueron concluyentes para determinar la fuente principal de NO_3^-. Los resultados permitieron estimar los lugares donde la desnitrificación es significativa (27 %) o ligeramente activa (13 %), pero la mayoría de las muestras (60 %) no muestran desnitrificación.

Agradecimientos: Proyecto financiado por el Ministerio para a la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) a través de los Fondos Europeos Next Generation.

Caracterización y análisis hidrogeoquímico de la masa de agua subterránea de Tordesillas (Zamora-Valladolid, España)

Juan Pablo Malagón Navarro[1], José Antonio Rodríguez Náñez[1]

[1]*Universidad de Valladolid*

Palabras clave: agua subterránea, procesos hidrogeoquímicos, análisis multivariante

Resumen. Se identificaron los principales procesos hidrogeoquímicos que controlan la composición química del agua subterránea en la Masa de Agua Subterránea de Tordesillas (MAST), entre Zamora y Valladolid, España. Entre febrero y junio de 2024 se muestrearon en siete campañas 37 pozos de uso agrícola y abastecimiento humano, complementados con 9 puntos de la red de control químico de la Confederación Hidrográfica del Duero, hasta totalizar 46 puntos. Se determinaron in situ pH, conductividad eléctrica, temperatura y potencial redox, y en laboratorio aniones y cationes mayoritarios junto con los elementos traza como aluminio, arsénico, hierro, manganeso y estroncio; el balance iónico arrojó errores inferiores al 10 %. La facies bicarbonatada cálcica dominó el área (63 % de las muestras), seguida por bicarbonatada sódica (15,2 %), clorurada sódica (10,9 %) y sulfatada sódica (10,9 %), evidenciando una evolución longitudinal desde las zonas de recarga hacia la descarga en el río Duero. El Análisis de Componentes Principales explicó el 63,3 % de la varianza en tres componentes asociados a la disolución de calcita y dolomita y a la evolución hacia aguas cloruradas sódicas; el Análisis de Agrupamiento Jerárquico discriminó tres grupos de mineralización creciente. La integración con el marco geológico e hidrogeológico permitió reconocer cinco procesos determinantes: recarga meteórica, disolución y precipitación mineral, intercambio catiónico, evolución química y contaminación antropogénica. Desde la perspectiva de gestión, 8 de las 46 muestras superaron el umbral de 7 microgramos por litro de arsénico y 3 el límite legal de 10 microgramos por litro para consumo humano; otras 3 excedieron los 50 miligramos por litro de nitrato (máximo de 239 miligramos por litro), todas en pozos de abastecimiento sin tratamiento. La MAST se encuentra, por tanto, en riesgo químico por arsénico geogénico y nitratos antropogénicos, lo que exige ampliar la red de vigilancia hacia el sur del acuífero, incorporar la

medida rutinaria del potencial redox e implementar sistemas de eliminación de arsénico y nitratos en los pozos de abastecimiento.

Colonización microbiana y evolución de la eficiencia depurativa en sistemas de tratamiento suelo-acuífero

Cristina Valhondo[1], Marta Casado[1], Lurdes Martinez-Landa[3], Marta Gual[1], Paola Sepulveda-Ruiz[4], Montserrat Folch[4], Claudia Sanz[1], Laia Navarro-Martin[1], Adriá Sunyer[5], Juan Cruz Carrizo[1], Paula Rodriguez[3], Ruben Gil-Solsona[1], Pablo Gago[1], Silvia Díaz-Cruz[1], Jesús Carrera[1], Benjamín Piña[1]

[1]*Institute of Environmental Assessment and Water Research. Associated Unit: Hydrogeology Group (UPC-CSIC)*
[2]*Associated Unit: Hydrogeology Group (UPC-CSIC)*
[3]*Dept. of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya*
[4]*Biology, Sanitation and Environmental Department, University of Barcelona*
[5]*Department of Environmental Science (ACES, Exposure & Effects), Science for Life Laboratory, Stockholm University*

Palabras clave: Sucesión microbiana, Zona No Saturada, Perfil metabólico, Genes de resistencia antibiotica

Resumen. Los sistemas de tratamiento suelo-acuífero (SAT) constituyen una solución basada en la naturaleza para la regeneración de agua y la recarga gestionada de acuíferos (MAR), con capacidad para reducir contaminantes químicos, microorganismos patógenos y otros riesgos asociados a efluentes de estaciones depuradoras de aguas residuales. Sin embargo, el tiempo necesario para que estos sistemas alcancen su máximo rendimiento depurativo y los procesos microbiológicos que lo gobiernan siguen siendo poco conocidos.

En este trabajo se evalúa la evolución temporal de la eficiencia depurativa de dos sistemas piloto de SAT que infiltran el mismo efluente secundario de una EDAR durante seis episodios de recarga a lo largo de dos años. Uno de los sistemas incorpora una barrera reactiva compuesta por arena, astillas de madera, compost, biochar, zeolitas y arcilla, mientras que el otro emplea únicamente arena como material filtrante.

Los resultados muestran que la calidad del agua tratada mejora progresivamente con el tiempo de operación, alcanzando reducciones de entre el 95 y más del 99

% en cargas bacterianas, genes de resistencia a antibióticos y actividad tóxica en ambos sistemas tras aproximadamente un año de funcionamiento. Este incremento en la eficiencia coincide con la colonización y sucesión de comunidades microbianas en la zona no saturada, que evolucionan desde perfiles metabólicos similares a los del efluente de entrada hacia comunidades con capacidades funcionales distintas, asociadas a una mayor degradación de contaminantes. La eliminación de contaminantes emergentes también mejora gradualmente con el tiempo de operación. La presencia de barreras reactivas influye en la estructura de las comunidades microbianas desarrolladas en la zona no saturada y contribuye de forma específica a una mayor atenuación de los contaminantes emergentes.

Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de los procesos de sucesión microbiana en el rendimiento de los sistemas SAT y sugieren que la inoculación de nuevos sistemas con microbiomas procedentes de instalaciones maduras podría acelerar su estabilización funcional.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través del proyecto CONMIMO (TED2021-131188B-C31), el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU), la AEI, y la Unión Europea mediante el programa NextGenerationEU/PRTR, en el marco del programa RyC2023 MICIU/AEI (10.13039/501100011033).

Asimismo, los autores agradecen al Consorci d'Aigües Costa Brava Girona (CACBGi) y al personal de la EDAR de Palamós su apoyo y colaboración.

Comprensión de la red de flujo de agua subterránea y de los procesos de desnitrificación en líneas de flujo que descargan al Mar Menor en el humedal de El Carmolí (Campo de Cartagena)

José A. Luque Marín[1], Edison Steven Morales Sotaminga[2], Virginia M. Robles-Arenas[2], Rosanna Margalef-Marti[1], Helena Escalona-Orellana[1], José Jiménez-Guiñez[1], Albert Soler[1], Neus Otero Pérez[3], Andrés Mira Carrión[2], Valentí Rodellas Vila[4], Marisol Manzano Arellano[2]

[1]Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Institut de Recerca de l'Aigua (IdRA), Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, España
[2]Departamento de Ingeniería Minera y Civil, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), España
[3]Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Institut de Recerca de l'Aigua (IdRA), Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, España. Plan Serra Húnter, Generalitat de Catalunya, España
[4]Departamento de Física, Grupo de Investigación MERS, Universitat Autònoma de Barcelona, España

Palabras clave: Acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena, Humedal de El Carmolí, $^{15}N/^{14}N$ y $^{18}O/^{16}O$ en Nitrato, Desnitrificación natural

Resumen. La descarga difusa de agua subterránea es una de las principales vías de aporte de nitrógeno al Mar Menor (Campo de Cartagena, Murcia). El uso intensivo de los recursos hídricos y la presencia de contaminantes agrícolas, urbanos y mineros en los efluentes a la laguna ha producido un impacto negativo con importantes implicaciones ecológicas y socioeconómicas. Por consiguiente, el conocimiento detallado de la red de flujo del agua subterránea en la franja costera, y su relación con los contenidos de nitrato y los procesos de desnitrificación, es fundamental para la caracterización espacio-temporal del aporte de nitrato a la laguna por el agua subterránea y para el diseño de acciones de remediación. El proyecto REMEDIATE (TED2021-131005B) se ha enfocado en evaluar la viabilidad de inducir la desnitrificación in situ en el Acuífero del

Cuaternario del Campo de Cartagena mediante bioestimulación, así como en evaluar la existencia de desnitrificación natural en humedales costeros. En el humedal de El Carmolí (310 ha) se ha estudiado los procesos de atenuación natural y las líneas de flujo que aportan nitrato a la laguna. En 2024 se construyó una planta piloto de 9 pozos de 40 m y 4 catas de 1 m de profundidad. Durante 2024-2025 se realizaron ensayos de bombeo y de trazadores para caracterizar las propiedades hidráulicas y el transporte de solutos, con el fin de evaluar la ocurrencia de atenuación natural de nitrato y, en caso contrario, evaluar la viabilidad de implementar una estrategia de bioestimulación inducida. Además, se realizaron campañas periódicas donde se midieron niveles piezométricos, y se tomaron muestras de agua para análisis químico e isotópico de $^{15}N/^{14}N$ y $^{18}O/^{16}O$ de las especies de nitrogeno, con el fin de identificar posibles procesos de desnitrificación natural. La información de la planta se complementó con datos de niveles piezométricos, de nitrato y análisis isotópico de $^{15}N/^{14}N$ y $^{18}O/^{16}O$ en pozos y ramblas del entorno del humedal, y en agua de poro de la playa. Los datos isotópicos indican que todas las aguas están desnitrificadas en distinto grado. El agua más somera del humedal (franja freática) contiene algunas decenas de mg/L de nitrato, pero a pocos metros de profundidad el agua está completamente desnitrificada. Pozos poco profundos del entorno y ramblas efluentes muy cercanas a la planta (ramblas del Carmolí y del Albujón) tienen concentraciones de nitrato elevadas (170-300 mg/L), y el agua del primer metro de la zona saturada en la playa frente al humedal tiene hasta 100 mg/L. La piezometría de la planta sugiere que, localmente, las líneas de flujo no son perpendiculares al mar, sino que van hacia cauces efluentes que atraviesan el humedal y descargan en la laguna. La evolución temporal de los valores de $^{15}N/^{14}N$ y $^{18}O/^{16}O$ en la planta piloto refleja los cambios locales en la red de flujo del agua subterránea inducidos por eventos de recarga y por los ensayos hidráulicos realizados. Los resultados evidencian que el flujo del agua subterránea bajo el humedal es dominantemente horizontal. Aunque el agua que circula en profundidad está notablemente desnitrificada, las líneas de flujo más someras (menos desnitrificadas) son las que aportan más nitrato a la laguna. No obstante, el espesor de esta franja es reducido y su hidrodinámica compleja, por lo que finalmente no se realizó bioestimulación en este humedal. Esta tarea sí se llevo a cabo en otra zona situada unos 6 km al N del Carmolí. Esta investigación sirvió para conocer los procesos controlados por los humedales costeros y el alcance de los mismos.

Agradecimientos: El proyecto REMEDIATE (TED2021-131005B) ha sido financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

Condiciones del permafrost y dinámica de la capa activa en la Meseta Marambio, Isla Marambio (Seymour), Antártida

Adrian Silva Busso[1], Luis Moreno Merino[3], Ormazabal Aitor[2], Almudena de la Losa Román[3]

[1]*Facultad de Cs. Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina. Instituto Antártico Argentino.*
[2]*Laboratorio de Suelos, ODENAC, EA, Argentina.*
[3]*Instituto Geológico y Minero de España CN-IGME (CSIC)*
[4]*Laboratorio de Suelos, ODENAC, EA, Argentina.*

Palabras clave: Marambio, Seymour, Permafrost, Antártida

Resumen. Este trabajo analiza la dinámica térmica e hidrogeológica de la capa activa desarrollada sobre la Meseta Marambio, en la Isla Marambio (Seymour) situada en el sector nororiental de la Península Antártica, la isla tiene forma elongada extendiéndose 20 km en dirección suroeste-nordeste, con un ancho máximo de 8 km. El objetivo del trabajo ha sido comprender el comportamiento estacional de la componente subterránea del ciclo hidrológico en la zona de estudio y diferenciar la influencia del control litológico sobre el control climático.

El modelo experimental consta de dos estaciones termométricas superficiales (0,02–1,0 m de profundidad) que registraron temperatura del suelo entre febrero de 2020 y febrero de 2021. Los datos fueron integrados con propiedades térmicas medidas en laboratorio y con 35 sondeos eléctricos verticales de alta resolución que permitieron caracterizar la estructura resistiva somera y la geometría de la capa activa.

A pesar de la homogeneidad fisiográfica de la meseta, pendientes suaves, exposición solar comparable y ausencia de cobertura nival persistente en verano, se observaron diferencias térmicas significativas entre los sectores norte (SY01-VOR) y sur (SY02-Pristine). La isoterma de 0 °C alcanzó 0,8 m en el sector norte y solo 0,6 m en el sector sur, mientras que el permafrost continuo se mantiene por debajo de 1 m en ambos sitios. Las diferencias no pueden atribuirse exclusivamente al forzamiento climático local, sino que se explican principalmente por la heterogeneidad litológica dentro de la Formación Weddell, unidad glaciogénica que constituye el nivel superior de la meseta.

Las determinaciones de capacidad calorífica específica y volumétrica muestran que los sedimentos del sector sur presentan mayor capacidad de almacenamiento térmico y mayor energía requerida para fundir el hielo intersticial, lo que limita la profundidad de deshielo estival. En consecuencia, la variabilidad espacial de la capa activa responde a diferencias en contenido de finos, porosidad y propiedades térmicas más que a variaciones en radiación o temperatura del aire.

Los perfiles térmicos indican que la amplitud térmica disminuye aproximadamente un 50% con la profundidad, y que el gradiente geotérmico en estado cuasi-estacionario (~0,2 °C/m) es consistente con mediciones históricas. Los índices de congelamiento y deshielo evidencian escaso efecto aislante de la nieve, coherente con la redistribución eólica sobre la superficie plana de la meseta.

La interpretación geofísica permitió identificar cinco horizontes resistivos asociados a: (1) capa activa saturada, (2) capa activa no saturada, (3) permafrost con bajo contenido de hielo, (4) permafrost rico en hielo y (5) permafrost desarrollado en unidades subyacentes. El espesor típico de la capa activa es de aproximadamente 0,6 m, con máximos locales de 1,2–1,4 m al norte de la pista principal y en el extremo sur de la meseta.

El acuífero suprapermafrost se desarrolla únicamente en sectores donde el deshielo supera aproximadamente 1 m de profundidad. Su comportamiento es discontinuo y depende no solo de la temperatura del sedimento, sino también de la porosidad, conductividad hidráulica, potencial de recarga vertical y disponibilidad interanual de agua de fusión. La cercanía al mar, y continua formación de spray induce una elevada salinidad en el agua de la capa activa (2.300 – 8.400 mg/L), lo que explica que permanezca líquida hasta temperaturas cercanas a –3 °C. La conectividad hidráulica es limitada y el flujo es predominantemente vertical. La influencia antrópica es localizada; la pista aérea genera un leve aumento del deshielo en sectores con drenaje deficiente, pero no modifica de manera generalizada la dinámica térmica regional.

En conclusión, la mera presencia de una capa activa no implica necesariamente el desarrollo de un acuífero estacional, y que la temperatura del permafrost no puede emplearse como indicador directo de variabilidad climática sin considerar previamente las propiedades térmicas y la heterogeneidad litológica del subsuelo. En ambientes antárticos libres de hielo, la respuesta del permafrost al cambio climático está modulada de forma significativa por controles geológicos locales.

Agradecimientos: Este trabajo fue posible gracias al apoyo y soporte del Instituto Antártico Argentino, de la Dirección Nacional del Antártico (IAA–DNA), la Universidad Tecnológica Nacional (Argentina) y la Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina.

Consecuencias de la geotermia de baja entalpia en el comportamiento de contaminantes orgánicos traza. Experiencia alrededor del Mercat de Sant Antoni en Barcelona.

Sergi Badia[1], Santiago Gómez[3], Anna Jurado[1], Sandra Pérez[2], Marc Teixidó[1], Estanislao Pujades[1]

[1]*Departamento de Geociencias, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona 08034, Cataluña, España*
[2]*Departamento de Química Ambiental, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona 08034, Cataluña, España*
[3]*Departamento de Geociencias, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona 08034, Cataluña, España. Departamento de Química Ambiental, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona 08034, Cataluña, España*

Palabras clave: Geotermia de baja entalpía (LEGE), Contaminantes orgánicos traza (TrOCs), Aguas subterráneas urbanas

Resumen. Los sistemas geotérmicos de baja entalpía (LEGE) se usan cada vez más en áreas urbanas como tecnologías sostenibles para calefacción y refrigeración. A pesar de sus beneficios, su posible impacto sobre la calidad del agua subterránea, y específicamente sobre los contaminantes orgánicos traza (TrOCs) es muy poco conocida. Este estudio investiga la presencia y el comportamiento de TrOCs específicos en un acuífero urbano afectado por una instalación geotérmica de baja entalpia situada bajo el Mercat de Sant Antoni (Barcelona, España). La presencia de TrOCs en el agua subterránea se monitorizó a lo largo de la línea de flujo mediante dos piezómetros: TABO (situado aguas arriba) y MABO (situado aguas abajo). Se realizaron varias campañas de muestreo para caracterizar las condiciones hidrogeoquímicas, incluyendo temperatura, pH, oxígeno disuelto, alcalinidad y carbono orgánico disuelto (DOC), junto con los principales iones mayoritarios. Se cuantificó una amplia gama de compuestos orgánicos incluyendo fármacos, pesticidas, productos químicos industriales, productos de cuidado personal y metabolitos a niveles de $ng \cdot L^{-1}$. Para comprender mejor el comportamiento de los TrOCs, se evaluaron descriptores moleculares como el peso molecular, log Kow, donadores y aceptores de enlaces de hidrógeno, el área

de superficie polar topológica y la aromaticidad mediante un flujo de trabajo basado en RDKit. El seguimiento de la temperatura reveló un gradiente térmico persistente entre los pozos, con MABO sistemáticamente más cálido que TABO (≈2,98 °C; rango 1,3 − 3,8 °C), y una oscilación entre 21,99 y 28,73 grados a lo largo del periodo de muestreo, lo que refleja el impacto del sistema LEGE. El análisis comparativo de las concentraciones de contaminantes indica un comportamiento variable a lo largo del flujo: varios compuestos mostraron una atenuación significativa (eliminación > 25%), incluidos fármacos y pesticidas, mientras que otros permanecieron estables (±25%) o aumentaron, lo que sugiere aportes adicionales procedentes de la red de alcantarillado unitario cercana. El análisis de correlación de Spearman sugiere que la temperatura y el DOC son factores clave en la dinámica de los contaminantes en el acuífero, con varios compuestos mostrando asociaciones fuertes ($\rho > 0,7$). Además, los patrones de atenuación (a)biótica se relacionaron parcialmente con descriptores moleculares como log Kow y la presencia de grupos funcionales polares, indicando mecanismos de sorción y biotransformación. Estos resultados indican que las instalaciones de LEGE influyen en el transporte y transformación de TrOCs. Comprender estas interacciones es esencial para evaluar las implicaciones ambientales de las tecnologías geotérmicas en sistemas de aguas subterráneas urbanas y para evaluar la posibilidad de diseñar sistemas capaces de aumentar la capacidad de degradación de los acuíferos frente a estos contaminantes.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por MCIU/AEI/10.13039/501100011033 y (i) FEDER Una manera de hacer Europa mediante el proyecto PID2021-128995OA-I00, (ii) FSE+ mediante el proyecto RYC2022-037083-I y (iii) Unión Europea NextGenerationEU/PRTR mediante el proyecto CNS2023-144051. Los autores agradecen a Barcelona Cicle de l'Aigua (BCASA) y al Institut Municipal de Mercats de Barcelona por haber facilitado el acceso a los puntos de observación.

Contaminantes emergentes en el acuífero kárstico de Yucatán (México): evaluación del impacto urbano de Mérida

Flor Árcega Cabrera[1], Marta Inés Llamas Dios[2], Ismael Oceguera Vargas[1], Elizabeth Lamas Cosío[1], Iñaki Vadillo Pérez[2]

[1]*Universidad Nacional Autónoma de México*
[2]*Universidad de Málaga*

Palabras clave: Yucatán (México), Acuífero kárstico, Contaminantes emergentes, Hidrogeología urbana

Resumen. La península de Yucatán (sureste de México) es una de las regiones kársticas costeras más grandes del mundo. Debido a la intensa karstificación y a la topografía predominantemente plana, la escorrentía superficial es extremadamente limitada y la población depende casi por completo de las aguas subterráneas. La ciudad de Mérida, situada 20 km tierra adentro en la parte norte de la península, es el centro urbano más grande de la región, con 1,1 millones de habitantes. La gestión de las aguas residuales en Mérida se realiza principalmente mediante fosas sépticas. Dada la alta permeabilidad del acuífero y la escasa o nula cobertura del suelo, la vulnerabilidad a la contaminación representa una gran preocupación.

En julio de 2023 se llevó a cabo una campaña de monitoreo de las aguas subterráneas (28 muestras) para evaluar la calidad del agua en Mérida y sus alrededores, incluyendo análisis hidroquímicos generales y 134 Contaminantes Emergentes (CECs). La composición hidroquímica está influenciada principalmente por la intrusión de agua de mar, con un aumento de la salinidad hacia la costa. La distribución espacial de las concentraciones de nitrato refleja claramente la influencia urbana en las aguas subterráneas, alcanzando hasta 76,4 mg/L. Se detectaron 59 CECs, al menos una vez, incluidos productos de cuidado personal, edulcorantes artificiales, drogas de abuso y productos farmacéuticos. Se detectaron 22 compuestos de forma sistemática en todas las muestras. La distribución espacial de las concentraciones totales no reveló un patrón claro. Sin embargo, compuestos específicos (por ejemplo, ibuprofeno, carbamazepina) se detectaron principalmente en muestras con concentraciones de nitrato superiores a 20 mg/L, es decir, dentro de los límites de la ciudad. Las drogas de

abuso, representadas en gran medida por un metabolito asociado al consumo de alcohol, mostraron concentraciones crecientes al norte de la ciudad, aguas abajo de la influencia urbana.

Control tectónico-litológico de la hidrogeoquímica de los manantiales hiperalcalinos del macizo de peridotitas de Ronda (Málaga, España)

Lucía Ojeda[1], Pablo Jiménez Gavilán[1], Antonio Castro Gámez[1], José Benavente[2], Iñaki Vadillo[1]

[1]*Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga*
[2]*Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada*

Palabras clave: Manantiales hiperalcalinos, Serpentinización, Peridotitas de Ronda, Interacción agua-roca

Resumen. Los manantiales hiperalcalinos son rasgos característicos de regiones ultramáficas serpentinizadas y proporcionan información clave sobre la circulación profunda de las aguas subterráneas y de los procesos de interacción agua–roca. El macizo de peridotitas de Ronda (Málaga, sur de España) alberga la mayor concentración conocida de manantiales hiperalcalinos en Europa. En este macizo, la localización y la composición química de las surgencias están estrechamente relacionadas con los contactos tectónicos entre las peridotitas y las litologías adyacentes, lo que indica que los controles estructurales y litológicos condicionan tanto las rutas de flujo de los fluidos como sus características geoquímicas.

Entre 2020 y 2022 se monitorizaron nueve manantiales, incluyendo surgencias en peridotitas y en contactos con calizas, rocas metamórficas de alto grado y unidades de flysch. Las aguas presentan un pH elevado (10–12,2) y una mineralización de moderada a alta (400–1800 µS/cm). Los resultados sugieren una evolución en dos etapas: (1) la serpentinización profunda genera fluidos Ca–OH con concentraciones extremadamente bajas de Mg (<1 mg/L), debido a que el Mg se incorpora a fases secundarias de serpentina y brucita; (2) durante su ascenso a lo largo de trayectorias controladas por contactos tectónicos los fluidos interactúan con las litologías atravesadas. Las surgencias asociadas a contactos con rocas metamórficas presentan mayores concentraciones de Si disuelto, mientras que aquellas que circulan a través de esquistos y flysch muestran enriquecimiento en Na, K, Cl y Br, lo que incrementa la mineralización y modifica la señal primaria Ca–OH. Los manantiales vinculados a contactos con carbonatos conservan rasgos Ca–OH junto con evidencias de carbonatación, mientras que las

surgencias en peridotitas granulares muestran una sobreimpresión geoquímica mínima. Uno de los manantiales estudiados presenta concentraciones más elevadas de Mg (hasta 19 mg/L), así como mayores contenidos de Si y HCO_3^- y un pH ligeramente inferior, lo que sugiere mezcla con aguas menos evolucionadas o de circulación más somera.

En conjunto, aunque el sistema se origina a partir de un fluido común generado por la serpentinización, la composición final de las aguas está principalmente condicionada por la compartimentación estructural y las interacciones litológicas asociadas a los contactos tectónicos, que controlan tanto las trayectorias de flujo como la impronta geoquímica de las surgencias.

Agradecimientos: Este trabajo contribuye al proyecto «Hidrógeno Natural en las Peridotitas de Ronda: Presencia, formación, comportamiento y almacenamiento (HYPE) - PID2024-157004OB-I0» financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER/UE. L.O. agradece la ayuda DGP_POST_2024_00043 (Junta de Andalucía/CUII y FSE+).

Correlación de los componentes hidrogeológicos de un sistema salino ácido: Salar de Gorbea como caso de estudio

Mauricio Medina-Cáceres[1], Francisco Remonsellez[2], Andrea Jara[3], Manuel Inostroza[4], Liey-si Wong[5], Juan Castro-Severyn[6], Amanda Suarez[7]

[1]*Doctorado en Ciencias mención Geología, Departamento en Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.*
[2]*Departamento de Ingeniería Química y Medio Ambiente, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.*
[3]*Centro Lithium I+D+i, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.*
[4]*Millenium Institute on Volcanic Risk Research – Ckelar Volcanoes, Chile. Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Antonio Varas 880, Santiago, Chile.*
[5]*Centro Lithium I+D+i, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile. Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 6010, Antofagasta, Chile.*
[6]*Departamento de Ingeniería Química y Medio Ambiente, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile. Centro de investigación tecnológica del agua y sustentabilidad en el desierto, CEITSAZA, Universidad Católica del Norte, Antofagasta Chile.*
[7]*Doctorado en Ingeniería Sustentable, Departamento de Ingeniería y Medio Ambiente, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.*

Palabras clave: Salar de Gorbea, Modelo ecohidrogeológico, Sistema salino ácido

Resumen. Los salares son sistemas evaporíticos-detríticos asociados a climas áridos e hiperáridos donde su formación está controlada por una combinación de factores geológicos (tectónica y/o vulcanismo), hídricos, climáticos y ecológicos. En términos hidrogeológicos, son sistemas evaporíticos alimentados por aguas subterráneas y superficiales, las cuales, al ser evaporadas, se hiperconcentran los solutos y permiten la precipitación de rocas evaporíticas en forma de costras salinas. Además, cuando los niveles freáticos afloran en superficie pueden dar

origen a humedales y/o lagunas con características hidroquímicas y ecosistémicas excepcionales.

Existe evidencia de que las comunidades microbianas son capaces de catalizar procesos hidro- y bioquímicos de las aguas subterráneas y superficiales de un salar, como puede ser la precipitación de costras salinas, la catálisis de procesos de acidificación en un salar, un ejemplo de estos procesos podría ser el Salar de Gorbea. El Salar de Gorbea es un sistema salino ácido ubicado en la Región de Atacama, Chile. La acidez de este salar está controlada principalmente por la oxidación del azufre nativo de los complejos volcánicos aledaños y la intensa alteración hidrotermal que inhibe la capacidad de neutralización de las rocas, generando que las aguas que recargan al salar sean principalmente de pH ácido (0.47 a 4.5).

El proyecto tiene como objetivo la creación de un modelo conceptual ecohidrogeológico que integre los factores hidrogeológicos y ecosistémicos del Salar de Gorbea a través de la correlación de indicadores hidroquímicos, hidrogeológicos y componentes ecosistémicos. Hasta la fecha, los datos hidroquímicos indican la existencia de un gradiente de acidez (representado por el pH) y de conductividad eléctrica en el salar, se observa que las muestras más ácidas (0.47 a 2.4) y conductivas se ubican en la zona central del salar, mientras que las aguas más diluidas tienen valores más altos de pH (3.5 a 4.4). Estos gradientes podrían estar mediados y/o potenciados por la actividad biológica de los ecosistemas existentes en las aguas subterráneas y superficiales de este salar.

La hidroquímica del Salar de Gorbea muestra que el sistema es principalmente de tipo clorurado sulfatado sódico con enriquecimientos en magnesio y calcio. La zona norte del salar es un sistema más diluido y de composición cloruradas sódicas, mientras que las aguas de la zona central son más concentradas y de composición clorurada sulfatada sódica magnésica y, además, las aguas subterráneas que alimentan al salar de Gorbea son aguas sulfatadas mixtas. Estos resultados de clasificación de aguas son consistentes con los clústeres obtenidos en el análisis estadístico, donde se obtuvieron tres grupos, el primer grupo corresponde a las aguas del sector norte, el segundo a las aguas del sector central y el tercero a las aguas que alimentan al salar. Estos resultados indican que en el Salar de Gorbea no es un sistema homogéneo y que existe uno o más factores de control diferente para las aguas del sector norte (diluidas y menos ácida) y para las aguas del sector sur (concentradas y más acidas), para el caso de las aguas que alimentan al salar, estas cambian su composición durante su trayecto hacia el Salar de Gorbea. Estos factores de control están asociados tanto a procesos bióticos y/o abióticos imperantes en el Salar de Gorbea.

Agradecimientos: Financiamiento y agradecimientos al proyecto ANID/ANILLOS/ATE240012

Agradecimientos a proyecto del Gobierno Regional de Antofagasta, Código BIP 40067597-0

Creación de humedales funcionales como estrategia de compensación hídrica de la industria cementera

Luis Moreno Merino[1], Almudena De la Losa Román[1], Raquel Morales García[1], Jose Antonio Domínguez Sánchez[2], Jose María Ruíz Hernández[1], Juan José Durán Valsero[1], Pilar Gegúndez Cámara[3], Laura Martín Herranz[3]

[1]CN-IGME (CSIC). C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid
[2]CN-IGME (CSIC). C/ Cirilo Amorós 42, 46004 Valencia
[3]HOLCIM España. Edificio Tokyo, Av. de Manoteras, 20. 28050 Madrid

Palabras clave: compensación hídrica, humedales funcionales, restauración ecológica, infraestructura verde

Resumen. El acceso al agua constituye un desafío global creciente, agravado por el cambio climático, la presión demográfica y el aumento de la demanda sectorial. En España, buena parte del territorio presenta un estrés hídrico estructural, donde a una elevada demanda se superponen condiciones climáticas adversas como la escasez de precipitaciones, la alta evapotranspiración y la marcada irregularidad pluviométrica. En este contexto, HOLCIM España, en colaboración con el IGME-CSIC, desarrolla una propuesta metodológica orientada a reforzar la sostenibilidad hídrica de sus operaciones, con especial atención a las instalaciones ubicadas en zonas en las que la probabilidad de impactos adversos relacionados con la escasez de agua es alta. Entre las medidas planteadas para conseguir un índice hídrico positivo destaca la creación de humedales funcionales. Uno de los principales retos ha sido definir criterios de desarrollo metodológico adaptados a las condiciones territoriales, climáticas y ambientales de la península ibérica, porque, aunque existen marcos consolidados, como la Water Positive Impact Methodology (WPIM), estos no se ajustan plenamente a la realidad hidrogeológica, climática y normativa española. Las principales limitaciones detectadas en la metodología vigente, que se corrigen en la propuesta desarrollada, se centran en dos aspectos. En primer lugar, la definición de cuenca local , que resulta técnicamente insuficiente: las masas de agua subterránea no coinciden necesariamente con las divisorias superficiales, las captaciones pueden afectar a varias subcuencas, los sistemas municipales integran recursos de distinto origen y el impacto puede manifestarse aguas abajo o incluso en otra cuenca jerárquicamente superior. En segundo lugar, la elegibilidad restringida a

humedales con lámina libre permanente y la penalización de flujos como la evaporación o la infiltración, es incompatible con la dinámica de los humedales mediterráneos, caracterizados por estacionalidad marcada, periodos de desecación total, recarga activa de acuíferos y una evapotranspiración que cumple funciones ecológicas y microclimáticas esenciales. Se introduce así el concepto de humedal funcional , que engloba humedales estacionales, criptohumedales y humedales artificiales restaurados (por ejemplo, en huecos mineros en desuso), priorizando no la permanencia de lámina libre, sino la recuperación de servicios ecosistémicos, la regulación hidrológica, la depuración natural y la conectividad ecológica. Asimismo, se reformula el cálculo del crédito hídrico para incluir toda el agua que entra en el dominio del humedal, se integra en su ciclo natural y contribuye a su funcionalidad. La infiltración se considera un proceso deseable de recarga y mejora de la calidad, y la evapotranspiración un mecanismo funcional de regulación microclimática, no una pérdida. Como elemento adicional, se incorpora la zona tampón que rodea el humedal al cálculo del balance hídrico positivo, reconociendo su papel en la protección, regulación y mejora del sistema. El trabajo realizado ha permitido concluir que la compensación hídrica debe vincularse a las masas de agua afectadas y no exclusivamente a la cuenca local; que los humedales funcionales, incluidos los estacionales y criptohumedales, constituyen instrumentos prioritarios de reposición; la infiltración y la evapotranspiración deben ser tratados como procesos naturales no penalizables; el cálculo del crédito hídrico debe basarse en el volumen total de agua que sostiene la funcionalidad del sistema; la metodología empleada debe estar adaptada a las condiciones mediterráneas de escasez estructural; y por último, las acciones deben generar un impacto hidrológico y ecológico verificable, más allá del mero balance contable.

Criterios para el diseño de perímetros de protección contra la contaminación de captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento

Luis Moreno Merino[1], Inmaculada García Moreno[1], Almudena de la Losa Román[1], Maria Jesús Minaya Ovejero[3], Jesús del PozoTejado[3], Laura Garrido Sobrados[2]

[1]*CN-IGME (CSIC). C/ Rios Rosas 23. 28003 Madrid*
[2]*Dirección General del Agua. MITECO. Plaza Juan de la Cruz 10, 28071 Madrid*
[3]*Tragsatec. C/ de Julián Camarillo 6B, San Blas-Canillejas. 28037 Madrid*

Palabras clave: perímetros de protección, abastecimiento, vulnerabilidad, zonificación

Resumen. La figura del perímetro de protección constituye una herramienta fundamental para la protección de la calidad de las aguas subterráneas de abastecimiento. Este concepto está recogido tanto en la normativa europea (Directiva Marco del Agua), como en la legislación española (Reglamento del Dominio Público Hidráulico) donde se señala que deben establecerse perímetros de protección en captaciones incluidas en el Registro de Zonas Protegidas que suministren agua para consumo humano con un volumen medio de al menos 10 m³/día o que abastezcan a más de 50 personas; el reglamento también define el número de zonas que componen el perímetro, su tipo y grado de restricciones aplicables. La aplicación práctica de esta figura normativa plantea diversas dificultades, entre ellas la selección del método de dimensionamiento, la adaptación de la zonificación teórica a las condiciones reales del acuífero y la compatibilización de las restricciones con los usos del territorio. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo presentar y sintetizar la metodología propuesta en la guía técnica elaborada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico junto con el CN IGME-CSIC titulada Guía para el diseño y dimensionamiento de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas destinadas al consumo humano (PPCSb) . En la guía se sistematiza el procedimiento técnico para la delimitación de los perímetros, estructurándolo en cinco etapas principales, tras una fase inicial de recopilación y análisis de información básica: (I) clasificación del perímetro en función de la población abastecida y del comportamiento hidráulico del acuífero, incluyendo la elaboración del modelo conceptual; (II) selección del método de

dimensionamiento más adecuado según las características del acuífero y la escala del abastecimiento; (III) definición de la zonificación teórica y práctica del perímetro; (IV) propuesta de restricciones y limitaciones de uso del suelo en cada zona; y (V) elaboración del informe técnico y de la propuesta final de delimitación. Las recomendaciones metodológicas, incluidas las relativas a la selección de métodos de dimensionamiento, se alinean con lo establecido en el RDPH. En acuíferos porosos o asimilables a porosos se recomienda el cálculo de isócronas de tiempo de tránsito, utilizando modelos matemáticos de flujo en grandes abastecimientos (poblaciones superiores a 50.000 habitantes o caudales extraídos superiores a 10.000 m^3/día). En sistemas de menor entidad, las isócronas pueden estimarse mediante métodos analíticos simplificados, como los propuestos por Wyssling o Jacobs y Bear. En acuíferos kársticos o fisurados, caracterizados por elevada heterogeneidad hidráulica y tiempos de tránsito difíciles de estimar mediante métodos convencionales, se recomienda el uso de métodos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca, como EPIK, COP o DISCO. La guía propone además un procedimiento para relacionar las clases de vulnerabilidad obtenidas mediante estos métodos con restricciones basadas en criterios de tiempo de tránsito, permitiendo integrar ambos enfoques en el diseño de los perímetros de protección. En definitiva, la metodología propuesta proporciona un marco técnico homogéneo para la delimitación de perímetros de protección en España, facilitando su aplicación por parte de administraciones hidráulicas y organismos gestores del abastecimiento.

Cuantificación de la contribución de la recarga natural y los aportes antropogénicos en las aguas superficiales en una cuenca mediterránea: enfoque de mezclas

Sonia Valdivielso[1], Luciana Scrinzi[1], Enric Vázquez-Suñé[1], Anna Jurado[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA, CSIC)*

Palabras clave: SOUPY, EMMA, Gestión de recursos hídricos, río Besòs

Resumen. Los recursos hídricos en cuencas mediterráneas urbanizadas están sometidos a una presión creciente derivada del cambio climático, la intensificación de las actividades humanas y la recurrencia de sequías prolongadas. En este contexto, comprender los procesos hidrogeoquímicos que controlan la calidad del agua resulta fundamental para una gestión sostenible de los recursos hídricos. Este estudio analiza la dinámica hidroquímica y la influencia de las presiones antropogénicas en la cuenca del río Besòs (noreste de España), un sistema mediterráneo altamente urbanizado que abastece a una población de aproximadamente 2,7 millones de habitantes. En particular, se examinan dos de sus principales afluentes, los ríos Tenes y Congost, que presentan condiciones ambientales contrastadas: el primero con menor grado de contaminación y el segundo fuertemente afectado por presiones urbanas, industriales y descargas de estaciones depuradoras de aguas residuales.

La metodología combina un End-Member Mixing Analysis (EMMA) con el modelo de mezclas SOUPY, con el objetivo de identificar las fuentes hidroquímicas dominantes, estimar sus proporciones de mezcla y evaluar los procesos geoquímicos que controlan la composición del agua superficial bajo diferentes condiciones hidrológicas. El análisis se basa en datos hidrológicos y químicos recopilados entre 2013 y 2024 por la Agencia Catalana del Agua, incluyendo parámetros mayoritarios como HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^+, así como conductividad eléctrica. Además, se definieron periodos hidrológicos secos, húmedos e intermedios a partir del análisis de percentiles de caudal en la estación de Santa Coloma de Gramenet, representativa del comportamiento hidrológico de la cuenca.

Los resultados del EMMA identifican tres end-members principales que representan distintas condiciones hidrológicas y fuentes de agua. En el río Tenes,

el end-member asociado a episodios húmedos, por lo tanto, una composición hidroquímica similar a la precipitación, presenta la mayor contribución media a lo largo del río (53–70 %), mientras que durante periodos secos se observa un aumento de la mineralización y una mayor influencia de aguas enriquecidas en sodio y cloruro, llegando a representar el 88% de la mezcla. Este aumento de sodio y cloruro es debido a las descargas de las estaciones depuradoras de aguas residuales. En contraste, el río Congost muestra una menor influencia de la precipitación (17-37%) y una mayor influencia de aportes antropogénicos, asociados principalmente a descargas de aguas residuales y actividades urbanas e industriales (39-56%), siendo mayor en periodos secos (30-61%). Asimismo, los diagramas hidroquímicos indican que las aguas del Tenes se clasifican mayoritariamente como Ca–HCO_3 durante periodos húmedos y normales, evolucionando hacia composiciones Na–Cl en condiciones de sequía.

En conjunto, los resultados evidencian que los extremos hidrológicos, especialmente las sequías prolongadas, reducen la capacidad de dilución del sistema fluvial y favorecen la acumulación de sales y nutrientes, mientras que los episodios de lluvia intensa movilizan contaminantes desde suelos y áreas urbanizadas hacia el sistema fluvial. La combinación de EMMA y SOUPY se revela como una herramienta eficaz para evaluar las contribuciones relativas de distintas fuentes de agua y los procesos hidrogeoquímicos dominantes en cuencas mediterráneas urbanizadas. Este enfoque proporciona información clave para mejorar la gestión integrada de los recursos hídricos en regiones sometidas a estrés climático y fuerte presión antropogénica

Agradecimientos: Se agradece la financiación recibida a través del proyecto WATERCLIMATE (2023 CLIMA 0101), financiado por el AGAUR. El proyecto que dio lugar a estos resultados recibió el apoyo de una beca de la Fundación La Caixa (ID 10001034). El código de la beca es B006133.

Curso de especialista en investigación y recuperación de aguas subterráneas y suelos contaminados

Vinyet Solà de Roa[1], Emilio Orejudo Ramírez[1], Diana Puigcerver Cuerda[2], Roberto Espínola Cazorla[1]

[1]*Col·legi de Geòlegs i Geòlogues de Catalunya (COLGEOCAT)*
[2]*Universitat de Barcelona*

Palabras clave: Contaminacion puntual, Formación reglada, Descontaminación aguas subterráneas, Descontaminación suelos

Resumen. Una formación rigurosa y de calidad contrastada es básica para la capacitación de profesionales solventes en cualquier campo o sector profesional. En este sentido, se quiere presentar la importante aportación que el Col·legi de Geòlegs i Geòlogues de Catalunya (COLGEOCAT), viene realizando desde hace años en el campo de la Higrogeología, y en concreto, en el sector de la contaminación puntual de suelos y aguas subterráneas.

Se trata del reconocido curso ESPECIALISTA EN INVESTIGACIÓN Y RECUPERACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUELOS CONTAMINADOS , curso de postgrado organizado por el COLGEOCAT y que cuenta con titulación oficial de la Universitat de Barcelona (14 créditos) y que se imparte en modalidad a distancia por el Institut de Formació Contínua IL3.

La organización del curso está basada en la experiencia del colectivo de profesionales expertos en la problemática de la contaminación puntual de suelos y aguas subterráneas. Así, los docentes y formadores del curso pertenecen al sector de la consultoría ambiental, así como de la academia y la administración competente, todos ellos de amplia experiencia profesional.

Por este motivo, la estructura formativa reproduce las fases de que consta un proyecto real de restauración de suelos contaminados y aguas subterráneas afectadas por contaminación de origen puntual. Así, se plantean los siguientes 3 módulos formativos:

• Módulo 1. Conceptos básicos, marco normativo y criterios técnicos de gestión y caracterización de emplazamientos contaminados.

Es un módulo introductorio el conocimiento hidrogeológico del medio natural afectado, de las principales familias de contaminantes, de la normativa aplicable y de las diferentes técnicas de investigación del subsuelo aplicadas a la caracterización ambiental.

• Módulo 2. Análisis del riesgo, seguridad y salud y técnicas de restauración.

Este módulo pretende presentar las técnicas actualizadas de restauración de emplazamientos contaminados e iniciarse en el empleo de las herramientas de análisis de riesgos.

• Módulo 3. Proyecto de resolución de un caso práctico de investigación y restauración.

Su objetivo es poner en práctica los conocimientos aprendidos en los módulos anteriores en un caso real y elaborar un informe completo de las diferentes etapas en la resolución de un episodio de contaminación puntual del subsuelo.

Hasta la actualidad se han realizado 12 ediciones del curso, con una total de 279 alumnos participantes, principalmente de España, países de Centro y Sudamérica y Europa. El alumnado participante muestra una distribución casi paritaria (55% hombres y 45% mujeres) y la tasa de aprobados del curso es del 86%. Cabe destacar la valoración general del curso, obtenida a partir de encuestas de satisfacción del alumnado, las cuales muestran una valoración media global de 4,8 sobre 6.

Además, durante la impartición del curso se ofrece la posibilidad de participar en un Jornada Presencial cuyo objetivo es aproximar a los asistentes a experiencias prácticas reales explicadas por profesionales de reconocido prestigio y competencia técnica. Por otro lado, supone una interesante oportunidad para establecer networking entre los participantes del curso con el conjunto de los profesionales del sector.

De la agricultura tradicional a la recarga gestionada: las zayas de La Valduerna como SbN para la resiliencia hídrica

Sergio Martos-Rosillo[1], Nuria Naranjo Fernández[1], Almudena de la Losa Román[1], Carolina Guardiola-Albert[1], Giussepe Massone Grez[2], José Ángel Ventura González[3], José María Ruiz Hernández[1], Antonio González-Ramón[1], Jorge Jódar Bermúdez[1], Blas Ramos Rodríguez[1], Carlos Marín Lechado[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*
[2]*Aljibe Consultores, S.L.*
[3]*PROVILACOR*

Resumen. Los sistemas tradicionales de gestión del agua, desarrollados durante siglos y adaptados a condiciones climáticas y sociales cambiantes, representan ejemplos relevantes de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) aplicadas a la Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR). En la comarca de La Valduerna (León, España), los agricultores emplean desde al menos el siglo XV una red de acequias denominadas zayas para la recarga de un acuífero libre poco profundo, mediante la infiltración del agua en las propias zayas y mediante riegos de invierno en leguminosas e inundación de barbechos. Este sistema constituye un ejemplo ancestral y singular de Agricultural Managed Aquifer Recharge (Ag-MAR), que permite almacenar agua durante los meses húmedos para su uso en verano mediante pozos someros.

En este trabajo se presenta una evaluación hidrogeológica integral del sistema Ag-MAR de La Valduerna, basada en cartografía histórica, teledetección, campañas piezométricas, ensayos de recarga, modelos de precipitación-aportación y simulación numérica del flujo subterráneo. La geometría del acuífero se reconstruyó mediante un modelo geológico 3D, que muestra depósitos aluviales cuaternarios con un espesor medio de 8 m, que recubren materiales miocenos de baja permeabilidad. La capacidad de almacenamiento se estima entre 9 y 12 hm³, lo que limita notablemente la resiliencia del acuífero frente a sequías prolongadas.

El estudio hidrogeológico realizado indica que la recarga natural por infiltración de lluvia es escasa (1–3 hm³/año), mientras que la demanda de riego alcanza aproximadamente 7 hm³/año. Por tanto, la recarga inducida mediante los bombeos en verano y la recarga que se realiza con las zayas constituye un aporte

esencial. Los ensayos realizados en abril–mayo de 2024 muestran que las tres principales zayas infiltraron 1.5 hm^3 en 43 días, elevando el nivel piezométrico medio del acuífero en 0.47 m. Este incremento es coherente con los valores de porosidad drenable (≈ 8 %) documentados para los sedimentos aluviales locales.

La modelización del flujo subterránea reproduce adecuadamente la dinámica estacional del acuífero (R^2 ≈ 0.99) y permite evaluar estrategias de gestión. Dos escenarios probados muestran que: (i) la incorporación de una nueva zaya incrementaría la recarga entre 1.2 y 2.4 hm^3/año; y (ii) adelantar el periodo operativo de las zayas del 1 de abril al 1 de enero podría aportar entre 2.0 y 4.3 hm^3/año adicionales, sin afectar a los caudales ecológicos del río Duerna. La combinación de información piezométrica, modelización hidrológica y simulación numérica del flujo subterráneo demuestra que el sistema tradicional de zayas es una solución robusta, de bajo coste y compatible con los principios de las SbN, que mejora la seguridad hídrica local, permite una gestión conjunta sostenible de aguas superficiales y subterráneas y favorece la presencia de bosques de ribera.

En conjunto, el caso de La Valduerna evidencia que las infraestructuras históricas de recarga gestionada pueden integrarse eficazmente en los marcos de gestión del agua actuales, ofreciendo oportunidades reales de adaptación frente al cambio climático y reforzando la resiliencia hídrica en territorios agrícolas.

Agradecimientos: Este trabajo es el resultado del proyecto "Caracterización Sistemas ancestrales de Siembra y Cosecha de Agua (SP7.DGA-CSIC2025-2029 CH Duero)" financiado a través de la SPN de la Dirección General del Agua a favor de la AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS, MP (CSIC)

Del TRT al rendimiento anual: sistemas geotérmicos de circuito abierto y cerrado en Barcelona.

Franco Coscia[1], Estanislao Pujades-Garnes[1], Enric Vázquez-Suñé[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)*

Palabras clave: Energia geotermica somera, Modelacion numérica, ATES, BTES

Resumen. La descarbonización urbana requiere soluciones renovables de calefacción y refrigeración que funcionen de forma fiable en entornos con limitaciones de infraestructura y condicionantes hidrogeológicos. Entre las opciones geotérmicas someras destacan los sistemas de circuito abierto, conocidos como Aquifer Thermal Energy Storage (ATES), y los de circuito cerrado, basados en Borehole Thermal Energy Storage (BTES), aunque elegir entre ambos sigue siendo complejo por sus distintas ventajas, riesgos e impactos.

En este trabajo se presenta una evaluación geotérmica en la antigua Prision La Model en Barcelona. A partir de un modelo previo de flujo de agua subterránea desarrollado en 2022 y acoplado con transporte de calor, se calibró numéricamente un ensayo de respuesta térmica (TRT) utilizando datos medidos de temperatura y caudal registrados durante 2.4 días. La conductividad térmica efectiva obtenida se integró en un modelo hidrogeológico multicapa y, con él, se simuló la demanda anual de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria de un gran complejo urbano para comparar el comportamiento de un sistema ATES y uno BTES.

El estudio tiene dos objetivos principales: estimar la conductividad térmica efectiva a partir de la calibración numérica de un TRT y comparar el rendimiento energético y los impactos hidrogeológicos de ambas opciones geotérmicas bajo una demanda anual realista. Este enfoque puede ayudar a seleccionar la tecnología más adecuada en acuíferos urbanos y servir como referencia para otras ciudades mediterráneas.

Delimitación de las áreas de recarga natural en las masas de agua subterránea con la integración de SIG, teledetección y AHP

Julia Tudela[1], Ester Vilanova[1], Salvador Jordana[1], Ximena Venier[1]

[1]*Amphos 21*

Palabras clave: recarga natural, AHP, SIG, acuíferos

Resumen. La delimitación espacial de la recarga natural de los acuíferos de las masas de agua subterráneas sigue siendo uno de los retos más complejos en hidrogeología aplicada, especialmente en territorios donde coexisten acuíferos con funcionamientos muy variados y donde la información disponible es heterogénea. En este trabajo se aplican metodologías para identificar y cartografiar áreas de recarga en las masas de agua subterránea de las Cuencas Internas de Cataluña (CIC), con el objetivo de generar una información técnica útil para la protección de acuíferos, la planificación hidrológica y la priorización de medidas de gestión.

La novedad del enfoque radica en combinar información hidrogeológica convencional, variables derivadas de teledetección y un esquema de ponderación multicriterio adaptable a la tipología de cada masa de agua subterránea. Frente a aproximaciones genéricas, la metodología parte de la hipótesis de que la recarga no es uniforme en el territorio y debe ajustarse al contexto hidrogeológico, distinguiendo entre masas aluviales, detríticas, carbonatadas o de baja permeabilidad, así como aquellos casos en los que la recarga efectiva puede localizarse fuera de la propia extensión cartografiada de la masa.

El procedimiento se estructura en cuatro etapas principales. En primer lugar, se revisa la bibliografía y la información disponible para seleccionar los factores con mayor influencia sobre la recarga. En segundo lugar, estos factores se convierten en capas temáticas georreferenciadas a partir de cartografía existente, bases de datos espaciales y productos satelitales. Entre las variables consideradas se incluyen precipitación, temperatura, evapotranspiración, pendiente, altitud, litología, tipo y uso del suelo, fracturación, conductividad hidráulica y distancia a elementos hidrológicos relevantes, entre otros.

Un aspecto especialmente relevante es la incorporación de teledetección para mejorar la caracterización espacial y temporal de variables hidroclimáticas. Se

evalúa el uso de precipitación diaria CHIRPS, evapotranspiración real derivada del sensor NASA MODIS y, cuando resulta adecuado, escorrentía potencial estimada mediante Curve Number. Estas fuentes permiten complementar redes de observación puntuales y aportar continuidad espacial en áreas con menor densidad de datos. Aportan valor añadido para la caracterización espaciotemporal de los parámetros que intervienen en el estudio.

Finalmente, las capas se normalizan y se integran mediante AHP (Analytic Hierarchy Process), a partir de una matriz de comparación por pares apoyada en juicio experto. AHP es una metodología de análisis multicriterio diseñada para ayudar a tomar decisiones complejas cuando intervienen diversos factores o criterios con importancias relativas diferentes. El resultado es una cartografía que define e identifica zonas de recarga natural clasificada en categorías, validada mediante información previa, contraste con datos observados y campañas de campo, en diferentes contextos hidrogeológicos.

Delimitación de perímetros de protección en medios detríticos y kársticos: retos metodológicos y aplicación práctica en el sistema de abastecimiento de Palma de Mallorca

Roger Mas Boti[1], Azahara Juárez García[2], Edgard Tarazona Cruz[1], Diego Sampietro Lardiés[1], Lidia Barbero Blanco[1], Salvador Bueso Sánchez[2], Pau Estrany Planas[3], Ana Rodríguez Godoy[3]

[1]Veolia. Paseo de la Zona Franca, número 48, 08038 Barcelona
[2]Veolia. Avda. Teniente Montesinos, 8, Edificio Z, Planta 7, 30100 Murcia
[3]EMAYA. Camí dels Reis 400, 07010 Palma

Palabras clave: Perímetros de protección, Vulnerabilidad hidrogeológica, Modelo conceptual hidrogeológico, Captaciones de agua potable

Resumen. La delimitación de perímetros de protección en captaciones destinadas al consumo humano constituye una herramienta clave en la gestión preventiva del riesgo, reforzada recientemente por la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico y por la guía metodológica publicada en 2025 por el MITECO. No obstante, la traslación de estas directrices a sistemas reales de abastecimiento plantea importantes desafíos técnicos e interpretativos, especialmente en contextos hidrogeológicos complejos.

Este trabajo presenta los resultados de la delimitación de perímetros de protección y la elaboración de mapas de vulnerabilidad para las captaciones gestionadas por EMAYA en Palma de Mallorca. El sistema integra captaciones en acuíferos granulares detríticos y en acuíferos kársticos carbonatados. Dada esta heterogeneidad, se han aplicado metodologías diferenciadas: el método semianalítico de Wyssling para la estimación de isócronas en medios granulares y el método COP para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca en medios kársticos, dentro de un marco donde coexisten diversas aproximaciones analíticas, numéricas y paramétricas.

Los resultados evidencian que el principal reto no reside en la formulación matemática de los métodos, sino en la definición de un modelo conceptual hidrogeológico robusto que sustente su aplicación. En acuíferos granulares, parámetros como la conductividad hidráulica, el gradiente hidráulico y el espesor

saturado condicionan de forma crítica la extensión de las isócronas que definen las zonas de protección. La heterogeneidad lateral, la anisotropía y la interferencia entre captaciones generan desviaciones significativas respecto a los supuestos de flujo radial estacionario. El análisis de sensibilidad muestra que variaciones razonables en estos parámetros pueden modificar el radio de protección en más de un 40%, con implicaciones directas en la planificación territorial. Asimismo, la aplicación estricta de los criterios metodológicos establecidos para sistemas de pozos próximos puede conducir a perímetros desproporcionados respecto al dominio hidrogeológico real, alcanzando en el caso analizado extensiones superiores a 5 km de radio.

En acuíferos kársticos, la aplicación del método COP introduce incertidumbres asociadas a la evaluación de sus factores, particularmente en la delimitación de áreas de recarga difusa frente a flujos concentrados y en la caracterización de las capas de protección. La asignación de valores a subfactores edáficos y litológicos presenta un elevado componente interpretativo, especialmente en entornos urbanizados, lo que puede traducirse en cambios significativos en la cartografía de vulnerabilidad y en su clasificación, con implicaciones regulatorias relevantes.

La protección de manantiales presenta particularidades adicionales, ya que pueden estar controladas estructuralmente y mostrar una elevada variabilidad hidrológica. La posible existencia de flujos rápidos en medios kársticos, junto con la ausencia de control sobre el régimen de explotación, limita la aplicabilidad directa de metodologías desarrolladas para captaciones mediante pozos.

En conjunto, el estudio pone de manifiesto que la delimitación de perímetros de protección no es un ejercicio meramente normativo, sino un proceso técnico altamente dependiente de la calidad del modelo conceptual. La integración de análisis paramétrico, evaluación de sensibilidad y conocimiento experto resulta esencial para ajustar la zonificación teórica a la realidad hidrogeológica, garantizando su utilidad como herramienta de gestión adaptativa y su adecuación a sistemas complejos y dinámicos.

Demostración de un sistema de tratamiento suelo acuífero con barreras reactivas para la eliminación de contaminantes del agua residual tratada

Miranda González Rodríguez[1], Tiphaine Anderbouhr[1], Joan Campos Ferré[1], Sara Bagés Estopà[1], Silvia Díaz-Cruz[2], Jesús Carrera[3], Cristina Valhondo González[3], Lurdes Martínez Landa[4]

[1]*Comaigua*
[2]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona*
[3]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona. Unidad Asociada: Grupo de Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC)*
[4]*Dpto. de Ingeniería Civil y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Unidad Asociada: Grupo de Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC)*

Resumen. La comarca del Baix Camp (Tarragona, España) enfrenta escasez de agua recurrente, especialmente en verano, debido a la presión combinada de la agricultura y el turismo. La sobreexplotación de acuíferos en la zona incrementa el riesgo de intrusión marina y compromete la disponibilidad de agua subterránea. El proyecto LIFE REMAR (2021–2025) implementó un sistema innovador de recarga gestionada de acuíferos, en concreto, un sistema de tratamiento suelo-acuífero con barreras reactivas (SATrb), utilizando el efluente secundario de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Cambrils, con el objetivo de mejorar la disponibilidad y la calidad del agua.

El sistema piloto consiste en dos balsas de 400 m², que reciben el efluente de la EDAR por gravedad. En la base de estas balsas se instalaron unas barreras reactivas de 80 cm compuestas por sedimentos locales, compost vegetal, astillas de madera, biochar y zeolitas. Estas barreras favorecen los procesos de adsorción y biodegradación de contaminantes presentes en el efluente de la EDAR. Las balsas operan mediante ciclos húmedos y secos para minimizar la colmatación. La calidad del agua infiltrada se controla mediante ocho piezómetros ubicados aguas arriba, dentro y aguas abajo de las balsas, midiendo parámetros en continuo como conductividad, temperatura y nivel, complementados con muestreos periódicos del efluente de la EDAR, el acuífero y la zona no saturada.

La recarga incrementó el estado cuantitativo del acuífero, con más de 129.000 m³ de agua tratada recargada en 1 año y 9 meses. En 2022, el nivel freático se situaba aproximadamente a 26 m sobre el nivel del mar, pero descendió hasta alrededor

de 24 m como consecuencia de la sequía. Durante la recarga, el nivel se recuperó localmente superando los 26 m. Asimismo, el estado cualitativo del acuífero mejoró, ya que los nitratos inicialmente presentes en el acuífero se redujeron localmente. Actualmente, el sistema continúa en operación, manteniéndose la infiltración de agua tratada y el seguimiento de su impacto en el acuífero.

Además, los resultados muestran una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes presentes en el agua tratada. Se observaron elevadas tasas de reducción: Escherichia coli 100%, Clostridium perfringens 99,99%, coliformes totales 99,98%, colífagos 99,98%, nitrógeno 82,7% y fósforo 96,5%. No se detectaron huevos de cestodos ni nematodos. Se observaron también descensos en compuestos emergentes, microplásticos, genes de resistencia y metales.

Estos hallazgos confirman que el sistema SATrb es una estrategia eficaz y sostenible para incrementar la disponibilidad de agua y mejorar su calidad en regiones con estrés hídrico. La experiencia adquirida en LIFE REMAR proporciona una base sólida para la replicación y el escalado de sistemas similares en otras zonas afectadas por la escasez de agua y la contaminación de acuíferos.

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

Desacoplamiento de transporte y reacciones en el transporte reactivo

Jordi Petchamé-Guerrero[1], Jesús Carrera[2], Jingjing Wang[3], Chunmiao Zheng[4]

[1]*Instituto de diagnóstico ambiental y estudios del agua (IDAEA-CSIC). Grupo de hidrología subterránea (UPC-CSIC). Neurite lab.*
[2]*Instituto de diagnóstico ambiental y estudios del agua (IDAEA-CSIC). Grupo de hidrología subterránea (UPC-CSIC)*
[3]*Tongji university, shangai. Eastern institute of technology, Ningbo*
[4]*Eastern institute of technology, Ningbo*

Palabras clave: water mixing approach, transporte reactivo, métodos numéricos implícitos, desacoplamiento

Resumen. Simular el transporte reactivo en aguas subterráneas es caro computacionalmente porque el transporte de solutos y las reacciones químicas están acoplados: hay que resolverlos a la vez. El método Water Mixing Approach (WMA) ofrece una alternativa que desacopla ambos procesos. En vez de resolver todo junto, el WMA entiende el transporte como una serie de mezclas de aguas vecinas. Las concentraciones en cada punto se calculan como la mezcla ponderada de aguas cercanas más la contribución de las reacciones. Así, transporte y reacciones quedan separados, lo que reduce el coste de cálculo y permite resolver las reacciones en cada nodo/celda de forma independiente.

El objetivo de este trabajo es evaluar y mejorar el WMA implícito para que mantenga el desacoplamiento entre transporte y reacciones en simulaciones reactivas. La versión original del WMA era explícita en el tiempo, lo que la hacía inestable para pasos de tiempo grandes. En este trabajo se extiende al caso implícito, que es incondicionalmente estable. El problema es que, al hacerlo implícito, transporte y reacciones vuelven a acoplarse. Para mantenerlos separados se proponen dos variantes: la "lumped", que agrupa las contribuciones de reacciones de aguas vecinas en el punto de cálculo, y la "consistente", que aproxima dichas contribuciones usando las velocidades de reacción ya calculadas aguas arriba y estimando las de aguas abajo.

Se comparan ambas variantes con el DSA (Direct Substitution Approach) y con soluciones analíticas en tres problemas: un mineral en equilibrio, dos zonas minerales en equilibrio adyacentes y desnitrificación. Para problemas con soluciones suaves, todos los métodos convergen bien. Sin embargo, cuando hay

un cambio brusco de condiciones químicas (dos zonas minerales), todos fallan, incluido el DSA.

Esto lleva a una conclusión importante: los métodos numéricos Eulerianos se han diseñado para que las concentraciones converjan correctamente, pero no las velocidades de reacción. Cuando hay frentes geoquímicos abruptos, las velocidades de reacción calculadas son imprecisas con cualquier método. Esto sugiere que es necesario desarrollar nuevos métodos numéricos que también garanticen la convergencia en velocidades de reacción.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el Programa Investigo del Gobierno de España, financiado por la Unión Europea — NextGenerationEU, y por los proyectos ConMimo y MuchoGusto (Agencia Estatal de Investigación, AEI, con referencias TED2021-131188B-C31 y PID2022-140862OB-C22, respectivamente), así como por el proyecto Ciencia de Frontera CONAHCYT CF-2023-G-904. J. W. agradece además la financiación de la National Natural Science Foundation of China (proyecto 42307271) y del Shanghai Pujiang Program (proyecto 23PJ1413200).

Desarrollo de sensores virtuales para la detección indirecta de episodios de contaminación en acuíferos kársticos mediante el uso de herramientas de Inteligencia Artificial

Jaime Fernández-Ortega[1], Juan Antonio Barberá Fornell[1], Álvaro Sencianes[1], Javier Serrano[2], Antonio Chaves[2], Luis Llopis[2], Manuel Díaz[2], Bartolomé Andreo Navarro[1]

[1]Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), 29071 Málaga, España
[2]Grupo de investigación Embedded Real-Time Systems (ERTIS) de la Universidad de Málaga, 29071 Málaga, España

Palabras clave: sensor virtual, acuífero kárstico, consumo humano, contaminación

Resumen. Los sensores virtuales o soft-sensors (en inglés) son herramientas basadas en sistemas de medición y algoritmos de inteligencia artificial que se emplean para inferir valores paramétricos de variables continuas -físicas o químicas- a partir de observaciones. Muy recientemente, el uso de este tipo de sensores digitales (virtuales) ha ido ganando protagonismo en aplicaciones hidrogeológicas para inferir parámetros de calidad del agua (p.e. nitratos, E. coli, etc) en tiempo real. Esta herramienta tecnológica, de especial interés en estudios de contaminación de aguas subterráneas, se puede utilizar como alternativa al uso de sensores costosos o de prototipos aún por desarrollar (y/o probar en entornos reales de aplicación) para la monitorización de sustancias contaminantes específicas.

En este trabajo se presentan dos casos de estudio en los que se han diseñado e implementado sensores virtuales para inferir i) la presencia de bacterias fecales (E. coli) y ii) la concentración de nitrato en aguas subterráneas. En ellos, se han considerado cinco acuíferos carbonáticos kársticos, localizados en las provincias de Málaga y Cádiz, en los que se han monitorizado cuatro manantiales y dos sondeos captados para el abastecimiento de agua potable a diferentes poblaciones rurales de interior. Los dos manantiales investigados para el desarrollo del sensor virtual de E. coli drenan el acuífero kárstico de la Sierra de Ubrique (NE de Cádiz), mientras que el de nitratos se está probando en

manantiales y sondeos que captan las aguas subterráneas de los acuíferos de las sierras de Los Caballos, Archidona, Carrasco y Peñarrubia (N de Málaga). Todos estos puntos de captación de agua han sido equipados con diferentes combinaciones de sensores comerciales para obtener medidas en continuo (15 min) de caudal/nivel piezométrico y parámetros físico químicos (conductividad eléctrica, turbidez, fluorescencia de tipo triptófano y oxígeno disuelto). De forma simultánea al registro continuo, se recogieron muestras de aguas subterráneas para analizar la actividad de E. coli y el contenido de nitratos en agua en laboratorio, cuyos datos analíticos se utilizaron posteriormente para entrenar los modelos de aprendizaje automático.

Se compararon un total de 25 tipos de algoritmos con diferentes combinaciones de parámetros del agua, entre los que se seleccionaron los 5 con mejor ajuste para cada punto de captación. El sensor virtual de actividad bacteriana (E. coli) se ha desarrollado mediante algoritmos de clasificación acorde con los niveles de riesgo sanitario definidos a partir de estándares internacionales (OMS). En este caso, se observó un mejor ajuste de los modelos realizados con Procesos Gaussianos, Redes Neuronales, el Naïve Bayes y Análisis Discriminante Cuadrático para discriminar correctamente entre dichos niveles hasta en un 85 % de las ocasiones. Por otro lado, en el caso del sensor virtual de nitrato en agua subterránea, aunque aún se encuentra en fase de optimización numérica, se aplicaron algoritmos de regresión entre los cuales destaca el ajuste a partir Unidades Recurrentes Cerradas (GRU, por sus siglas en inglés) con análisis de tendencias en diferentes ventanas temporales.

El diseño e implementación de sensores virtuales en captaciones destinadas al consumo humano presenta una serie de ventajas frente al uso de sensores convencionales, como la capacidad predictiva y la flexibilidad en su configuración en diferentes contextos hidrogeológicos y entornos de explotación, de gran utilidad en acuíferos kársticos. No obstante, la incertidumbre asociada al valor paramétrico inferido por la solución digital virtual (lo cual no ocurre con el grado de acierto obtenido a partir de algoritmos de clasificación) podrá verse reducida a medida que se refinen los algoritmos predictivos y las bases de datos sean más completas.

Agradecimientos: El proyecto iSAT se ejecuta en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, financiado por la Unión Europea a través de NextGenerationEU. Esta iniciativa responde a la necesidad identificada en la plataforma del PLAnd Sequía Andalucía. Los autores agradecen a los Ayuntamientos de Ubrique, Cuevas del Becerro, Teba, Sierra de Yeguas y Villanueva de Tapia y las respectivas empresas de aguas su colaboración.

Desarrollo de un modelo hidrológico e hidrogeológico acoplado de la cuenca del Llobregat para el análisis de interacciones superficie-subsuelo bajo escenarios de cambio climático

Vitor Ariza Malagutti[1], Daniel Fernàndez-Garcia[3], Meritxell Minoves Ruiz[2], Eduardo Martinez Gomariz[3], Marta Ganzer Marti[2]

[1]*Aigües de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña*
[2]*Aigües de Barcelona*
[3]*Universidad Politécnica de Cataluña*

Palabras clave: Modelo acoplado hidrológico-hidrogeológico, Interacción río-acuífero, Cambio climático, Gestión integrada del agua

Resumen. La cuenca del río Llobregat constituye uno de los sistemas hídricos más complejos y estratégicos del noreste de la península ibérica, con una intensa regulación superficial, una explotación significativa de acuíferos y una fuerte dependencia de la interacción entre aguas superficiales y subterráneas para garantizar el abastecimiento urbano. Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo hidrológico e hidrogeológico acoplado de la cuenca del Llobregat, diseñado para analizar dichas interacciones y evaluar su comportamiento bajo escenarios futuros de cambio climático. A diferencia de enfoques previos centrados únicamente en modelos hidrológicos de cuenca o en modelos hidrogeológicos locales del valle bajo del Llobregat, el enfoque propuesto integra conjuntamente la cabecera regulada, los embalses, los aportes laterales y la dinámica hidrogeológica de la parte baja del sistema dentro de un único marco acoplado a escala de cuenca.

El modelo integra un componente hidrológico distribuido con un modelo hidrogeológico regional que representa la dinámica de los acuíferos, los intercambios río-acuífero, las extracciones y las recargas gestionadas. Esta aproximación permite reproducir la transferencia de flujos entre superficie y subsuelo y analizar la respuesta conjunta del sistema ante variaciones climáticas y cambios en las estrategias de gestión del agua. La integración resulta especialmente relevante en sistemas donde las decisiones de explotación

superficial condicionan la presión sobre los acuíferos y donde la respuesta hidrogeológica influye directamente en la resiliencia del abastecimiento durante sequías.

La construcción del modelo se apoya en series históricas meteorológicas e hidrológicas para su calibración y validación. Las primeras evaluaciones de calibración reproducen de forma razonable la dinámica hidrológica observada en los principales puntos de control de la cuenca y permiten identificar los procesos dominantes de partición entre escorrentía, percolación y aportes laterales hacia el tramo bajo del sistema. Posteriormente, el modelo será forzado con proyecciones climáticas regionalizadas para simular escenarios futuros caracterizados por mayor variabilidad hidrológica, sequías prolongadas y eventos de precipitación intensa.

Los resultados permitirán evaluar la evolución futura de la disponibilidad de recursos, la dependencia relativa entre captaciones superficiales y subterráneas y el papel del acuífero como elemento regulador frente a eventos extremos. Asimismo, el modelo permitirá analizar estrategias de adaptación, como modificaciones en los esquemas de explotación, incremento de la recarga artificial o mayor uso de recursos alternativos. La definición de un dominio hidrológico prácticamente cerrado reduce además la dependencia de condiciones de contorno externas y facilita la integración de proyecciones climáticas futuras dentro del sistema modelado.

El modelo constituye además la base física de una metodología de Climate Resilient Water Safety Plan actualmente en desarrollo, proporcionando variables hidrológicas e hidrogeológicas que posteriormente alimentan modelos probabilísticos de riesgos climáticos y operativos asociados al abastecimiento.

El enfoque desarrollado demuestra el valor de los modelos acoplados para comprender las interacciones superficie-subsuelo a escala de cuenca y apoyar la evaluación de escenarios de cambio climático desde una perspectiva hidrogeológica.

Desarrollo de un modelo hidrológico integrado totalmente distribuido para simulaciones SW-GW a gran escala

Rafael Magnabosco[1], Diego Meléndez-Saldaña[1], Vanessa A. Godoy[1], Patricio Hernández-Parra[1], Pedro Assunção[2], Félix Francés[1], J. Jaime Gómez-Hernández[1]

[1]*Instituto de Investigación en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Valencia, España*
[2]*Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Instituto de Geociências, Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID), Belo Horizonte, Brasil*

Palabras clave: Modelos acoplados, TETIS-MODFLOW, SW-GW

Resumen. Los modelos hidrológicos integrados para la simulación de aguas superficiales y aguas subterráneas (SW-GW) son fundamentales para representar las interacciones entre suelos, ríos, lagos y acuíferos, dado que la mayoría de los modelos suelen simplificar uno de estos compartimentos o no consideran sus interacciones dinámicas. Eso es especialmente importante para los humedales mediterráneos, como el Parque Natural de l'Albufera en Valencia (España), ya que se trata de regiones sensibles y fuertemente influenciadas tanto por fenómenos atmosféricos como por procesos hidrológicos superficiales y subterráneos.

El objetivo principal de este estudio es presentar un nuevo modelo hidrológico integrado totalmente distribuido (TETIS-MODFLOW), incluyendo su mecanismo de funcionamiento y la validación del balance hídrico mediante datos sintéticos. El componente subterráneo utiliza MODFLOW 6 para resolver el flujo subterráneo transitorio tridimensional. Los procesos superficiales y subsuperficiales se simulan con TETIS, un modelo físicamente basado que aporta flujos espacialmente distribuidos como la infiltración en el suelo y percolación hacia el acuífero, así como la escorrentía directa y interflujo. Estos flujos se incorporan a los paquetes de MODFLOW 6 que representan las interacciones SW-GW: GWF (recarga y flujo subterráneo), SFR (caudales e intercambio río-acuífero) y LAK (interacción lago-acuífero).

Una ventaja frente a modelos basados en HRU es que los modelos totalmente distribuidos proporcionan salidas como caudales, intercambios SW-GW y niveles piezométricos por celda. Este trabajo también innova al implementar un flujo de trabajo automatizado basado en Python (FloPy) que construye el modelo a partir

de entradas SIG estándar (p. ej., rásteres GeoTIFF/ASCII y shapefiles), incluyendo geometría de acuíferos, condiciones de contorno, discretización temporal y asignación de parámetros. Además, el modelo aprovecha la herramienta MODFLOW API para posibilitar un acoplamiento estrecho, actualizaciones interactivas de variables y mayor flexibilidad para calibración y optimización.

El modelo se encuentra en desarrollo activo y se están incorporando progresivamente otros paquetes avanzados. Los resultados y el balance hídrico se están validando de forma preliminar con datos sintéticos. Sin embargo, se pretende aplicarlo al Parque Natural de l'Albufera, en Valencia (España) en un estudio posterior. Finalmente, aunque la herramienta desarrollada se centra en simulaciones SW-GW a gran escala, puede aplicarse a regiones con diferentes características geomorfológicas, lo que refuerza su aplicabilidad general.

Agradecimientos: La publicación es parte de la ayuda PRE2022-101977, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

Desarrollo de un modelo numérico de flujo subterráneo como base para la remediación del acuífero fracturado de Òdena (España)

José H. Jiménez-Guíñez[1], Jose A. Luque Marín[1], Albert Soler[1], Mònica Rosell[1], Clara Torrentó[2]

[1]*Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), 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, Barcelona 08028, Spain*
[2]*Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), 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, Barcelona 08028, Spain. Serra Húnter Fellowship, Generalitat de Catalunya, Spain.*

Palabras clave: Acuífero fracturado, Propiedades hidráulicas, Modelación numérica, Hidrogeología

Resumen. El cambio climático, la sobreexplotación de los acuíferos y el uso intensivo del suelo deterioran la disponibilidad y calidad del agua subterránea a nivel global. Además, la diversidad geológica de los acuíferos, especialmente de los fracturados, dificulta su evaluación y favorece la dispersión de contaminantes. Para abordar estas complejidades, se emplean modelos numéricos de flujo que permiten simular el comportamiento del agua subterránea bajo distintos escenarios y analizar el transporte de contaminantes. Estas herramientas posibilitan anticipar cambios en los sistemas, proteger los recursos hídricos y evaluar estrategias de remediación aplicables en campo.

No obstante, el desarrollo de modelos numéricos de flujo implica superar numerosos retos. La obtención de datos hidrogeológicos confiables —como conductividad hidráulica, coeficientes de almacenamiento, niveles piezométricos o la geometría del acuífero— suele ser compleja. Los entornos geológicos heterogéneos requieren modelos conceptuales sólidos que representen de forma adecuada la dinámica del flujo. A ello se suman las demandas computacionales, especialmente en sistemas de gran escala o con condiciones transitorias significativas, como variaciones de recarga, bombeos o inyecciones. Por esta

razón, la calibración basada en la comparación entre datos observados y simulados resulta crítica para garantizar la precisión del modelo y su capacidad predictiva al evaluar escenarios futuros.

El objetivo principal de este estudio, enmarcado dentro de los proyectos ISOTRACE (PID2022-139911OB-C41) y BIODECLOR (RDI001/24/000002), es construir un modelo numérico de flujo que represente con precisión un acuífero fracturado ubicado en Òdena, a unos 50 kilómetros al noreste de Barcelona (España). Este acuífero se encuentra afectado por una mezcla de compuestos orgánicos volátiles clorados, producto de la actividad histórica vinculada a una planta química.

Como primera aproximación, se elaboró un modelo geológico mediante el software Leapfrog Geo con datos recopilados entre 2006-2026. Este modelo incluye descripciones litológicas de distintos sondajes y calicatas, así como la ubicación de diferentes fracturas. Además, se realizó un ensayo de trazador para caracterizar la conectividad entre estas fracturas y la interacción con la litología en profundidad. Esta información se empleó como base para construir el modelo numérico en MODFLOW, utilizando la interfaz gráfica ModelMuse. La calibración requirió integrar múltiples datos: condiciones de borde adecuadas, un balance hídrico detallado basado en registros de precipitación, temperatura, evapotranspiración y procesos de recarga y descarga, además de ensayos de bombeo para determinar los parámetros hidráulicos del acuífero y evaluar su variabilidad. A ello se añadieron mediciones continuas de nivel freático mediante sensores y registros manuales en los puntos de interés que permiten evaluar el sistema con una escala de error centimétrica.

Posteriormente, se evaluó el periodo 2024–2025 para comprobar la capacidad predictiva del modelo en la zona de estudio y anticipar el comportamiento hidráulico asociado a la futura inyección de un bioestimulante que favorezca la degradación declorativa de los contaminantes presentes en el acuífero. Como último objetivo, se prevé acoplar esta herramienta a un modelo de transporte reactivo que permita simular los efectos de dicha inyección y la evolución del proceso de degradación de los contaminantes en el sistema.

Agradecimientos: Este estudio ha sido financiado por los proyectos:

REMECLOR (PDC2021-120861-C21), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

ADVANCE4WATER-ISOTRACE (PID2022-139911OB-C41), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

Descarga de agua subterránea al mar: cuantificación de sus componentes mediante la integración de técnicas

Marc Diego-Feliu[1], Maria Muñoz-Pinyol[2], Jose Tur-Piedra[1], Bella Almillategui[1], Juanjo Ledo[3], Valentí Rodellas[2], Albert Folch[1]

[1]*Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona E-08034, Espanya*
[2]*Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona, E-08193 Bellaterra, Spain*
[3]*Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Plaza de las Ciencias 1, Madrid 28040, Spain*

Palabras clave: Descarga de agua subterránea al mar, Enfoque multimetodológico, Acuífero kárstico costero, Trazadores y geofísica

Resumen. La descarga de agua subterránea al mar es un proceso hidrogeológico clave que transfiere compuestos disueltos desde el continente hacia el medio marino, incluyendo nutrientes, metales traza y contaminantes. Por ello, desempeña un papel fundamental en la biogeoquímica y en el estado ecológico de los ecosistemas costeros, pudiendo tanto sostener su productividad mediante el aporte de nutrientes como contribuir a su degradación al favorecer procesos de eutrofización. En un sentido amplio, este proceso engloba cualquier flujo de agua desde los acuíferos costeros hacia el mar, incluyendo tanto la descarga de agua dulce de origen continental, impulsada por gradientes hidráulicos, como la recirculación de agua marina a través del sedimento, forzada por gradientes de densidad, el oleaje, las mareas y la bioirrigación asociada a la actividad de la fauna bentónica. En consecuencia, la descarga de agua subterránea al mar comprende procesos que operan en un amplio rango de escalas espaciales y temporales, desde centímetros y minutos hasta kilómetros y años, e involucra aguas de origen tanto terrestre como marino, con historias geoquímicas diferenciadas. Como resultado, cada componente de la descarga presenta magnitudes, dinámicas e improntas geoquímicas propias, lo que se traduce en efectos distintos sobre los ecosistemas costeros receptores. Debido a esta complejidad, su caracterización y cuantificación resultan especialmente difíciles y suelen requerir enfoques

multimetodológicos que permitan discriminar entre procesos y estimar de forma independiente su magnitud relativa.

En este estudio se aplica un enfoque multidisciplinar que combina distintas técnicas de cuantificación de la descarga, incluyendo trazadores radiactivos, métodos geofísicos y medidas directas mediante cámaras bentónicas. El trabajo se desarrolla en la Cala Aiguadolç (Barcelona), un sitio experimental localizado en el macizo kárstico del Garraf y caracterizado por una elevada heterogeneidad de la descarga, con focos puntuales asociados a surgencias submarinas y sectores dominados por descarga difusa. A partir de campañas de muestreo estacionales realizadas entre 2023 y 2025, los resultados muestran la coexistencia de distintos procesos de intercambio agua subterránea-mar, incluyendo la descarga de agua dulce, la recirculación de agua marina inducida por oleaje y mareas, y el intercambio de agua de poro a escala centimétrica. Las primeras estimaciones de flujo indican una descarga total de 730 m^3 d-1, con una contribución de agua dulce de entre el 20 y el 70 %. El enfoque multimetodológico pone de manifiesto que la aplicación aislada de un único método puede sesgar la interpretación de la magnitud y naturaleza de los flujos. En cambio, la integración de métodos permite resolver mejor la heterogeneidad espacial y temporal del proceso, discriminar la contribución relativa de sus distintos componentes y obtener estimaciones más robustas de los flujos de agua y solutos hacia el medio marino.

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Catalana del Agua (subvención n.º ACA210/18/00007), por los proyectos PID2022-140862OB-C21 y PID2022-140862OB-C22, financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y por FEDER, Una manera de hacer Europa, así como por la financiación de la Direcció General de Recerca de la Generalitat de Catalunya (subvención: 2021-SGR 00609). M.D-F. agradece el apoyo financiero de la ayuda JDC2022-050316-I, financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea - NextGenerationEU/PRTR. J.T-P. agradece el apoyo económico de las becas FI-2022 de la Generalitat de Catalunya (2022FI_B_00601). B.A. cuenta con el apoyo de una beca doctoral de investigación (BIDP-I-2020-016) concedida por SENACYT-IFARHU de la República de Panamá.

Desde la caracterización del emplazamiento hasta el diseño de la remediación: un enfoque integrado para aguas subterráneas contaminadas por nitratos

Jose Guadalupe Montero Ramirez[1], Jofre Herrero Ferran[1], Diana Puigserver Cuerda[1], Alberto Millan Martos[1], Carmen Lazaro Sanchez[2], Laura Del Val Alonso[2], Valentina Urrea Vargas[2], Carme Bosch Suades[2]

[1]*Universitat de Barcelona*
[2]*EURECAT*

Palabras clave: Piloto, Nitratos, Descontaminación, Remediación In Situ

Resumen. La contaminación difusa por nitratos constituye una de las principales presiones sobre las aguas subterráneas en zonas rurales, comprometiendo el abastecimiento de agua potable y dificultando el cumplimiento de los estándares regulatorios. En este contexto, el desarrollo de estrategias de remediación eficaces y sostenibles requiere una comprensión integrada de los procesos hidrogeológicos, geoquímicos y microbiológicos que controlan la distribución, persistencia y atenuación del nitrato. Este trabajo presenta una caracterización avanzada de emplazamiento como base para el diseño de una estrategia de remediación in situ orientada a la rehabilitación de una zona de captación en un acuífero rural afectado por contaminación agrícola y ganadera.

El área de estudio presenta concentraciones de nitrato superiores a 150 mg/L de NO_3^-, asociadas a aportes prolongados derivados de fertilización y gestión de estiércoles. Se llevó a cabo una campaña integral que incluyó la caracterización geológica e hidrogeológica del acuífero, el monitoreo piezométrico, el muestreo estacional de aguas subterráneas y el análisis hidroquímico detallado. Se emplearon herramientas isotópicas ($\delta^{15}N\text{-}NO_3^-$ y $\delta^{18}O\text{-}NO_3^-$) y parámetros redox para identificar las fuentes de contaminación y evaluar los procesos de atenuación natural. Asimismo, se analizó la comunidad microbiana para determinar el potencial intrínseco de biorremediación del sistema. Estos datos se complementaron con experimentos de microcosmos previamente desarrollados, en los que se evaluaron rutas combinadas de reducción abiótica y biótica del nitrato utilizando agua subterránea y sedimentos del emplazamiento.

Los resultados ponen de manifiesto una elevada heterogeneidad del acuífero, donde la conectividad hidrogeológica y la zonación redox condicionan de forma determinante la persistencia del nitrato. La evidencia isotópica y microbiológica confirma la viabilidad de inducir procesos de desnitrificación mediante la adición controlada de donadores de electrones, optimizando las condiciones redox para evitar efectos secundarios indeseables, como la movilización de hierro o la generación de sulfuro. A partir de esta información, se desarrolló un modelo conceptual robusto que sustenta el diseño de un sistema piloto de remediación in situ, orientado a reducir las concentraciones de nitrato por debajo de 37,5 mg/L y permitir la recuperación sostenible del pozo de abastecimiento.

El enfoque propuesto se alinea con iniciativas europeas orientadas a la gestión sostenible de nutrientes y la protección de recursos hídricos, como el proyecto GREENHOOD, al integrar el conocimiento detallado del sistema con soluciones específicas a escala local. En este sentido, el estudio ilustra cómo las estrategias basadas en modelos conceptuales y caracterización avanzada de emplazamientos pueden contribuir a los objetivos de reducción de nutrientes, economía circular y resiliencia hídrica en entornos rurales. Este trabajo pone de relieve la necesidad de enfoques adaptados a cada emplazamiento para abordar eficazmente la contaminación por nitratos en aguas subterráneas.

Desnitrificación in situ como estrategia de gestión para mejorar la calidad del agua subterránea en acuíferos costeros mediterráneos: potencial aplicación en recarga artificial

Jesus Guillermo Aguirre Ramos[1], Fabian Willert[1], Jesús Carrera[3], Albert Folch[1], Lourdes Martínez Landa[1], Paula Rodríguez Escales[1], Francesc Codony Iglesias[2], Enric Corbella Reventós[2], Melanie Jimena Huaman Nieto[1]

[1]*Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*
[2]*Aigües de Mataró, S.A.*
[3]*Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*

Palabras clave: desnitrificación, recarga artificial

Resumen. La contaminación por nitratos es uno de los principales problemas globales de calidad del agua subterránea. En Cataluña, una parte significativa del territorio está declarada como zona vulnerable por esta problemática. En el acuífero de la riera de Argentona, las concentraciones de nitrato pueden superar el límite máximo permitido para consumo humano (50 mg/L de NO_3^-), lo que restringe su uso directo para abastecimiento y obliga a realizar procesos para potabilizar el agua. En este contexto, la estimulación de procesos microbianos de desnitrificación in situ mediante la recarga de agua enriquecida con carbono orgánico se plantea como una estrategia potencial para mejorar la calidad del recurso.

Con el objetivo de evaluar la viabilidad de esta metodología, se realizaron ensayos tipo (inyección-extracción), consistentes en la introducción controlada de agua enriquecida con acetato como fuente de carbono orgánico y donador de electrones en el agua subterránea rica en nitratos. Durante la campaña experimental se llevaron a cabo ocho ciclos: los cinco primeros se realizaron durante el primer trimestre de 2025, mientras que los tres últimos se ejecutaron en el último trimestre del mismo año. Para caracterizar los procesos de transporte y mezcla en el acuífero se empleó un conjunto de trazadores fluorescentes (Uranina, Rodamina WT y Amino G). El seguimiento del sistema incluyó mediciones mediante sondas multiparamétricas, monitorización de niveles piezométricos y análisis químicos de laboratorio de especies nitrogenadas,

carbono orgánico disuelto, así como cationes y aniones mayoritarios y elementos traza.

Los resultados muestran una disminución significativa de las concentraciones de nitrato tras la adición de la fuente de carbono. Asimismo, el seguimiento hidroquímico no evidenció incrementos relevantes en otros parámetros que pudieran comprometer la calidad del agua para su uso potencial como recurso de abastecimiento. Estos resultados sugieren que la estimulación de la desnitrificación in situ puede favorecer la reducción de nitratos sin generar efectos adversos significativos en la composición química del agua subterránea.

Este enfoque experimental permite evaluar la respuesta biogeoquímica del acuífero frente a la adición de carbono y explorar su reproducibilidad, así como su potencial aplicación en sistemas reales de recarga artificial. En este sentido, los ensayos push-pull se plantean como una herramienta útil para analizar la viabilidad de estrategias de gestión orientadas a la mejora de la calidad del agua subterránea en acuíferos afectados por contaminación por nitratos.

Desnitrificación inducida en un acuífero aluvial costero mediante ensayos push-pull (NE de España)

Fabian Willert[1], Jesús Guillermo Aguirre Ramos[5], Melanie Jimena Huaman Nieto[1], Lurdes Martinez Landa[1], Michela Trabucchi[1], Clara Ruiz González[2], Benjamin Piña[3], Audrey H. Sawyer[1], Paula Rodríguez-Escales[1], Albert Folch[1], Jesús Carrera[3]

[1]Department of Civil and Environmental Engineering (DECA), Universitat Politécnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain. Associated Unit: Hydrogeology Group (UPC-CSIC), Barcelona, Spain
[2]Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC), Barcelona, Spain
[3]Institute of Environmental Assessment and Research (IDAEA), Spanish National Research Council (CSIC), Barcelona, Spain
[4]Institute of Environmental Assessment and Research (IDAEA), Spanish National Research Council (CSIC), Barcelona, Spain. Associated Unit: Hydrogeology Group (UPC-CSIC), Barcelona, Spain
[5]Department of Civil and Environmental Engineering (DECA), Universitat Politécnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain. Associated Unit: Hydrogeology Group (UPC-CSIC), Barcelona, Spain. Aigües de Mataró S.A. (AMSA), Mataró, Spain

Palabras clave: push pull, desnitrificación, acuífero costero, biofilm

Resumen. La contaminación por nitratos es una de las principales amenazas para la calidad de las aguas subterráneas a nivel mundial y, especialmente, en Cataluña, donde casi el 40% del territorio está designado como zona vulnerable a los nitratos. Este estudio investiga el potencial de la desnitrificación inducida en un acuífero costero aluvial semiconfinado en una riera efímera de Argentona (costa norte de Barcelona). Además, de manera secundaria, también se han evaluado distintos métodos para caracterizar las comunidades microbianas del acuífero.

En este trabajo se han realizado una ensayos push-pull, inyectando una fuente de carbono lábil, para evaluar las tasas de reducción del nitrato durante eventos controlados de recarga del acuífero. Cada ciclo de push-pull comprendió: (1) la inyección de 50 m³ de una mezcla reactiva, compuesta por agua subterránea rica

en nitratos, acetato como donador de electrones y trazadores conservativos (Amino G, Rodamina WT, Uranina); (2) una fase de incubación corta (0,5–2 días); y (3) una fase de extracción. Para evaluar la validez de los métodos de caracterización de comunidades microbianas, se compararon seis técnicas de muestreo dirigidas tanto a la biomasa en suspensión como a la adherida, incluyendo muestreo estándar de agua subterránea, swabbing y pistoneo en el pozo, extracción de testigos de suelo, y trampas pasivas de biopelícula en sedimento.

El monitoreo en campo incluyó el registro continuo de niveles piezométricos, potencial redox (Eh) y parámetros fisicoquímicos. Las muestras de agua subterránea fueron analizadas para iones mayoritarios, especies de nitrógeno, elementos sensibles al potencial redox (Fe, Mn, sulfuro, As) y fracciones de carbono (COD, CIT). Mediante el acoplamiento del transporte de solutos con las transformaciones biogeoquímicas, este estudio ha cuantificado cómo la dinámica de las comunidades microbianas contribuye a la reducción de nitratos y aporta información sobre los mecanismos acoplados que gobiernan la desnitrificación en acuíferos aluviales.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PID2023-148543OA-I00 "HETMAR" y PID2022-140862OB-C21/C22 "MUCHOGUSTO".

Determinación estacional del origen de la contaminación por nitratos en aguas mediante el uso integrado de datos multiisotópicos y de marcadores microbianos

Albert Soler[1], Anicet R. Blanch[2], Teresa Garrido[3], Pere Pons[4], Jose A. Luque Marín[1], Raquel Casas Mangas[2], Núria Micola[3], Juan Manuel López[4], Neus Otero[6], Mireia Iglesias Carrera[3], Anna Terrats Riera[3], Joan Solà[4], Rosanna Margalef-Marti[1], Leopoldo Pena[5], Ester Garcia-Solsona[5]

[1]Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Institut de Recerca de l'Aigua (IdRA), Universitat de Barcelona (UB)
[2]Grup MARS, Departament de Genètica, Microbiologia i Estadística, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona
[3]Agència Catalana de l'Aigua (ACA)
[4]Geoservei Projectes i Gestió Ambiental SL
[5]Grup de Geociències Marines, Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà. Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona.
[6]Grup MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia – MAGH, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona. Pla Serra Hunter, Generalitat de Catalunya.

Palabras clave: Nitrato, contaminación agraria, 15N, marcadores microbianos específicos

Resumen. La contaminación por nitrato en aguas superficiales y subterráneas sigue siendo uno de los principales desafíos para la gestión sostenible de los recursos hídricos en Europa. A pesar de las iniciativas derivadas de la Directiva 91/676/CEE y de su integración en la Directiva Marco del Agua, numerosas masas de agua mantienen concentraciones elevadas de nitrato, evidenciando las limitaciones de las estrategias centradas exclusivamente en la reducción de la presión agraria. En este contexto, se requieren herramientas analíticas precisas que permitan identificar con fiabilidad el origen de la contaminación, así como caracterizar los procesos hidrogeoquímicos que controlan su evolución.

La geoquímica isotópica del nitrato se ha consolidado como una herramienta esencial para discriminar entre fertilizantes sintéticos de residuos ganaderos y descargas de aguas residuales. La composición isotópica de N y O del nitrato disuelto permite diferenciar con precisión estas aportaciones, y su integración con otros isótopos de co-trazadores, como $\delta^{11}B$ en boro disuelto, $\delta^{34}S$ y $\delta^{18}O$ en sulfato disuelto, y $\delta^{2}H$ y $\delta^{18}O$ en agua, proporciona un enfoque multiisotópico robusto capaz de resolver solapamientos composicionales y cuantificar la contribución relativa de cada fuente al nitrato exportado a las aguas. Además, este enfoque permite evaluar la presencia de procesos naturales de atenuación.

No obstante, los métodos multiisotópicos presentan limitaciones en escenarios donde es necesario diferenciar entre fuentes ganaderas (porcino, bovino, aviar, …) o discriminar mezclas de fuentes urbanas y agrícolas en zonas costeras donde la presencia de boro marino enmascara la señal de aguas residuales y residuos ganaderos. Para superar estas limitaciones, y disponer a la vez de una verificación basada en trazadores independientes, este estudio integra el uso de indicadores y marcadores microbianos específicos (MST: Microbial Source Tracking), que permiten identificar aportes fecales con un nivel de resolución complementario al de los trazadores isotópicos. Aunque presentan limitaciones asociadas a su carácter no conservativo, la combinación de MST y datos isotópicos incrementa notablemente la capacidad para resolver sistemas complejos sometidos a múltiples presiones antrópicas.

Los resultados de un estudio multiisotópico combinado con trazadores MST realizado en Catalunya por la Agència Catalana de l'Aigua durante 3 años muestran que la principal discrepancia entre ambos métodos se produce en áreas dominadas por fertilización inorgánica, debido a la ausencia de marcadores MST en este tipo de fuente. Mientras que la mayor concordancia se observa en zonas con mayor contribución de fuentes orgánicas. Aunque únicamente la composición isotópica del N y del O del nitrato permite identificar directamente el origen del nitrato exportado, la integración de otros trazadores isotópicos de co-trazadores ($\delta^{11}B$, $\delta^{34}S_{SO4}$ y $\delta^{18}O_{SO4}$) y de marcadores MST permite cuantificar el papel de cada fuente en el ciclo del nitrógeno y evaluar su responsabilidad relativa en la exportación estacional de nitrato hacia las aguas. La combinación de estos métodos con la contextualización hidrológica e hidrogeológica y el análisis de presiones territoriales permite definir la vulnerabilidad del medio y determinar las causas de la contaminación. Este enfoque multidisciplinario constituye una herramienta eficaz para identificar fuentes, atribuir responsabilidades y contribuir a la gestión de zonas vulnerables a la contaminación por nitratos.

Diagnóstico de la colmatación en balsas de infiltración horizontal mediante integración de datos de presión, polarización inducida y Epss

Alex Sendrós Brea-Iglesias[6], Gabriela Anriquez Mauricio[1], Aritz Urruela Garcia[1], Josefina Tapias Pantebre[5], Mahjoub Himi Benomar[1], Lluís Rivero Marginedas[6], Albert Casas Ponsatí[6], Ruben Garcia Artigas[3]

[1]*Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada (Universitat de Barcelona)*
[2]*Institut de Recerca de l'Aigua (Universitat de Barcelona)*
[3]*Agència Catalana de l'Aigua (Generalitat de Catalunya)*
[4]*Departament de Biologia, Sanitat i Medi Ambient (Universitat de Barcelona)*
[5]*Departament de Biologia, Sanitat i Medi Ambient (Universitat de Barcelona), Institut de Recerca de l'Aigua (Universitat de Barcelona)*
[6]*Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada (Universitat de Barcelona), Institut de Recerca de l'Aigua (Universitat de Barcelona)*

Palabras clave: humedales construidos, conductividad hidráulica, polarización inducida, prospección geofísica

Resumen. Las balsas de infiltración de flujo horizontal subsuperficial (FHS) constituyen una solución basada en la naturaleza y en el subsuelo ampliamente utilizada para el tratamiento de aguas residuales de un modo sostenible. Su principal limitación operativa es la colmatación (clogging), fenómeno que implica la reducción del espacio poroso del medio por presencia de partículas orgánicas, inorgánicas y/o formación de biofilm, que reduce la porosidad efectiva y la conductividad hidráulica (Ksat), generando flujos preferentes y pérdida de eficacia del sistema. En este estudio se evalúan tres metodologías no invasivas y complementarias para diagnosticar el estado de colmatación de un sistema de humedales construidos para 2000 habitantes equivalentes: (i) cálculo de Ksat mediante sensores de presión instalados en piezómetros; (ii) modelización geofísica mediante polarización inducida en dominio del tiempo (TDIP) y obtención de la cargabilidad normalizada (Mn); y (iii) cuantificación de proteínas de sustancias poliméricas extracelulares (EPSs) como indicador de actividad biológica y desarrollo de biofilm. Los resultados muestran un gradiente espacial coherente entre las tres aproximaciones. La Ksat presenta valores mayores en las zonas más alejadas del eje de entrada del agua (≈480–830 m/d), intermedios en

la zona central (≈460 m/d) y significativamente menores en los piezómetros próximos al punto de ingreso (≈310–350 m/d), reflejando un incremento del grado de colmatación a medida que el agua avanza a través de la balsa. Además, se observa una tendencia temporal decreciente de Ksat, con reducciones de hasta 300–350 m/d entre campañas en sensores clave, coherente con un aumento progresivo de la colmatación del medio poroso. Los modelos geofísicos derivados de la TDIP permiten identificar patrones espaciales de Mn asociados a zonas de mayor o menor colmatación. Se ha obtenido una correlación directa entre Mn y el porcentaje de material de tamaño de grano fino determinado experimentalmente, que permite estimar el nivel de colmatación a partir de los datos geofísicos. Los mayores valores de Mn se concentran en el centro de la balsa y, a partir de 50 cm de profundidad, formando una banda continua paralela al eje hidráulico e indicando también una acumulación progresiva de material colmatante. Por otro lado, el análisis de EPSs muestra concentraciones máximas en sedimentos (≈28,7 μg/g) y valores menores en gravas (≈6,4 μg/g), con un patrón espacial claramente asociado a zonas con evidencias de mayor colmatación superficial y más cercanas al eje de entrada del agua. Aunque los modelos lineales EPSs–Mn–redox presentan significancia estadística, la relación es no lineal y con alto componente residual, reflejando la complejidad del crecimiento del biofilm y su interacción con el flujo.La integración de Ksat, Mn y EPSs confirma que las tres metodologías son coherentes y complementarias para poder desarrollar protocolos de diagnóstico preventivo de colmatación y optimizar las tareas correctivas en la gestión de humedales construidos: los sensores piezométricos permiten un diagnóstico continuo y automatizable del estado global de la balsa; la polarización inducida proporciona un diagnóstico espacial detallado de las zonas con mayor colmatación; y los EPSs aportan evidencia directa del desarrollo biológico asociado al bioclogging.

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada por la ayuda PID2022-137467OB-I00 del programa «Proyectos de Generación de Conocimiento», financiado por MICIU/AEI y FEDER (UE), con el apoyo adicional de Global Omniun.

Dinámica estacional de múltiples mecanismos de recarga en cuencas mediterráneas montañosas: de la señal isotópica al flujo absoluto

Rayen Rivera Vidal[1], José Luis Arumí[1], Alejandra Stehr[1], Víctor Parra[1], Matías Taucare[2]

[1]*Universidad de Concepción*
[2]*Universidad de Chile*

Palabras clave: Recarga estacional, Modelo SWAT, MixSIAR, Recarga de montaña

Resumen. En las regiones mediterráneas con relieve montañoso, la recarga subterránea es el resultado de la interacción entre procesos atmosféricos, hidrológicos y antrópicos que varían marcadamente a lo largo del año. Aunque se reconoce el papel de la precipitación invernal, la infiltración desde ríos y los aportes cordilleranos en la recarga de acuíferos aluviales, la cuantificación conjunta y estacional de estos mecanismos sigue siendo un desafío metodológico. Este trabajo propone un enfoque integrado para estimar tanto las contribuciones relativas como los flujos absolutos asociados a tres mecanismos de recarga en una cuenca mediterránea andina de Chile central, con cabeceras que superan los 3.000 m s.n.m.

Se acopló un modelo hidrológico semi distribuido basado en procesos (SWAT) con análisis de isótopos estables del agua ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) y un modelo bayesiano de mezcla (MixSIAR). SWAT permitió estimar la recarga difusa mensual generada por precipitación directa, mientras que un balance hídrico agrícola independiente se utilizó para cuantificar los retornos de riego, los cuales se incorporaron como componente adicional de recarga difusa en las zonas agrícolas de la cuenca. MixSIAR permitió determinar las proporciones relativas de los tres mecanismos de recarga identificados isotópicamente: (i) recarga difusa asociada a precipitación local (ii) recarga focalizada derivada de pérdidas desde ríos y canales, y (iii) recarga de frente de montaña (MFR) asociada a aportes cordilleranos. La integración de ambos enfoques permitió traducir las proporciones relativas obtenidas mediante el modelo bayesiano de mezcla (MixSIAR) en flujos absolutos mensuales y estacionales, escalando las contribuciones de recarga focalizada y MFR respecto de la recarga difusa cuantificada por SWAT.

Los resultados muestran que la recarga total del acuífero aluvial varía entre ~8,5 y ~27,2 mm/mes en estación seca y lluviosa, respectivamente. Durante la temporada lluviosa (abril a septiembre), domina la recarga difusa (45 – 61 %), mientras que en los meses secos (octubre a marzo) prevalece la recarga focalizada asociada a cauces y canales de riego sin revestir (60 – 65 %). La recarga de frente de montaña aporta de manera estable entre 11 y 17 % a lo largo del año, evidenciando el rol persistente de la cordillera como fuente de agua subterránea. Los retornos de riego representan aproximadamente el 8 % de la recarga difusa total en el valle, con una contribución que varía espacialmente en función de la eficiencia del riego considerada en el balance agrícola.

La identificación y cuantificación diferenciada de estos mecanismos y su variación estacional permite comprender con mayor precisión cómo se configura el régimen estacional de recarga, no solo en términos de sus contribuciones relativas, sino también en cuanto a su magnitud efectiva dentro del balance hídrico del acuífero aluvial. Al vincular la señal isotópica con estimaciones volumétricas, el enfoque adoptado permite avanzar desde la atribución de fuentes hacia la cuantificación integrada de flujos. Este marco constituye una herramienta transferible para la evaluación de la recarga en sistemas mediterráneos con fuerte estacionalidad y presión antrópica, aportando criterios técnicos relevantes para la gestión del recurso subterráneo en cuencas con influencia hidrológica de montaña.

Agradecimientos: Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID - Chile)

Diseño de una red de sensorización hidrogeológica para la conservación de manantiales petrificantes en Orbaneja del Castillo (Burgos)

María Candela Ruiz[1], Sergio Raúl Durán-Laforet[2], Ana Martínez[2], Borja Villasante[2], Lorena Bermejo Santos [2]

[1]Amphos 21 Consulting S.L Carrer Pujades, 340. 08019 Barcelona (Barcelona)
[2]Amphos 21 Consulting S.L. Calle Raquel Meller, 7. 28029 Madrid (Madrid)

Palabras clave: Sistemas tobáceos, Patrimonio, Monitorización, Conservación

Resumen. Los sistemas tobáceos en la zona de Orbaneja del Castillo constituyen un enclave de gran valor natural, geológico y cultural, identificado como Hábitat de Interés Comunitario prioritario 7220 Manantiales petrificantes con formación de tuf (Cratoneurion). La fragilidad de estos sistemas impulsa la necesidad de conocer mejor su funcionamiento, identificar sus puntos vulnerables, y contar con una base técnica sólida para orientar su conservación y restauración. En este contexto, la protección del patrimonio no consiste solo en intervenir sobre elementos visibles, sino en entender el sistema en su conjunto, su dinámica hidrogeológica, y su relación con el paisaje y con la ocupación humana actual e histórica.

El gran edificio tobáceo de cascada activo de Orbaneja del Castillo, situado entre la Cueva del Agua y el fondo del valle, presenta una organización compleja en la que se suceden una serie de cascadas, pozas, cursos naturales y tramos canalizados, resultando en una morfología estrechamente ligada a la dinámica natural y al desarrollo histórico de la población. El trabajo llevado a cabo permitió delimitar nueve unidades principales (definidas por criterios de homogeneidad geomorfológica, hidrogeológica y funcional), algunas subdivididas internamente, reflejando la marcada heterogeneidad funcional del sistema. La valoración cuantitativa del estado de estas unidades se basó en una metodología multicriterio aplicada en campo, considerando integridad geomorfológica, funcionamiento hidrogeológico, procesos activos, impacto antrópico y reversibilidad, con mayor peso asignado al funcionamiento hidrogeológico por su papel central en la dinámica natural de los edificios tobáceos. También permitió reconocer el carácter excepcional del enclave, no solo por la magnitud y actividad

de los edificios tobáceos, sino por su estrecha vinculación con la identidad del lugar, el asentamiento histórico y los usos tradicionales del agua.

Los resultados muestran que el edificio tobáceo de Orbaneja del Castillo conserva sectores de alto interés geomorfológico e hidrogeológico, pero también una fragmentación funcional relevante. La cartografía de zonificación permitió representar espacialmente esta heterogeneidad e identificar sectores bien conservados, áreas susceptibles de mejora y tramos críticos, no solo como un mapa de impactos visibles, sino como una lectura del grado en que cada unidad mantiene su funcionamiento natural esperado. Estos resultados aportan una base objetiva para priorizar actuaciones de gestión, restauración y seguimiento, así como para diseñar una red de instrumentación dedicada a la medición de caudal, nivel, temperatura, pH, conductividad eléctrica, potencial redox y alcalinidad, además de una estación meteorológica. En conjunto, el estudio demuestra la utilidad de integrar observación de campo, valoración cuantitativa y SIG para gestionar de forma más eficaz un patrimonio natural y cultural singular, conciliando conservación, restauración y uso público responsable.

Las principales conclusiones de este estudio ponen de manifiesto la importancia de disponer de una base científica sólida que considere la vulnerabilidad intrínseca de los sistemas kársticos para gestionar un espacio de alto valor patrimonial. La red de sensorización permite fundamentar la toma de decisiones en registros sistemáticos, conciliando la conservación y restauración de los manantiales petrificantes con un disfrute público responsable, promoviendo así una protección integrada del patrimonio natural y cultural.

Dispersion on laminar and turbulent network flow

Tobias Grundhöfer[1], Marco Dentz[1], Jannes Jannes Kordilla[1]

[1]*Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IDAEA-CSIC), Barcelona, España*

Resumen. Los acuíferos kársticos son sistemas altamente dinámicos y heterogéneos, donde los solutos pueden desplazarse rápidamente a través de redes de conductos, mientras parte de la masa contaminante queda retenida en zonas inmóviles. Esta estructura multiescalar genera procesos de transporte complejos y curvas de avance con colas prolongadas, lo que dificulta una predicción precisa de la dispersión y complica la evaluación de riesgos de contaminación y eventos extremos. En este trabajo se simula el flujo en redes kársticas sintéticas y en el sistema real de la Seefeldhöhle (Suiza) mediante un solucionador laplaciano basado en grafos, capaz de representar condiciones laminares y turbulentas. El transporte de solutos se modela con un enfoque de seguimiento de partículas mediante Caminatas Aleatorias en el Dominio del Tiempo (TDRW). Se analiza el papel de la mezcla en las intersecciones de conductos aplicando reglas de mezcla completa y de enrutamiento por líneas de corriente para evaluar su influencia en la dispersión longitudinal y transversal. La caracterización del transporte combina distribuciones del tiempo de primer paso, mapas de visita de partículas y momentos espaciales. Las series de velocidades lagrangianas se analizan mediante cópulas de velocidad para cuantificar correlaciones e intermitencia. Los resultados muestran que los procesos locales de mezcla modifican los patrones de dispersión en detalle, pero las métricas globales como las curvas de avance y los momentos espaciales son poco sensibles a estas variaciones. Esto sugiere que ciertos aspectos de la estructura de red y de la dinámica de flujo dominan el comportamiento de transporte a gran escala.

Estos hallazgos sientan las bases para desarrollar un enfoque de escalamiento multiescalar basado en Caminatas Aleatorias en Tiempo Continuo (CTRW), que conecte las estadísticas de velocidad a escala de conducto con la dinámica de transporte emergente a escala de red, mejorando la predicción del comportamiento de contaminantes y la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos kársticos complejos.

Agradecimientos: Financiado por la Unión Europea (ERC, KARST, 101071836)

Doñana: evolución histórica y situación actual

Victor Juan Cifuentes Sánchez[1]

[1]*Confederación Hidrográfica del Guadalquivir*

Palabras clave: Doñana, Presion humana, Cambio global, Evolución y situación.

Resumen. Doñana es una de las zonas húmedas más importantes de Europa. Su paisaje más peculiar y característico es la marisma, una extensa llanura arcillosa que se inunda y deseca anualmente. Entre la marisma y la costa se sitúa una franja de distintas variedades de monte mediterráneo con numerosas lagunas dispersas, y a continuación varias líneas de dunas y finalmente las playas. El Parque Nacional de Doñana constituye el núcleo de un espacio único, rodeado por una valiosa zona periférica.

Este conjunto ha experimentado importantes cambios en las últimas décadas, impulsado por fuerzas motrices en último término antrópicas. Podemos distinguir entre:

- Debidas a la actividad sobre el territorio

o Agricultura: debidas al Plan Almonte-Marismas, que pretendía poner en riego 20.000 ha con aguas subterráneas. Aunque incompleto, representa la mayor amenaza para Doñana, no solo por las extracciones sino por la situación de asedio sobre el espacio natural, rodeado de un cinturón de agricultura superintensiva.

o Turismo: concentrado casi exclusivamente en Matalascañas, es una fracción muy pequeña del total, pero en una zona especialmente sensible.

- Debidas al cambio global inducido por el cambio climático. El periodo 1970/2011 tiene una media de precipitación de 564 mm, mientras que el 2012-2025 solo 450 mm. Es un periodo seco muy largo, con cambios cuasi estructurales, especialmente en un contexto de gran incremento de la temperatura.

Efectos sobre las masas de agua:

- Subterránea: descenso generalizado y creciente de los niveles piezométricos, especialmente acusado en una franja de orientación Suroeste-Noreste y de 5 a 10 km de anchura que bordea los límites del Parque Nacional y dos profundos conos de depresión en sus extremos. Afectan a amplias zonas del Espacio Natural Doñana e incluso a las limítrofes del Parque Nacional, con disminución de caudales en arroyos que se han convertido en perdedores y

dificultades crecientes de la vegetación para acceder al nivel freático. Esta situación ha motivado la declaración como en riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo de tres de las cinco masas de agua subterráneas y la consiguiente formación de Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas.

- Superficial: cauces: El desvío directo del Guadiamar al estuario ha supuesto la destrucción física de su antigua conexión con la marisma a través del Caño Guadiamar, privándola de más de la mitad de su aportación. Su sustitución por un importante conjunto de agricultura intensiva es un hecho consolidado y casi imposible de revertir, aunque caben medidas de mitigación. En los cauces menores, ahora los mayores aportadores a la marisma, también hay cambios. El Arroyo de la Rocina muestra una disminución de 500 l/s. En cuanto a los sistemas lénticos, su situación parece acoplada a la meteorología, con matices. La marisma responde a una dinámica anual. El caso de las lagunas peridunares de Doñana es más complejo, con un hidroperiodo de memoria más larga, como corresponde a un sistema de aguas subterráneas. Además, en el extremo Oeste hay otro factor: los bombeos de Matalascañas han desecado ya dos importantes lagunas (Brezo y Charco del Toro), alterado gravemente otra (Zahillo) y provocan signos evidentes de deterioro en otra (Taraje). En el resto no se observan cambios achacables a las extracciones.

- El vigente plan hidrológico prevé un conjunto de inversiones por valor de más de 350 M€ para revertir esta situación.

Efectos de la capilaridad y la heterogeneidad hidráulica en el fujo subterráneo saturado-no saturado

Patricio Hernández-Parra[1], Vanessa A. Godoy[1], Rafael Magnabosco[1], Pedro Assunção[2], J. Jaime Gómez-Hernández[1]

[1]*Instituto de Ingenieria del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València*
[2]*Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais*

Palabras clave: Zona vadosa, Modelación numérica, Simulación Monte Carlo

Resumen. La caracterización del flujo subterráneo saturado–no saturado en medios heterogéneos es esencial para comprender la dinámica de los acuíferos libres y el transporte de contaminantes. Sin embargo, en la práctica sigue siendo habitual emplear modelos saturados como MODFLOW-NWT, en los que la zona no saturada y los efectos de la capilaridad no se representan explícitamente, lo que puede introducir errores conceptuales y cuantitativos en este tipo de problemas. En este trabajo analizamos hasta qué punto la capilaridad y la heterogeneidad hidráulica condicionan las diferencias entre un modelo saturado de superficie libre en MODFLOW-NWT y un modelo de flujo de Richards en OpenGeoSys (OGS) en un escenario de flujo saturado–no saturado.

El experimento numérico consiste en liberar un volumen finito de agua en una fracción del dominio, representado como un pulso inicialmente saturado situado dentro de una matriz seca, y seguir su redistribución gravitacional y capilar en un dominio cerrado. Ambos modelos comparten la misma geometría, las mismas propiedades hidráulicas y la misma condición inicial, de manera que cualquier diferencia en la evolución del flujo se debe a las hipótesis físicas (flujo saturado con superficie libre frente a solución de Richards con curva de retención de Van Genuchten). Para representar la heterogeneidad, se generan campos de log conductividad mediante simulación multi gaussiana y mediante realizaciones no gaussianas construidas con el código EROSIM, que combina superficies erosivas y facies sedimentarias estratificadas más realistas. En cada escenario se simulan múltiples realizaciones independientes, con el fin de capturar la variabilidad inducida por la estructura de la heterogeneidad. Cada realización se asigna de forma consistente a las mallas de MODFLOW y OGS, garantizando una comparación entre ambas aproximaciones numéricas.

La comparación se basa en métricas que van más allá de la posición del frente. Utilizando la evolución del nivel freático en MODFLOW y la superficie de presión nula y los campos de saturación en OGS, se cuantifican las diferencias en la posición y la forma del frente de flujo, el reparto volumétrico entre las zonas seca, vadosa y saturada, y la aparición de rutas de flujo preferente. Estas métricas permiten observar la discrepancia asociada a la ausencia de una zona no saturada en un modelo saturado.

Los resultados preliminares en medios homogéneos muestran que la inclusión explícita de la capilaridad mediante la ecuación de Richards modifica de forma apreciable la redistribución del pulso y el almacenamiento en la zona vadosa frente al enfoque puramente saturado. Se espera que, al introducir campos heterogéneos multi gaussianos y no gaussianos, y considerar conjuntos de realizaciones para cada caso, estos efectos se vean reforzados y se observen patrones de flujo preferente y diferencias adicionales en la evolución del frente.

Agradecimientos: Patricio Hernández-Parra agradece el apoyo financiero de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Chile, a través de Becas Chile N.º 72230124 (Beca de Doctorado en el Extranjero, Convocatoria 2023).

Efectos de la heterogeneidad estratificada en la geometría de los lentes de agua dulce y en los procesos de ascenso salino por bombeo en acuíferos insulares

Nathalia Tinjacá Jiménez[1], Javier Rodrigo Ilarri[1], María Elena Rodrigo Clavero[1]

[1]*Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente IIAMA, Universitat Politècnica de València*

Palabras clave: Lente de agua dulce, Upconing, Sandbox, Modelo numérico

Resumen. Los acuíferos insulares y costeros constituyen sistemas altamente vulnerables donde las lentes de agua dulce representan, en muchos casos, la principal fuente de abastecimiento. La comprensión de los procesos de interacción agua dulce–agua salada es fundamental para evaluar la sostenibilidad de estos sistemas frente a cambios en la recarga y a la explotación mediante bombeo. En este contexto, el presente estudio analiza la influencia de la heterogeneidad estratificada en la formación de lentes de agua dulce y en los procesos de ascenso de agua salina (upconing) inducidos por bombeo.

La investigación integra experimentos físicos a escala de laboratorio mediante modelos tipo sandbox, simulaciones numéricas de flujo subterráneo de densidad variable realizadas con FEFLOW 7.2 y la comparación con soluciones analíticas clásicas. Se evaluaron configuraciones de medios porosos homogéneos y heterogéneos estratificados con el fin de analizar las diferencias en la geometría de la lente de agua dulce y en la dinámica de la interfaz agua dulce–agua salada.

Los resultados muestran que, en condiciones homogéneas, la lente de agua dulce presenta una geometría aproximadamente parabólica y simétrica, en concordancia con las soluciones analíticas tradicionales. Sin embargo, en sistemas con heterogeneidad estratificada, la geometría de la lente se modifica significativamente, generando interfaces irregulares y asimétricas, así como una reducción en el espesor efectivo de la lente. Además, los experimentos y simulaciones realizadas evidencian que la estratificación intensifica el fenómeno de upconing durante el bombeo, favoreciendo un ascenso más localizado y pronunciado de la interfaz salina hacia el pozo.

Estos resultados evidencian las limitaciones de las aproximaciones analíticas en acuíferos estratificados y destacan la importancia de considerar explícitamente la heterogeneidad hidrogeológica en la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos costeros e insulares. El enfoque experimental–numérico propuesto proporciona una base robusta para mejorar las estrategias de gestión sostenible del agua subterránea en estos sistemas.

Efectos sinérgicos de la sequía extrema y las presiones antropogénicas en la calidad de los manantiales de la provincia de Barcelona

Patricia Sigoña León[1], Enric Vázquez-Suñé[1], Sonia Valdivielso[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), CSIC, Barcelona, España*

Palabras clave: Calidad del agua subterránea, Contaminación por nitratos, Sequía, Manantiales

Resumen. Con el objetivo de evaluar los efectos combinados de la sequía extrema y las presiones antropogénicas sobre la calidad del agua subterránea, este estudio analiza la evolución hidroquímica de 578 manantiales en la provincia de Barcelona (NE de España) durante el período 2016–2024, que incluye la sequía más severa registrada (2021–2023). Se analizaron un total de 3.543 muestras procedentes de estos manantiales, que actúan como puntos de descarga de los acuíferos, para la determinación de parámetros fisicoquímicos, hidroquímicos y mediciones de caudal de descarga.

Los resultados revelan una reducción del 25% en la concentración media de nitratos (de 39,82 a 29,84 mg/L), atribuible a los programas de actuación en zonas vulnerables en el marco de la Directiva 91/676/CEE. Sin embargo, la proporción de manantiales que superan el umbral de potabilidad (50 mg/L) permanece estable en torno al 24% del total monitoreado, lo que indica que, si bien la contaminación difusa disminuye en términos generales, persisten focos de contaminación estructural que no responden a las medidas de gestión convencionales. Espacialmente, las concentraciones elevadas de nitratos se agrupan en los sectores central y meridional de la provincia de Barcelona, coincidiendo con actividades agrícolas y ganaderas intensivas.

La caracterización hidroquímica confirma el predominio de acuíferos carbonatados, con un 61,2% de los manantiales presentando facies bicarbonatadas cálcicas. La evolución de facies entre 2023 y 2024 revela trayectorias diagnósticas: las transiciones de aguas bicarbonatadas cálcicas hacia facies sulfatadas indican contacto con formaciones evaporíticas, mientras que los desplazamientos hacia facies cloruradas señalan una presión antropogénica creciente en la Depresión Prelitoral y la Serralada Litoral, donde la ubicación

interior de los manantiales excluye la intrusión marina como origen del incremento de cloruros, reflejando una degradación sinérgica derivada de la concentración inducida por la sequía y la contaminación difusa.

El sistema muestra señales climáticas claras: un incremento de 0,5 °C en la temperatura media de los manantiales estudiados durante el período 2016–2024 y un aumento de la conductividad eléctrica consistente con la sequía severa. La reducción de la recarga disminuye la dilución natural y, al mismo tiempo, incrementa la contribución de flujos profundos más mineralizados. Esta sinergia entre el estrés hídrico y la contaminación preexistente amplifica la degradación más allá de lo que cualquiera de los dos factores produciría de forma independiente.

Estos hallazgos demuestran el valor de las redes de monitoreo de manantiales como complemento a la vigilancia oficial, proporcionando una mayor resolución espacial para la detección temprana de deterioros localizados. La vulnerabilidad diferencial de los acuíferos, con los sistemas porosos aluviales mostrando la mayor sensibilidad a la sequía y la contaminación, tiene implicaciones directas para la priorización de la protección en las zonas de recarga.

El agua subterránea como restricción biofísica en la toma de decisiones económicas: hallazgos preliminares de una revisión sistemática

Cesar Perez-Hurtado[2], Marijke Huysmans[1], Nora Van Cauwenbergh[3]

[1]*Department of Water and Climate (HYDR), Vrije Universiteit Brussel (VUB), Belgium*
[2]*Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible del Oriente Boliviano (CIDOR), Universidad Católica Boliviana San Pablo, Bolivia*
[3]*IHE-Delft Institute for Water Education, The Netherlands*

Palabras clave: Agua subterránea, Modelización hidroeconómica, Economía ecológica, Restricción biofísica

Resumen. El agua subterránea es esencial para la producción agrícola, el consumo humano y el funcionamiento de los ecosistemas; sin embargo, su representación en los marcos de decisión económica sigue siendo fragmentada e insuficiente. Esta comunicación presenta los hallazgos preliminares de una revisión sistemática que examina en qué medida el agua subterránea es operacionalizada como una restricción biofísica dentro de los modelos económicos existentes.

Se aplicó un protocolo de revisión informado estilo PRISMA, con 21 cadenas de búsqueda estructuradas en Scopus, organizadas en cuatro clústeres temáticos: marcos económicos conceptuales, enfoques de modelización económica del agua subterránea, mecanismos de gobernanza y asignación, e integración de datos biofísicos y espaciales. Tras eliminar 2.041 duplicados, se identificaron 13.313 estudios únicos. La aplicación de cinco criterios de selección —relevancia del agua subterránea, vinculación económica, estructura de modelización, representación como restricción e integración de datos espaciales— resultó en la inclusión de 387 estudios en la muestra analítica final. El corpus abarca casi seis décadas de producción académica, con estudios publicados entre 1967 y 2026, y una aceleración marcada en el volumen de publicaciones a partir de 2015.

Los resultados revelan una literatura estructuralmente fragmentada. Si bien el agua subterránea es ampliamente reconocida como un problema económico y ambiental crítico, solo un subconjunto limitado de estudios —concentrado principalmente en enfoques de modelización operacional (51% de los estudios incluidos)— la integra explícitamente en modelos económicos orientados a la

toma de decisiones. Entre los estudios incluidos, los modelos bioeconómicos e hidroeconómicos son los enfoques dominantes, y el agua subterránea es tratada con mayor frecuencia como un insumo implícito o una variable débilmente restringida, en lugar de un límite biofísico vinculante. Los procesos hidrológicos clave —en particular la recarga y las retroalimentaciones dinámicas— están frecuentemente ausentes o simplificados.

La revisión evidencia que el principal desafío no radica en la ausencia de enfoques de modelización capaces de representar las restricciones del agua subterránea, sino en su adopción desigual y limitada en los modelos de decisión económica. Se destaca la necesidad de marcos híbridos que integren datos biofísicos —incluidos los derivados de teledetección satelital como GRACE— con comportamiento económico y contexto institucional, permitiendo que el agua subterránea funcione como una forma de capital natural dinámicamente restrictiva en los sistemas de decisión.

Agradecimientos: Esta investigación se desarrolla en el marco del Proyecto CReA-UCB, Subproyecto 2: "Contribución a la Gestión Integral del Agua en Bolivia", financiado por la Comisión Interuniversitaria Flamenca para el Desarrollo (VLIR-UOS), en colaboración con la Universidad Católica Boliviana San Pablo (UCB) y la Vrije Universiteit Brussel (VUB).

El agua subterránea en la encrucijada: Una mirada a la crisis hídrica en Guanajuato, México

José Ramón Gómez García[1], Yeniffer Alexandra Camargo Bonilla[1]

[1]*Universidad de Guadalajara*

Palabras clave: agua subterránea, crisis hídrica, intensificación de la agricultura, ejidos

Resumen. El trabajo analiza la crisis hídrica del Bajío guanajuatense a partir del estudio de dos acuíferos locales: Salvatierra y Ciénega Prieta, donde se sitúan los ejidos más extensos de la región. En particular el ejido San Nicolás de los Agustinos, representativo de las problemáticas ambientales, socio productivas y políticas que afrontan los campesinos y productores.

Nuestro trabajo aborda el impacto diferencial de los nuevos regímenes de explotación del agua, a partir de un análisis de la gestión direccionada por el modelo descentralizador y mercantilizado de los recursos que abandera el neoliberalismo desde 1990. Se considera que la reproducción social del campesinado y su tejido agrario se ha transformado a partir de las nuevas formas de apropiación de sus territorios, y las narrativas existentes en torno a la escasez de agua.

La investigación deriva de la ecología política y hace uso de la categoría de territorios hidrosociales. Con base en entrevistas, recorridos de campo y sistematización de datos cuantitativos, se muestra la percepción de los regantes sobre el uso y aprovechamiento de las aguas subterráneas, los fenómenos de abatimiento y contaminación en vínculo con la producción intensiva de hortalizas durante las últimas décadas.

Los acuíferos mencionados registran un total de 1,032 pozos concesionados de forma legal, esto excluye muchos otros perforados en clandestinidad, el déficit presentado desde 1990 promedia los 50 millares de m^3 por año. La capacidad de recarga es muy inferior respecto a los niveles de extracción y la intensidad piezométrica del bombeo, con registros promedios de 1.3 a 2 metros de incremento mensual en profundidad del pozo, causando fenómenos de abatimiento, infiltración y choque de corrientes. Los inventarios de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) evidencian que los productores no han cumplido

con la normativa y que la profundidad media del nivel estático ha pasado de 30-60 metros en 1990 a 120-150 en 2025.

Los datos corroboran el grado de presión hídrica y la insostenibilidad en el manejo de los acuíferos y mantos del subsuelo. La región además de ocupar los tres primeros lugares a nivel nacional en materia de sobreexplotación se sitúa como zona de riesgo en lo que respecta a mitigación y recuperación, no sólo por los volúmenes empleados sino la intrusión de minerales y sales que contaminan el agua.

La importancia del análisis ha sido situar y problematizar los procesos de cambio y control en el acceso al agua subterránea a partir del desarrollo de la agroindustria durante el neoliberalismo, que derivó en una crisis hídrica a nivel local y regional. Dicha crisis se manifiesta en la extracción desmedida del agua, la escasez y vulnerabilidad social, vista desde la renta y disputa por el recurso. En la región y el ejido se pone en entredicho su disponibilidad en un corto plazo, aún más en un contexto de sequías y cambio climático.

El Aula de Hidrogeología en el campo como herramienta de aprendizaje basada en la resolución de problemas

Diana Puigserver[1], Josep Maria Carmona[2], Jofre Herrero[1], Alberto Millán[1]

[1]*Universitat de Barcelona*

Palabras clave: Docencia de Hidrogeología, Contaminación de aguas subterráneas, Compuestos orgánicos más densos que el agua

Resumen. La enseñanza universitaria en Hidrogeología requiere integrar conocimientos científico-técnicos con el desarrollo de competencias profesionales y transversales, en línea con el modelo formativo del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES). En este contexto, las metodologías activas basadas en la resolución de problemas y el aprendizaje experiencial constituyen estrategias particularmente adecuadas para aproximar al alumnado a la práctica profesional. El uso de zonas experimentales asociadas a proyectos de investigación permite situar el proceso de aprendizaje en entornos reales, favoreciendo la adquisición de conocimientos y habilidades mediante la integración de actividades de campo, laboratorio y gabinete.

Desde el curso 2008-2009 se ha implementado un Aula de Hidrogeología en una zona experimental previamente caracterizada por la Agencia Catalana del Agua y por el grupo de investigación en Hidrogeología Ambiental y Cambio Global de la Universidad de Barcelona. El área ha sido objeto de diversos proyectos de investigación centrados en la caracterización de episodios de contaminación de suelos y aguas subterráneas por compuestos DNAPL en un sistema acuífero de la comarca de Osona (Cataluña, España). La disponibilidad de infraestructura de monitorización y de información hidrogeológica previa permite diseñar actividades docentes orientadas a la resolución de un problema real: el diagnóstico del estado cuantitativo y cualitativo del sistema acuífero y la evaluación de su vulnerabilidad frente a procesos de contaminación.

Las actividades se estructuran en tres bloques complementarios. El primero se centra en la caracterización hidráulica del sistema mediante medición de niveles piezométricos, realización de ensayos de campo para la estimación de parámetros hidráulicos y de transporte de solutos, y análisis de la interacción entre aguas subterráneas y superficiales. El segundo bloque incluye el muestreo de aguas en

piezómetros, la determinación in situ de parámetros fisicoquímicos y la realización de análisis semicuantitativos en laboratorio. Finalmente, el tercer bloque se orienta a la integración de la información obtenida para la elaboración de un modelo conceptual de flujo y transporte y la interpretación de los procesos de contaminación presentes en el sistema.

Desde el punto de vista metodológico, la actividad se basa en el aprendizaje cooperativo y en la rotación de equipos de trabajo, de modo que todos los estudiantes participan en las distintas tareas de campo, laboratorio e interpretación de datos. El proceso culmina con la elaboración de un informe técnico en el que los estudiantes sintetizan los resultados obtenidos y proponen interpretaciones y posibles estrategias de gestión. Este enfoque fomenta la reflexión crítica, la comunicación científica y la toma de decisiones fundamentadas en datos, reproduciendo dinámicas propias del ejercicio profesional en hidrogeología.

Los resultados obtenidos a lo largo de los distintos cursos muestran que el Aula de Hidrogeología constituye una herramienta eficaz para la adquisición de competencias específicas, como la interpretación integrada de datos hidrogeológicos, la elaboración de modelos conceptuales y el análisis de episodios de contaminación en acuíferos. Asimismo, favorece el desarrollo de competencias transversales, entre ellas el trabajo en equipo, la planificación de actividades, la autogestión del aprendizaje y la resolución de problemas complejos en contextos reales. La experiencia también incrementa la motivación y la implicación del alumnado, al situar el aprendizaje en escenarios reales donde la heterogeneidad del medio hidrogeológico pone de manifiesto la necesidad de integrar teoría y práctica.

En conjunto, esta experiencia docente evidencia que la incorporación de zonas experimentales en la formación en Hidrogeología constituye una estrategia de innovación educativa eficaz para el desarrollo de profesionales capaces de abordar los retos asociados a la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos y a la mitigación de impactos ambientales.

El reto de los nitratos en las aguas subterráneas y superficiales en Catalunya: del diagnóstico hidrogeológico a las soluciones basadas en la naturaleza

Núria Micola Colomer[1], Teresa Garrido Martín[1], Mireia Iglesias Carrera[1], Carolina Solà Ortega[1], Anna Terrats Riera[1], Josep Fraile[1]

[1]*Agència Catalana de l'Aigua*

Palabras clave: nitratos, mitigación, SBN, contaminación difusa

Resumen. En esta comunicación se presenta la evolución de los trabajos desarrollados por la administración hidráulica de Catalunya en relación con la problemática de los nitratos en las aguas subterráneas y superficiales, desde la caracterización química inicial, pasando por la determinación del origen mediante técnicas avanzadas, hasta la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza ante la persistencia del problema.

La elevada concentración de nitratos, mayoritariamente de origen agrario, se mantiene como el problema de calidad del agua subterránea más extenso y persistente en todo el territorio de Catalunya. Esta contaminación difusa condiciona de manera significativa la posibilidad de alcanzar el buen estado en un porcentaje importante de masas de agua, tanto subterráneas (35%) como superficiales (11%), lo que, a la vez, limita su uso para el abastecimiento humano.

La protección de determinadas áreas mediante la figura de las Zonas Vulnerables y de acuerdo con la Directiva de Nitratos 91/676/CEE actualmente alcanza el 40% de la superficie total de Catalunya y el 49% de sus municipios.

En este contexto, y junto con los programas de seguimiento y control del medio, la ACA impulsa la mejora del conocimiento de la contaminación por nitratos a través de su Programa de Medidas (2022-2027), que incluye capítulos específicos destinados a la mitigación de la contaminación y la caracterización del origen de los nitratos.

Con este propósito, y en colaboración con centros de investigación y consultorías especializadas, la ACA ha desarrollado metodologías avanzadas que integran la caracterización hidrológica e hidrogeológica con herramientas multi-isotópicas, el

uso de trazadores microbiológicos basados en microbiología molecular cuantitativa y un análisis detallado de las presiones existentes en el medio. Esta aproximación multidisciplinar permite discriminar las fuentes de nitrato y proporciona la base científico-técnica necesaria para la delimitación robusta de zonas vulnerables y la planificación de medidas de gestión más eficientes.

Hasta la fecha, la ACA ha aplicado esta metodología en tres proyectos. Entre 2016 y 2018 se ejecutaron trabajos en nueve áreas de estudio, con un total de 205 muestras de aguas subterráneas, superficiales y efluentes de depuradoras urbanas. Posteriormente, en 2021 y juntamente con el Departamento de Agricultura, se analizaron ocho cuencas hidrográficas, en el marco de un proyecto orientado al seguimiento del medio hídrico y de las prácticas agrícolas y ganaderas. Actualmente, se está desarrollando un estudio a escala regional que integra 200 puntos de control distribuidos en los principales acuíferos, cuencas hidrográficas y zonas vulnerables, con el fin de evaluar patrones espaciales y temporales de contaminación por nitratos.

En el proyecto inicial los resultados indicaron que, en el caso de las aguas subterráneas, las causas predominantes eran la contaminación difusa (56%) y la difusa combinada con afecciones puntuales (17%). En cuanto al origen, fue mayoritariamente de tipo inorgánico (41%) y orgánico (34%) en las muestras seleccionadas para este estudio. En las aguas superficiales, las causas mayoritarias fueron la contaminación difusa y puntual (39%) y la puntual exclusivamente (31%), mientras que el origen principal era de tipo orgánico (64%). Esta información constituyó la base científico-técnica para cumplir con los requerimientos de la Directiva de Nitratos (Orden TES/80/2021).

En la actualidad, la estrategia metodológica ha evolucionado desde la fase de diagnóstico hacia la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, orientadas a evaluar la capacidad de determinados ecosistemas para atenuar la contaminación nitrogenada. Esta nueva línea incorpora la participación del sector agrario para valorar la viabilidad técnica y operativa de las actuaciones propuestas. Así, la combinación de conocimiento hidrogeológico, restauración ecológica y gobernanza participativa se presenta como una herramienta clave para mitigar progresivamente el exceso de nitratos en los sistemas hídricos, de forma complementaria a la mejora de las prácticas agrícolas.

En conclusión, la experiencia acumulada en Cataluña ofrece un marco metodológico sólido que puede ser de referencia para otros territorios con problemáticas similares, contribuyendo al diseño de estrategias eficaces orientadas a la mejora de la calidad de las aguas.

Ensayos de columna para evaluar la eliminación de contaminantes biológicos y orgánicos emergentes en sistemas suelo–acuífero con barreras reactivas

Paula Andrea Benzid [1], Paola Sepúlveda-Ruiz[3], Cristina García Aljaro[4], Juan Cruz Carrizo[2], Silvia Díaz-Cruz[2], Jesús Carrera[5], Lurdes Martínez-Landa[5], Cristina Valhondo[6], Melissa Faria[2]

[1]*Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC), Barcelona, España – Departamento de Biología, Sanidad y Medio Ambiente, Facultad de Farmacia y Ciencias de la Alimentación, Universidad de Barcelona, Barcelona, España*
[2]*Institute of Environmental Assessment and Water Research, IDAEA-CSIC*
[3]*Departamento de biologia, sanidad y medio ambiente, Facultad de Farmacia y Ciencias de la Alimentación. Universidad de Barcelona*
[4]*Departament de Genètica, Microbiologia i Estadística, Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona*
[5]*Dept. Ingeniería Civil y Ambiental (UPC) – Unidad asociada: Grupo de Hidrogeología (UPC-CSIC)*
[6]*Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC), Barcelona, España – Unidad asociada: Grupo de Hidrogeología (UPC-CSIC), Barcelona, España*

Palabras clave: Recarga gestionada de acuíferos, Genes de resitencia a antibióticos, Contaminantes orgánicos emergentes, Calidad del agua

Resumen. El tratamiento suelo–acuífero (SAT) constituye una tecnología basada en procesos naturales que permite incrementar los recursos de agua subterránea y mejorar la calidad del agua infiltrada a través del terreno. En los sistemas de recarga gestionada de acuíferos (MAR), el agua utilizada suele estar influenciada por efluentes de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), por lo que puede contener mezclas complejas de contaminantes químicos y biológicos. Entre las principales limitaciones para la aplicación generalizada de esta tecnología destaca el riesgo potencial de transferencia de patógenos, indicadores microbiológicos y genes de resistencia a antibióticos hacia las aguas subterráneas.

En este estudio se evaluó, mediante ensayos de columna, la capacidad de sistemas SAT para eliminar contaminantes biológicos presentes en efluente secundario de EDAR, así como el efecto de la incorporación de barreras reactivas basadas en sustratos orgánicos. Para ello se utilizaron seis columnas de laboratorio: tres rellenas únicamente con arena y tres con un material reactivo compuesto por arena, virutas de madera, compost y arcilla.

El experimento se desarrolló en dos fases. En la fase I, las columnas se alimentaron durante cinco semanas con efluente secundario procedente de la EDAR de Sant Feliu de Llobregat (Barcelona). Se monitorizaron parámetros fisicoquímicos, contaminantes orgánicos emergentes (CECs) e indicadores microbiológicos, incluyendo Escherichia coli (cultivable y molecular), colífagos somáticos, esporas de Clostridium reductores de sulfito y los genes de resistencia a antibióticos blaTEM, sul1 y tetW, mediante técnicas de cultivo y PCR cuantitativa. En la fase II se simularon eventos extremos mediante cambios bruscos en la conductividad del influente (agua bidestilada y agua salina) con el objetivo de evaluar la resiliencia del sistema.

Los resultados muestran reducciones significativas tanto de CECs como de indicadores microbiológicos a lo largo de las columnas, especialmente en aquellas que incorporan barreras reactivas. Sin embargo, las variaciones abruptas en la conductividad favorecieron la movilización de contaminantes previamente retenidos, reduciendo temporalmente la eficiencia del sistema. Estos resultados evidencian el potencial de los sistemas SAT con barreras reactivas como tratamiento terciario para la mejora de la calidad del agua regenerada, y destacan la importancia de considerar la variabilidad hidroquímica en el diseño y la gestión de estos sistemas.

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) proyecto CONMIMO (TED2021-131188B-C31), proyecto "Sinergia SAFE", el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU), la AEI, y la Unión Europea mediante el programa NextGenerationEU/PRTR, en el marco del programa RyC2023 MICIU/AEI (10.13039/501100011033)

Ensayos piloto para la optimización de la estrategia de biorremediación de un emplazamiento multifoco impactado por etenos clorados

Natàlia Blázquez-Pallí[1], Clara Torrentó[2], Ernest Marco-Urrea[3], David Garriga[1], Marta González[1], Marçal Bosch[1]

[1]*Litoclean, S.L.*
[2]*Grup MAiMA, Universitat de Barcelona*
[3]*Grup BioremUAB, Universitat Autònoma de Barcelona*

Palabras clave: bioestimulación, etenos clorados, reducción química in situ, Contaminación aguas subterráneas

Resumen. El acuífero somero de un emplazamiento industrial se encuentra gravemente contaminado con etenos clorados, observándose una acumulación de cis-1,2-dicloroetileno (cis-DCE). A partir de estudios previos, se identificaron dos plumas de contaminación diferenciadas, una norte y otra sur, y se caracterizó la conectividad entre los acuíferos somero y profundo. Para dar solución a esta problemática de contaminación ambiental, se realizaron estudios de tratabilidad en laboratorio y pruebas piloto in situ para definir la mejor estrategia de remediación. Para ello se utilizaron varias metodologías, entre ellas 1) la adquisición de datos hidrogeoquímicos; 2) experimentos de microcosmos a partir de muestras de agua subterránea; 3) técnicas moleculares (qPCR y metabarcoding), y 4) análisis de isótopos estables de carbono (δ13C) y cloro (δ37Cl). Si bien se investigaron las tecnologías de oxidación química (ISCO), reducción química (ISCR) y biorremediación mejorada (bioestimulación) para transformar los contaminantes en productos finales no tóxicos, los microcosmos confirmaron la viabilidad de un tratamiento de bioestimulación con sustratos orgánicos fermentables en el acuífero somero, tanto en las plumas norte como sur. Esto también se confirmó mediante qPCR con cebadores dirigidos al ARNr 16S de Dehalococcoides sp. y Dehalogenimonas sp., y a los genes de las deshalogenasas reductoras tceA, vcrA y bvcA. Para el acuífero profundo, los resultados del laboratorio sugirieron la implementación de una estrategia combinada de bioestimulación e ISCR. Por consiguiente, se implementaron tres pruebas piloto in situ: dos de bioestimulación en las plumas norte y sur, dirigidas

al acuífero superficial, y un ensayo combinado para el acuífero profundo. El seguimiento y monitoreo de todos los ensayos in situ se realizó mediante una metodología integrativa (análisis hidroquímico, molecular y de isótopos estables). En dos de los tres ensayos realizados se logró la decloración completa a eteno, evidenciado por los análisis hidroquímicos y moleculares, y el cálculo de los balances de masa de los isótopos de carbono. La decloración completa de los etenos clorados estuvo acompañada por un cambio en las poblaciones microbianas, de bacterias aeróbicas a fermentadoras. En la prueba piloto combinada de bioestimulación e ISCR, que consistió en la inyección de un sustrato orgánico fermentable y hierro cero valente (ZVI), tanto las vías bióticas como las abióticas contribuyeron a la producción de eteno. Por lo tanto, la metodología integrada utilizada en este estudio resultó ser una herramienta útil para determinar que la bioestimulación es una estrategia válida para la remediación de ambos acuíferos impactados en este emplazamiento, y que podría mejorarse con ZVI en los posibles casos en que la biodegradación por sí sola no fuera eficiente o estuviera ausente.

El proyecto de investigación previo a este estudio se presentó en el congreso CIAS 2024 y el proyecto de remediación derivado de estos ensayos se presentará también como resumen en esta conferencia CIAS 2026, en este caso para una presentación oral.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por los proyectos PID2022-138929OB-I00 y PID2022-139911OB-C4-1, ambos subvencionados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER/UE «A way of making Europe».

Estado químico del acuífero principal del delta del Llobregat en el ámbito de la barrera hidráulica contra la intrusión salina

Esther Garcia Falcó[1]

[1]*Comunitat d'Usuaris d'Aigües de la Vall Baixa i Delta del Llobregat (CUADLL)*

Resumen. El acuífero profundo del Delta del Llobregat forma parte de la Masa de Agua Subterránea 39 (Valle Bajo y Delta del Llobregat). Según el Pla de Gestió de Districte de Conca Fluvial de Catalunya (PGDCFC), esta masa de agua se encuentra en mal estado químico y cuantitativo. Uno de los problemas principales en el ámbito que provoca este mal estado de las aguas subterráneas es la presencia de una avanzada cuña de intrusión marina.

Para hacer frente a esta cuestión, la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) diseñó y construyó el año 2006-2007, la primera fase de una infraestructura basada en cuatro pozos situados en la parte costera del delta del Llobregat en los que se inyecta una mezcla de agua regenerada de la Estación regeneradora de agua (ERA) del Prat de Llobregat y agua potable. Posteriormente, en 2009 se construyó la segunda fase con once pozos más y una capacidad de suministro de agua regenerada de hasta 15000 m^3/día. En el 2011, se paró la inyección en los pozos hasta el 2020 que se reactivó de nuevo. Durante la sequía 2023-2025, debido al descenso del nivel freático en el acuífero profundo, el volumen de recarga fue superior, alcanzando los 2 hm^3 inyectados en el 2024. Este 2025, con la recuperación de los niveles, el volumen inyectado ha sido menor.

Después de varios años de funcionamiento y después de la sequía más intensa desde que hay registro instrumental, se ha realizado una valoración cualitativa del agua del acuífero mediante los resultados analíticos de muestras tomadas en distintos puntos del delta durante el 2025 y se ha comparado con los resultados disponibles de años anteriores (desde principios de los 2000 hasta la actualidad). En esta valoración, se han tenido en cuenta los parámetros que definen el mal estado de la masa de agua y otros parámetros que se han detectado con concentraciones significativas. Los aspectos a destacar son:

- En relación con la salinidad, en el delta existen tres zonas principales de entrada de agua marina: la Zona Franca, la zona de la Bunyola (el Prat de Llobregat), y la zona costera entre Gavà y Castelldefels. Desde principios de los 2000, se ha observado una tendencia similar en todos los puntos de observación

en cuanto cloruros, ya que hay un descenso general de las concentraciones en el año 2009 coincidiendo con el funcionamiento de la barrera hidráulica, y un posterior ascenso gradual des del 2011 debido a la parada de la inyección. A partir del 2020, que se reprende la actividad, se detecta una mejora de las concentraciones de nuevo, aunque en algunos puntos no hay mejoría debido a la sequía. Este 2025 se ha observado un aumento de las concentraciones de cloruros y sulfatos en las zonas de entrada de agua marina respecto el año anterior, especialmente en la zona del puerto de Barcelona. Sin embargo, existe una mejora de los valores de cloruros en el polígono Pratense y parte de la Zona Franca, donde se encuentra situada la Barrera hidráulica. En esta zona se ha observado finalmente el contacto entre las plumas de inyección de algunos pozos vecinos que conforman esta infraestructura.

- Se han detectado concentraciones elevadas de nitrato en la zona de la barrera hidráulica, probablemente proveniente de las aguas inyectadas. También en las zonas de margen, por pérdidas en la red de saneamiento, y en algún punto de la zona central agrícola entre el Prat de Llobregat i Sant Boi. En cambio, debido a que el amonio se encuentra en condiciones reductoras favorables, éste se detecta a lo largo de toda la zona costera, especialmente en el margen izquierdo (Zona Franca y Puerto de Barcelona).
- Se detectan distintos metales en el ámbito del delta, especialmente hierro, manganeso, arsénico y zinc. El hierro y el manganeso se localizan de forma generalizada en el delta, aunque especialmente en la zona costera por sus condiciones confinadas y anóxicas naturales que favorecen la presencia de estos elementos. El arsénico se ha observado en la costa, donde el acuífero es más profundo y tiene condiciones reductoras superiores. También se han detectado concentraciones de zinc en la parte central del delta y en tres pozos de la barrera hidráulica.
- En la zona central del delta, de Viladecans a Hospitalet, se han detectado concentraciones de diferentes compuestos orgánicos volátiles, halogenados y aditivos de la gasolina. En uno de los piezómetros de control de la barrera hidráulica situado en la Zona Franca, cerca de la Ronda Litoral, se han detectado concentraciones elevadas de c-1,2-Dicloroeteno, cloruro de vinilo y benceno. Años anteriores, se habían detectado otros compuestos como la 2-butanona, 1,2,4-trimetilbenceno y 1,3,5-trimetilbenceno en este punto. Estos compuestos se utilizan mayormente como disolventes industriales, resinas, colorantes, etc. Por lo tanto, la presencia de estos compuestos en las aguas subterráneas se atribuye a aportes de origen industrial y no proviene de las aguas regeneradas inyectadas.
- El 1,4-Dioxano, es un compuesto solvente que se ha detectado en el agua regenerada de la ERA del Prat y también en los pozos de inyección y zonas cercanas a la barrera hidráulica convirtiéndose desafortunadamente en un buen

trazador. La voluntad de la administración es que este parámetro disminuya en origen, es decir, en los vertidos a red de saneamiento que van a la depuradora.

- A modo de conclusión, se sigue observando que el acuífero profundo del delta tiene múltiples problemas de calidad. La barrera hidráulica juega un papel clave contra la intrusión salina, aunque actualmente no soluciona el problema completamente. En estos pozos, se ha podido inyectar hasta 1,3 hm^3/año respecto los 5 hm^3/años inicialmente previstos en situación de normalidad. Esta infraestructura requiere una tercera fase para poder aportar este caudal en las zonas más afectadas por la salinidad, especialmente en la zona del puerto de Barcelona, la zona aeroportuaria y Viladecans, así como mejorar el tratamiento para evitar la inyección de contaminantes en el acuífero. Con este enfoque la Masa de Agua al menos revertirá su estado químico.

Agradecimientos: Este trabajo ha contado con el apoyo del proyecto europeo Clepsydra (Interreg Euro-MED) y de la Agència Catalana de l'Aigua, en el marco del convenio de colaboración que ha permitido llevar a cabo el muestreo asociado al estudio.

Estimación de la recarga de agua subterránea mediante modelación hidrológica distribuida en una subcuenca del Alto Guadiana

Sharon Vizcarra[1], Nafiseh Salehi Siavashani[1], Estanislao Pujades-Garnes[1], Anna Jurado[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua*

Palabras clave: Recarga, Modelación hidrológica, mHM, Cuenca Alta del Guadiana

Resumen. En las regiones semiáridas, la cuantificación de la recarga de aguas subterráneas es fundamental para una gestión sostenible, especialmente ante la creciente variabilidad climática y la recurrencia de periodos de sequía. La estimación de este proceso, como principal entrada de agua a los sistemas subterráneos, constituye un elemento clave en la modelación hidrogeológica. Para abordar esta necesidad, el objetivo principal de este estudio es cuantificar la recarga de manera espacialmente distribuida en una subcuenca de la Cuenca Alta del Guadiana (España). El principal aporte metodológico consiste en el uso en el uso del modelo hidrológico mHM (mesoscale Hydrological Model), seleccionado por su capacidad para simular el balance hídrico con base física en entornos con una red fluvial heterogénea y para transferir de forma coherente las propiedades del suelo y clima a diferentes escalas espaciales.

La metodología se basa en la compilación de variables climáticas diarias (temperatura máxima, mínima y precipitación), junto con datos de propiedades físicas del suelo, parámetros edafológicos y mapas de usos del suelo. Además, se integraron registros históricos de caudales para caracterizar el régimen hidrológico superficial y el sistema de aguas reguladas en la zona de estudio.

El flujo de trabajo se centra en la calibración del modelo en el punto de cierre de la subcuenca. Esta área presenta una configuración hidrológica particular, caracterizada por una secuencia de ríos, lagunas y embalses que convergen en un punto de salida final. Dicha disposición proporciona un escenario ideal para validar el modelo mediante la comparación entre los caudales simulados y los datos observados de la red fluvial. Este enfoque permite integrar información multiescalar, garantizando que la estimación de la recarga mantenga una consistencia física interpretable y sensible a las variaciones del clima.

La aplicación de este modelo permitirá generar mapas de recarga espacialmente distribuidos y evaluar la sensibilidad del acuífero ante diferentes escenarios climáticos. Además, dicha estimación se utilizará como dato de entrada para un modelo hidrogeológico en desarrollo, lo que permitirá mejorar la cuantificación de la dinámica de las aguas subterráneas y fortalecer la gestión sostenible de los recursos hídricos en el Alto Guadiana.

Agradecimientos: Esta investigación forma parte de la subvención PLEC2023-010215 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. N.S.S. agradece la financiación de la ayuda Juan de la Cierva (JDC2024-053428-I), financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

Estimación preliminar de la recarga mediante balance de masas de cloruro (CMB) en los acuíferos de Sierra Morena: Protocolo para depuración de datos hidroquímicos

José Manuel Gómez Fontalva[1], Fernando Ruiz Bermudo[1], José Antonio Serrano Reina[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC), Unidad de Sevilla. Plaza de España, Torre Norte. 41013 (Sevilla).*

Palabras clave: Cloruro conservativo, Depuración hidroquímica, Trazadores ambientales, Recarga difusa

Resumen. La cuantificación de la recarga de los acuíferos es uno de los parámetros más imprecisos y, al mismo tiempo, determinantes para la gestión sostenible de las aguas subterráneas, especialmente en masas de agua extensas y geológicamente complejas. En este trabajo se presenta la aplicación del método del Balance de Masas de Cloruro (CMB), una aproximación ampliamente utilizada para la estimación de la recarga, para la estimación preliminar de la recarga media anual en los acuíferos de la Masa de Agua Subterránea (MASb) Sierra Morena, cuyo funcionamiento se sectoriza en al menos nueve sectores acuíferos individualizados, cada uno con sus propias características hidrodinámicas.

El CMB se basa en el carácter conservativo del ion cloruro en el ciclo hidrológico. Al tratarse de un ion conservador, su concentración en el agua subterránea refleja directamente el factor de concentración por evapotranspiración respecto a la deposición atmosférica. Esto permite estimar la fracción de precipitación que alcanza el acuífero de forma independiente a los modelos hidrodinámicos convencionales. El método asume estado estacionario y que la totalidad del cloruro disuelto en el agua subterránea procede fundamentalmente de la lluvia cuando la escorrentía sobre los afloramientos permeables es poco significativa. Cualquier aporte externo introduciría un sesgo directo hacia la subestimación de la recarga.

Los datos hidroquímicos utilizados proceden de dos redes de muestreo complementarias, con analíticas comprendidas entre 1967 y la actualidad, de mayor densidad de muestreo en las últimas décadas. Dado que el método CMB

asume condiciones medias de largo plazo, el conjunto de datos se ha considerado representativo del comportamiento del sistema tras un protocolo de depuración secuencial basado en criterios hidrogeoquímicos explícitos, apoyados en umbrales analíticos, relaciones iónicas y técnicas estadísticas, aplicados de forma sistemática. El primer filtro descarta los análisis con balance iónico incorrecto. Los dos filtros siguientes eliminan las muestras cuya huella hidroquímica haya sido modificada, bien por la actividad humana (retornos de riego, lixiviados o vertidos urbanos), o bien por procesos de intercambio iónico propios de la hidrodinámica del acuífero. El cuarto filtro aplica un procedimiento de identificación de valores extremos de cloruro mediante detección estadística no paramétrica y detección de valores anormalmente altos. El quinto filtro evalúa la coherencia estequiométrica de la facies carbonatada dominante. La coherencia interna del procedimiento y la estabilidad de los resultados obtenidos con distintos enfoques estadísticos refuerzan la robustez de la estimación. En particular, la mediana de cloruros se mantiene estable tras el filtrado, mientras que la dispersión se reduce significativamente, indicando la eliminación de valores anómalos sin alterar la señal de fondo.

La estimación de la entrada atmosférica de cloruro, necesaria para aplicar el método, presenta una dificultad adicional en áreas con escasa cobertura de estaciones de muestreo de agua de lluvia. Para resolverla, se construyó un modelo de regionalización espacial basado en el decaimiento logarítmico del aerosol marino con la distancia a la costa atlántica, calibrado mediante regresión de mínimos cuadrados ponderados sobre estaciones con series de longitud muy desigual. La ponderación por el error estándar de cada serie otorga mayor influencia a los registros más largos, reduciendo el sesgo derivado de datos escasos, y permite obtener una estimación continua de la deposición de cloruro para cada sector acuífero.

La aplicación del CMB proporciona tasas de recarga diferenciadas por sector y, dentro de cada sector, variables en función del tipo de punto de muestreo. Los manantiales, que drenan flujos someros con tiempos de tránsito cortos, tienden a reflejar recargas locales más elevadas, mientras que los sondeos, que integran mezclas de aguas procedentes de distintas zonas del acuífero, arrojan tasas más moderadas representativas de la recarga regional. Esta variabilidad es coherente con la compartimentación estructural de la MASb y constituye en sí misma información sobre la heterogeneidad del sistema. Los resultados, aunque preliminares, apuntan a que la recarga podría ser considerablemente inferior a la contemplada en estudios anteriores, lo que refuerza la necesidad de mejorar y ampliar los estudios de estimación de recursos en esta MASb y contrastar estos resultados con otros métodos de estimación de la recarga.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el marco del convenio del IGME-CSIC con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir para la mejora del conocimiento hidrogeológico en el marco de la planificación hidrológica (2024-2028), en su Actividad nº 12 Avance en el conocimiento hidrogeológico de sectores de la masa de agua subterránea Sierra Morena (ES050MSBT000054500). Propuesta de subdivisión .

Estimulación de la desnitrificación para optimizar la eliminación de nitratos en escorrentía agrícola en un humedal construido: evaluación isotópica

Rosanna Margalef Marti[1], Helena Escalona-Orellana[1], Manuela Barbieri[1], Jesús Causapé[2], Jose A. Luque Marín[1], Neus Otero[3], Albert Soler[1]

[1]*Grup MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia – MAGH, Departament de Mineralogia, Petro-logia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, España.*
[2]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Residencia CSIC Campus Aula Dei. Zaragoza, España.*
[3]*Grup MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia – MAGH, Departament de Mineralogia, Petro-logia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, España. Plan Serra Hunter, Generalitat de Catalunya.*

Palabras clave: Bioremediación, Fraccionamiento isotópico, Humedal artificial, Nitrato

Resumen. El nitrato es un contaminante común en aguas de escorrentía agrícola debido al uso excesivo de fertilizantes. Los humedales artificiales (HA), son sistemas de bajo coste y fácil operación que permiten eliminar nitrato mediante la asimilación por plantas y la desnitrificación, mediada por microorganismos que transforman nitrato en nitrógeno gas en presencia de donadores de electrones. La desnitrificación constituye un verdadero sumidero de nitrógeno reactivo a diferencia del secuestro en biomasa. Si el HA no puede aportar donadores de electrones para alcanzar una desnitrificación eficiente (por ejemplo, a partir del agua de entrada o la vegetación), una estrategia de optimización consiste en la adición de fuentes externas de carbono orgánico.

En el barranco de Lerma (Zaragoza) lleva diez años en funcionamiento un HA de flujo superficial y subterráneo (≈3200 m² y ≈2800 m², respectivamente, ≈40 cm de profundidad) hacia el que se canalizan aguas de retorno de riego contaminadas por nitrato (≤200 mg/L). Sin embargo, presenta una capacidad limitada para eliminar nitrato cuando opera con caudal continuo y elevado (>1200 m³/semana). El objetivo del presente estudio, financiado a través de los proyectos NPP-SOL (PCI2023-143359), ISOTRACE (PID2022-139911OB-C41) y AGROSOSIII (PID2023-

147588OB-I00), es mejorar la eficiencia de la desnitrificación del HA implementan-do diferentes estrategias de bioestimulación. Estas consistieron en la adición de un subproducto de la industria láctea rico en carbono orgánico (suero lácteo), en distintas dosis y frecuencias de aplicación, así como bajo diferentes caudales en el HA.

Se evaluaron dos estrategias diferentes de bioestimulación entre junio de 2024 y julio de 2025, y una tercera será evaluada en primavera-verano de 2026. La primera estrategia consistió en inyecciones diarias de 50 L de suero mientras el HA operaba en flujo continuo (≈2300 m^3/semana). La segunda estrategia implicó la inyección semanal de 350 L de suero mientras el HA operaba en flujo intermitente (≈140 m^3/semana). Durante la tercera estrategia, se prevé una operación en flujo continuo y con caudales mayores a los previos (>4000 m^3/semana), mientras que la dosis y la periodicidad de inyección de suero se adaptarán en función de los resultados anteriores. A lo largo del periodo de estudio se realizaron campañas de muestreo periódicas. Para evaluar la eficiencia de la desnitrificación, se caracterizaron las muestras química e isotópicamente, incluyendo $\delta^{15}N$ y $\delta^{18}O$ del nitrato.

Los resultados muestran que ambas estrategias fueron eficaces para incrementar la eficiencia de desnitrificación del HA. La caracterización isotópica indicó que la primera estrategia alcanzó una eficiencia de desnitrificación ≥20 %. Durante la segunda estrategia el nitrato llegó a ser insignificante en la salida del HA, indicando una desnitrificación completa. Esto equivale a la eliminación de 403 kg de nitrato en 7 meses durante la primera estrategia y 107 kg en 3 meses durante la segunda. Además, se estima una asimilación de hasta 18 kg de nitrato por mes durante el crecimiento de la vegetación (Typha y Phragmites). Los productos intermedios de la desnitrificación potencialmente nocivos, como nitrito, amonio o un exceso de carbono orgánico fueron insignificantes en la salida, constatando la seguridad del tratamiento.

Estrategia de gestión de aguas subterráneas: reglas coordinadas de explotación en nuevas zonas de captación para abastecimiento y recarga gestionada de acuíferos con aguas regeneradas: el caso del paleocanal del río la Muga (Alt Empordà, NE de la Península Ibérica)

Carles Couso Vilà[1], Isabel Tubau Fernández[1]

[1]*Agència Catalana de l'Aigua*

Palabras clave: Sequía, Fluvià-Muga, ACA, REC

Resumen. Entre 2021 y 2024 Catalunya experimentó el episodio de sequía más intenso registrado en las últimas décadas, con un acusado déficit de precipitación y una presión creciente sobre los recursos hídricos disponibles. En el municipio de Peralada (Alt Empordà, NE de Catalunya), el abastecimiento de agua potable depende íntegramente de captaciones subterráneas. Existen tres redes de suministro independiente, con 11 pozos, que abastecen a varios municipios con una demanda anual aproximada de 1,7 hm³.

Durante el episodio de sequía se evidenció la vulnerabilidad del esquema de explotación existente, concentrado históricamente en captaciones asociadas al paleocanal del Llobregat d'Empordà, afluente del río Muga. El descenso progresivo observado en el piezómetro de referencia S-12 puso de manifiesto la necesidad de diversificar las zonas de captación y mejorar la gestión operativa del sistema acuífero.

La Plana de l'Empordà forma parte de la masa de agua subterránea Fluvià-Muga (MAS-032) y está constituida por depósitos aluviales cuaternarios que reposan sobre materiales arcillosos neógenos. El sistema acuífero presenta una estructura típica de llanura aluvial, con un nivel superior arenoso-limoso, un nivel intermedio más arcilloso que actúa como acuitardo y un nivel basal de gravas y arenas gruesas que constituye un acuífero semiconfinado de elevada conductividad hidráulica. Diversos estudios hidrogeológicos indican que la circulación subterránea se encuentra fuertemente condicionada por paleocanales que concentran los materiales más gruesos y, por tanto, los mayores valores de transmisividad.

La caracterización del paleocanal de la Muga se llevó a cabo mediante la integración de información geológica, campañas geofísicas, sondeos exploratorios y ensayos de bombeo. Los trabajos geofísicos permitieron identificar cuerpos de gravas subyacentes y reconstruir la geometría del paleocanal dentro de la llanura aluvial.

A partir de esta caracterización hidrogeológica se desarrolló en 2024 una nueva área de explotación formada por cinco pozos de producción en el sector meridional de Peralada. Los pozos alcanzan profundidades comprendidas entre 16,5 y 22,5 m que explotan el nivel basal de gravas. El conjunto permite disponer de una capacidad de bombeo próxima a 500 m^3/h, lo que incrementa de forma notable la flexibilidad del sistema de abastecimiento.

Los ensayos de bombeo efectuados en las nuevas captaciones en abril de 2024 indicaron una elevada productividad, con descensos entre los 10 cm y los 4 metros y caudales óptimos de explotación entre 75 y 100 m^3/h, Las transmisividades estimadas alcanzan valores del orden de 5.000 m^2/día en los tramos principales del paleocanal, lo que confirma su interés hidrogeológico como zona preferente de explotación.

Los análisis hidroquímicos indican aguas subterráneas de mineralización moderada, con conductividades en torno a 500-600 µS/cm y concentraciones de nitratos relativamente bajas, generalmente inferiores a las observadas en algunos sectores del acuífero explotados históricamente.

La explotación del acuífero se regula mediante un sistema de reglas de explotación coordinada (REC), establecido por el Departament de Concessions del ACA durante la regularización de las nuevas captaciones. Estas REC organizan el funcionamiento conjunto de las captaciones históricas y del nuevo campo de pozos y se basan en un indicador piezométrico, el punto de control S-12. En función del nivel piezométrico se establecen cuatro estados de gestión y cada estado se fijan volúmenes máximos de extracción con ajustes estacionales según la demanda.

Las REC permiten redistribuir progresivamente las extracciones entre distintos sectores del acuífero en función de la evolución de los niveles piezométricos, reduciendo la presión sobre las zonas históricamente más explotadas.

De forma complementaria, se han considerado actuaciones de recarga del acuífero con agua procedente de la estación depuradora de Figueres. En particular, de cara al nuevo ciclo del Plan Hidrológico, se plantea la posible recarga en el entorno de Pont de Molins (aguas arriba del municipio de Peralada) con volúmenes del orden de 2–3 hm^3/año. Paralelamente, también se prevé el uso para el riego agrícola en superficies próximas (unas 222 ha en una primera fase y

hasta 400 ha en una segunda). Estas actuaciones podrían contribuir a mejorar el estado del acuífero en el sector de Peralada y, en consecuencia, aumentar la garantía de abastecimiento.

En definitiva, el caso de Peralada muestra cómo una caracterización hidrogeológica detallada de paleocanales, combinada con nuevas zonas de captación y con reglas de explotación coordinada, puede mejorar de forma significativa la resiliencia de los sistemas de abastecimiento basados en aguas subterráneas frente a episodios prolongados de sequía.

Estrategia y compromisos de la industria de los materiales de construcción en la gestión responsable del agua

María Pilar Gegúndez Cámara[1], Lara Hildebrand[1], Luis Moreno Merino[2], Almudena De la Losa Román[2]

[1]*HOLCIM*
[2]*CN-IGME (CSIC). C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid*

Palabras clave: Gestión sostenible, SUDS, Restauración minera, Humedales

Resumen. La gestión sostenible del agua se ha consolidado como un eje estratégico prioritario para Holcim a escala global, orientando su modelo operativo hacia una reducción significativa de su dependencia de recursos hídricos superficiales y subterráneos. En un escenario de creciente escasez hídrica y presión sobre los recursos, la compañía ha establecido objetivos cuantificables de reducción en la extracción de agua dulce por tonelada de producción: 33 % en el segmento de cemento, 50 % en áridos y 15 % en hormigón. La validación de estos objetivos por parte de la Science Based Targets Network (SBTN) en cuencas hidrográficas sometidas a niveles muy elevados de estrés hídrico confirma que la estrategia desarrollada se fundamenta en criterios científicos eficaces. La estrategia global se implementa en España a través de diversos proyectos específicos en áreas con un elevado estrés hídrico. En concreto, en la fábrica de cemento de Montcada i Reixac, el proyecto se centra en la sustitución del uso de agua dulce por agua regenerada para usos industriales, enfoque ya implementado con éxito en la fábrica de cemento de Villaluenga de la Sagra (Toledo). Asimismo, en la fábrica de cemento de Carboneras (Almería), el 100 % del agua utilizada procede de una planta desaladora propia. Partiendo de la premisa de que los ecosistemas hidrológicos trascienden los límites físicos de las instalaciones industriales, las actuaciones impulsadas por la compañía integran enfoques basados en la restauración ecológica y la gestión territorial. Uno de los pilares fundamentales de estas actuaciones son las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). La implementación de estas iniciativas requiere necesariamente la participación de administraciones públicas, comunidades locales y entidades técnicas especializadas, para garantizar que los efectos positivos sobre el ciclo hidrológico sean cuantificables y sostenibles a escala de cuenca.

Holcim España está desarrollando actuaciones de gestión de biodiversidad y restauración ecológica en canteras de la mano de entidades especializadas en conservación de la naturaleza. En este contexto, se están creando humedales funcionales, que actúan como elementos de regulación hidrológica a escala local y contribuyen a mejorar la capacidad de retención hídrica del territorio favoreciendo la creación de hábitats para especies acuáticas y semiacuáticas. Algunos casos se sitúan en la Alcarria, Jerez, La Mancha, La Sagra y Cabo de Gata. De forma complementaria, Holcim desarrolla soluciones constructivas diseñadas para mejorar la gestión del agua en entornos urbanos, mejorar la resiliencia frente a eventos extremos y aumentar la recarga de los acuíferos. Entre ellas destaca en desarrollo de Hydromedia, un hormigón drenante que permite incrementar la infiltración del agua de lluvia en el terreno, reduciendo la escorrentía superficial y contribuyendo a la mitigación del riesgo de inundaciones en áreas urbanizadas. Este tipo de material es capaz de capturar y trasvasar hacia el subsuelo más del 80% de la escorrentía directa. Se integra en Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), favoreciendo una gestión más natural del ciclo hidrológico en entornos urbanos. La superficie actualmente instalada en España de Hydromedia en aplicaciones vinculadas a SUDS, permite recuperar un volumen estimado superior a 15.000 m^3 de agua al año. Considerando el consumo de agua del sector cemento en España (225 m^3/t cemento producido, es decir, 4.500 millones de m^3 al año), si se adoptasen los compromisos de Holcim por el sector, supondría un ahorro equivalente al consumo de más de medio millón de habitantes de nuestro país. Asimismo, de las experiencias de Holcim, sabemos que en el desarrollo de una explotación minera se presentan múltiples oportunidades para crear humedales temporales, bien porinterceptar pequeños acuíferos libres, bien por disponer de materiales impermeables con los que configurar pequeñas cuencas endorreicas donde se acumule el agua de lluvia o escorrentía. Replicar estas acciones en el sector minero contribuiría muy positivamente a los objetivos del Reglamento de Restauración de la Naturaleza de la UE revirtiendo la degradación de estos ecosistemas, mejorando la biodiversidad y aumentando la resiliencia frente a la sequía y el cambio climático.

Estrategias para el estudio y monitoreo de aguas subterráneas, mediante el uso de herramientas técnicas y tecnológicas integradas a sistemas IoT en zonas de influencia del corredor minero del departamento del Cesar

Moises oswaldo Bustamante rua[1], Cristian antonio Daza alvarez[1], Viviana julieth Melo lopez[1]

[1]*Universidad nacional de colombia*

Palabras clave: Hidrogeologia, Agua subterranea, calidad del agua, internet de las cosas (IoT)

Resumen. La ecorregión del valle medio del río Cesar (Colombia), ubicada en el corredor minero del departamento del Cesar, presenta alta vulnerabilidad hídrica debido a la presión antrópica y a la limitada integración de información hidrogeológica del subsuelo. En este contexto, el estudio desarrolla un enfoque integral que combina análisis hidrogeoquímico, caracterización del medio poroso e implementación de un sistema de monitoreo continuo basado en tecnologías IoT, con el objetivo de mejorar la comprensión del comportamiento de los acuíferos de la región.

La caracterización hidrogeoquímica incluyó la determinación de cationes y aniones mayores, la verificación mediante balance iónico y su representación en diagramas de Piper y Stiff. Los resultados evidencian variabilidad espacial en la calidad del agua subterránea, con facies hidroquímicas bicarbonatadas sódicas y cálcicas, así como cloruradas. Asimismo, se identificaron procesos de interacción agua-roca asociados a la disolución de minerales como pirita, dolomita y calcita, junto con posibles influencias antrópicas en los puntos de estudio. De manera complementaria, el análisis del medio poroso mediante granulometría, difracción y fluorescencia de rayos X (DRX/FRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM) permitió identificar características mineralógicas y texturales que influyen en la porosidad efectiva y el comportamiento hidráulico del subsuelo.

Como componente central del estudio, se diseñó e implementó un sistema IoT (Internet de las cosas) de bajo costo para el monitoreo hidrogeológico en tiempo real, basado en sensores multiparamétricos (pH, sólidos disueltos totales,

turbidez y temperatura). El sistema integra adquisición automática de datos, transmisión inalámbrica y almacenamiento en bases de datos de series temporales, con visualización en tiempo real. La adquisición de datos se realizó con una frecuencia mínima de 5 segundos durante periodos continuos de monitoreo entre 24 y 72 horas. Su validación incluyó procesos de calibración con soluciones patrón y pruebas en campo, evidenciando un desempeño estable, coherencia en las mediciones y capacidad para registrar variaciones físico-químicas con alta resolución temporal.

Los registros obtenidos muestran que el monitoreo continuo permite identificar fluctuaciones temporales en la calidad del agua no detectables mediante campañas de muestreo convencionales. Adicionalmente, la comparación entre los datos registrados por los sensores y las mediciones realizadas con equipos de campo evidenció diferencias mínimas, lo que respalda la confiabilidad del sistema implementado. La integración de estos datos con el análisis hidrogeoquímico permite una interpretación más robusta del sistema acuífero y mejora la identificación temprana de cambios asociados a condiciones ambientales y presiones externas.

En conjunto, el sistema desarrollado constituye un producto mínimo viable (PMV) de monitoreo hidrogeológico multiparamétrico, escalable y adaptable a contextos con alta presión antrópica. Su aplicación aporta una herramienta tecnológica para la gestión sostenible de aguas subterráneas basada en información continua y confiable.

Agradecimientos: Agradecimiento a la universidad nacional de Colombia - sede Medellín y al instituto de minerales CIMEX adscrito a la facultad de minas, por los aportes de financiación.

Estudio de la recarga del acuífero de la cubeta de la Llagosta

Júlia Wachs Glubocko[1], Jesús Belda Navarrete[1]

[1]*Consorci Besòs Tordera*

Resumen. La recarga gestionada de acuíferos (Managed Aquifer Recharge, MAR) se plantea como una solución estratégica para mejorar la resiliencia hídrica en regiones mediterráneas sometidas a estrés hídrico, elevada presión antrópica y creciente variabilidad climática. Este trabajo presenta el desarrollo integral de un proyecto de recarga artificial en el sistema hidrogeológico de la Cubeta de La Llagosta – Baix Besòs, impulsado por el Consorci Besòs Tordera en el marco del PERTE de digitalización del ciclo del agua y del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (Next Generation EU). El objetivo principal es evaluar la viabilidad técnica, ambiental y operativa de la infiltración controlada de agua regenerada para incrementar la disponibilidad de recursos subterráneos y mejorar el estado cuantitativo y cualitativo del acuífero.

El proyecto se estructura en tres fases complementarias. La primera fase comprende la caracterización hidrogeológica del ámbito de estudio, incluyendo análisis piezométrico, balances hídricos, inventario de captaciones y evaluación hidroquímica, lo que ha permitido definir la geometría del sistema acuífero, identificar unidades permeables y delimitar zonas potencialmente favorables para la recarga. La segunda fase desarrolla estudios en detalle mediante ensayos de bombeo, de infiltración, y campañas hidroquímicas, integrados en un modelo geológico tridimensionales y en un modelo numérico de flujo y transporte. Estos modelos permiten simular escenarios de recarga, estimar capacidades de almacenamiento, tiempos de tránsito y evaluar posibles impactos, como la movilización de contaminantes. La tercera fase contempla la ejecución de una prueba piloto de recarga mediante infraestructuras de infiltración alimentadas con agua regenerada, con monitorización continua de niveles y calidad del agua para validar los modelos.

Se espera que los resultados permitan definir criterios de diseño y explotación sostenible, identificar zonas óptimas de recarga y establecer protocolos de monitorización ambiental. Asimismo, se prevé el diseño del sistema de recarga a escala real, proporcionando las bases técnicas para su futura implementación operativa. Este proyecto constituye un caso de referencia en la integración de reutilización de agua y gestión de acuíferos en entornos periurbanos,

contribuyendo a la adaptación al cambio climático y a la sostenibilidad del ciclo urbano del agua.

Agradecimientos: Agradecer al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y a la Agencia Catalana del Agua

Estudio de los contaminantes orgánicos de preocupación emergente en las aguas subterráneas de la cuenca del río Besós

Erik Mestanza-Castelltort[1], Sergio Santana-Viera[1], Luciana Scrinzi[2], Anna Jurado[2], Estanislao Pujades[2], Sandra Pérez[1]

[1]ONHEALTH, Departamento de Química medioambiental, Instituto de Diagnostico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), CSIC, Jordi Girona 18-26, 08034 Barcelona, España
[2]Departamento de Geociencia, Instituto de Diagnostico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), CSIC, Jordi Girona 18-26, 08034 Barcelona, España

Palabras clave: Agua subterránea, Contaminantes orgánicos, Contaminantes de preocupación emergente

Resumen. El cambio climático puede alterar los procesos hidrológicos y geoquímicos, afectando la calidad del agua subterránea y aumentando el riesgo de contaminación en los acuíferos. Una de las consecuencias del cambio climático es el aumento de la frecuencia, intensidad y duración de eventos extremo de sequía y precipitación. Estas consecuencias se espera que sean realmente dramáticas en la región Mediterránea. En este contexto es necesario investigar fuentes de agua dulce alternativas para aumentar los recursos hídricos disponibles durante épocas secas. Esto es especialmente relevante en zonas densamente pobladas y con presencia de actividades industriales y agrícolas, por ser lugares donde es necesario asegurar el suministro de agua. Estas actividades generan unos contaminantes de origen antropogénico que pueden ser perjudiciales. Una de estas fuentes de agua dulce, que en ocasiones esta infrautilizada y puede estar impactada por la contaminación, son las aguas subterráneas. Una vez han llegado al agua subterránea, los contaminantes se pueden transportar, degradar y transformar en los acuíferos. Este estudio evalúa la concentración de contaminantes orgánicos de preocupación emergente (CECs) en gran parte de la cuenca del río Besòs, específicamente en 4 subcuencas de sus afluentes y en la ciudad de Barcelona. El objetivo es evaluar los contaminantes de esta región. Los CECs analizados incluyen fármacos y productos de cuidado personal (PPCPs), compuestos de origen industrial, contaminantes agroquímicos, así como productos de transformación derivados de los grupos mencionados.

Para el este estudio, se tomaron 61 muestras de diferentes pozos distribuidos a lo largo de la cuenca (especialmente concentrados en las subcuencas de los ríos Mogent, Congost, Caldes y Tenes y en la ciudad de Barcelona). Una vez recogidas, las muestras fueron previamente preconcentradas mediante extracción asistida por vacío (VAE) y analizados utilizando cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas de alta resolución (LC-HRMS) empleando un sistema Q-Exactive Orbitrap-MS que es una técnica que permitió una identificación y cuantificación precisa de los contaminantes presentes a bajas concentraciones. Se analizaron 100 compuestos diferentes, entre los cuales hay compuestos previamente estudiados para ver su evolución y 70 compuestos no estudiados para analizar sus concentraciones.

En las muestras analizadas se detectó una amplia variedad de contaminantes en un amplio rango de concentraciones, que oscilaron desde 0,03 ng/L para la cocaína (droga de abuso) hasta 11.400 ng/L para la sucralosa, un edulcorante artificial. Estos compuestos ya habían sido detectados previamente en muestras de agua subterránea de la parte baja de la cuenca del Besòs, donde en el caso de la sucralosa se reportaron concentraciones de hasta 34.100 ng/L. Asimismo, se observaron concentraciones elevadas de otros compuestos, como la primidona (10.400 ng/L), cuya presencia no había sido reportada anteriormente en este tipo de muestras.

Los datos obtenidos aportan información útil para futuras evaluaciones de riesgo y para planificar estrategias de gestión del agua más eficientes en un contexto urbano.

Agradecimientos: Este trabajo es parte del R+D+i del proyecto WATERPOLLUT (PID2022-138556OB-C21), financiado por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/. Parte de esta investigación se desarrolla en el marco del proyecto WATER4MED (programa PRIMA en 2023) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea (PCI2024-153452). Además, los autores agradecen el apoyo de los proyectos CLIMADAPT (CEX2018-000794-S) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y AQUADAPT (CNS2023-144051) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR. LS agradece el apoyo de la beca doctoral de fundación La Caixa (ID 100010434; código B006133). Sergio Santana-Viera agradece al Gobierno de Canarias y al Fondo Social Europeo su contrato postdoctoral Catalina-Ruiz.

Estudio de los procesos hidrogeológicos en una cuenca volcánica mediante el análisis de manantiales

José Luis Arumí[1], Rayén Rivera[1], Ricardo Oyarzún[2], Víctor Parra[1], Ana María Aguilar[1]

[1]*Universidad de Concepción*
[2]*Universidad de La Serena*

Palabras clave: Manantiales, Volcanes, Cuencas de Montaña, Rocas Fracturadas

Resumen. Las cabeceras de montaña son las fuentes de agua de las comunidades y ecosistemas que desarrollan bajo ellas, por ello es necesario comprender como los procesos hidrogeológicos mantienen los caudales mínimos de ríos y manantiales de montaña. Sin embargo, en la parte sur de la Cordillera de los Andes (Chile y Argentina), con la excepción de aquellas zonas donde se desarrollan importantes proyectos mineros o de embalses, no se dispone de información hidrogeológica.

En la zona central de Chile, se desarrolla un area turística en la vertiente sur del Complejo Volcánico Nevados de Chillán (Latitud -36,5°). La disponibilidad de agua para las comunidades se basa en manantiales; por lo que se requiere conocer las características de los sistemas hidrogeológicos que alimentan dichos manantiales. Ante la escasez de datos hidrogeológicos, un paso lógico, es estudiar los mismos manantiales.

El objetivo del trabajo fue comprender el sistema hidrogeológico para analizar la vulnerabilidad del abastecimiento de agua frente al cambio climático y la expansión urbana. La investigación consideró las dos subcuencas que drenan el area en estudio: el estero Renegado y el río Diguillín. Estas cuencas tienen diferentes características de caudal a pesar de que son similares en tamaño, orientación y condiciones climáticas.

Se analizó el balance hídrico de las cuencas estableciendo la existencia de transferencias de agua subterránea desde la cueca del Renegado a la cuenca del Diguillín. Entre los años 2015 y 2025, se realizaron análisis de trazadores ambientales (18O, 2H, Temperatura y CE), además de campañas de aforos realizadas en abril de cada año (período libre de deshielo y crecidas pluviales).

Se identificaron cuatro grandes grupos de manantiales: Valle de Aguas Calientes (VAC), Agua Tibia (AT), Agua Fría (AF) y Agua Bonita (AB).

En la parte alta de la cuenca del Río Diguillín se ubican los manantiales del VAC que aportan un caudal de aproximadamente 2,5 m^3/s desde un sistema acuífero que se desarrolla en el interior del Volcán Chillán. Estos manantiales poseen aguas frías que son recargadas por infiltración del derretimiento nival y aguas termales que provienen el interior del complejo volcánico.

En la parte media del valle del estero Renegado se ubican los grupos de manantiales de AT y AF, ambos a 1100 (ms n m). Los manantiales AF tiene una respuesta rápida a las precipitaciones pasando de 0 a 7,0 m^3/s en sólo tres meses el año 2023, en cambio los manantiales AT presenta un caudal estable (0,60 m^3/s). Mediante el análisis de isótopos, temperatura y de conductividad eléctrica se pudo verificar que los manantiales AF reciben recarga proveniente de la infiltración de derretimiento de nieves, mientras los manantiales AT reciben aportes de aguas termales provenientes del complejo volcánico.

Los manantiales de AB aportan aproximadamente 4,5 m^3/s desde un sistema de rocas fracturadas formadas por flujos de lava. El origen del agua de los manantiales AB se relaciona con las características del valle del estero Renegado, donde los suelos están compuestos por arenas sobre un basamento compuesto por rocas fracturadas. La infiltración del agua de lluvia y deshielo predomina sobre la escorrentía superficial, lo que resulta en un flujo de agua subterránea que alimenta los manantiales AB.

Se concluye que el sistema hidrogeológico de la zona en estudio está conformado por rocas fracturadas generadas por los flujos de lava que construyeron el complejo volcánico. En relación con la vulnerabilidad del abastecimiento de agua, el cambio climático no afectaría significativamente la recarga, pero la construcción de viviendas en las zonas de recarga de los manantiales AF y AB aumenta el riesgo de deterioro de la calidad de agua por contaminación.

Agradecimientos: ANID/FONDAP/1523A0001

Estudio del riego con aguas regeneradas en el acuífero detrítico del Río Vélez (Málaga): impacto de compuestos inorgánicos y contaminantes emergentes

Iñaki Vadillo Pérez[1], Marta Inés Llamas Dios[1], Pablo Jiménez Gavilán[1], Lucía Ojeda Rodríguez[1]

[1]*Universidad de Málaga*

Palabras clave: Riego con agua regenerada, Cultivos subtropicales, Contaminantes emergentes y PFAS, Contaminación de aguas

Resumen. La Axarquía, una región semiárida situada al sur de la Península Ibérica (España), es uno de los principales productores europeos de aguacate y otros cultivos subtropicales. La grave crisis hídrica de 2019-2024 puso de manifiesto un desequilibrio estructural a largo plazo entre la demanda y la disponibilidad de agua. Los niveles piezométricos del acuífero aluvial de Vélez, en el centro de la Axarquía, descendieron drásticamente debido a la extracción excesiva de agua subterránea. Para paliar la escasez de agua, actualmente se está introduciendo y ampliando la red de agua regenerada con tratamiento terciario (ARTT) mezclada con recursos convencionales para el riego. En comparación con los recursos hídricos convencionales, las ARTT contienen concentraciones más elevadas de sustancias químicas inorgánicas y otras derivadas de actividades domésticas, a menudo denominadas contaminantes emergentes, que pueden llegar al acuífero a través de retorno de riego.

Durante la investigación se seleccionaron dos parcelas de cultivo de aguacates situada sobre el acuífero de Vélez: una regada con agua del acuífero, aguas arriba de la población de Vélez Málaga; y otra regada con una mezcla de ARTT y agua del Embalse de la Viñuela. Durante la investigación se ha realizado un seguimiento de la calidad del agua desde julio de 2025. Las muestras recogidas: (1) del piezómetro situado en la parcela; (2) de un pozo situado aguas arriba de la finca y (3) de la mezcla de ARTT y agua de riego, se analizaron para determinar su hidroquímica general, metales y contaminantes emergentes.

Desde julio de 2025 hasta la fecha, se detectaron veintinueve compuestos emergentes (fragancias, antibióticos, productos farmacéuticos y diversos PFAS)

en el agua de riego (ARTT+Embalse). Nueve de ellos se detectaron en el agua subterránea del piezómetro de la parcela de estudio, algunos en concentraciones más elevadas, lo que sugiere un proceso de acumulación. El uso de aguas residuales regeneradas explica la aparición de contaminantes emergentes en las aguas subterráneas que no se detectaron aguas arriba de la zona de riego. La ausencia de ciertos compuestos en las aguas subterráneas que estaban presentes en el agua de riego puede atribuirse a procesos que actuen de forma simultánea: (1) degradación de los compuestos; (2) Procesos de sorción en el suelo y zona no saturada; (3) Biodegradación microbiana y (4) acumulación en la planta (savia y fruto).

Agradecimientos: Esta comunicación es un resultado del Proyecto "Manejo sostenible de los frutales subtropicales en Andalucía en un contexto de escasez hídrica. Estudio de la alteración de la calidad de las aguas subterráneas por el riego con aguas regeneradas (PLSQ-309-2)" financiado por la Junta de Andalucía.

Estudio hidrogeológico para la recarga gestionada de acuíferos con agua regenerada de la EDAR de l'Ampolla y l'Ametlla de Mar y análisis multicriterio de alternativas para determinar el sistema de recarga

Julia Tudela[1], Ester Vilanova[1], Samuel Campanero[2]

[1]*Amphos 21*
[2]*Cosell Comarcal del Baix Ebre*

Palabras clave: Recarga gestionada, Acuíferos, Mediterráneo, Agua regenerada

Resumen. El proyecto Estudio hidrogeológico de la actuación ERA en l'Ampolla-l'Ametlla de Mar para la recarga de acuíferos y otros usos tiene como objetivo definir las mejores opciones técnicas para el futuro desarrollo constructivo de sistemas de recarga gestionada con agua regenerada procedente de EDAR en dos ámbitos del litoral tarraconense, l'Ampolla y l'Ametlla de Mar. El estudio aborda de forma integrada la viabilidad hidrogeológica, geoquímica, operativa y económica de distintas alternativas de recarga, con especial atención a su capacidad para mejorar el estado cuantitativo de los acuíferos, reducir problemas de salinidad y minimizar afecciones sobre el medio receptor y los puntos de abastecimiento.

El ámbito de trabajo incluye tres unidades hidrogeológicas principales, el acuífero detrítico pliocuaternario de l'Ametlla de Mar (312I01), el acuífero detrítico pliocuaternario de l'Aldea - Ampolla (312I02), y el acuífero de calizas mesozoicas de Cardó - Vandellòs (312C31). Sobre esta base, el estudio combina recopilación e interpretación de información previa, campañas de campo para la obtención de nuevos datos, construcción de un modelo geológico 3D del conjunto del área, análisis de las demandas actuales de agua subterránea, revisión histórica de la química del agua subterránea y caracterización de la salinidad del sistema.

A partir de estos trabajos se desarrolla una diagnosis del estado cuantitativo y cualitativo actual de los acuíferos, identificando sectores con problemáticas y evaluando medidas correctoras. De forma complementaria, se han realizado ensayos de infiltración, un piezómetro y geofísica para el conocimiento y

propiedades de la geología local y, con ello, ajustar la selección del sistema de recarga más adecuado.

Uno de los elementos centrales del estudio es la comparación entre diferentes sistemas de recarga artificial y la determinación del punto de recarga óptimo para el uso del efluente regenerado de las EDAR. Para ello se plantea una metodología de análisis multicriterio que integra variables hidrogeológicas, químicas, funcionales y económicas, entre ellas el estado cuantitativo y cualitativo del acuífero, los objetivos y beneficiarios de la actuación, la logística del emplazamiento, los costes de implantación y operación, la complejidad de la explotación y mantenimiento, y los tiempos de implementación. Este enfoque permite priorizar alternativas no solo por su eficacia hidrogeológica, sino también por su viabilidad operativa a medio y largo plazo.

El resultado es la definición de la alternativa de recarga más favorable para cada ámbito y la zona, incluyendo una valoración preliminar de su repercusión sobre los pozos de abastecimiento, su potencial contribución a la mejora de la salinidad de la masa de agua, y una estimación económica aproximada de la implantación, mantenimiento y explotación del sistema a quince años. El trabajo constituye un caso aplicado a la planificación de actuaciones de reutilización y recarga gestionada en acuíferos costeros mediterráneos sometidos a presiones cuantitativas y cualitativas.

En conjunto, el estudio aporta una evaluación hidrogeológica y multicriterio para la selección de sistemas de recarga gestionada en acuíferos costeros con agua regenerada procedente de EDAR. La integración de criterios técnicos, geoquímicos, operativos y económicos permite apoyar la definición de soluciones viables, aplicables y adaptadas a las condiciones específicas de l'Ampolla y l'Ametlla de Mar.

Estudio multi-isotópico de persulfato ($^{34}S/^{32}S$, $^{18}O/^{16}O$) y tricloroeteno ($^{13}C/^{12}C$, $^{37}Cl/^{35}Cl$) para evaluar la eficiencia de un tratamiento de oxidación avanzada en un emplazamiento contaminado

Albert Fernández Lagunas[1], José Jiménez Guíñez[1], José A. Luque Marín[1], Martí Vinyes Nadal[1], Mònica Rosell[1], Clara Torrentó[1], Albert Soler[1], Cristina Domènech[1], Jordi Palau[1]

[1]*Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), 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, Barcelona, España*

Palabras clave: persulfato, tricloroeteno, oxidación química, análisis isotópicos

Resumen. En la remediación de compuestos orgánicos volátiles clorados (Cl-COVs), la contaminación remanente en la zona no saturada (ZNS) puede seguir actuando como una fuente tras retirar el foco principal de contaminación. La oxidación química in situ (ISCO de sus siglas en inglés), con persulfato activado alcalinamente, es una estrategia habitual para tratar estos casos. Durante la activación del persulfato tiene lugar su descomposición generándose radicales con una alta capacidad oxidante ($SO_4^{\bullet-}$, $HO^{\bullet}$). No obstante, la eficacia de este tratamiento depende de generar y mantener fuertes condiciones alcalinas (pH > 10) normalmente mediante la adición de bases fuertes (p. ej., NaOH) en solución.

La evaluación de la activación del persulfato en el subsuelo es complicada debido a que junto con la activación ocurren otros procesos que afectan a su concentración (p. ej., dispersión). Por tanto, es necesaria la investigación de nuevas metodologías para evaluar el grado de activación del persulfato. Experimentos a escala de laboratorio han mostrado un fraccionamiento isotópico significativo, del azufre y oxígeno del persulfato disuelto, asociado a su descomposición mediante diferentes mecanismos de activación. Esto abre la posibilidad del uso de la composición isotópica del persulfato como herramienta para investigar su activación, aportando así nuevas evidencias para la evaluación del tratamiento de remediación en campo.

Los objetivos principales de este estudio son i) utilizar por primera vez en un ensayo piloto de campo la composición isotópica del persulfato ($^{34}S/^{32}S$, $^{18}O/^{16}O$) para determinar su grado de activación y ii) combinar esta información con la composición isotópica del tricloroeteno ($^{13}C/^{12}C$, $^{37}Cl/^{35}Cl$) para evaluar así el efecto de la activación del persulfato sobre la degradación del contaminante.

El emplazamiento piloto de Òdena (45km al NO de Barcelona, España) consiste en un acuífero libre, fracturado y contaminado por una mezcla compleja de Cl-COVs, pesticidas y trazas de hidrocarburos. En el año 2006 se instaló una barrera permeable reactiva en la zona no saturada (BPR-ZNS), rellena de residuos de la construcción, que actúa como una zanja de intercepción del agua de recarga del acuífero e induce condiciones alcalinas que permiten la degradación de algunos Cl-COVs (p. ej., triclorometano) mediante hidrólisis alcalina. Estas condiciones son también favorables para la activación alcalina del persulfato.

En el marco de los proyectos REMECLOR (PDC2021- 120861-C21) y ADVANCE4WATER- ISOTRACE (PID2022-139911OB-C4-01), se realizaron dos inyecciones de persulfato sódico en la BPR, en marzo y abril de 2024, y un seguimiento semanal y quincenal, durante 182 días en siete puntos de muestreo, de parámetros hidrogeoquímicos, concentraciones y composición isotópica tanto del persulfato como del tricloroeteno. La evolución de la composición isotópica del persulfato y el aumento de la concentración de sulfato indican un alto grado de activación. Por otro lado, pese a una removilización de los contaminantes, la evolución de la composición isotópica del tricloroeteno evidencia que se produce su degradación. Los resultados de este estudio muestran el potencial de los análisis isotópicos del persulfato, combinados con el CSIA de contaminantes orgánicos, para mejorar la evaluación y seguimiento del tratamiento de remediación.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado a través del proyecto REMECLOR (PDC2021-120861-C21) financiado por el Gobierno de España (MICIU/AEI/ 10.13039/501100011033) y por la Unión Europea NextGenerationEU/ PRTR. También ha sido financiado con fondos del proyecto ADVANCE4WATER- ISOTRACE (PID2022-139911OB-C4-01), financiado por MICIU/ AEI/10.13039/501100011033/FEDER,UE. Este trabajo también ha sido posible grácias al Grupo de Investigación Consolidado (2021SGR00308), financiado por el AGAUR (Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca, Gobierno de Cataluña). Además, Albert Fernández Lagunas también agredece al AGAUR por la beca predoctoral 2022 FI_B 00498 y el cofinanciamento del Fondo Europeo Social Plus (FSE+). Los autores agradecen también a los técnicos de laboratorio de MAiMA, Tatiana Palomeque y Arnau Rubio, así cómo a los técnicos de los CCiTUB por su colaboración.

Estudio preliminar de la relación entre las aguas subterráneas y superficiales mediante el análisis de los contaminantes emergentes y el glifosato y AMPA en la cuenca del Guadiana

Diego Rojas Hita[1], Jesús Díez Castro[1], José Enrique Larios López[1], Luis Archilla Castillo[1], Laura Sierra Medina[2]

[1]*Eurofins Cavendish*
[2]*Confederación Hidrográfica del Guadiana*

Palabras clave: Glifosato, Aguas subterráneas, Aguas superficiales, Guadiana

Resumen. La cuenca hidrográfica del Guadiana cuenta con una extensión de unos 67000 km^2 en su totalidad, una de las más extensas de la Península Ibérica. En su parte española se han definido 20 masas de agua subterránea, todas ellas sometidas a diversas presiones que se manifiestan en forma de sustancias contaminantes.

El Glifosato y el AMPA son dos de los contaminantes de aparición más frecuente en esta demarcación. Generan la mayor parte de los incumplimientos de las normas de calidad aplicables, en la evaluación de estado, tanto en aguas subterráneas como en superficiales. Además, en la actualidad existe una elevada preocupación por la aparición de contaminantes emergentes, entre los que se encuentran algunos de los estudiados en el presente trabajo.

El objetivo de este estudio consiste en determinar la distribución y concentración, de estas sustancias tanto en aguas superficiales como en subterráneas, además de identificar la relación entre ellas y los usos del suelo.

Para ello se han utilizado los resultados analíticos obtenidos en329 puntos de muestreo (148 en aguas superficiales y 181 en subterráneas) distribuidos por toda la demarcación hidrográfica desde agosto de 2024 hasta febrero de 2026. Además, se ha contado con capas de información que contienen los usos del suelo.

Los resultados obtenidos han mostrado que los contaminantes emergentes con mayor representación, tanto en aguas superficiales como subterráneas han resultado ser: acenafteno, acenftileno, tetraconazol, difenoconazol, propiconazol

y difenilamina. Mientras los dos primeros tienen su origen en descomposición de plásticos, colorantes y fármacos, el resto pertenecen al grupo de los fungicidas.

De todos ellos, se ha calculado un promedio de aparición del 47 % de los puntos en aguas subterráneas y del 53 % en aguas superficiales. Se relacionan fundamentalmente con zonas de cultivo. Por su parte, el glifosato pertenece al grupo de los herbicidas y el AMPA es su principal producto de degradación. Los resultados obtenidos para estos dos parámetros han mostrado que en aguas superficiales su presencia es en torno al 70 % de todos los puntos analizados, mientras que en subterráneas su presencia se reduce aproximadamente al 30%. Ambos presentan mayor distribución en zonas de cultivo, pero no así su mayor concentración. Esta se encuentra en las aguas subterráneas concretamente en las pertenecientes a zonas urbanas con concentraciones medias superiores a 2,5 µg/l para el glifosato y 0.2 µg/l para el AMPA. En aguas superficiales la mayor concentración se ha encontrado para el parámetro AMPA, en los campos de cultivo en primer lugar, con medias de 10 µg/l y en segundo lugar en el tejido urbano con más de 3 µg/l de AMPA.

Los datos indican que la mayor concentración de glifosato en aguas subterráneas se debe a la menor presencia de oxígeno en este medio, lo que dificulta su degradación a AMPA. En las aguas superficiales ocurre el efecto contrario al encontrarse total disponibilidad de oxígeno. Asimismo, resulta clave el estudio de ambos fundamentalmente en zonas urbanas, donde se han hallado concentraciones muy elevadas.

Agradecimientos: Este trabajo se engloba en el marco del Proyecto de "Desarrollo de los Programas de Seguimiento de Estado y Calidad de aguas de la Confederación Hidrográfica del Guadiana.

Estudios hidrológicos y modelos de mezcla de aguas para el estudio del drenaje ácido del terraplén del Aparral en la autovía AG-64 (A Coruña)

Javier Samper Calvete[1], Luis Montenegro Pérez[1], Acacia Naves García-Rendueles[1], Aitor García Tomillo[1], Marta García Souto[1], Bruno Pisani Veiga[1], Marcos Lado Liñares[1], Jorge Dafonte Dafonte[2], Marta Arias[3], Héctor Dopico[3]

[1]*Universidade da Coruña, Centro Interdisciplinar de Química y Biología (CICA), A Coruña, España.*
[2]*Universidade de Santiago de Compostela, Escuela Politécnica Superior, Lugo, España*
[3]*INTACTA Gestión Ambiental S.L., As Pontes, A Coruña, España.*

Palabras clave: agua ácida, modelización numérica, monitorización hidroquímica

Resumen. La construcción del terraplén del Aparral en la autovía AG-64 (As Pontes, A Coruña) utilizó materiales pizarrosos con contenido en sulfuros procedentes de excavaciones cercanas. La oxidación de estos minerales ha generado procesos de drenaje ácido que afectan a las aguas superficiales y subterráneas del entorno del arroyo de Aparral. La descarga de aguas ácidas en dicho arroyo, perteneciente a la cuenca del río Eume, se remedia desde hace años mediante la adicción de cal.

Se ha desarrollado un estudio integrado basado en campañas de campo, monitorización hidroquímica y modelos numéricos de flujo y transporte, con el objetivo de comprender la hidrología de este sistema y cuantificar las mezclas entre aguas naturales y aguas ácidas. Se cuenta con una red de control que incluye siete piezómetros, siete puntos de control de aguas superficiales y dos aforadores del arroyo, donde se han realizado medidas puntuales y continuas de niveles piezométricos, pH y conductividad eléctrica desde al menos 2019. También se han realizado campañas de análisis químicos completas. Los datos obtenidos han permitido identificar varias zonas de generación de aguas ácidas asociadas al terraplén, incluyendo rezumes en cunetas, filtraciones en juntas del paso de fauna y aguas subterráneas ácidas en distintos piezómetros. El análisis integrado de los datos hidrológicos, piezométricos e hidroquímicos han permitido: (1) Identificar

dos tipos principales de aguas, aguas naturales del arroyo y aguas ácidas generadas por el drenaje de rocas sulfurosas, y su modelo de mezcla (2) Desarrollar modelos conceptuales y numéricos de flujo subterráneo y transporte de solutos que permite analizar las interacciones entre el terraplén y el terreno natural. Se ha desarrollado un modelo de flujo en perfil que atraviesa el terraplén y cuya traza pasa por dos de los piezómetros de la red de control situados aguas arriba y debajo de este. Este modelo se calibró en régimen estacionario con los niveles medios observados, obteniéndose un error absoluto medio de 0.01 m y un error en el balance de agua del 0.023 %. En régimen transitorio, los hidrogramas simulados presentaban menor amplitud que los medidos y para mejorar su ajuste es necesario considerar una entrada de agua adicional de 0.16 L/d en el talud aguas abajo del terraplén. Se desarrolló un segundo modelo en perfil paralelo al terraplén, aguas arriba de este y cuya traza pasa por cuatro piezómetros de la red. El modelo estacionario reproduce adecuadamente los niveles medios (error absoluto medio de 0.15 m) y un error de balance del 0.001 %. Los modelos desarrollados constituyen una herramienta útil para analizar el flujo de agua en el terraplén y el terreno natural, identificar las zonas generadoras de acidez y estimar las fracciones de mezcla entre aguas ácidas y naturales. Además, estos modelos permitirán evaluar estrategias de mitigación orientadas a reducir los flujos de agua a través de los rellenos sulfurosos y, en consecuencia, las cargas de acidez que deben ser tratadas.

Agradecimientos: Este estudio ha sido financiado por INTACTA a través de contratos de investigación. Se ha contado también con apoyo y financiación de un proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación de España y del Proyecto de Consolidación GRC de la Xunta de Galicia (Ref.: ED431C 2025/55).

Estudios preliminares para la mejora de la precisión en la medida de tritio en aguas subterráneas con el equipo de centelleo líquido Quantulus GCT 6220

Héctor Fuentes González[1], Luis Pujol Teres[1], Francisco Javier Rodríguez Arévalo[1]

[1]*Área de Aplicaciones Isotópicas (CETA), Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, España.*

Palabras clave: tritio, centelleo, electrolítica, medida

Resumen. El tritio es una herramienta fundamental para la investigación en hidrología ya que permite la caracterización de acuíferos mediante la determinación del tiempo de renovación de aguas subterráneas, el estudio experimental de la recarga, la evaluación de su vulnerabilidad a la contaminación, y su aplicación a la gestión del agua y al estudio de los efectos del cambio climático, entre muchas otras aplicaciones.

El tritio es un isótopo radiactivo del hidrógeno con un periodo de semidesintegración de 4500 días. Es emisor beta de energía media muy baja de 5,72 keV y una energía máxima de 18,6 keV, por lo que la única técnica disponible para su detección es la medida por centelleo líquido.

El tritio de origen natural se produce por la interacción de los rayos cósmicos con los gases de la atmósfera. Por otra parte, las pruebas nucleares realizadas en la década de los 50 y 60 incrementaron estos niveles naturales. Además, en las proximidades de algunas centrales nucleares, ocasionalmente el tritio es vertido al medio ambiente en concentraciones bajas desde el punto de vista de radioprotección, pero suficientemente altas, si se disponen de sistemas de detección de muy bajo fondo, para ser medidas sin concentración electrolítica. De hecho, nace de aquí una oportunidad adicional para el uso del tritio como trazador en el estudio de la relación aguas superficiales/aguas subterráneas tan relevante en la gestión del agua.

Sin embargo, el tritio presente en las precipitaciones ha decrecido desde que alcanzara su máximo a principios de la década de los 60 y se ha aproximado a los niveles naturales. Esto ha llevado a diferentes instituciones y laboratorios a requerir una mejora del límite de detección, lo que ha estimulado el desarrollo de la concentración electrolítica como el método más práctico y económico para su enriquecimiento y de equipos específicamente diseñados para lograr fondos muy bajos, así como de técnicas de datación basadas en gases nobles como helio-3. En el primer caso, no solo es necesario disponer de equipos de muy bajo fondo, sino la optimización de todos los parámetros influyentes tanto en la preparación como en la medida para alcanzar la mayor sensibilidad posible en el método.

El CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) mantiene un laboratorio acreditado por ENAC en este ensayo según la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2017 y un conocimiento experto desde hace décadas en este campo. Se presentan las características y capacidades disponibles actualmente en el CEDEX de preparación de muestras de agua mediante concentración electrolítica y de medida de tritio con los equipos Quantulus 1220 y Quantulus GCT 6220. Se detalla el proceso de cálculo de los parámetros de actividad, incertidumbre y actividad mínima detectable (AMD), se analiza el aseguramiento de la validez de los resultados obtenidos, y se describen las diferentes vías en desarrollo para mejorar estas capacidades y satisfacer las futuras demandas en investigación científica en hidrología y aplicaciones a la gestión del agua, las infraestructuras hidráulicas y los residuos.

Evaluación cuantitativa de opciones de gobernanza para la mejora de la calidad en un acuífero multicapa urbano-costero: caso del delta del Besòs

Deby Jurado[2], Franco Coscia[1], Eike Thaysen[1], Enric Vázquez-Suñé[1], Sergio Carrero[1], Sonia Valdivielso[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), CSIC, Barcelona, España*
[2]*Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España; CSIC, Barcelona, España*

Palabras clave: Hidrogeología urbana, Acuífero costero, Recarga gestionada de acuíferos, Soluciones basadas en la naturaleza

Resumen. En un escenario global marcado por el crecimiento de la demanda hídrica y la intensificación de sequías debido al cambio climático, el agua subterránea se ha consolidado como un recurso estratégico esencial para la sustentabilidad hídrica. Sin embargo, a nivel mundial, una gran parte de estas reservas presenta un estado de degradación alarmante. Un ejemplo es el acuífero del delta del río Besòs (Barcelona), históricamente reconocido como uno de los ríos más contaminados de Europa. Su sistema acuífero multicapa refleja una fuerte presión industrial y urbana, albergando concentraciones elevadas de contaminantes, incluyendo contaminantes emergentes, que comprometen la seguridad del recurso. La definición de estrategias de gobernanza eficaces para revertir esta situación requiere herramientas capaces de evaluar cuantitativamente el impacto real de distintas opciones de intervención.

Para abordar esto, se desarrolló y calibró un modelo numérico tridimensional de flujo y transporte que representa la estructura multicapa del sistema, incluyendo unidades semiconfinantes y la interacción río–acuífero. seguidamente, se implementaron seis Opciones de Gobernanza y Políticas en el modelo, mediante la modificación de condiciones de recarga, bombeo, interacción río–acuífero y concentraciones impuestas. Las configuraciones evaluadas combinaban: (i) recarga gestionada mediante pozos de inyección, (ii) sistemas de infiltración superficial, (iii) mejora de la calidad del efluente de la EDAR mediante tratamientos de oxidación avanzada, (iv) soluciones basadas en la naturaleza,

representadas por humedales construidos para el tratamiento del efluente y zonas de infiltración natural controlada, y (v) control de extracciones subterráneas. La comparación entre escenarios se realizó mediante un indicador normalizado de mejora de la calidad del acuífero.

Los resultados muestran que la Recarga Gestionada de Acuíferos mediante la combinación de pozos de inyección con tratamientos de oxidación avanzados o solo soluciones basadas en la naturaleza es la herramienta más potente, generando mejoras en la calidad del acuífero del orden del 30%.Por el contrario, las estrategias basadas exclusivamente en la mejora de vertidos sin una gestión activa de la recarga presentan impactos significativamente menores. El análisis espacial confirma que la configuración hidráulica de la recarga ejerce un control más determinante sobre la propagación de las mejoras que la eficiencia de tratamiento de forma aislada.

Este trabajo propone un marco metodológico robusto, novedoso y replicable que aporta una base cuantitativa para priorizar intervenciones. En un momento de escasez hídrica aguda, estas simulaciones ofrecen una hoja de ruta oportuna para recuperar acuíferos degradados, demostrando que este enfoque es aplicable no solo en entornos costeros, sino en cualquier sistema acuífero complejo bajo presión antrópica que requiera una gestión científica de sus recursos.

Agradecimientos: UPWATER, funded by the European Union under Grant Agreement No. 101081807, y SHIELD (PID2023-153345NB-I00, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades), IDAEA-CSIC.

Evaluación de diferentes estrategias para la reducción de la afección por nitratos en aguas subterráneas y suelos de origen industrial y agrícola (proyecto SERENA)

Natàlia Blázquez-Pallí[1], Foix Soler-Balaguer[1], Marta González[1]

[1]*Litoclean, S.L.*

Palabras clave: nitratos, contaminación, biorremediación, bioelectroquímica

Resumen. La contaminación por nitratos procedentes de la industria agroalimentaria es un problema muy importante en España donde, según varios informes, más del 20% de las aguas superficiales y subterráneas del país presentan altas concentraciones de nitratos. El aumento de la presencia de nitratos en las aguas se debe, mayormente, a su uso en la agricultura como fertilizantes. Asimismo, la contaminación de aguas subterráneas también se puede producir en emplazamientos industriales, a raíz de los procesos productivos llevados a cabo, pérdidas accidentales o gestión inadecuada de efluentes y residuos. Esta contaminación puede provocar graves problemas, tanto a nivel ambiental (eutrofización), como para la salud humana, en caso de consumo.

En este contexto, se desarrolló el proyecto SERENA (Sistemas eficientes para la reducción de la contaminación por nitratos al medio natural derivados de la actividad humana), financiado por el CDTI en el marco de la convocatoria Misiones 2024, y que contó con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación. SERENA tiene como objetivo reducir la contaminación por nitratos en ecosistemas mediante la investigación de tecnologías innovadoras para la desnitrificación de aguas subterráneas y suelos, así como la valorización de residuos orgánicos y la monitorización de la concentración de nitratos en el agua. Para ello, la empresa LITOCLEAN muestreó aguas subterráneas y suelos de un emplazamiento agrícola y uno industrial impactados por nitratos y los utilizó para desarrollar diferentes ensayos de tratabilidad en el laboratorio con el fin de investigar las estrategias de biorremediación y sistemas bioelectroquímicos (BES) para aguas subterráneas, y fitorremediación para suelos, como tecnologías de reducción de nitrato en el subsuelo. Para el seguimiento de los ensayos se utilizaron varias técnicas

analíticas, como la adquisición de datos hidrogeoquímicos, y técnicas moleculares (qPCR y metabarcoding).

En los ensayos de biorremediación, se prepararon experimentos de microcosmos con donantes de electrones orgánicos e inorgánicos, y sólo las enmiendas orgánicas consiguieron promover la desnitrificación de un total de 460 mg/l de nitrato, posiblemente selectiva a la formación de N2 gas, y sin acumulación significativa de nitrito ni amonio. Esto también se confirmó mediante metabarcoding y qPCR con cebadores dirigidos a los genes de las enzimas reductasas narG, nirK, y nirS. Para profundizar en estos procesos del subsuelo, se realizaron también ensayos en columna dinámica para dos enmiendas orgánicas, mostrando que las condiciones más favorables para la desnitrificación (con una eficiencia media de 67-91%) correspondieron a una ratio C/N de 1,5 y un tiempo de residencia de 66 h (2,75 días), a una temperatura estable de 17ºC.

En los ensayos BES, se demostró que estos sistemas pueden actuar como fuente de donador de electrones (mediante la generación de hidrógeno) para bioestimular reacciones de desnitrificación. Se logró reducir un total de entre 110 y 140 mg/L de nitrato, sin necesidad de adicionar una fuente de carbono externa, y se evidenció un incremento de los biomarcadores genéticos de desnitrificación. Sin embargo, se observó que, tras un período prolongado de operación, la biodisponibilidad de materia orgánica puede resultar limitante y, en determinados casos, puede ser favorable la adición de una enmienda orgánica. En definitiva, los ensayos realizados sobre muestras de agua subterránea de origen industrial y agrícola demostraron que estas matrices de orígenes distintos podían albergar procesos biológicos de desnitrificación de nitrato, y estos resultados permiten definir parámetros clave para el diseño de potenciales medidas correctoras.

Finalmente, los ensayos de fitorremediación en macetas realizados con tres especies vegetales distintas (mostaza blanca, hinojo, y rábano negro/forrajero) demostraron que las muestras de suelo de origen industrial y agrícola evaluadas también podrían albergar procesos biológicos de desnitrificación (por la presencia de narG), pero que la remoción de nitrato observada fue promovida, principalmente, por el crecimiento vegetal, que actuó como sumidero de nitrato. Asimismo, las especies vegetales sólo pudieron establecerse y crecer vigorosamente en los casos dónde las condiciones del suelo de pH y conductividad fueron más favorables.

En conjunto, los resultados del proyecto SERENA demuestran que tanto las aguas subterráneas como los suelos afectados por nitratos de origen agrícola e industrial pueden albergar procesos eficaces de reducción de nitratos, si bien las estrategias deben estar adaptadas a la matriz y a las condiciones

hidrogeoquímicas. Las tecnologías evaluadas presentan un elevado potencial de escalado y constituyen una base sólida para el diseño de medidas correctoras y la gestión de masas de agua subterránea afectadas por contaminación difusa y puntual por nitratos.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por el proyecto SERENA, con número de expediente MIG-20241094, financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI) en el marco de la convocatoria Misiones Ciencia e Innovación 2024, dentro del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

Evaluación de la calidad del agua de consumo y sus factores condicionantes en la ciudad de Malabo

Víctor Gómez-Escalonilla[1], Severo Meñe Nsue-Mikue[2], Manuel Rodríguez del Rosario[1], Esperanza Montero-González[1], Silvia Díaz-Alcaide[1], Pedro Martínez-Santos[1]

[1]*Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid, España.*
[2]*Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial. Facultad de Medio Ambiente. Campus Malabo. Malabo, Guinea Ecuatorial*

Palabras clave: Agua potable, Hidrogeología

Resumen. El agua es un recurso indispensable para la salud pública, la seguridad alimentaria y la reducción de la pobreza. Sin embargo, millones de personas en el mundo carecen aún de un acceso seguro y sostenible a este recurso, una situación especialmente crítica en los países del Sur Global. Obtener estimaciones fiables sobre la calidad del agua resulta particularmente complejo en contextos urbanos de regiones de bajos ingresos, donde la diversidad de fuentes y la rápida expansión demográfica dificultan la evaluación. Este trabajo consiste en una evaluación de la calidad del agua de consumo en Malabo, en Guinea Ecuatorial, con el objetivo de identificar los principales focos de contaminación y los factores que la condicionan.

La investigación se basa en una campaña de muestreo en la que se recolectaron más de 500 muestras entre junio de 2024 y marzo de 2025. En determinados puntos se tomaron muestras tanto en la estación seca como en la estación húmeda, con el objetivo de comparar la evolución de la calidad de las fuentes en función de las condiciones climáticas y analizar posibles variaciones estacionales. En cada campaña se evaluó la presencia de Escherichia coli como indicador de contaminación microbiológica, además de diversos parámetros fisicoquímicos —incluyendo pH, conductividad eléctrica y concentración de nitratos— con el fin de obtener una caracterización integral de la calidad del agua.

Los resultados muestran que los principales problemas de calidad se concentran en determinadas tipologías de fuentes como los pozos no protegidos, especialmente en las áreas más expuestas a presiones antrópicas. El análisis

evidencia que factores como la proximidad a cauces fluviales, la densidad de población y la presencia de letrinas en el entorno inmediato influyen significativamente en la contaminación microbiológica, particularmente en la presencia de Escherichia coli. La combinación de análisis microbiológicos, fisicoquímicos y variables espaciales distribuidas permite identificar los principales factores condicionantes de la calidad del agua y aporta evidencias útiles para el diseño e implementación de medidas prácticas para la reducción del riesgo.

Agradecimientos: Esta investigación se llevó a cabo en el marco del proyecto DEME-ML-2, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (PID2021-124018OB-I00), y del proyecto CARESOIL-CM, financiado por la Comunidad de Madrid (TEC-2024/ECO-69).

Evaluación de la garantía de suministro y calidad del agua a partir de recursos subterráneos, demanda y estrategias de gestión sostenible: el caso de manacor (Mallorca)

Ana Martínez Prudencio[1], Lucía Pairetti[1], Sergio Durán Laforet[1], Lorena Bermejo Santos[1], Esther Sánchez Sánchez[1]

[1]*Amphos21*

Palabras clave: Abastecimiento urbano, Garantía de suministro, Calidad del agua, Eficiencia hídrica

Resumen. El abastecimiento poblacional del municipio de Manacor (Mallorca) se realiza íntegramente con recursos subterráneos procedentes de distintas masas de agua y gestionados por diferentes proveedores que operan los sistemas de captación y distribución del municipio. Esta fragmentación del servicio, junto con la marcada estacionalidad de la demanda asociada a la actividad turística y afecciones de cantidad y de calidad del agua, plantea retos relevantes para la garantía y sostenibilidad del recurso. Con el objetivo de abordar estos desafíos, se ha elaborado el Plan de Gestión Sostenible del Agua (PGSA) del término municipal de Manacor, de acuerdo a lo establecido en el Plan Hidrológico de Islas Baleares del tercer ciclo (GOIB, 2023). El PGSA, promovido por la Empresa de Servicios del Municipio de Manacor S.A. (SAM), integra un diagnóstico hidrogeológico de los acuíferos explotados con el análisis del funcionamiento del sistema de abastecimiento. En este marco, se ha evaluado la disponibilidad de los recursos subterráneos, tendencias piezométricas y de parámetros de calidad. Asimismo, se ha realizado una estimación de la población actual y futura bajo diferentes escenarios temporales, junto con la cuantificación de la demanda de agua, el análisis de la garantía de suministro y la evaluación de la calidad del servicio.

Los resultados obtenidos sugieren la existencia de limitaciones tanto en la disponibilidad como en la calidad de los recursos subterráneos, así como posibles desequilibrios entre demanda y recursos disponibles, particularmente durante periodos de elevada demanda estacional. A partir de este diagnóstico integrado, se ha planteado un conjunto de medidas orientadas a reforzar la sostenibilidad del sistema de abastecimiento. Entre ellas se incluyen actuaciones destinadas a

mejorar el control y la gestión de la explotación, como la ampliación de la red de seguimiento, la definición de parámetros e índices para el control del estado cuantitativo y cualitativo de los acuíferos y la incorporación de herramientas de apoyo a la gestión, además de la propuesta de medidas dirigidas a la protección y conservación de las captaciones. Adicionalmente, se proponen programas dirigidos a mejorar la eficiencia de las captaciones y a diversificar las fuentes de suministro, mediante la integración de nuevas captaciones y el fomento de la reutilización de aguas residuales y pluviales. De forma complementaria, se contemplan actuaciones orientadas a la reducción de la demanda y a la mejora de la eficiencia en la distribución y el consumo, tales como la interconexión de redes de abastecimiento, la gestión activa de pérdidas, la finalización de la sectorización y el incremento de la capacidad de regulación del sistema. Estas medidas se complementan con políticas de concienciación y con instrumentos regulatorios y tarifarios orientados a promover el uso eficiente del agua.

Agradecimientos: Empresa de Serveis del municipi de Manacor S.A. (SAM)

Evaluación de la hidrogeoquímica natural y antrópica de las aguas subterráneas y superficiales en la cuenca del río Ripoll con herramientas estadísticas.

Juan Fernando Rubilar Contreras[1], Anna Jurado Elices[2], Estanislao Pujades Garnes[2]

[1]*Department of Geosciences, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC), Jordi Girona 18-26, Barcelona, 08034, Spain. Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona, Spain*
[2]*Department of Geosciences, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC), Jordi Girona 18-26, Barcelona, 08034, Spain.*

Palabras clave: Calidad aguas subterráneas y superficiales, Métodos estadísticos, Río Ripoll

Resumen. Los recursos hídricos en la región mediterránea se encuentran bajo una presión creciente debido al cambio climático, el aumento de la demanda y las actividades antropogénicas. Comprender los procesos que controlan la calidad del agua superficial y subterránea a escala de cuenca es fundamental para apoyar la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Este estudio analiza los procesos hidrogeoquímicos que controlan la calidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Ripoll durante los últimos 10 años (2016-2025), integrando datos de aguas superficiales y subterráneas procedentes de la base de datos pública de la Agencia Catalana del Agua (ACA). Las aguas subterráneas fueron analizadas mediante análisis de componentes principales (PCA), agrupamiento jerárquico e interpolación geoestadística (kriging), utilizando 15 parámetros fisicoquímicos. Además, se aplicó un análisis de mezcla de end-members (EMMA) a muestras de agua del río para identificar las principales fuentes hidrogeoquímicas que controlan su composición y entender la interacción entre el río Ripoll y los acuíferos principales. Finalmente, se calcularon las proporciones de mezcla en las aguas superficiales con las fuentes hidrogeoquimicas seleccionadas.

El PCA identificó tres procesos principales que explican la mayor parte de la variabilidad hidroquímica: (i) acumulación de sales y movilización redox de As y Sb en el acuífero aluvial; (ii) disolución geogénica de sales y contaminación puntual asociada a nitratos; y (iii) aportes de materia orgánica y nitrificación incompleta. El análisis de clusters confirma esta diferenciación hidrogeoquímica, separando las aguas del acuífero aluvial del Ripoll, de las aguas provenientes de los acuíferos detríticos y del basamento rocoso.

Se construyeron mapas geoestadísticos mediante la interpolación de las puntuaciones de los PCs utilizando el método de kriging ordinario, para esto se calcularon y evaluaron los respectivos semivariogramas experimentales. Los resultados muestran un gradiente regional creciente del PC1 hacia la parte baja de la cuenca, asociado al acuífero aluvial y a procesos de acumulación de sales y movilización redox de metales traza. En contraste, el PC2 presenta anomalías localizadas relacionadas con aportes de nitratos y sales procedentes de fuentes antropogénicas que afectan principalmente al acuífero detrítico subyacente. El PC3 refleja procesos biogeoquímicos locales asociados a condiciones redox variables.

El análisis EMMA del río identifica tres fuentes que representan condiciones hidrológicas contrastantes, necesarias para explicar su variabilidad hidroquímica: una fuente asociada a periodos de crecida, una segunda fuente influenciada por aportes antropogénicos ricos en nitratos y potasio, y, por último, una fuente caracterizada por concentraciones elevadas de sodio, cloruros y sulfatos. Los resultados obtenidos permiten conocer patrones de interacción entre el río y los acuíferos. Durante periodos secos, la descarga subterránea contribuye a la mineralización del río, mientras que en los tramos bajos se observa infiltración de agua fluvial hacia el acuífero aluvial. Además, se detectan intercambios locales de contaminantes entre el río y el acuífero detrítico en zonas urbanas y agrícolas de la cuenca media.

Este enfoque integrado permite caracterizar los procesos que controlan la calidad del agua a escala de cuenca, proporcionando un marco para apoyar la gestión sostenible de los recursos hídricos en sistemas mediterráneos sometidos a una alta presión antropogénica.

Agradecimientos: J.R agradece el apoyo de ANID Becas/Doctorado Internacional folio 72240268. Esta investigación ha sido parcialmente financiada por (i) el proyecto WATER4MED, financiado en la convocatoria PRIMA en 2023, concretamente mediante financiación del MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y de la Unión Europea a través del proyecto PCI2024-153452 y (ii) el proyecto AqUADAPT (CNS2023-144051) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

Evaluación de la incertidumbre en la estimación de los recursos termohidrogeológicos con base en soluciones analíticas y numéricas

Licetd Silva[1], Margorzata Borowiecka[1], Mar Alcaraz[1]

[1]*Universidad Politécnica de Cartagena*

Palabras clave: geotermia somera, gestión sostenible

Resumen. La gestión de la geotermia somera en entornos urbanos exige una precisión rigurosa en la delimitación de las afecciones térmicas o sombras geotérmicas. La interferencia entre captaciones adyacentes y el impacto en el estado térmico natural del subsuelo son fenómenos complejos, condicionados por la elevada incertidumbre en los parámetros hidrogeológicos. En este contexto, el presente trabajo desarrolla una metodología para cuantificar dicha incertidumbre y evaluar la fiabilidad de las predicciones analíticas en comparación con modelos numéricos.

En la fase inicial, se han diseñado una batería de modelos numéricos sintéticos de transporte de calor en medio poroso que acopla los procesos de conducción, advección y dispersión de calor. Se ha implementado una técnica de barrido paramétrico sobre la variable Velocidad de Darcy, ya que ésta puede representar cambios en la conductividad hidráulica, en el espesor y en el gradiente hidráulico. Este enfoque permite procesar de forma sistemática un espectro exhaustivo de escenarios, simulando el comportamiento del sistema ante diferentes configuraciones.

La metodología propuesta se basa en la validación espacial mediante la comparación de las soluciones analíticas clásicas (más sencillas y rápidas de implementar a la hora de la gestión del recurso) con los resultados de la batería de modelos numéricos sintéticos. Para dotar a esta comparación de un valor cuantitativo y objetivo, se ha utilizado el Índice de Jaccard. Esta métrica de similitud permite evaluar el grado de solapamiento entre la geometría de la afección obtenida numéricamente y la predicha analíticamente. Al tratar las sombras geotérmicas como conjuntos espaciales definidos por un umbral de temperatura, el Índice de Jaccard (J) calcula la razón entre la intersección y la unión de ambas áreas. Un valor de J cercano a la unidad indica una coincidencia

espacial casi perfecta, validando la robustez de la malla y la formulación numérica frente a la solución analítica teórica.

Asimismo, el estudio profundiza en la variación espacial de los gradientes de la velocidad de Darcy en los modelos regionales, usando como ejemplo el caso de la ciudad de Murcia. Mediante el cálculo del gradiente de la velocidad de Darcy, se han generado mapas que permiten diferenciar claramente las zonas de cambio de aquellas regiones donde la velocidad de Darcy permanece constante. La capacidad de identificar áreas de flujo estable o "zonas constantes" permite otorgar mayor certidumbre a las soluciones analíticas a la hora de su aplicación para la toma de decisiones en la gestión de la geotermia somera en ciudades.

Aunque el estudio se encuentra en fase de consolidación de resultados, se anticipa que la combinación del barrido paramétrico con la métrica de Jaccard permitirá establecer márgenes de confianza claros para las sombras geotérmicas. En conclusión, este enfoque estandarizado fortalece la planificación energética urbana, asegurando un aprovechamiento sostenible y seguro del subsuelo.

Agradecimientos: Estos resultados son parte del proyecto TED2021-131664A-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU /PRTR

Evaluación de la recarga gestionada del acuífero de Sa Estremera (Mallorca)

Esther Sánchez Sánchez[1], Jordi Guimerà[1], Tybaud Goyetche[1], Sergio Durán[1], Camilo Fernández[2], Abraham García[2], Santiago Del Río[3], Biel Serra[3]

[1]*Amphos 21, SL*
[2]*North Line, SL*
[3]*ABAQUA*

Palabras clave: Recarga gestionada de acuíferos, Pozos de recarga, Abastecimiento urbano, Garantía de suministro

Resumen. El estudio se encuadra en una iniciativa promovida por la L'Agència Balear de l'Aigua i la Qualitat Ambiental, del Govern de les Illes Balears (ABAQUA), en el contexto del proyecto para la mejora de la calidad del agua procedente de la Fuente de Sa Costera para consumo humano y su posterior infiltración de excedentes dentro del acuífero de S'Estremera . Se trata, entre otros aspectos, de definir el sistema que asegure el adecuado aprovechamiento de los excedentes procedentes de la Fuente de Sa Costera y permita utilizar el acuífero como elemento regulador.

Desde hace años, se vienen realizando labores de recarga en este acuífero, con un volumen máximo anual detectado de 5,5 hm^3 en el año 2019, pero se precisa mejorar el sistema dotándolo de mayor garantía. Para ello, se ha analizado la capacidad del acuífero y el potencial de las infraestructuras existentes.

Se proyecta la inyección y almacenamiento en el acuífero carbonatado de S´Estremera de una caudal punta de hasta 6.400 m^3/h, procedente de la ETAP de Sóller, que trata el agua de la fuente cárstica de Sa Costera. Se ha diseñado su ampliación para permitir el tratamiento de todo el caudal procedente de esta captación y maximizar el aprovechamiento del recurso.

El estudio de capacidades aconseja distribuir la inyección entre 4 y 6 pozos, bien de uso exclusivo de recarga o bien del tipo ASR o ASRT, con profundidades del orden de 150-200 m y caudales punta unitarios del orden de 300 l/s. Para ello, se analizan ventajas e inconvenientes de cada tipo.

Se han estudiado las distintas ubicaciones de interés para construir los nuevos pozos, contemplando tanto la posibilidad de aprovechar las instalaciones

existentes que estén libres de riesgo estructural, como la alternativa de construir nuevas instalaciones en las que todos los elementos sean de nuevo desarrollo. El análisis de ubicaciones se ha realizado con un enfoque global teniendo en cuenta tanto las instalaciones de recarga como las de extracción y con una perspectiva hidrogeológica, estructural y operativa.

También se han tenido en cuenta algunos aspectos clave en el equipamiento de los pozos de recarga, que pueden condicionar su operación. Se parte de la premisa fundamental de que la recarga en los pozos se realizará siempre por debajo del nivel piezométrico y evitando la entrada de aire al interior del pozo y acuífero.

Este proyecto se someterá a licitación para su posterior ejecución y operación y permitirá poner en práctica esta propuesta de recarga gestionada y comprobar su idoneidad para dotar de mayor garantía al abastecimiento, así como conocer adecuadamente el comportamiento del sistema: acuífero-pozos de inyección.

Agradecimientos: Agradecimiento a L'Agència Balear de l'Aigua i la Qualitat Ambiental, del Govern de les Illes Balears , por su iniciativa y liderazgo en el proyecto

Evaluación de la recarga natural en acuíferos kársticos en el mundo

Eugenio Sanz Pérez[1], Ignacio Menéndez Pidal Navascués[1], Juan Carlos Mosquera Feijoo[1], Joaquín Sanz de Ojeda[1], Ignacio Laja Santiago[1]

[1]*Esc. Tec. Sup de Ing. de Caminos, C.C. y P.P., Universidad Politécnica de Madrid (U.P.M.)*

Palabras clave: Recarga natural, acuíferos kársticos, SIG, cambio climático

Resumen. La recarga natural en acuíferos kársticos constituye un componente esencial del ciclo hidrológico y una variable clave para la evaluación, protección y gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos. Su estimación a gran escala resulta especialmente relevante en contextos de planificación hidrológica, comparación regional y análisis de vulnerabilidad frente al cambio climático.

Se propone una estimación integrada, transparente y fácilmente actualizable de la recarga natural actual en acuíferos kársticos a escala mundial, con especial interés para la planificación y comparación regional de recursos subterráneos. El enfoque parte de dos premisas operativas: la recarga media anual puede aproximarse, a gran escala, como una fracción estable de la precipitación media anual sobre terrenos carbonatados kársticos, y la delimitación espacial de esos terrenos puede obtenerse de cartografía hidrogeológica global. Con esta base se desarrolla un procedimiento SIG reproducible que combina la distribución superficial de afloramientos carbonatados potencialmente kársticos con la precipitación media anual, generando mapas continuos de recarga específica y estimaciones de volumen anual.

El método adopta una tasa de recarga respecto de la precipitación del 34,31% para el karst, considerada representativa y situada dentro de rangos ampliamente citados en estudios de hidrogeología kárstica a escala regional. La aplicación global se realiza mediante operaciones estándar de superposición espacial, con enmascaramiento de áreas glaciadas y de permafrost, y exclusión de situaciones extremas donde los procesos de recarga no son comparables con el karst templado. Se reconoce que, a esta escala, no se incluye de forma explícita la recarga alógena asociada a pérdidas de ríos hacia el karst ni el comportamiento de acuíferos profundos confinados, por lo que el resultado debe entenderse como una primera aproximación conservadora y homogénea para grandes áreas.

Para evaluar la coherencia del procedimiento, se han realizado aplicaciones previas en dominios extensos y heterogéneos, incluyendo la cuenca del Duero en España, sobre un área efectiva de análisis de aproximadamente 90.000 km², inferior a la superficie total de la cuenca por criterios de delimitación y disponibilidad de información, y varios países europeos. En estos casos se compararon los volúmenes estimados con estadísticas oficiales y evaluaciones independientes, obteniéndose concordancias suficientes para respaldar el uso del método como herramienta de cribado y priorización de zonas. La extrapolación global permite cuantificar el potencial renovable asociado a los afloramientos kársticos del planeta y discutir su peso relativo respecto a estimaciones globales de recursos subterráneos renovables. Los resultados sugieren que el karst constituye una fracción significativa de la recarga subterránea global y, por tanto, un componente crítico del ciclo hidrológico y del abastecimiento potencial en regiones con dependencia de aguas subterráneas.

Finalmente, se incorpora una evaluación prospectiva para un horizonte 2050, recalculando la recarga con cambios proyectados en precipitación y considerando la retracción del hielo como factor que puede exponer nuevos terrenos carbonatados. El balance global indica una disminución neta de la recarga kárstica de aproximadamente 462.533 hm³/año (10,55 %), con compensaciones parciales en áreas donde el retroceso glaciar aumenta la superficie potencialmente recargable. En conjunto, el trabajo aporta una primera imagen global integrada de la recarga kárstica y una base comparativa para el análisis de vulnerabilidad y la toma de decisiones frente a incertidumbres climáticas. El enfoque es especialmente útil cuando la información de campo es limitada, ya que permite actualizar los mapas al incorporar nuevas climatologías o cartografía kárstica, y facilita la comunicación de resultados mediante indicadores de recarga específica y volumen anual por unidad administrativa o cuenca. Palabras clave: recarga, karst, SIG, precipitación, cambio climático

Evaluación de los impactos del cambio climático en el balance hidrológico en cuencas de montaña de los Andes

Víctor Pinilla Pedraza[1], Enric Vázquez-Suñé[1], Sonia Valdivielso[2]

[1]*Instituto de diagnóstico ambiental y estudios del agua (IDAEA), CSIC.*
[2]*Instituto de diagnóstico ambiental y estudios del agua (IDAEA), CSIC. Grupo MAiMA, mineralogía aplicada, geoquímica e hidrogeología (MAGH), departamento de mineralogía, petrología y geología aplicada, facultada de ciencias de la tierra, universidad de Barcelona (UB).*

Palabras clave: recarga, WaterPyBal, cuenca Katari, evapotranspiración

Resumen. La gestión integrada de los recursos hídricos representa un desafío multinivel y multisectorial en las cuencas altoandinas, donde el crecimiento demográfico acelerado, la concentración urbana, los cambios en el uso del suelo, la degradación de la calidad del agua y los peligros asociados al clima, como inundaciones, sequías y deslizamientos, han intensificado la presión sobre los sistemas hídricos. En este contexto, la evaluación del balance hídrico constituye un enfoque fundamental para comprender los procesos hidrológicos, cuantificar la disponibilidad y distribución del agua y apoyar estrategias de gestión hídrica a largo plazo.

Este estudio evalúa el balance hídrico de la cuenca Katari (Bolivia), una cuenca altamente vulnerable dentro del sistema del lago Titicaca, bajo condiciones climáticas actuales y escenarios futuros de cambio climático, a los cuales se les aplicó un procedimiento de corrección de sesgo basado en la comparación con datos observados, con el fin de reducir las incertidumbres asociadas. El análisis se realizó mediante el software WaterPyBal Studio 1.0, que integra variables meteorológicas, propiedades del suelo, usos del suelo y características topográficas para estimar los principales componentes del balance hídrico mediante el método del Número de Curva. Adicionalmente, el análisis incorpora aportes del ciclo urbano del agua y la fusión de glaciares. Los resultados para un año de precipitaciones normales (2022) indican que, a partir de una precipitación anual de 377,78 mm, el 45 % correspondió a infiltración, el 44 % a abstracción inicial y el 11 % generó escorrentía superficial. La recarga de aguas subterráneas representó 15,29 mm/año, equivalente al 4 % de la precipitación y un 9 % del total de agua infiltrada. Posteriormente, se incorporaron las contribuciones del ciclo

urbano del agua y de los procesos de fusión glaciar para refinar el balance hídrico de la cuenca. Los procesos urbanos aportaron aproximadamente 3,53 mm/año al sistema hídrico, mientras que los aportes de nevados y glaciares representaron una contribución anual de 2,32 mm, resultando en una recarga conjunta de aguas subterráneas de 5,85 mm/año.

Las proyecciones climáticas hacia el año 2100 indican cambios sustanciales en el balance hidrológico de la cuenca. Bajo el escenario de bajas emisiones SSP1-2.6, la precipitación anual disminuye a 283,06 mm, la infiltración se reduce al 25 % de la precipitación y la recarga de aguas subterráneas desciende a 2,27 mm, mientras que la evapotranspiración potencial aumenta hasta 1.164,92 mm. En cambio, bajo el escenario de altas emisiones SSP5-8.5, la precipitación se mantiene más cercana a las condiciones actuales (366,58 mm/año), pero el fuerte incremento de la ETP (1.328,65 mm/año) genera un mayor déficit hídrico y una recarga efectiva menor (4,5 mm) en comparación con el modelo base actual de 2022.

Estos resultados sugieren que el aumento de la demanda atmosférica y los cambios en los patrones de precipitación podrían reducir significativamente la recarga de aguas subterráneas en la cuenca Katari hacia finales de siglo, con implicaciones importantes para la disponibilidad de agua a largo plazo en regiones altoandinas.

Evaluación del estado cuantitativo de acuíferos sobreexplotados a partir de la aplicación de índices estandarizados climáticos (SPEI) e hidrogeológicos (SGI)

Pedro Marín Troya[1], Juan Antonio Barberá Fornell[1], Bartolomé Andreo Navarro[1]

[1]*Universidad de Málaga*

Palabras clave: Sur de España, Climatología, Estandarización, Acuíferos carbonatados sobreexplotados

Resumen. En regiones semiáridas mediterráneas (400-500 mm/año) del sur y sureste peninsular predominan afloramientos de rocas calizo-dolomíticas, generalmente discontinuos, que constituyen acuíferos con reservas de agua limitadas, aunque de buena calidad. Este mismo contexto hidrogeológico se da en el norte de la provincia de Málaga, donde las aguas subterráneas son esenciales para el abastecimiento urbano y el desarrollo económico de la región. No obstante, su explotación intensiva durante décadas y el escaso control sobre los bombeos de agua subterránea han motivado la declaración de mal estado cuantitativo y/o cualitativo de los acuíferos.

La presente investigación tiene como objetivo principal analizar la influencia de la variabilidad climática y del uso intensivo del agua subterránea en la evolución temporal de niveles piezométricos de acuíferos carbonatados kársticos sobreexplotados del norte de la provincia de Málaga. Para ello, se han recopilado registros históricos diarios de precipitación y temperatura del aire procedentes de organismos oficiales de 13 estaciones meteorológicas; y datos piezométricos discontinuos, con periodicidad media mensual, de los acuíferos jurásicos (5-17 km^2) de las sierras de Humilladero (índice de explotación -IE-=4), Mollina-La Camorra (IE=4), Archidona (IE=1.2) y Los Caballos (IE=1.1). Las series de datos climáticos y de niveles de agua (1980-2025) se completaron empleando métodos de regresión lineal a partir de otras estaciones de medida/puntos de control próximos. Asimismo, se ha realizado un análisis de tendencias (test de Mann-Kendall y pendiente de Sen) a las series de datos pluviométricos. Finalmente, se han calculado los índices SPEI (6, 12 y 24 meses) y el Índice Estandarizado de Aguas Subterráneas (SGI), que se fundamenta en la estandarización de niveles piezométricos mediante técnicas de normalización no paramétrica.

Los resultados del análisis climático indican una tendencia pluviométrica descendente, con una disminución de hasta 4 mm/año en las proximidades de las sierras de Humilladero y Mollina-La Camorra. En consonancia, en ambos acuíferos se observa que el SGI decrece de manera continuada, con valores negativos desde el año hidrológico 2003/2004 y mínimos históricos en 2024. Al comparar la precipitación (SPEI) y los datos de nivel de agua subterránea (SGI), se aprecia un patrón de comportamiento independiente entre variables, condicionada en gran medida por los bombeos intensivos. En los acuíferos de las sierras de Los Caballos y Archidona, el índice SPEI muestra una evolución en el tiempo similar a las variaciones piezométricas (SGI). Durante los períodos húmedos (SPEI>1), el indicador SGI aumenta con cierto desfase con respecto al índice climático, entre 2 y 24 meses. Esta relación de dependencia estadística, aunque débil, parece estar condicionada por el efecto combinado del déficit hídrico en sequías y las extracciones desmedidas de agua subterránea, intensificada en la última década.

En el estudio de acuíferos sobreexplotados (carbonatados kársticos), el análisis temporal de los factores que más afectan al descenso progresivo de niveles piezométricos, y su contribución en el tiempo, permite entender mejor cómo y con qué ritmo se agotan las reservas acuíferas. La ventaja de la aplicación de este tipo de índices climáticos e hidrogeológicos reside en la normalización estadística de las variaciones paramétricas estacionales, a diferencia de análisis clásico de la relación causal precipitación-nivel piezométrico.

Agradecimientos: Financiado por el programa de ayudas a "Proyectos de Generación de Conocimiento 2023" de la Agencia Estatal de Investigación (PID2023-151910OB-I00).

Evaluación del impacto del cambio climático en la calidad del agua mediante análisis multivariante y aprendizaje automático en la cuenca alta del Guadiana (centro-sur de España)

Nafiseh Salehi Siavashani[1], Sharon Lee Vizcarra Mondragón[1], Estanislao Pujades Garnes[1], Anna Jurado[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), C/Jordi Girona 18, 08034, Barcelona*

Palabras clave: Calidad del agua, Aprendizaje automático, Cambio climático, Cuenca del alto Guadiana

Resumen. Entender las interacciones entre la variabilidad climática y la calidad del agua constituye un desafío importante en regiones áridas y semiáridas, donde los recursos hídricos están cada vez más afectados por cambios en los regímenes hidrológicos, el aumento de las temperaturas y la mayor frecuencia de sequías. En este contexto, este estudio propone una metodología combinando el análisis multivariante y técnicas de aprendizaje automático para investigar la influencia del clima sobre la calidad del agua en la cuenca alta del Guadiana (España). Esta metodología se aplica a dos escalas complementarias: a escala regional, centrada en aguas superficiales de la cuenca del alto Guadiana (16.000 km^2), y a escala local, enfocada en aguas subterráneas de la zona piloto de Peñarroya (450 km^2), representativa por la estrecha interacción entre aguas superficiales y subterráneas. Esta subcuenca está ubicada en un acuífero carbonatado de alta permeabilidad, compuesto principalmente por calizas y dolomías.

A escala regional, se analiza la evolución de las variables climáticas y su posible influencia en la calidad de las aguas superficiales. Para ello, se utilizaron series históricas de temperatura y precipitación correspondientes al periodo 1980–2018, junto con proyecciones climáticas futuras obtenidas del modelo global MIROC-ESM-CHEM dentro del marco CMIP5. Las proyecciones se evaluaron bajo cuatro trayectorias representativas de concentración (RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5) para el periodo 2019–2100. Los parámetros hidroquímicos analizados incluyen conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto y los iones mayoritarios (HCO_3^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, Na^+, Mg^{2+} y Ca^{2+}). Con el objetivo de identificar patrones temporales, tendencias y relaciones entre variables climáticas y parámetros de calidad del

agua, se aplicaron técnicas de análisis multivariante como el análisis de componentes principales y el análisis de conglomerados jerárquicos. Posteriormente, se desarrolló un marco predictivo basado en modelos de aprendizaje automático, particularmente métodos de ensamble como Random Forest, con el objetivo de estimar parámetros hidroquímicos a partir de predictores climáticos e identificar aquellos más sensibles a las condiciones climáticas. Los resultados evidencian una tendencia significativa de aumento de la temperatura, especialmente bajo escenarios de altas emisiones (RCP 6.0 y 8.5), junto con una mayor variabilidad interanual en la precipitación. Estas condiciones influyen en la evolución de diversos parámetros de calidad del agua, reflejando la sensibilidad de los sistemas hídricos a los cambios climáticos.

Paralelamente, a escala de una subcuenca, se está aplicando esta metodología para analizar la relación entre variables climáticas y la calidad de las aguas subterráneas en un área representativa de la cuenca. En este caso, se utilizaron variables climáticas diarias (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación) procedentes de la Agencia Estatal de Meteorología, junto con datos hidroquímicos recopilados entre 2001 y 2021 en diez puntos de muestreo correspondientes a pozos gestionados por la Confederación Hidrográfica del Guadiana.

El enfoque metodológico propuesto permite integrar conjuntos de datos con diferentes escalas espacio-temporales, proporcionando herramientas útiles para la predicción de la calidad del agua y la evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas hídricos frente al cambio climático. Además, esta aproximación ofrece un marco transferible para apoyar la gestión sostenible de los recursos hídricos en regiones sometidas a un creciente estrés climático.

Agradecimientos: Esta investigación forma parte de la subvención PLEC2023-010215 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. N.S.S. agradece la financiación de la ayuda Juan de la Cierva (JDC2024-053428-I), financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

Evaluación del régimen térmico del sistema acuífero Almonte-Marismas mediante perfiles verticales de temperatura

José Luis Yanes Conde[1], Miguel Rodríguez Rodríguez[1], Alejandro Jiménez Bonilla[1]

[1]*Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales. Universidad Pablo de Olavide. Av. Rectora Rosario Valpuesta Fernández, 1, 41089 Dos Hermanas, Sevilla, España*

Palabras clave: Trazadores térmicos, Flujo subterráneo, Acuífero detrítico, Doñana

Resumen. El sistema acuífero Almonte-Marismas integra seis masas de agua subterránea que sustentan los ecosistemas de Doñana, así como diversas actividades agrícolas y urbanas en la región. Este sistema, en las últimas décadas, ha estado sometido a fuertes impactos, principalmente los derivados de las extracciones para el turismo y la agricultura, situación agravada por las intensas sequías recurrentes en el contexto climático actual. En este sentido, resulta fundamental evaluar la extensión espacial de estos impactos para poder tomar decisiones de gestión y planificación adecuadas.

La temperatura del agua constituye un trazador natural del flujo subterráneo, cuya utilidad en medios detríticos costeros, y específicamente en el acuífero de Doñana, ha sido ampliamente documentada. Entre los años 2002 y 2005 se realizó una campaña de caracterización hidrogeológica del acuífero mediante prospección geofísica en la que se obtuvieron, entre otros, perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en diversos sondeos distribuidos por todo el sistema acuífero Almonte-Marismas. En el presente trabajo se ha llevado a cabo una revisión y análisis de dichos registros históricos, lo que ha permitido caracterizar el régimen térmico del sistema y estimar los gradientes geotérmicos existentes en diferentes sectores del acuífero a principios del siglo XXI. Los resultados obtenidos indican que, bajo el régimen térmico observado en la campaña de 2002–2005, los perfiles térmicos presentan gradientes del orden de 2,5-3 °C/100 m en la zona geotérmica conductiva, que se alcanza aproximadamente entre los 20-50 m de profundidad. No obstante, en zonas de recarga o descarga del sistema, donde existen flujos verticales significativos, el perfil se homogeniza y el gradiente geotérmico se reduce hasta valores próximos a 1 °C/100 m.

Con el objetivo de evaluar posibles modificaciones en este régimen térmico, durante los años 2025 y 2026 se han realizado nuevos perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en los mismos piezómetros profundos distribuidos a lo largo del acuífero que fueron investigados en la campaña de 2002-2005. La comparación entre los perfiles actuales y los registros históricos muestra que, en zonas sometidas a bombeo sostenido, como el entorno del núcleo turístico de Matalascañas, el gradiente geotérmico ha experimentado una reducción muy significativa respecto a los valores medidos previamente. En estos sectores se observa un perfil prácticamente homotérmico, con gradientes próximos a 0 °C/100 m, o incluso inversión del gradiente, lo que podría ser compatible con un enfriamiento progresivo de los niveles más profundos del acuífero por el desplazamiento de la zona homotérmica hacia mayores profundidades.

Estos resultados sugieren que las extracciones desde los niveles más productivos del acuífero inducen flujos verticales descendentes que transportan agua más fría desde niveles superiores, modificando el régimen térmico natural del sistema. En consecuencia, el análisis de perfiles térmicos puede ser una herramienta especialmente útil para identificar la influencia espacial de los bombeos en medios altamente transmisivos, donde los descensos piezométricos pueden resultar poco evidentes.

Agradecimientos: Estudio financiado por el Convenio de investigación: Monitorización hidrológica y modelización de la relación laguna-acuífero en los mantos eólicos de Doñana. Seguimiento y ampliación del inventario (BOE-A-2023-13925).

Evaluación integrada del impacto del cambio climático y la propagación de la sequía en la respuesta hidrogeológica de la cuenca del río Mecina (Sierra Nevada)

Jorge Jódar Bermúdez[1], Thomas Zakaluk[1], Antonio González-Ramón[1], Luis Javier Lambán-Jiménez[1], Sergio Martos-Rosillo[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC)*

Palabras clave: Sierra Nevada, Cambio Climático, Sequía, HBV

Resumen. La cuenca del río Mecina, situada en la vertiente sur de Sierra Nevada, constituye un sistema hidrológico que, aun estando desarrollado en rocas duras (esquistos), juega un papel fundamental para la sostenibilidad hídrica local. Para reproducir el funcionamiento hidrodinámico de la cuenca, en términos de caudal de descarga, se calibrado un modelo hidrológico HBV, que incluye en su formulación conceptual una parametrización semiagregada para simular los procesos de precipitación y escorrentía. Este modelo se emplea ampliamente en previsiones hidrológicas y en estudios de balance hídrico en cuencas hidrológicas de montaña donde la información suele ser escasa. A partir del modelo calibrado, este trabajo presenta una evaluación integrada del impacto del cambio climático sobre el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico de la cuenca, simulando con el modelo la respuesta hidrológica de la cuenca para los escenarios de referencia (1961–2005) y futuros (2070–2100, RCP4.5 y RCP8.5) del set de 12 modelos climáticos recomendados por la AEMET, como los más apropiados, para el ámbito geográfico de la península ibérica. Los resultados de la modelación climática se analizan desde la perspectiva de la evaluación de la propagación de la sequía, utilizando para ello el método umbral. Los resultados permiten caracterizar de manera robusta la evolución de la recarga, la descarga subterránea y el caudal total, así como el modo en que las sequías meteorológicas se transforman en sequías hidrológicas más persistentes e intensa para los escenarios de referencia y RCPs considerados.

Desde una perspectiva de las variables climáticas, los escenarios analizados muestran una reducción moderada de la precipitación en todos los meses del año respecto al periodo de referencia, con descensos acumulados del orden del 40%

en RCP4.5 y superiores al 50% en RCP8.5, particularmente en otoño e invierno que, en condiciones naturales, constituyen los periodos clave para la recarga del acuífero. Este descenso viene acompañado de un incremento térmico medio generalizado de 1.9 ^{o}C y 3.8 ^{o}C para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Desde una perspectiva hidrológica, el incremento térmico intensifica la demanda evaporativa y reduce la disponibilidad de agua para el proceso de recarga, que cae significativamente en ambos escenarios, llegando a superar la mayor parte del año reducciones superiores al 43% y el 59% para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Esta pérdida de aportes subterráneos impacta de manera marcada en la escorrentía total de la cuenca que, para los mismos escenarios climáticos disminuye el 42% y un 56%, respectivamente, reduciendo de manera notable la capacidad del acuífero para sostener el caudal de base del río durante el estiaje.

La evaluación de la sequía, basada en indicadores clásicos de duración, déficit e intensidad de la sequía, confirma una intensificación significativa de los episodios de escasez. La duración media de las sequías meteorológicas pasa de 20 días en el periodo histórico a 75–86 días en los escenarios futuros, mientras que la sequía asociada a la recarga experimenta un incremento de un orden de magnitud tanto en duración como en déficit e intensidad. Este comportamiento refleja un sistema donde la señal de sequía se amplifica conforme progresa a través del ciclo hidrológico, en línea con los procesos de superposición y alargamiento de los eventos de sequía según esta se propaga por sistema hidrológico.

En conjunto, los resultados apuntan hacia un futuro hidrológico caracterizado por disminuciones estructurales en la recarga del acuífero, menores caudales base y una intensificación sustancial de las sequías hidrológicas. Este escenario implica una merma notable en la resiliencia del sistema y subraya la necesidad de estrategias de gestión hídrica orientadas a la conservación de la recarga, al uso eficiente del recurso y a la adaptación de los ecosistemas dependientes del agua subterránea. La cuenca del Mecina constituye así un caso representativo de la vulnerabilidad de los sistemas hidrológicos de montaña mediterránea frente al cambio global.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el ámbito del proyecto Impacto, seguimiento y evaluación del cambio climático y global en los recursos hídricos en Parques Nacionales de alta montaña" (OAPN, Ref. 2741/2021)

Evaluación isotópica de la eficiencia de la desnitrificación inducida en el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena (Murcia)

Helena Escalona-Orellana[1], Rosanna Margalef-Martí[1], José A. Luque Marín[1], Edison Steven Morales[2], José H. Jiménez-Guíñez[2], Virginia Robles-Arenas[2], Marisol Manzano[2], Neus Otero[1], Albert Soler[1]

[1]*Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Institut de Recerca de l'Aigua (IdRA), Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, España.*

[2]*Departamento de Ingeniería Minera y Civil, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), España.*

Resumen. La contaminación por nitratos es uno de los principales problemas de las aguas subterráneas en regiones agrícolas, a pesar de las restricciones sobre el uso de fertilizantes vigentes en la Unión Europea desde la década de 1990. Un caso representativo es el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena, cuyas aguas subterráneas descargan hacia el Mar Menor, contribuyendo a episodios recurrentes de eutrofización con importantes impactos ecológicos y socioeconómicos.

La desnitrificación del nitrato a gas dinitrógeno constituye una estrategia de remediación eficaz. Este proceso ocurre en condiciones anóxicas y requiere un donador de electrones, como el carbono orgánico, cuya disponibilidad suele ser limitada en muchos acuíferos, lo que restringe su ocurrencia natural. En este contexto, el uso de fuentes externas de carbono orgánico, especialmente subproductos agroindustriales, se plantea como una alternativa viable y económicamente más sostenible que los compuestos puros, particularmente en aplicaciones a gran escala o a largo plazo.

Este estudio evalúa la viabilidad del uso de suero lácteo como donador de electrones para inducir la desnitrificación in situ en el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena. Para ello, en la primavera de 2025 se construyó una planta piloto compuesta por cuatro pozos, donde se implementó durante seis meses una estrategia de inyecciones periódicas de suero, cuya dosificación fue previamente optimizada mediante experimentos de laboratorio (microcosmos y columna de flujo continuo) con el fin de prever la respuesta química del sistema ante efectos

secundarios no deseados, como el crecimiento excesivo de biomasa y la acumulación de carbono orgánico disuelto, la sulfato-reducción, la formación de amonio o la acumulación de nitrito.

Las concentraciones basales de nitrato en la planta piloto oscilan entre 200 y 260 mg/L. Tras dos meses de tratamiento, la concentración de nitrato en el pozo de inyección descendió por debajo de 3 mg/L. Posteriormente, la dosis de suero se redujo para evitar efectos secundarios no deseados al observarse acumulación de suero lácteo en el pozo de inyección por el crecimiento excesivo de biomasa, al mismo tiempo que se mantuvieron las concentraciones de nitrato por debajo del umbral regulatorio español (37,5 mg/L). En el resto de pozos se observaron fluctuaciones temporales de nitrato (80–260 mg/L) con una tendencia general decreciente desde el inicio de las inyecciones, sin acumulación de nitrito ni carbono orgánico disuelto. Los análisis isotópicos en curso ($\delta^{15}N$ y $\delta^{18}O$ del nitrato) permitirán identificar y cuantificar la eficiencia de la desnitrificación, diferenciando la reducción de la masa de nitrato de otros procesos físicos como dilución, dispersión, etc.

Agradecimientos: Este estudio ha sido financiado por los proyectos REMEDIATE (TED2021-131005B) e ISOTRACE (PID2022-139911OB-C41)

Evolución hidrogeoquímica del sistema acuífero-río de la cuenca alta del Llobregat durante la sequía y la recuperación hidrológica

Benjamín Crisóstomo[1], Marta Turull[1], Sergio Carrero[1], Enric Vázquez-Suñé[1], Sergi Díez[1], Deby Jurado[2], Sonia Valdivielso[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Geociencias, Barcelona, España.*
[2]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Geociencias, Barcelona, España. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España.*

Resumen. La caracterización hidrogeoquímica de acuíferos de montaña es clave para comprender la respuesta de los sistemas hídricos frente a sequías prolongadas, especialmente en un contexto de cambio climático. En este trabajo se evalúa la distribución espacial y temporal de parámetros fisicoquímicos, elementos mayoritarios, nutrientes y elementos traza en el sistema acuífero-río de la cuenca alta del Llobregat (Pirineo oriental), con especial atención al periodo de sequía 2021–2024 y a la posterior recuperación hidrológica. Se analizaron 23 puntos de muestreo, incluyendo precipitación, río principal, tributarios, manantiales y piezómetros, en cuatro campañas: abril de 2024 (en sequía), junio y septiembre de 2024, y mayo de 2025 (en post-sequía). Se realizó modelización geoquímica inversa en PHREEQC para evaluar la coherencia entre la hidroquímica observada, la mineralogía del sistema y los procesos de interacción agua-roca, así como un Análisis de Componentes Principales (PCA) para identificar los patrones hidrogeoquímicos dominantes.

Los manantiales situados en la cabecera del Llobregat y los piezómetros próximos a Les Fonts del Llobregat presentan facies bicarbonatadas cálcicas y baja mineralización, lo que sugiere que forman parte de una misma unidad acuífera somera desarrollado en rocas carbonatadas. A escala de cuenca, la composición química evoluciona aguas abajo por efecto de los aportes subterráneos, la mezcla con los ríos tributarios y el control litológico. Aunque el sistema se mantiene como facies bicarbonatada cálcica, destaca la influencia del río Saldes, de facies clorurada sódica y alta mineralización, responsable del principal enriquecimiento en Cl^-, Na^+ y, en menor medida, K^+ aguas abajo. En los elementos traza se observa una tendencia general de incremento longitudinal para As, B, Ba, Li, Mn, Rb, S, Sr,

U y V. Además, ciertos elementos (e.g. As, Ba, Cu y Ti) presentan señales locales asociadas a tributarios o a aguas subterráneas. La normalización de las concentraciones respecto el caudal muestra que la variabilidad estacional de este último explica la mayor parte de las fluctuaciones observadas en los elementos mayoritarios (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}), mientras que los elementos traza y nutrientes (NH_4^{+}, NO_2^{-}, NO_3^{-}) mantienen patrones que no pueden atribuirse únicamente a la dilución hidrológica. La persistencia de anomalías positivas durante condiciones de bajo caudal y su atenuación parcial posterior sugieren que la sequía ejerció una influencia fundamental sobre los procesos biogeoquímicos, más allá de efectos meramente estacionales. El PCA evidenció un fondo geoquímico común controlado por la litología y la interacción agua-roca, sobre el cual se superpone una variabilidad secundaria asociada al tipo de agua y a la evolución sequía-postsequía.

Estos resultados aportan una base para la caracterización hidrogeoquímica integrada de acuíferos y su conexión con aguas superficiales en cuencas mediterráneas de montaña sometidas a eventos hidrológicos extremos.

Exploración de nuevos recursos hídricos subterráneos en Kenia. El caso del acuífero neógeno.

Jordi Guimerà[1], Ximena Venier[1], Travis Keslay[1], Vincent Okello[2], Canute Mwakamba[2], Beatrice Githinji[2], Salma Sheba[2], Maina Githinji[2], angelo Chamane[3], Salvador Mondlane[3], Agatha Njuguna[4], Mohamed Shurie[4], S. Oiro[4], M. Amino[4], A. Omar[4], David Shokut[4], A. Ndungu[4]

[1]*Amphos 21 (Barcelona)*
[2]*CGP Engineering (Kenia)*
[3]*GMSC (Mozambique)*
[4]*Water Resources Authority (Kenia)*

Palabras clave: Exploración, Acuíferos profundos, Kenia, Desarrollo de recursos

Resumen. El descubrimiento de un acuífero neógeno en Tanzania, con agua dulce cerca de la costa hace dos décadas, impulsó la exploración de una formación geológica similar en Kenia, al menos de edad geológica similar. La WRA ha recibido fondos del WB en el marco del Proyecto HOAGW4RP para estudiar el potencial hídrico de las formaciones neógenas en el sureste de Kenia. Este trabajo abarca zonas costeras e interiores de los condados de Lamu, el río Tana y Garissa.

Los objetivos de este artículo son(1) definir la geometría de las formaciones neógenas; (2) describir los materiales geológicos y la presencia del acuífero en el Neógeno; (3) describir las características del agua subterránea del acuífero, y (4) cuantificar la recarga natural y la descarga al mar.

Dado que las formaciones neógenas no afloran ni en el área de estudio ni en Kenia, la delimitación se basa principalmente en información heredada de la exploración del petróleo y gas, corroborada con nuevos estudios geofísicos y sondeos exploratorios. El área de estudio abarca aproximadamente 61.000 km² .

El Neógeno, si bien sigue estando dominado por los depósitos del delta del río Tana, también incluye calizas de la plataforma continental, como la Formación Baratumu.

Se ha realizado un estudio de campo para identificar los principales pozos de agua de la zona y recolectar muestras de agua para análisis hidroquímicos e isotópicos. En ese momento, no se diferenciaban los pozos que intersectaban la Formación

Marafa , superpuesta al Neógeno, al Neógeno o a ambos. Se identificaron más de 100 pozos y se muestrearon 23. La evidencia preliminar también apunta a limitaciones localizadas en la calidad del agua costera, como la salinidad y la posible influencia del agua de mar, lo que resalta la necesidad de una estrategia de desarrollo conservadora, respaldada por el monitoreo y la interpretación.

Se han evaluado los parámetros del acuífero utilizando el rendimiento específico de algunos pozos inventariados y datos proporcionados por WRA.

El balance hídrico distribuido ha permitido estimar los componentes clave del ciclo hidrológico en la región de estudio. Se utilizaron datos satelitales de libre acceso y herramientas geoespaciales de código abierto para cuantificar los valores mensuales y anuales de precipitación (P), evapotranspiración (ET), escorrentía superficial (Q) y recarga neta (ΔS). Paralelamente, se desarrolló el primer análisis regional de idoneidad para recarga gestionada de acuíferos, MAR, utilizando un marco multicriterio y se comparó con la vulnerabilidad intrínseca, para respaldar la identificación de zonas prioritarias, evitando las áreas sensibles.

Hay algunas cuestiones que necesitan resolverse mediante perforaciones exploratorias y de monitoreo, a saber: (1) el origen del agua salada en las formaciones neógenas lejos de la costa; (2) la presencia de agua salina en diferentes partes del área de studio y (3) la presencia de agua dulce en el área costera.

Con estos resultados se elabora un modelo numérico regional de aguas subterráneas que busca integrar la evidencia disponible, probar las hipótesis conceptuales y servir como herramienta preliminar para la gestión de las aguas subterráneas en la zona. Las primeras estimaciones arrojan un volumen de rercursos renovables del orden de varios hectómetros cúbicos que, de ser puestos en explotación, progresivamente alejarían a la población de las amenazas de sequía que actualmente padecen de forma recurrente. Del mismo modo, permitiría el desarrollo de poblaciones costeras como Lamu en una forma similar a lo que ha sido Mombasa.

Formación continua avanzada en hidrogeología: experiencia de un modelo docente híbrido sincrónico

Roser Escuder[1], Albert Soler[2], Enric Vàzquez-Suñé[3], Rotman Criollo[4], Cristina Domènech[2], Salvador Jordana[5], Estanislao Pujades[3], Clara Torrentó[6], Ester Vilanova[5]

[1]*Grup MAiMA, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB) Martí i Franqués s/n, Barcelona. Máster de Formación Permanente Hidrogeología y Modelación.*
[2]*Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), 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 i Franqués s/n, Barcelona. Máster de Formación Permanente Hidrogeología y Modelación.*
[3]*Departamento de Geociencias, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Jordi Girona 18, Barcelona. Máster de Formación Permanente Hidrogeología y Modelación.*
[4]*Global Change Research Group (GCRG), Mediterranean Institute for Advanced Studies (IMEDEA), CSIC-UIB, Esporles, Spain. Máster de Formación Permanente Hidrogeología y Modelación.*
[5]*Amphos 21 Consulting, Pujades 340, 4ª planta, Barcelona. Máster de Formación Permanente Hidrogeología y Modelación.*
[6]*Grup MAiMA, SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH), 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 i Franqués s/n, Barcelona, Serra Húnter Fellowship, Generalitat de Catalunya. Máster de Formación Permanente Hidrogeología y Modelación.*

Palabras clave: Hidrogeología, Modelización, Máster

Resumen. La formación continua avanzada en hidrogeología y modelización numérica de acuíferos afronta actualmente un reto importante: compatibilizar la adquisición de conocimientos técnicos especializados con la actividad profesional, en el caso de profesionales que buscan especializarse, y la conciliación personal

del alumnado. Muchos profesionales, de formación diversa (como geología, ingenierías y ciencias ambientales), interesados en mejorar su formación en el campo de la hidrogeología y modelización numérica, se encuentran con dificultades para acceder a programas formativos intensivos totalmente presenciales que requieren de varios meses de dedicación completa a los estudios. La alternativa, los modelos completamente virtuales suelen limitar la interacción directa y el seguimiento del aprendizaje en contenidos de elevada complejidad técnica como es la hidrogeología.

En este contexto, el Máster de Formación Permanente en Hidrogeología y Modelación (MHGM), impartido conjuntamente por la Universitat de Barcelona y el IDAEA-CSIC, adopta un modelo docente híbrido sincrónico orientado a responder a estas necesidades. El programa admite alumnado presencial y remoto en un mismo espacio de aprendizaje de interacción simultánea, manteniendo las ventajas de la docencia presencial y facilitando al mismo tiempo el acceso a personas con limitaciones geográficas o laborales. Desde su implantación en 2022, este enfoque ha favorecido además una notable diversidad geográfica y profesional. El aula dispone de tecnología que garantiza una comunicación oral y visual fluida entre profesorado y alumnado, y las clases se graban para facilitar la revisión posterior de contenidos complejos y reforzar el seguimiento continuado del aprendizaje. Por otro lado, todo el alumnado debe asistir a las prácticas presenciales y las salidas de campo que se concentran en varias semanas intensivas durante el primer curso, en las cuales se crean además vínculos profesionales.

El máster, de 90 ECTS en dos años, organiza tres clases diarias de una hora durante cuatro días por semana, favoreciendo la compatibilidad con la actividad profesional. La carga docente y la duración del programa permiten además abordar los contenidos con un nivel de profundidad difícil de alcanzar en formatos más intensivos o de menor duración. Además, su estructura modular permite seguir el máster a marcha lenta cursando asignaturas de forma progresiva y completar la titulación en un periodo más amplio (tres o más años) adaptando el ritmo de dedicación según las necesidades del alumnado.

Este modelo también facilita la participación de una plantilla amplia y diversa de 80 - 90 especialistas reconocidos procedentes del ámbito académico, profesional y de la gestión de recursos hídricos, garantizando una formación rigurosa, multidisciplinar y aplicada. El primer curso incluye contenidos de hidráulica de acuíferos, planificación y gestión de recursos hídricos, prospección y explotación, contaminación, hidroquímica y geoquímica isotópica. El segundo curso profundiza en hidrogeología aplicada, la interacción con minería y obra civil, geotermia, hidrogeoquímica y modelización numérica avanzada. Los talleres de

software desarrollados con más profesorado en el aula garantizan una atención más personalizada y favorecen además una dinámica de aprendizaje activo y aplicado. El Trabajo Final de Máster se orienta a resolver problemas reales vinculados al entorno profesional del estudiante, reforzando el carácter aplicado de la formación.

Desde su inicio en 2022, el MHGM ha experimentado un crecimiento sostenido y una valoración muy positiva por parte del alumnado. Para garantizar la calidad de la enseñanza y un seguimiento adecuado, el número de plazas se limita a 25 por curso; actualmente, entre los dos cursos, el máster cuenta con 50 estudiantes, además de aquellos estudiantes que lo realizan a marcha lenta. Las encuestas de valoración del alumnado destacan la calidad docente, la utilidad profesional de los contenidos y la flexibilidad del modelo híbrido sincrónico.

En conjunto, la experiencia del MHGM muestra que la docencia híbrida sincrónica constituye no solo una alternativa viable, sino una evolución natural de la formación continua avanzada en hidrogeología, especialmente en un contexto en el que la conciliación laboral y personal condiciona cada vez más el acceso a programas de especialización.

Formación interdisciplinar en gestión de recursos hídricos mediante trabajo de campo: experiencia docente en la cuenca de la Muga

Jofre Herrero Ferran[1], Diana Puigserver Cuerda[1], Alberto Millán Martos[1], Joaquim Farguell Pérez[1], Joan Gomà Martínez[1], José Francisco García Martínez[1]

[1]*Universitat de Barcelona*

Palabras clave: Gestión integrada del agua, Hidrogeología aplicada, Trabajo de campo interdisciplinar, Sequía y sostenibilidad hídrica

Resumen. La formación en gestión de recursos hídricos requiere integrar conocimientos hidrológicos, hidrogeológicos, ambientales y socioeconómicos en contextos reales donde los conflictos por el agua sean evidentes. En este contexto, la asignatura Escuela de Campo del Máster en Ciencia y Gestión Integral del Agua de la Universitat de Barcelona utiliza la cuenca de la Muga (Alt Empordà, NE de la Península Ibérica) como caso de estudio para desarrollar un aprendizaje aplicado basado en el análisis de un sistema hidrológico mediterráneo sometido a múltiples presiones.

La cuenca de la Muga constituye una unidad de gestión compleja de aproximadamente 1.000 km² que integra el sistema fluvial principal y diversas cuencas costeras interconectadas mediante infraestructuras de abastecimiento y acuíferos compartidos. Este sistema presenta una elevada diversidad de usos del agua, incluyendo abastecimiento urbano, agricultura de regadío, turismo y conservación de ecosistemas, lo que genera tensiones recurrentes entre demandas sociales y disponibilidad de recursos.

Las tendencias climáticas observadas en las últimas décadas muestran un incremento de las temperaturas medias y una mayor irregularidad en las precipitaciones, con un incremento de los periodos de sequía, tanto en su frecuencia como en su duración. A ello se suma el aumento de la presión turística y agrícola, así como la vulnerabilidad de los acuíferos costeros a procesos de intrusión salina. Estos factores convierten la cuenca en un escenario idóneo para analizar los retos actuales de la gestión del agua en regiones mediterráneas.

La asignatura se estructura en torno a una campaña intensiva de cinco días de trabajo de campo, complementada con actividades de laboratorio y análisis de

datos. Durante el trabajo de campo los estudiantes realizan muestreos hidroquímicos, visitas a infraestructuras hidráulicas y encuentros con gestores y técnicos del territorio. Posteriormente, las muestras se analizan en laboratorio y los datos obtenidos se integran con información pública hidrológica, climática y socioeconómica para elaborar un diagnóstico del sistema hídrico.

El enfoque pedagógico combina aprendizaje basado en problemas, trabajo interdisciplinar y análisis de casos reales de gestión. De este modo, los estudiantes deben evaluar el papel de los recursos subterráneos dentro del sistema hidrológico, analizar su interacción con los recursos superficiales y valorar su importancia estratégica durante episodios de sequía. Asimismo, se discuten aspectos como la intrusión marina en el acuífero fluviodeltaico Muga-Fluvià, la gestión de los recursos en periodos de escasez y los conflictos entre diferentes usuarios del agua.

La experiencia docente muestra que el trabajo de campo en sistemas hidrogeológicos reales facilita la integración de conocimientos adquiridos previamente y mejora la comprensión de los procesos que condicionan la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en contextos mediterráneos donde las aguas subterráneas desempeñan un papel clave como recurso estratégico frente a la variabilidad climática.

Gemelo digital para la gestión sostenible del abastecimiento de Palma: Modelización acoplada de acuíferos bajo escenarios de cambio climático

Diego Sampietro Lardiés[1], Roger Mas Boti[1], Carlos Bedmar Martin Merino[2], Lidia Barbero Blanco[1], Salvador Bueso Sánchez[2], Ana Rodríguez Godoy[3], Pau Estrany Planas[3]

[1]Veolia. Paseo de la Zona Franca, número 48, 08038 – Barcelona
[2]Veolia. Avda. Teniente Montesinos, 8, Edificio Z, Planta 7, 30100 Murcia
[3]EMAYA. Camí dels Reis 400, 07010 Palma

Palabras clave: Modelización, Gemelo digital, Cambio climático, Abastecimiento

Resumen. El sistema de abastecimiento de Palma de Mallorca depende de múltiples masas de agua subterránea hidráulicamente interconectadas, sometidas a presiones crecientes derivadas de la demanda urbana, la intrusión salina costera y la variabilidad climática. La gestión sostenible de este sistema requiere superar enfoques locales o sectoriales y avanzar hacia una modelización integrada del dominio hidrogeológico, capaz de apoyar la toma de decisiones estratégicas en la planificación y explotación de recursos.

Este trabajo presenta el desarrollo de un gemelo digital de los acuíferos que abastecen a Palma de Mallorca, con el objetivo de disponer de una herramienta numérica que facilite la gestión sostenible del recurso. La ponencia se centra en la metodología empleada para su construcción basada en un modelo geológico tridimensional regional que integra información geofísica, piezométrica y litológica disponible, junto con una adaptación de la delimitación oficial de las masas de agua subterránea. Esta adaptación permite representar mejor la heterogeneidad del sistema y las interacciones entre acuíferos. El dominio se discretiza en cuatro modelos hidrogeológicos independientes pero acoplados dinámicamente: Norte/Estremera-Inca, Oeste/Tramuntana, Este/Xorrigo y Sur/Palma-Sant Jordi.

Todos ellos han sido desarrollados con el código de diferencias finitas MODFLOW y alimentados con datos meteorológicos, hidrogeológicos e hidrológicos procedentes de organismos como AEMET, la Dirección General de Recursos Hídricos y Riscbal. El modelo incorpora una distribución espacialmente

heterogénea de la recarga, considerando variaciones litológicas, orográficas y climáticas.

La principal innovación radica en la estrategia de acoplamiento entre modelos. Cada uno se calibra de forma independiente según sus características hidrogeológicas, pero incorpora condiciones de contorno interdependientes que permiten reproducir los flujos entre cuencas y las transferencias regionales. Este enfoque modular reduce la complejidad computacional, mantiene la estabilidad numérica y garantiza la coherencia hidráulica a escala regional. Además, permite analizar cómo los cambios en explotación, recarga o recirculación en un sector afectan al conjunto del sistema.

Una vez calibrado, el modelo se utiliza para simular escenarios a corto y medio plazo bajo distintas proyecciones climáticas (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) evaluando la sensibilidad del balance hídrico regional, la evolución de los niveles piezométricos y el riesgo de intensificación de la intrusión. Asimismo, la herramienta permite analizar medidas de adaptación de la red a los posibles cambios como la redistribución de bombeos, la incorporación de nuevas captaciones, la recarga artificial con excedentes o el uso de recursos no convencionales.

Los resultados muestran que la modelización modular acoplada permite identificar umbrales críticos de explotación, optimizar la asignación de recursos y priorizar actuaciones estratégicas desde un enfoque integral. Asimismo, la adaptación de la delimitación de las masas de agua subterránea oficiales a unidades hidrogeológicas coherentes con los modelos facilita la integración entre la gestión administrativa y la simulación técnica, reforzando la utilidad operativa del modelo para la planificación adaptativa del abastecimiento urbano. Este enfoque constituye una herramienta robusta, flexible y replicable para la gestión sostenible de sistemas hidrogeológicos complejos y compartimentados, transformando el modelo numérico en un soporte de decisión operativo capaz de anticipar riesgos y guiar las inversiones en infraestructuras hídricas.

Generación de conocimiento sobre la contaminación por metales pesados en el agua subterránea del sur de Honduras y su relevancia en la elevada incidencia de enfermedad renal crónica

Acacia Naves García-Rendueles[1], Marta López Alonso[2], Tania María Peña Paz[3], Isabel Margarida Antunes[4], Teresa Valente[4], Josseline Faviola Núñez Maradiaga[3], Fátima Patricia Gomes[4], Marcio Chirinos Escobar[3], Luis Montenegro Pérez[1]

[1]*Universidade da Coruña, Centro Interdisciplinar de Química e Bioloxía (CICA), A Coruña, España.*
[2]*Universidade de Santiago de Compostela, Instituto de investigación iTERRA, Lugo, España*
[3]*Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT), Tegucigalpa, Honduras.*
[4]*Universidade do Minho, Instituto de Ciências da Terra (ICT), Braga, Portugal.*

Palabras clave: metales, contaminación, Honduras, enfermedad renal

Resumen. El proyecto CADMIO analiza la posible relación entre la contaminación por metales pesados en aguas subterráneas y la alta incidencia de enfermedad renal crónica (ERC) en los departamentos de Valle y Choluteca, en el sur de Honduras.

La ERC se ha convertido en la principal causa de muerte en hombres jóvenes sin antecedentes cardiovasculares en Centroamérica, con carácter epidémico en la costa pacífica. En Honduras, la SESAL ha documentado una elevada prevalencia de ERC de origen no determinado en la zona de estudio. Su etiología es multifactorial e incluye factores biológicos, ambientales, ocupacionales y sociales, como la exposición a agroquímicos, las condiciones laborales a altas temperaturas, el estrés hídrico, el limitado acceso al agua, la dieta, la presencia de comorbilidades (diabetes, hipertensión o leishmaniosis) y las barreras de acceso a la atención sanitaria. A estos factores se suma otra posible causa analizada en este trabajo: la presencia de metales pesados en las fuentes de agua, especialmente en los periodos secos prolongados.

El país carece de información geológica a escala adecuada, de datos hidrogeoquímicos sistemáticos y, en algunas regiones, de capacidad analítica suficiente. La evidencia disponible sobre metales pesados en aguas subterráneas se limita a análisis puntuales y muy localizados que muestran concentraciones elevadas de cadmio (Cd) y otros metales (Pb, Fe, etc.). En este contexto, se plantea una primera caracterización integrada de aguas subterráneas, suelos y cadena trófica para evaluar la magnitud y el origen del problema, con especial atención al Cd, uno de los metales más tóxicos y con reconocida bioacumulación y nefrotoxicidad.

En el proyecto CADMIO participan la Universidad de A Coruña (UDC), la Universidad de Santiago de Compostela (USC), la Universidade do Minho (UM) y la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH) y tiene un enfoque multidisciplinar, con una metodología que combina hidrogeología, geoquímica ambiental y biomonitorización. En febrero de 2026, investigadoras de las 4 instituciones junto con personal de entidades locales (SESAL, mancomunidad de municipios, ONGs y vecinos) se han desplazado a realizar trabajo de campo en dos comunidades rurales especialmente afectadas por la ERC y una comunidad de control con menor afección. Se han realizado campañas de muestreo de aguas subterráneas y superficiales que serán analizadas con análisis elementales completos (AAS e ICP-MS) en la UDC. Muestreos de suelos dirigidos por la UM para evaluar asociaciones mineralógicas y posibles focos antrópicos o naturales de Cd. Paralelamente, la USC liderará el análisis de alimentos, tejidos y sangres de animales, con el fin de determinar si la contaminación ha alcanzado la cadena trófica. Este aspecto crítico permitirá evaluar la exposición humana tanto por consumo de agua como por ingestión de productos animales y vegetales locales.

El proyecto tiene además un componente estratégico: fortalecer la capacidad nacional en el monitoreo de la calidad del agua y en la evaluación de metales pesados, impulsando laboratorios públicos como el del IHCIT (UNAH) y formando personal técnico de la SESAL, la UNAH y CESCCO en muestreo, preparación de matrices biológicas y protocolos de análisis.

CADMIO representa, por tanto, un avance significativo para la hidrogeología aplicada en Centroamérica. Proporcionará el primer conjunto de datos robustos sobre distribución, origen y movilidad del cadmio en acuíferos hondureños, evaluará su transferencia a la cadena trófica y generará insumos esenciales para la futura norma técnica de aguas subterráneas que Honduras está desarrollando. Sus resultados pretenden orientar estrategias de protección de acuíferos, seleccionar de forma informada captaciones para abastecimiento y diseñar tecnologías apropiadas de tratamiento en zonas rurales, contribuyendo a mitigar una problemática sanitaria muy probablemente vinculada a la calidad del agua.

Agradecimientos: Este proyecto ha sido financiado por la convocatoria Investigación para el Desarrollo 2025 de la Xunta de Galicia (PR815A/2025/26) y complementa las iniciativas que desarrollan en la zona la Mancomunidad NASMAR, CODDEFFAGOLF y Enxeñería Sen Fronteiras Galicia. La investigadora principal cuenta, además, con apoyo del Proyecto de Consolidación GRC de la Xunta de Galicia (ED431C 2025/55). Se agradece la colaboración de la AECID, la Secretaría de Salud de Honduras, el INGEOMIN, la Facultad de Física de la UNAH, los laboratorios CDM de Nacaome y los Servicios de Apoio á Investigación de la UDC, así como el compromiso y apoyo de todas las personas hondureñas que han contribuido al desarrollo de este trabajo.

Gestión avanzada de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca del Besòs: experiencias y avances de los proyectos RECLAM y waterSOS

Carme Barba[1], Eugènia Martí[3], Júlia Wachs[4], Carles Passarell[5], Núria Ferrer[1], Guillem Sole-Mari[1], Davide Furlanetto[1], Carles Pérez[1], Oriol Bertran[1], Daniel Fernàndez-Garcia[1]

[1]*Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain*
[2]*Grup d'Hidrologia Subterrània, Unidad Asociada (UPC-CSIC)*
[3]*Integrative Freshwater Ecology Group, Centre d'Estudis Avançats de Blanes (CEAB-CSIC), Blanes, Spain*
[4]*Consorci Besòs Tordera, Granollers, Spain*
[5]*Diputació de Barcelona, Barcelona, Spain*

Palabras clave: Managed Aquifer Recharge, Soil Aquifer Treatment, Balsas de infiltración

Resumen. La cuenca del río Besòs, situada en la región metropolitana de Barcelona, representa uno de los escenarios más complejos y con mayor estrés hídrico del litoral mediterráneo. En un contexto de crisis climática y cambio global, caracterizado por sequías recurrentes y presiones antropogénicas intensas, la gestión sostenible de sus acuíferos se ha convertido en una prioridad estratégica para reforzar la resiliencia del sistema de abastecimiento metropolitano.

Los proyectos waterSOS y RECLAM surgen con el objetivo de transformar esta gestión mediante la integración segura de agua depurada en el ciclo urbano. Para ello, combinan técnicas de Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR) y Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS), que permiten incrementar la disponibilidad de agua y mejorar su calidad mediante procesos de atenuación natural en el medio poroso.

En este trabajo se presentan los principales avances obtenidos en el marco de ambos proyectos, destacando el desarrollo de códigos de transporte reactivo y su integración en modelos hidrogeológicos numéricos. Asimismo, se describe el trabajo experimental realizado en la zona adyacente a los humedales construidos de Montcada i Reixac, donde se han construido y monitorizado dos balsas piloto de recarga alimentadas, respectivamente, con el efluente secundario de la EDAR y con el efluente tratado por los humedales.

Ambas iniciativas destacan también por la integración de herramientas digitales avanzadas, como un Data Warehouse centralizado y modelos de Inteligencia Artificial que permiten realizar predicciones a corto plazo para optimizar la toma de decisiones y la gestión operativa. Finalmente, la relevancia de estos proyectos se sustenta en una gobernanza compartida que alinea a investigadores, gestores del agua y administraciones competentes, favoreciendo la transferencia del conocimiento científico hacia soluciones reales de planificación y gestión. En conjunto, los proyectos RECLAM y waterSOS proponen una metodología robusta y transferible que sitúa a las aguas subterráneas como un elemento clave para la resiliencia hídrica en entornos urbanos altamente antropizados.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos:

- "Reptes de qualitat i solucions basades en la natura per a l'ús i reutilització dels recursos hídrics del Besòs: maximitzant la sostenibilitat (RECLAM)", financiado por el Ajuntament de Barcelona con código de subvención 24S05783-001.

- "Challenges and solutions for advanced water resources management in the Besòs River basin (waterSOS)-Programa Prismas y Problemas de la Fundación BBVA 2023".

Gestión sostenible y compartida de recursos hidrotermales frente al cambio climático: método y resultados preliminares del proyecto ThermEcoWat

Christian Iasio[1], Georgina Arnó[2], Elsa Ramalho[3], Rosa Maria Moreno[2], Victor Klaba[1], Cyril Aumar[1], Luis Manuel Ferreira Gomes[4]

[1]*BRGM - French Geological Survey*
[2]*Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*
[3]*LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia*
[4]*Universidade da Beira Interior*

Palabras clave: Recursos hidrotermales, Adaptación al cambio climático, Enfoque integrado, Toma de decisiones

Resumen. Entre los recursos del subsuelo más significativos tanto para los territorios locales como para sus comunidades, las fuentes de agua termal han desempeñado un papel fundamental como catalizadores socioeconómicos. Muchas ciudades termales europeas e ibéricas remontan sus orígenes a la época romana e incluso a civilizaciones precedentes.

No obstante, las perturbaciones del ciclo hidrogeológico inducidas por el cambio climático se están produciendo a una velocidad e intensidad nunca vistas. Las economías que se han desarrollado entorno a estos centros se enfrentan ahora a nuevas vulnerabilidades y amenazas naturales y antropogénicas.

¿De qué manera los recursos termales están amenazados por el cambio climático? ¿Qué factores clave de su contexto hidrogeológico es necesario conocer? ¿Cuáles son las posibilidades de optimización y adaptación de los territorios termales para fortalecer su resiliencia frente al cambio climático?

El proyecto SUDOE ThermEcoWat aborda estos desafíos sociales emergentes facilitando una transición hacia prácticas más allá del statu quo, con el objetivo particular de anticipar conflictos por los recursos hídricos y energéticos en las localidades termales. Los criterios de planificación de la adaptación dentro del proyecto abarcan la protección de los recursos, la gobernanza compartida, el despliegue de energía geotérmica, la consolidación de los usos terapéuticos del agua y la planificación urbana integrada. Alcanzar estos objetivos requiere una

comprensión granular de los manantiales termales, que supere significativamente el nivel de conocimiento disponible en la actualidad.

ThermEcoWat abordó el estudio científico integrado (hidrogeológico, socioeconómico y legal) de tres sitios piloto; São Pedro do Sul (Portugal) a 67ºC, Chaudes-Aigues (Francia) a 82ºC y Caldes de Montbui (España) a 74ºC. Teniendo en cuenta los diferentes entornos geológicos de estos tres sitios y el nivel de conocimiento del sistema hidrotermal, su nivel de protección y sus especificidades sobre los distintos escenarios de cambio climático pronosticados para cada caso, la mejora del conocimiento se ha abordado de forma distinta en cada sitio piloto.

En São Pedro do Sul la investigación se centró en la modelización 3D del sistema hidrotermal, para asegurar que la protección del recurso se aborde adecuadamente desde el punto de vista legal planificando y ejecutando nuevos estudios geofísicos. En Chaudes-Aigues los trabajos de mejora del conocimiento se basaron en la integración 3D de la información hidrogeológica previa y en Caldes de Montbui los esfuerzos se focalizaron en mejorar el conocimiento sobre la captación, el sistema de distribución a los diferentes usuarios y en evaluar diversas hipótesis sobre el origen del sistema hidrotermal.

En los tres sitios piloto se realizaron análisis químicos, isotópicos y de secuenciación de ADN para estudiar que permiten determinar la biomasa, la biodiversidad y el perfil metabólico de hongos y bacterias presentes en las aguas termales. Además, se caracterizó el potencial energético y sus alternativas de aprovechamiento teniendo en cuenta las características del entorno y su capacidad de adaptación.

Basándose en la experiencia adquirida en tres emplazamientos piloto, diferenciados por sus contextos geográficos, geológicos y climáticos, esta contribución tiene como propósito presentar los criterios y hallazgos mediante los cuales se han generado y traducido estos nuevos conocimientos en beneficio de los responsables de la toma de decisiones.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el programa Interreg SUDOE a través del proyecto ThermEcoWat, coordinado por Marion Roussel (Thermauvergne).

Gravity fingering and solute transport in heterogeneous unsaturated soils under infiltration–evaporation cycles

Yajaira A. Castillo Gonzales[1], Marco Dentz[1], Juan J. Hidalgo[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona, España*

Palabras clave: flujo no saturado, heterogeneidad, dedos gravitacionales, transporte de solutos

Resumen. El flujo no saturado en la zona vadosa puede presentar inestabilidades transitorias que generan vías preferenciales en forma de dedos gravitacionales. Estos fenómenos están asociados con la naturaleza no lineal de las propiedades hidráulicas del suelo, cambios rápidos en las condiciones de contorno, histéresis y heterogeneidad. Aunque los estudios experimentales muestran de manera consistente la formación de dedos gravitacionales tanto en suelos homogéneos como heterogéneos, las simulaciones numéricas basadas en la ecuación de Richards no siempre logran reproducir estos patrones de flujo preferencial, ya que solo consideran efectos capilares locales. Para superar esta limitación, se han propuesto formulaciones alternativas que incorporan efectos capilares no locales mediante derivadas espaciales de cuarto orden. El objetivo de este trabajo es estudiar el flujo no saturado y el transporte de solutos durante ciclos de infiltración–evaporación, considerando la influencia de la heterogeneidad del suelo y la formación de flujo preferencial. El flujo y el transporte se resuelven utilizando la biblioteca de elementos finitos FEniCS, mientras que la heterogeneidad del suelo se representa mediante campos aleatorios gaussianos de conductividad hidráulica saturada con distintas longitudes de correlación y varianzas. Los resultados preliminares muestran que la ecuación clásica de Richards no reproduce adecuadamente el flujo preferencial, mientras que la formulación extendida permite capturar la formación de dedos gravitacionales y su influencia sobre el transporte de solutos. Asimismo, se observa que la heterogeneidad y el flujo preferencial influyen significativamente en las métricas de transporte, generando curvas de llegada con colas más largas, llegada más temprana del soluto y mayor mezcla del contaminante. El marco propuesto es especialmente relevante para suelos arenosos o de textura gruesa bajo condiciones inicialmente secas, donde el flujo preferencial inestable y el

transporte de contaminantes son fenómenos frecuentes. Este estudio contribuye a mejorar la comprensión y modelización del flujo preferencial en medios porosos.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo de la Agencia Estatal de Investigación (10.13039/501100011033) y del Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del proyecto HydroPore.

Groundwater DataHub: plataforma interoperable y modelización híbrida para la gestión territorial de aguas subterráneas frente a la sequía en la Costa del Sol Occidental

Isabel Gamallo Paz[1], Manuel Argamasilla[1], Lupicinio García[1], Damián Sánchez[1], Miguel Ruiz[1], Ángel Cañete[1], Javier Martínez[1], Sara Espinosa Martínez[1], Betriz de la Loma González [1]

[1]*CETAQUA, Centro Tecnológico del Agua*

Palabras clave: Gestión de aguas subterráneas, Recarga gestionada de acuíferos (MAR), Modelización hidrogeológica

Resumen. La Costa del Sol Occidental (Málaga), es una zona altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, entre los que destacan las sequías. La escasez estructural en este sector de la provincia unido a la marcada estacionalidad tanto de las precipitaciones como del turismo, motor económico de la zona, ponen de manifiesto la necesidad de gestionar de forma sostenible sistemas complejos de abastecimiento. En este contexto, el proyecto Groundwater Datahub (PIAnd Sequía) tiene como principal objetivo mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos del subsistema de explotación I-3 de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas y dotar a los gestores de abastecimiento de una herramienta avanzada para el apoyo en la toma de decisiones. Para resolver estos retos, se ha diseñado una plataforma interoperable que integra los resultados desarrollados en 4 ejes: (i) modelización, que combina modelos deterministas de flujo numérico (MODFLOW en el acuífero carbonático de la Sierra de Mijas) con algoritmos predictivos de machine learning capaces de predecir el volumen de 3 embalses y el nivel piezométrico de 12 puntos de control, a 6 meses vista, con elevada precisión (sMAPE medio 9,2 %), en los sectores acuíferos detríticos de Marbella-Estepona; (ii) impulso a la recarga gestionada de acuíferos mediante la integración de un sistema de alertas que incorpora indicadores de riesgo operativo, sanitario y medioambiental y alertas de predicciones meteorológicas y de desembalse para optimizar las operaciones de dos esquemas de recarga gestionada: Aloha y El Señorío (Marbella); (iii) creación de un multi-panel de indicadores de sequía y escasez que agrega datos meteorológicos, hidrológicos, hidrogeológicos y de

gestión del recurso y cubre un vacío en los actuales planes especiales de sequía al considerar los recursos subterráneos en la definición de valores umbral; (iv) simulación de escenarios de gestión y riesgo a corto plazo, a través de la cuantificación de las probabilidades de fallo en las demandas y de la identificación de excedentes hídricos para recarga gestionada de acuíferos. La integración de cada uno de estos ejes en la plataforma interoperable permite aumentar la resiliencia hídrica de la región al anticipar posibles escenarios de disponibilidad hídrica limitada, evaluar el estado de sequía y escasez a partir de indicadores que incluyen la componente del agua subterránea y además, permite a los gestores de esquemas de recarga gestionada de acuíferos y de abastecimiento evaluar el impacto operativo y tomar decisiones fundamentadas en datos para minimizar riesgos en la gestión de las operaciones.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo financiero del Programa de investigación e innovación PlAnd Sequía de la Junta de Andalucía (PLSQ_00302_2), proyecto Groundwater Datahub y al programa de investigación e innovación Horizonte Europa de la Unión Europea, en virtud del acuerdo de subvención n.º 101082048: proyecto MAR2PROTECT

Guía técnica de abatimientos del freático en obras de edificación

Albert Orta Guasch[1], Ester Falgàs Parra[1], Ruben Garcia Artigas[1], Mireia Iglesias Carrera[1]

[1]*Agència Catalana de l'Aigua (ACA)*

Palabras clave: gestión de las aguas subterráneas, abatimientos temporales del nivel freático, infraestructuras subterráneas, impacto ambiental

Resumen. La ejecución de excavaciones por debajo del nivel freático es una práctica frecuente en el ámbito de la edificación y las infraestructuras urbanas que requieren de la autorización preceptiva por parte de la administración hidráulica competente. Estas actuaciones implican la implantación de sistemas de abatimiento temporal que permitan ejecutar la obra en seco y garantizar su estabilidad. Sin embargo, su diseño y ejecución pueden generar afecciones significativas sobre el medio hídrico en su conjunto, las infraestructuras existentes y la calidad de las aguas subterráneas, especialmente en entornos urbanos complejos.

En este contexto, la administración hidráulica ha elaborado una guía técnica con el objetivo de establecer unos criterios comunes que faciliten la planificación, diseño, ejecución y tramitación administrativa de los abatimientos temporales del nivel freático. El documento integra los aspectos hidrogeológicos, constructivos, ambientales y normativos, con el fin de mejorar la calidad de los proyectos y garantizar una gestión sostenible de las aguas subterráneas.

La guía define los contenidos mínimos de los estudios hidrogeológicos, incluyendo la recopilación de información previa, la caracterización del subsuelo mediante investigaciones de campo y ensayos de bombeo, así como la elaboración de modelos conceptuales o numéricos que permitan comprender el funcionamiento del sistema. Estos elementos son fundamentales para dimensionar adecuadamente los sistemas de drenaje, estimar su radio de influencia y evaluar posibles afecciones sobre el entorno.

Asimismo, el documento recoge las principales soluciones técnicas disponibles, como los sistemas de bombeo mediante pozos o lanzas, así como el uso de barreras hidráulicas destinadas a limitar la afección sobre el entorno. Se abordan

también las diferentes alternativas de gestión de las aguas extraídas, en función de su calidad y de las condiciones del medio receptor.

Se presta especial atención a la identificación y evaluación de impactos asociados a los abatimientos, tanto en el entorno como en la propia obra, tales como descensos piezométricos, subsidencia del terreno, movilización de contaminantes, afección a captaciones e infraestructuras próximas o espacios protegidos, etc. En este sentido, ante la incertidumbre inherente al medio hidrogeológico, la guía propone medidas preventivas y correctoras y destaca la importancia del seguimiento durante y después del abatimiento mediante el control de niveles, caudales, volúmenes extraídos y calidad del agua.

En conjunto, la guía que se presenta en esta comunicación se configura como una herramienta operativa que mejora y facilita la coordinación entre los distintos agentes implicados, agiliza el proceso de tramitación de la autorización para los abatimientos temporales del nivel freático y contribuye a una gestión más segura y sostenible de las aguas subterráneas en el ámbito de las obras de edificación.

Herramienta de gestión hidrológica espacial para la prevención de riesgos en humedales mediterráneos: aplicación al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel

Héctor Aguilera Alonso[1], Lucía Calvo Sánchez[2], Miguel Mejías Moreno[1], Juan Grima Olmedo[1], Leticia Baena Ruíz[1], Juan de Dios Gómez Gómez[1], Luis Moreno Merino[1], David Pulido Velázquez[1]

[1]*IGME*
[2]*UCM*

Palabras clave: Zona no saturada, Cambio climático, Tablas de Daimiel, Gestión zonas húmedas

Resumen. El Parque Nacional de las Tablas de Daimiel (PNTD) constituye un caso paradigmático de los desafíos que enfrentan los humedales mediterráneos semiáridos ante la presión conjunta del cambio climático y la sobreexplotación de acuíferos. La reducción drástica de su área inundada —de 150 km² en condiciones naturales a menos de 18 km² actualmente—, sumada a la inversión del gradiente hidráulico que ha transformado el humedal en zona de recarga, ha generado un escenario de estrés hídrico crónico. En este contexto, la gestión requiere herramientas predictivas que permitan anticipar episodios de desecación y sus consecuencias ecológicas.

El presente trabajo describe el desarrollo de una herramienta operativa de gestión basada en la extensión del modelo SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) a un marco espacial 2D, integrando datos globales (ERA5-Land, SMAP) con información local de niveles piezométricos y propiedades edáficas. El modelo, calibrado y validado para el periodo 2018-2020 mediante comparación con productos satelitales (correlación de Pearson de 0,69-0,78 con SMAP), genera mapas diarios de humedad del suelo a diferentes profundidades.

La aplicación práctica se centra en dos umbrales críticos de gestión: (i) el riesgo de combustión de turba, con humedades gravimétricas inferiores al 60% para probabilidad de ignición del 50%, y (ii) la expansión descontrolada de Phragmites australis, cuyo crecimiento óptimo se produce alrededor del 96% de la capacidad

de campo. Los mapas de riesgo resultantes permiten identificar zonas prioritarias para intervenciones de rewetting preventivo y campañas de control de vegetación.

Se han simulado escenarios de desecación basados en la perturbación serie histórica (2001-2025) con cuatro modelos climáticos de CMIP6 bajo un escenario de calentamiento local de 3 °C. Los escenarios climáticos proyectan más sequías, más largas y más profundas que lo observado en la estación meteorológica, generando mayor riesgo de alcanzar las humedades críticas para la degradación ambiental.

La metodología, basada exclusivamente en datos de libre acceso y técnicas de downscaling de reanálisis climáticos, garantiza la reproducibilidad y transferibilidad a otros sistemas de humedal con limitaciones de datos. El sistema automatizado propuesto constituye un avance hacia la gestión proactiva, permitiendo a los gestores del PNTD anticipar episodios de riesgo con hasta varios días de antelación, optimizando la asignación de recursos hídricos en un contexto de competencia con usos agrícolas.

Agradecimientos: PID2021-128021OB-I00. Seguimiento y evaluación de impactos y riesgos asociados al cambio climático y/o global en espacios naturales protegidos. Análisis de estrategias de adaptación.

Hidrodinámica de acuíferos costeros en ambientes hiperáridos: el acuífero Caplina en el desierto de Atacama, sur del Perú

Samuel Chucuya Mamani[1], Vanessa A. Godoy[1], Edwin Pino Vargas[2], J. Jaime Gómez Hernández[1]

[1]*Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain*
[2]*Department of Civil Engineering, Jorge Basadre Grohmann National University, Tacna, Peru*

Palabras clave: Acuíferos costeros, Zonas hiperáridas, Modelación Hidrogeologica, Isotopos ambientales

Resumen. Comprender el funcionamiento de los acuíferos costeros en zonas hiperáridas es un desafío clave para la hidrogeología, especialmente en regiones donde la demanda de agua supera ampliamente la capacidad natural de renovación del sistema. Este es el caso del acuífero Caplina, ubicado en el extremo norte del desierto de Atacama, al sur del Perú, un sistema estratégico para la agricultura y el desarrollo regional que presenta descenso sostenido de niveles piezométricos, deterioro de la calidad del agua y creciente vulnerabilidad frente a la intrusión salina.

El objetivo de esta investigación es caracterizar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero Caplina y evaluar su respuesta frente a distintos regímenes de explotación, integrando evidencias hidroquímicas, isotópicas, geológicas e hidrodinámicas. Los resultados hidroquímicos, junto con el análisis de isótopos ambientales y carbono-14, indican que una parte importante del agua almacenada tiene una antigüedad superior a mil años, lo que sugiere que el sistema no depende únicamente de recarga reciente, sino también de reservas subterráneas antiguas y de muy lenta renovación.

Asimismo, la geología del área, caracterizada por fallas, grabens y una arquitectura estratigráfica heterogénea, condiciona la dirección del flujo subterráneo y la conectividad hidráulica. Sobre esta base, se desarrolla un modelo de flujo subterráneo con MODFLOW 6, implementado mediante FloPy en Python, para reconstruir la evolución hidrodinámica del sistema entre 2002 y 2022 y analizar escenarios de explotación.

La novedad del estudio radica en integrar la memoria química, isotópica y estructural del agua subterránea dentro de una herramienta numérica moderna, permitiendo pasar de una interpretación fragmentada a una representación dinámica y predictiva del acuífero. Los resultados permiten evaluar trayectorias de abatimiento, explorar límites de bombeo y aportar criterios para la gestión sostenible de acuíferos costeros hiperáridos sometidos a fuerte presión extractiva.

Hidrogeología de la Euro-región Mose-Rin (EMR) y modelización de flujo subterráneo para el estudio de viabilidad del Telescopio de Einstein

Alberto Román Gessa Fernández[1], Dwight Baldwin[1], Marijke Huysmans[1]

[1]*Vrije Universiteit Brussel*

Palabras clave: Hidrogeología, Modelización hidrogeológica, Infraestructura subterránea, Mitigación de descensos piezométricos

Resumen. El Telescopio de Einstein es una instalación subterránea propuesta como parte de una iniciativa científica europea que servirá como observatorio de ondas gravitacionales de tercera generación. La candidatura de la Euro-región Mosa-Rin (EMR), situada en la frontera entre Bélgica, los Países Bajos y Alemania, plantea la construcción de un entramado triangular subterráneo con 30 km de túneles y cavernas a profundidades de entre 250 y 400 metros bajo la superficie del terreno. Una infraestructura de esta magnitud puede causar importantes impactos ambientales debido al drenaje de agua subterránea hacia las excavaciones que debe ser extraído y bombeada. Simulaciones regionales preliminares estimaron descensos en el acuífero superficial de hasta 20 metros, suponiendo un riesgo para humedales, ríos y bosques ribereños, algunos protegidos por la Red Natura 2000.

La EMR se caracteriza por un subsuelo complejo, compuesto por rocas sedimentarias afectadas por fallas, fracturas y pliegues. Esta estructura geológica da lugar a una marcada heterogeneidad de los parámetros hidráulicos que varían significativamente incluso dentro de mismas unidades estratigráficas. Debido a esta variabilidad, las primeras simulaciones regionales estimaron caudales a drenar entre 380 y 48.500 m^3/d. Para abordar esta incertidumbre, se han desarrollado modelos refinados basados en datos geológicos e hidrogeológicos recientemente adquiridos en campo en el marco del proyecto.

Nuevos modelos geológicos y de flujo subterráneo refinados locamente han sido elaborados, respectivamente en Leapfrog y FEFLOW. Estos modelos se complementan entre sí y con los modelos regionales existentes, y permiten avanzar en la interpretación hidrogeológica del subsuelo. La conceptualización está basada en datos de fuentes públicas, de colaboradores del proyecto y de nuevas interpretaciones detalladas de los datos tomados en el terreno. En

particular, los ensayos con obturador doble realizados en nueve piezómetros construidos reportan conductividades hidráulicas que varían desde 3,3x10-4 m/s hasta 4,5x10-13 m/s, lo cual evidencia la significativa heterogeneidad entre unidades geológicas, diferentes tipos de roca geotécnicos y zonas afectadas por fracturas y fallas.

En nuestros modelos, además del refinamiento de la conceptualización geológica e hidrogeológica, se ha mejorado la discretización de la infraestructura subterránea del Telescopio de Einstein. Consecuentemente, los resultados preliminares actuales estiman los descensos piezométricos entre un máximo de 3,3 m y un mínimo de 1,8 m, con mayores impactos en el área en torno al vértice sur del entramado triangular. El flujo hacia los túneles se estima entre 3.870 y 2.600 m^3/d, consistente con las estimaciones iniciales de colaboradores que situaban el flujo en 10 L/min/100m de túnel. Cabe señalar que estos resultados son preliminares, debido a que es un proyecto en curso; los próximos pasos incluyen la incorporación de cavernas y túneles de acceso, así como la calibración automática mediante la herramienta PEST.

Actualmente, se están evaluando medidas de mitigación, con resultados prometedores, tales como la inyección de lechada (grouting) en las paredes de los túneles y la recarga gestionada de acuíferos para abordar los posibles impactos relacionados con la construcción, y, por consiguiente, contribuir a la viabilidad técnica del proyecto y reforzar la candidatura de la EMR para albergar el Telescopio de Einstein.

Hidrogeoquímica del acuífero costero de El Golfo-Nisdafe (El Hierro, Islas Canarias)

Esmeralda Estévez[1], José Luis Fernandez-Turiel[2], Alejandro Rodriguez-Gonzalez[1], Francisco José Perez-Torrado[1], María del Carmen Cabrera[1]

[1]*Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (i–UNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC)*
[2]*Geociencias Barcelona, GEO3BCN, CSIC*

Palabras clave: Terrenos volcánicos, Hidrogeología, Hidrogeoquímica, El Hierro (Islas Canarias)

Resumen. La superposición sucesiva de los edificios volcánicos Tiñor, El Golfo y el posterior de las dorsales, separados en el tiempo por episodios de deslizamientos gigantes, configuró la forma aproximadamente tetraédrica de la isla de El Hierro (1502 m de altitud y 269 km²). La geomorfología del norte de la isla está condicionada por el deslizamiento gigante del edificio El Golfo ocurrido entre 87 y 39 ka, que generó un escarpe de varios cientos de metros y una amplia superficie (Valle de El Golfo) rellena parcialmente por coladas de lava procedentes de las dorsales NE y NO. Un deslizamiento gigante previo, ocurrido entre 0,8 y 0,5 Ma, desestabilizó el edificio volcánico Tiñor, dando lugar a una superficie impermeable sobre la que se emplazó el edificio volcánico El Golfo. Entre ambas cicatrices de deslizamiento se formó el acuífero más productivo de la isla, cuya zona de recarga se localiza en la Meseta de Nisdafe que le da nombre.

La isla presenta numerosas obras hidráulicas subterráneas, desde pozos y galerías hasta sistemas combinados, muchas de ellas abandonadas y concentradas en el Valle de El Golfo. Destaca el pozo-galería Los Padrones, con 52 m de profundidad y una galería de fondo de 1011 m y orientación NW-SE, con una producción superior a 1.100.000 m^3/año destinada para el abastecimiento y regadío. En el valle existe, además, una red de piezómetros con datos periódicos de piezometría e hidroquímica.

El análisis de la evolución temporal de la hidrogeoquímica del agua subterránea en el Valle de El Golfo ha permitido deducir que se mantiene estable al menos desde 1990 y diferenciar dos tipos de facies: (i) aguas cloruradas sódicas de alta salinidad, influenciadas en distinta medida por la mezcla con agua de mar, y (ii) aguas bicarbonatadas sódicas de menor salinidad asociadas a captaciones pegadas a la pared este del valle, como el pozo-galería Los Padrones. También se

ha observado la presencia de aportes de gas volcánico en algunos pozos del oeste del valle y retornos de riego en algunos puntos. La interpretación conjunta de los datos hidrogeoquímicos, la geometría de las captaciones y la estructura geológica de este sector de la isla ha permitido caracterizar dos acuíferos: el Acuífero El Golfo, conformado por las lavas que rellenan el valle procedentes de las dorsales NE y NO, y el Acuífero Nisdafe, conformado por las lavas del edificio El Golfo y limitado por las cicatrices de los dos deslizamientos gigantes.

La investigación realizada constata que el conocimiento de la hidrogeoquímica y de la estructura geológica de la isla es clave para establecer la compartimentación del acuífero y la definición de las zonas y mecanismos de recarga en cada área.

Agradecimientos: El trabajo ha sido financiado por el Consejo Insular de Aguas de El Hierro mediante varios contratos a través de la Fundación Parque Científico Tecnológico de la ULPGC (HR-144-8-CM, C2019/149, F2022/08) y por el Proyecto LAJIAL (PGC2018-101027-B-I00, CIU/AEI/FEDER, EU).

Hierro y nitrógeno en interacción en un sistema lacustre: implicaciones en la mitigación de la contaminación por nitratos

Cristóbal Méndez[1], Rosanna Margalef-Marti[1], Nicolás Valiente[2], Juan José Gómez-Alday[2], Neus Otero[3]

[1]*Grup MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia – MAGH, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, España.*
[2]*Grupo de Hidrogeología, Laboratorio de Biotecnología y RRNN, Instituto de Desarrollo Regional (IDR), Universidad de Castilla la Mancha (UCLM), Campus Universitario s/n, 02071 Albacete, España*
[3]*Grup MAiMA, Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia – MAGH, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, España; Professora Serra Hunter Generalitat de Catalunya*

Palabras clave: Isotopía, Geoquímica, Nitratos, Hierro

Resumen. El hierro (Fe) puede desempeñar un papel clave en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno (N), participando en transformaciones redox que influencian los flujos de nitrógeno reactivo. En particular, el Fe puede actuar como donador de electrones durante la desnitrificación, proceso enzimático en que el nitrato (NO_3^-) se reduce secuencialmente a nitrito (NO_2^-), óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O) y finalmente nitrógeno molecular (N_2), y la quimiodesnitrificación (proceso mucho menos conocido en sistemas reales), que implica la reducción abiótica del NO_2^- a N_2O. No obstante, en ambientes naturales estos procesos pueden competir con otras rutas mediadas por compuestos reductores como sulfuro o materia orgánica, lo que dificulta identificar los mecanismos dominantes bajo distintas condiciones ambientales. Este problema es especialmente relevante en sistemas afectados por aportes de nitrógeno de origen agrícola, como la laguna de Pétrola, ubicada en la cuenca del río Segura (Castilla-La Mancha, España), afectada por contaminación por NO_3^-. En estos ambientes, la combinación de procesos microbianos y abióticos puede contribuir a la remoción de NO_3^- pero, al mismo tiempo, contribuir a las emisiones de N_2O; sin embargo, distinguir entre ambos procesos en condiciones naturales sigue siendo un desafío. En este contexto, los análisis isotópicos pueden representar una herramienta muy

útil. Como los estudios de quimiodenitrificación son limitados, aún no está claro si la caracterización isotópica del NO_3^-, NO_2^- y N_2O puede ser útil para distinguir procesos microbianos y abióticos. Además, aunque se ha documentado fraccionamiento isotópico del Fe durante su oxidación, no se comprende con claridad cómo difiere entre procesos microbianos y abióticos ni cómo se acopla al ciclo del N. Con el objetivo de evaluar el rol del Fe^{2+} en la mitigación de la contaminación por NO_3^- y las emisiones de N_2O en la laguna de Pétrola, se han llevado a cabo experimentos de tipo batch utilizando agua y sedimento de la laguna. Los ensayos consideran condiciones bióticas y abióticas, con adiciones de NO_3^-, NO_2^-, Fe^{2+} y su combinación, en concentraciones representativas del sistema natural. Se han obtenido muestras para su caracterización geoquímica e isotópica, y para la detección de genes relacionados con los procesos estudiados. Los experimentos han demostrado que el sedimento contiene una gran cantidad de NH4+ de origen orgánico y que junto con el agua inducen transformaciones del NO_3^- y NO_2^-. Se han observado diferencias de reactividad entre las distintas condiciones estudiadas (biótico o abiótico, con o sin adición de Fe, etc.) y no se han detectado cantidades significativas de N_2O. La caracterización isotópica de los compuestos de N y de Fe (en curso) permitirá determinar qué procesos han sido responsables de estas transformaciones y de las diferencias de reactividad en diferentes condiciones. Estos resultados serán validados combinando los resultados isotópicos con la caracterización geoquímica y de genes implicados en los procesos redox del N. Poder identificar y diferenciar procesos abióticos y microbianos mediados por Fe en sistemas naturales afectados por contaminación por nitrato, como la laguna de Pétrola, permitirá optimizar el diseño de estrategias de gestión de recursos hídricos dirigidas a mitigar la contaminación.

Agradecimientos: Proyecto Advance4water-Isotrace

Huella isotópica de la precipitación y la recarga en acuíferos kársticos de la cabecera del Llobregat

Sonia Valdivielso[1], Marta Turull[2], Sergio Carrero[1], Benjamín Crisóstomo[1], Deby Jurado[1], Enric Vázquez-Suñé[1], Sergi Díez[2]

[1]*Departamento de Geociencias, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Jordi Girona 18–26, 08034 Barcelona, España*
[2]*Departamento de Química Ambiental, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Jordi Girona 18–26, 08034 Barcelona, España*

Palabras clave: Isótopos estables del agua, Gestión de recursos hídricos, Zona de recarga, Río Llobregat

Resumen. Este estudio amplía la comprensión de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos en macizos carbonatados fracturados y karstificados mediante la caracterización de la composición isotópica de la precipitación, las aguas superficiales y las aguas subterráneas en las cabeceras del río Llobregat (Cataluña). Se analizó un total de 115 muestras de agua, recogidas entre abril de 2024 y febrero de 2025, con el fin de evaluar la variabilidad isotópica temporal y espacial, examinar las relaciones entre los isótopos estables y las variables meteorológicas, reconstruir retro trayectorias de las masas de aire de las fuentes de humedad y delimitar las zonas de recarga de los acuíferos.

Los resultados revelan un gradiente isotópico vinculado a las condiciones de humedad y muestran que los procesos termodinámicos y el origen de las masas de aire ejercen un control primario sobre los valores de exceso de deuterio. El 44% de las masas de humedad que generaron precipitación procedían del océano Atlántico y cruzaron la Península Ibérica, el 24% del mar Mediterráneo, el 18% desde Francia y el 14% del mar Cantábrico.

La composición isotópica de las aguas subterráneas y superficiales sugieren una recarga dominante en invierno que tiene lugar por encima de los 1.800 m s. n. m., en coherencia con la topografía regional y la estructura altamente karstificada del macizo del Moixeró. Las señales estacionales de la precipitación preservadas en las aguas subterráneas indican además tiempos de residencia cortos y respuestas rápidas de recarga.

Estos resultados aportan información valiosa para la gestión de los recursos hídricos y ponen de relieve la sensibilidad de los sistemas kársticos alpinos a la variabilidad climática.

Agradecimientos: Este estudio ha sido financiado por la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación de España, el IDAEA-CSIC, Centro de Excelencia Severo Ochoa (CEX2018–000794-S) mediante el proyecto SINERGIA-IDAEA «Desarrollo de nuevos muestreadores pasivos para la caracterización de aguas subterráneas en los manantiales del Llobregat (SENTINEL)». S. Valdivielso reconocer el Programa Juan de la Cierva (JDC2023–051090) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por SE+. S. Carrero reconoce el Programa Ramón y Cajal (RYC2023–04523-I).

Humedales artificiales como medida de mitigación frente a aportes de nitrato en un sistema acuífero–laguna del Mediterráneo

Vanessa A. Godoy[1], Rafael Magnabosco[1], J. Jaime Gómez-Hernández[1], Patricio Hernández-Parra[1], Eduardo Cassiraga[1], Javier Rodrigo-Illari[1], Carmen Hernández-Crespo[1], Miguel Martín Monerris[1]

[1]*Universitat Politècnica de València, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Valencia, España.*

Palabras clave: Soluciones basadas en la naturaleza, Aguas subterráneas, Aliminación de nitrógeno, Calidad del agua

Resumen. En sistemas lagunares mediterráneos, las descargas procedentes de acuíferos sobre los que tiene lugar una actividad agrícola intensa constituyen una fuente relevante de nutrientes hacia ecosistemas protegidos. En el Parque Natural de l'Albufera (Valencia, España), el aporte de agua subterránea rica en nitratos, que aflora a través de manantiales, contribuye de forma significativa a las presiones eutróficas que afectan al lago.

Este trabajo evalúa el potencial de los humedales artificiales como medida de gestión y mitigación para interceptar estos flujos antes de su llegada al sistema lagunar. Para ello, se emplea un marco de modelización integrado que combina una simulación hidrológica del sistema con un modelo de eliminación de nitrógeno basado en datos observados. El análisis considera tres zonas del parque con características hidrológicas diferenciadas y distintos periodos del ciclo hidrológico anual, incluyendo la campaña de riego, el periodo sin riego y la inundación invernal. Asimismo, se analizan distintos escenarios de gestión orientados a evaluar la viabilidad y el potencial de estas soluciones basadas en la naturaleza bajo condiciones hidrológicas variables.

Los resultados preliminares muestran una marcada variabilidad espacial y temporal en la disponibilidad de caudales susceptibles de tratamiento, condicionando tanto la viabilidad operativa como el potencial de eliminación de nitrógeno de los humedales. Las zonas dominadas por aportes subterráneos más concentrados presentan mayores eficiencias potenciales de eliminación, aunque también una mayor dependencia de la estacionalidad de los flujos. El trabajo pone de manifiesto la importancia de integrar la dinámica hidrológica subterránea y

superficial en la evaluación de medidas de gestión orientadas a la reducción de nutrientes en ecosistemas lagunares protegidos.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el proyecto OurMED del programa PRIMA, financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, en el marco del acuerdo de subvención n.º 2222.

Identificación de Unidades Físicas Mitigadoras de nitrato en ecosistemas acuáticos y acuíferos de Cataluña

Gabriela Córdoba-Ariza[1], Susana Bernal[2], Eugènia Martí[2], Guillermo García[3], Anna Gallés[4], Sofía Rivaes[4], Núria Micola[5], Teresa Garrido[5], Mireia Iglesias Carrera[5], Evelyn Garcia[5], Josep Mas-Pla[6]

[1]*Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA)*
[2]*Centre d'Estudis Avançats de Blanes (CEAB-CSIC)*
[3]*MN Consultors*
[4]*Fundació Andrena*
[5]*Agència Catalana de l'Aigua*
[6]*Institut Català de Recerca de l'Aigua, y Universitat de Girona*

Palabras clave: Nitrato, Desnitrificación, Unidad Física Mitigadora, Ecohidrología

Resumen. La contaminación por nitratos (NO_3^-) en el agua subterránea constituye una prioridad a nivel europeo debido a sus impactos sobre los ecosistemas y la salud humana. En Cataluña, el exceso de NO_3^- es la principal causa del mal estado químico de las masas de agua subterránea, un 45% de las masas de agua subterránea de las Cuencas Internas presentan incumplimientos (>50 mg NO_3^-/L), mientras que en la parte catalana del Ebro se sitúa en el 19% (ACA, 2025).

Frente a esta problemática, los ecosistemas acuáticos y de interfase terrestre-acuática desempeñan un papel clave en la eliminación natural del nitrógeno. En este contexto, los procesos de desnitrificación se concentran en determinadas zonas que denominamos Unidades Físicas Mitigadoras (UFM) de la contaminación por NO_3^-. Las UFM son áreas del paisaje que reúnen las condiciones físicas, hidrológicas y biogeoquímicas necesarias para favorecer la actividad desnitrificadora. Estas áreas incluyen tanto hábitats acuáticos superficiales (ríos, humedales, balsas) como hábitats en la interfase entre las aguas superficiales y subterráneas (zonas de ribera, zonas hiporreicas, acuíferos aluviales).

El proyecto ENEO3 (2025–2028) tiene como objetivo estudiar la funcionalidad de las UFM en ámbitos del territorio catalán vulnerables a la contaminación por NO_3^-, así como cuantificar el potencial desnitrificador de los hábitats que los conforman. Además, se evalúa cómo preservar y potenciar este potencial desnitrificador favoreciendo determinadas dinámicas naturales que contribuyen

a incrementar la eliminación de nitratos como la conectividad hidrológica, el tiempo de residencia, o la disponibilidad de materia orgánica en distintos contextos socio-ecológicos.

Una revisión bibliográfica y metodológica previa ha permitido identificar y ponderar los principales parámetros e indicadores que determinan la capacidad desnitrificadora del paisaje, con el fin de definir y localizar potenciales UFM. Este trabajo parte de la premisa de que la eliminación efectiva de NO_3^- depende de una estructura del paisaje que facilite la convergencia de flujos cargados de nutrientes con zonas anóxicas y biogeoquímicamente activas. Por lo tanto, se han integrado variables orográficas, geológicas e hidrológicas que regulan la conectividad y el transporte de solutos, junto con propiedades críticas del suelo y el sedimento, el pH y la temperatura. A partir del análisis espacial del territorio catalán y del estudio de datos históricos disponibles correspondiente a zonas vulnerables, su contexto hidrológico, niveles de nitrato y valores de desnitrificación se han definido cinco tipos paradigmáticos de UFM: (i) entornos fluviales con acuífero asociado, (ii) entornos fluviales sin acuífero asociado, (iii) entornos fluviales antropizados, (iv) entornos de humedal y (v) entornos de acuífero. Los muestreos incluyen la determinación de variables fisicoquímicas y biogeoquímicas del agua, así como indicadores ambientales que permiten evaluar condiciones favorables para la desnitrificación: el análisis de isótopos estables del NO_3^- y la detección de genes funcionales asociados a enzimas desnitrificadoras.

Los resultados preliminares de 25 UFMs, destacan la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, tanto para transportar el NO_3^- hacia áreas favorables como para generar las condiciones de anoxia y los tiempos de residencia necesarios. La integración de los datos permitirá evaluar la capacidad potencial de eliminación de NO_3^- de las distintas unidades identificadas y avanzar hacia una clasificación funcional de las UFM en el territorio. Este enfoque facilitará determinar qué UFM son actualmente efectivas y deben priorizarse para su conservación, y cuáles presentan potencial para mejorar su funcionalidad mediante estrategias de restauración basadas en la naturaleza, contribuyendo así a la reducción de la contaminación por nitratos a escala de paisaje.

Agradecimientos: Financiación: Agència Catalana de l'Aigua (Contrato: CTN2400669).

Identificación mediante análisis SIG multicriterio de áreas potenciales para la replicación de sistemas ancestrales de recarga gestionada con acequias de montaña en España peninsular

Carlos Marín Lechado[1], Antonio González Ramón[1], Ana Ruiz Constán[1], Miguel Rodríguez Rodríguez[2], Jorge Jódar[1], Blas Ramos[3], Thomas Zakaluk[1], Nuria Naranjo Fernández[1], Sergio Martos Rosillo[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España - CSIC*
[2]*Universidad Pablo de Olavide*
[3]*Universidad de Granada*

Palabras clave: Siembra y Cosecha de Agua, recarga, análisis SIG multicriterio, acequias de montaña

Resumen. Los sistemas ancestrales de Siembra y Cosecha de Agua (SyCA) constituyen una forma de recarga gestionada de acuíferos basada en la infiltración intencionada de agua superficial en laderas y depósitos de alteración, para su recuperación diferida en manantiales, ríos y captaciones. En la España peninsular, las acequias de careo de Sierra Nevada y las pesqueras de La Vera son ejemplos funcionales de esta estrategia, con relevancia para la adaptación al cambio climático, la seguridad hídrica y el mantenimiento de caudales estivales.

En el marco del proyecto INCHA, este trabajo tiene como objetivo identificar, mediante análisis SIG multicriterio, las zonas de la España peninsular con mayor potencial para replicar sistemas de recarga gestionada mediante acequias de montaña análogos a los careos y pesqueras. Para ello, se parte de la caracterización hidrológica, hidrogeológica y fisiográfica de los sistemas inventariados en el proyecto WaSHa y se integran, en un entorno SIG, factores físicos y socioeconómicos condicionantes de su viabilidad.

Entre los factores físicos considerados se incluyen el relieve montañoso, la naturaleza del sustrato, la persistencia nival y el régimen climático, priorizando ámbitos con veranos secos pero con precipitación suficiente fuera del estiaje. La intersección de estos factores permite delimitar áreas físicamente favorables, que posteriormente se jerarquizan mediante variables socioeconómicas como la presencia de población local potencialmente gestora, los usos agrarios y la

existencia de figuras de protección ambiental. Estos factores son ponderados y normalizados para obtener un índice final de potencialidad.

Los resultados identifican áreas favorables en el Sistema Bético, el Sistema Central, sectores del Sistema Ibérico, el Macizo Ibérico y enclaves de la Cordillera Cantábrica. Destacan Sierra de Béjar, Sierra de Guadarrama, Sierra de las Nieves, Sierra Nevada, Sierra Tejeda, Sierra de los Filabres, Sierra de Gredos y Montes de León. La metodología propuesta constituye una herramienta reproducible para apoyar estrategias de recarga gestionada y transferir el conocimiento ecológico local asociado a los sistemas SyCA hacia nuevos territorios con condiciones análogas.

Agradecimientos: Los autores agradecen la financiación recibida a través del proyecto INCHA, Acequias de Infiltración como Soluciones Basadas en la Naturaleza para la Transición Ecológica (PID2022-140092OB-I00), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Impacto de la expansión de la geotermia somera en la calidad del agua subterránea: Movilización de elementos traza por el aumento de temperatura

Laura Scheiber Pagès[1], Estanislao Pujadas[1], Anna Jurado[1], Marc Teixidor[1], Martin Gonzalez[2], Magalí Carro[3], Matías Taucare[2], Linda Daniele[2]

[1]*IDAEA-CSIC*
[2]*CEGA, Santiago de Chile*
[3]*FCEFyN, UNC, Córdoba, Argentina*

Palabras clave: Geotermia Somera, interacción agua-roca, Movilización de elementos traza, Impacto geotérmia

Resumen. El incremento de la temperatura del agua subterránea asociado al desarrollo de sistemas geotérmicos someros puede modificar significativamente los procesos hidrogeoquímicos que controlan la movilidad de elementos potencialmente tóxicos en los acuíferos. A pesar del creciente uso de la energía geotérmica somera como alternativa energética sostenible, los efectos de las perturbaciones térmicas sobre las interacciones agua–sedimento y la liberación de elementos traza siguen siendo poco conocidos. En particular, existe una limitada comprensión de los mecanismos que pueden favorecer la movilización de ciertos elementos como, por ejemplo, el arsénico en condiciones predominantemente óxicas.

El objetivo de este estudio es investigar el impacto del aumento de temperatura sobre las interacciones hidrogeoquímicas entre el agua subterránea y los sedimentos de acuífero (oxihidróxidos de hierro), así como evaluar los posibles mecanismos responsables de la movilización de elementos traza bajo condiciones óxicas. Los reactores, preparados por triplicado, se incubaron durante 21 días a 35 °C para simular condiciones térmicas presentes en acuíferos afectados por anomalías térmicas asociadas a sistemas geotérmicos. A lo largo del experimento se monitorizó la evolución de los principales parámetros fisicoquímicos, así como las concentraciones de carbono orgánico disuelto (DOC), compuestos mayoritarios y elementos traza.

Los resultados muestran una evolución temporal bien definida del sistema hidrogeoquímico. Durante los primeros días de incubación se observa una fase inicial de reajuste geoquímico acompañada por un aumento progresivo de las concentraciones de DOC, que alcanzan un máximo aproximadamente entre los 5 y 7 días. Posteriormente, el sistema evoluciona hacia una fase caracterizada por la movilización progresiva de hierro disuelto y elementos traza asociados El arsénico muestra el mayor cambio, con concentraciones que aumentaron de 2.4–2.8 μg L^{-1} hasta 2655 μg L^{-1}, lo que supone un incremento de aproximadamente tres órdenes de magnitud durante el experimento térmico.

Este aumento significativo de arsénico se produjo a pesar de mantenerse condiciones óxicas a lo largo de todo el experimento, lo que indica que su movilización no puede explicarse mediante los mecanismos clásicos de disolución reductora de minerales de hierro. En cambio, la coincidencia temporal entre el pico de DOC y el incremento posterior de hierro disuelto sugiere que el aumento de temperatura favorece las interacciones entre materia orgánica y minerales del sedimento. Estos procesos podrían provocar la desestabilización de las superficies de oxihidróxidos de hierro y una reducción de su capacidad de adsorción, facilitando así la liberación de arsénico, entre otros elementos, previamente retenido en las fases sólidas.

Los resultados obtenidos demuestran que incrementos moderados de temperatura pueden activar procesos biogeoquímicos capaces de alterar significativamente la movilidad de elementos traza en acuíferos, incluso en condiciones óxicas. Estos hallazgos ponen de manifiesto la necesidad de considerar los efectos hidrogeoquímicos inducidos por perturbaciones térmicas en la evaluación ambiental y en la planificación del desarrollo sostenible de sistemas geotérmicos someros.

Agradecimientos: Esta investigación está financiada por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) bajo el proyecto 719RT0585 Red Iberoamericana de Energía Geotérmica Somera (RIGS-CYTED).

Impacto de los incendios forestales en la calidad de las aguas subterráneas: perspectivas de la Sierra de la Culebra (España)

Esther Rodríguez Jiménez[1], Juan Carlos Santamarta Cerezal[2]

[1]*Universidad Politécnica de Madrid. Confederación Hidrográfica del Duero*
[2]*Universidad de la Laguna*

Palabras clave: impacto, aguas subterráneas, incendio forestal

Resumen. Los incendios forestales inducen cambios en la composición del suelo y la vegetación, lo cual produce un impacto en el ciclo hidrológico. Las cenizas pueden infiltrarse en el subsuelo junto con el agua, lo que provoca modificaciones en la hidroquímica de las aguas subterráneas. En el verano del 2022, en la Sierra de la Culebra en la provincia de Zamora (España) tuvo lugar el mayor incendio registrado en la historia de España desde que se tienen registros. Así el objeto de este estudio es determinar cuánto ha sido el impacto de esta gran catástrofe sobre las aguas subterráneas. A tal efecto se tomaron muestras durante 2023 en distintos puntos en los que existía un registro histórico, para comparar los resultados hidroquímicos después del incendio con los datos de fondo previos. En los resultados se observa un aumento de la temperatura, hasta 10 grados centígrados, y una acidificación registrándose variaciones de pH desde un valor de 7,0 en el periodo pre-incendio hasta un valor de 6,2. Hay un aumento significativo en algunas zonas de los iones principales, como sulfatos y nitratos, mientras que los niveles de hidrogeno carbonatos disminuyeron en general, lo que indica la oxidación de la materia orgánica del suelo y la introducción de ácidos orgánicos en las aguas subterráneas. Además, se apreciaron un aumento en las concentraciones de cationes como el sodio, potasio, magnesio y calcio, lo que puede deberse a la infiltración de cenizas. Los niveles elevados de fósforo detectados, posiblemente se pueden correlacionar con el uso de retardantes de fuego o cenizas de vegetación quemada, y el aumento en las concentraciones de nitrógeno hacen suponer una lixiviación de este compuesto. También se detectaron contaminantes como trihalometanos y tolueno en algunas muestras de agua subterránea posteriores al incendio. En conclusión, en este estudio, se han cuantificado una serie de impactos de los incendios forestales en la calidad de las aguas subterráneas, un año después del suceso.

Impacto del Cambio Climático en la Cola de Caballo (Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido)

Jorge Jódar Bermúdez[1], Luis Javier Lambán Jiménez[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC)*

Palabras clave: Ordesa, Cola de Caballo, Manantial de Gracés, Cambio Climátio

Resumen. El Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (PNOMP) constituye uno de los espacios de alta montaña más singulares del sur de Europa desde el punto de vista hidrogeológico, al albergar el mayor macizo calcáreo de Europa occidental y sistemas kársticos desarrollados a gran altitud en dichos carbonatos.

En este contexto, los recursos hídricos subterráneos juegan un papel fundamental en el sostenimiento de los caudales de ríos y manantiales, así como en el mantenimiento de ecosistemas de alto valor ecológico y paisajístico. Entre estos elementos destaca el manantial de Garcés, cuya descarga da origen a la cascada de la Cola de Caballo, uno de los iconos naturales más representativos del PNOMP.

Los acuíferos kársticos de alta montaña se caracterizan por una elevada heterogeneidad, tiempos de tránsito cortos y una fuerte dependencia de la dinámica nival, lo que los hace especialmente vulnerables frente al cambio climático. El incremento de las temperaturas previsto para las próximas décadas puede alterar significativamente los procesos de acumulación y fusión de la nieve, modificando tanto la recarga como la estacionalidad de la descarga subterránea. El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto del cambio climático sobre la cantidad y el régimen temporal de la descarga del sistema kárstico de Garcés, y analizar sus posibles implicaciones hidrogeológicas y ambientales.

Para ello, se ha implementado y calibrado un modelo hidrológico semidistribuido HBV en la cuenca hidrológica asociada al manantial de Garcés, situada en el macizo del Monte Perdido. El modelo incorpora explícitamente los procesos de acumulación y fusión nival, y se alimenta con series temporales diarias de precipitación, temperatura y evapotranspiración, así como con una serie de caudales de descarga del manantial, estimada a partir de registros continuos de nivel de agua en el sifón terminal del sistema kárstico. La calibración y validación

del modelo muestran una reproducción satisfactoria de los caudales de descarga medidos en el Manantial de Garcés. Así mismo, se ha evaluado la incertidumbre asociada a la parametrización del modelo mediante un análisis de Monte Carlo.

Una vez calibrado, el modelo se ha utilizado para simular la respuesta hidrológica del sistema hidrogeológico bajo escenarios climáticos futuros RCP4.5 (escenario de emisiones moderadas) y RCP8.5 (escenario de emisiones muy altas), aplicando un enfoque de delta change basado en el conjunto de modelos climáticos considerados por la AEMET. Los resultados indican que, si bien no se esperan cambios significativos en la precipitación anual media, sí se prevé un aumento notable de la temperatura del aire y de la evapotranspiración. Este incremento térmico conlleva una reducción sustancial de la acumulación nival, un ascenso de la cota de nieve entre 300 y 500 m y un adelanto del periodo de fusión.

En términos anuales, la recarga media del acuífero no muestra una disminución significativa; sin embargo, se observa un cambio marcado en su estacionalidad. Las simulaciones muestran un aumento de la descarga subterránea durante los meses de otoño, invierno y primavera, asociado a un mayor número de eventos de precipitación en forma de lluvia y a una fusión nival más temprana. Por el contrario, durante el estiaje estival se produce una reducción relevante del caudal base, especialmente bajo el escenario RCP8.5, lo que puede comprometer el funcionamiento de los ecosistemas dependientes del recurso hídrico aguas abajo del manantial.

Los resultados ponen de manifiesto que el principal impacto del cambio climático en el sistema kárstico de Garcés no será tanto una disminución del volumen anual de recursos hídricos como una alteración significativa de su régimen temporal de descarga. Este cambio en la estacionalidad, junto con un previsible aumento de la temperatura del agua durante el verano, tiene implicaciones directas para la gestión y conservación de los sistemas acuáticos y del patrimonio natural del PNOMP.

Este estudio se enmarca en las actividades del proyecto estratégico integrado LIFE-SIP PYRENEES4CLIMA, cuyo objetivo principal es poner en marcha la primera estrategia transfronteriza de cambio climático en Europa en una zona de montaña como es el Pirineo, y se articula y coordina a través del Observatorio Pirenaico de Cambio Climático (OPCC) y la Comunidad de Trabajo de los Pirineos (CTP), respectivamente.

Agradecimientos: Esta investigación ha recibido el apoyo de Interreg (EFA210/16), del proyecto de cooperación internacional PIRAGUA, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg V España-Francia-Andorre (POCTEFA 2014-2020) de la Unión Europea, del proyecto LIFE PYRENEES4CLIMATE (101104957 - LIFE22-IPC-ES-

LIFE PYRENEES4CLIMA), financiado por la UE, y del proyecto IGME-CSIC INTRAMURAL 202530E207.

Impacto del modelo de Supermanzanas (Superilles) en la calidad del agua urbana: dinámica de metales traza y materia orgánica disuelta en el entorno urbano

Diego Schmidlin[1], Eike Marie Thaysen[1], Stefan Platikanov[2], Jiaqi Xu[1], Roma Tauler[2], Enric Vázquez-Suñé[1], Maria Jose Chesa[3], Marc Teixidó[1]

[1]*Department of Geosciences, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA- CSIC), Severo Ochoa Excellence, 18-26 Jordi Girona, 08034, Barcelona, Spain*
[2]*Department of Environmental Chemistry, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC), Severo Ochoa Excellence, 18-26 Jordi Girona, 08034, Barcelona, Spain*
[3]*Barcelona Cicle de l'Aigua, S.A. (BCASA), Acer 16, 08038, Barcelona, Spain*

Palabras clave: Modelo de Supermanzanas, Escorrentía urbana, Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), Metales traza y materia orgánica disuelta

Resumen. El cambio climático, la contaminación urbana y la creciente escasez de agua están impulsando la adopción de estrategias que aumenten la resiliencia de las ciudades. En este contexto, el modelo de Supermanzanas (Superilles) de Barcelona —una estrategia de planificación urbana que restringe el tráfico motorizado, prioriza el uso peatonal y promueve la infraestructura verde— se presenta como una solución integrada. Dentro de este modelo, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) permiten la captación, tratamiento e infiltración de la escorrentía urbana, favoreciendo su reutilización principalmente para usos no potables y la recarga de acuíferos. Para evaluar su impacto en la calidad del agua, se realizaron siete campañas de muestreo en tres distritos de Barcelona, incluyendo lluvia, escorrentía (first flush) en calles con tráfico y peatonales, así como influentes y efluentes de SUDS. Se analizaron seis metales traza disueltos (Zn, Cu, Cr, Pb, Ni y Cd) y la materia orgánica disuelta (DOM). Los resultados muestran que las concentraciones siguen la tendencia: lluvia < efluente SUDS < escorrentía peatonal < escorrentía vial. El Zn (hasta 160 µg/L) y el Cu (hasta 42 µg/L) fueron los metales dominantes, asociados al tráfico vehicular. Los SUDS redujeron contaminantes entre un 23 y un 70% y transformaron la DOM hacia formas más húmicas y estables. La evaluación

ecotoxicológica evidenció riesgos episódicos en escorrentía vial, principalmente por Cu y Zn, mientras que los efluentes de SUDS se mantuvieron por debajo de los umbrales de riesgo. Estos resultados demuestran que la combinación de control en origen (Supermanzanas) y tratamiento (SUDS) reduce eficazmente la contaminación difusa urbana.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer el apoyo financiero proporcionado por el Ayuntamiento de Barcelona a través del Premio de Investigación Científica sobre Retos Urbanos en la Ciudad de Barcelona 2020 (ASSET-WATER, 21S04651–3).

DS y EMT agradecen el proyecto UPWATER (UPWATER – Understanding groundwater Pollution to protect and Enhance WATER quality), financiado por la Unión Europea bajo el Grant Agreement No. 101081807.

Impactos antrópicos sobre la hidrología de las lagunas de Lantejuela (Sevilla) y propuesta de restauración hidrológica

Francisco Moral Martos[1], Miguel Rodríguez Rodríguez[1], José Luis Yanes Conde[1], Alejandro Jiménez Bonilla[1]

[1]*Universidad Pablo de Olavide*

Palabras clave: Impactos antrópicos, Humedal-Acuífero-Red fluvial, Restauración hídrica

Resumen. La subsidencia reciente de la subcuenca Corbones-Genil ha favorecido la formación de un delta interior, constituido por limos, arenas, gravas y arcillas cuaternarios de facies fluviolacustre, que ocupa una superficie próxima a los 300 km^2 entre las localidades de Lantejuela y Osuna. Estos sedimentos, generalmente con potencias inferiores a los 20 m, fosilizan un antiguo relieve labrado sobre lutitas triásicas y miocenas y se caracterizan por una morfología casi plana y ligeramente inclinada hacia el norte. El relleno sedimentario forma el acuífero de los Llanos de Osuna, de aguas salobres, con una superficie freática somera y dirección del flujo subterráneo hacia el norte. Los cauces fluviales que atraviesan los sedimentos cuaternarios apenas muestran incisión, lo que evidencia un proceso activo de agradación sedimentaria originado por los desbordamientos fluviales en épocas de crecida. En la parte septentrional de la llanura aluvial se encuentran varias lagunas, que son los restos de un extenso humedal, que recibía la descarga de agua del acuífero y los aportes de los desbordamientos de los cauces fluviales. En el origen de algunos vasos lacustres ha tenido un papel relevante la deflación eólica, como se infiere de la presencia de dunas arcillosas (lunetas), únicas en la península Ibérica, que orlan la orilla septentrional de las lagunas.

A pesar de la buena aptitud de los suelos para la agricultura, hasta los años 60 del siglo pasado existía notables dificultades para el cultivo a causa de las recurrentes inundaciones y de la poca profundidad de la superficie freática, en algunos puntos, prácticamente a ras del suelo. Por este motivo, se ejecutan las obras del plan de saneamiento de la campiña de Osuna que consistieron en la canalización mediante excavación de los principales cauces fluviales y la realización de una red de zanjas de drenaje para favorecer la evacuación de las aguas de las zonas palustres y de varias lagunas.

Por otra parte, la construcción de numerosos pozos y la extensión del regadío en las últimas décadas ha provocado un descenso de la piezometría en la mayor parte del acuífero, limitando la descarga de agua hacia el antiguo humedal. En definitiva, las obras de drenaje y la extracción de agua subterránea han ocasionado una notable reducción de los intercambios de agua entre el acuífero, el humedal y los cauces fluviales.

La administración andaluza ha ejecutado algunas obras que pretenden la restauración hidrológica de algunas de las lagunas más emblemáticas de la zona, como la laguna de Ruiz Sánchez, la segunda en extensión de Andalucía, o la de Calderón Grande. No obstante, estas actuaciones presentan un carácter puntual y adolecen de una perspectiva global del sistema hidrológico acuífero-humedal-arroyos. En este trabajo se subraya la importancia del conocimiento hidrológico integral como base para la restauración hidrológica que, en el caso del humedal de Lantejuela, podría ser muy efectiva con actuaciones relativamente sencillas y de bajo coste y permitiría la recuperación del principal humedal continental de Andalucía.

Impactos de la recarga artificial de acuíferos mediante acequias de careo en la cuenca del río Mecina (Sierra Nevada, España)

Thomas Zakaluk[1], Jorge Jódar[2], Antonio González-Ramón[1], Blas Ramos-Rodríguez[1], Juan Pablo Zamora-Gómez[3], Luis Javier Lambán-Jiménez[2], Carlos Marín-Lechado[4], Sergio Martos-Rosillo[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, Granada, España.*
[2]*Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, Zaragoza, España.*
[3]*Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA, Argentina.*
[4]*Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, Madrid, España.*

Palabras clave: recarga artificial, acequias de careo, soluciones basadas en la naturaleza, antropoceno

Resumen. Las comunidades de regantes tradicionales de Sierra Nevada (España) cuentan con una larga tradición de recarga artificial de acuíferos para incrementar el caudal de manantiales y el flujo base de los ríos durante los meses estivales. Esta técnica, conocida localmente como careo, constituye una estrategia de adaptación a la escasez hídrica estacional. El método de recarga consiste en desviar el agua desde las cabeceras fluviales, principalmente durante el deshielo, mediante acequias, con poca pendiente y no revestidas, que favorecen la infiltración en laderas y la percolación hacia acuíferos en pendiente, desarrollados sobre esquistos alterados de escaso espesor (<50 m).

Este trabajo se centra en la cuenca del río Mecina, situada en la vertiente sur de Sierra Nevada (41 km²; 1132–2768 m s. n. m.), donde los careos desempeñan un papel clave en el funcionamiento hidrológico y en los sistemas de vida locales desde la Edad Media. Se presentan resultados de cinco años de monitorización de caudales en el río y en las principales acequias (2021–2025), con el objetivo de cuantificar los balances hídricos y evaluar la contribución de los careos a la recarga total. Asimismo, se integran balances de cloruros a partir de muestreos de aguas superficiales y subterráneas realizados durante el mismo periodo.

Los resultados evidencian que los careos generan una combinación de recarga natural difusa y recarga artificial concentrada, con un impacto significativo en el balance hídrico de la cuenca. Durante el periodo de estudio, las acequias infiltraron en promedio 50±25 mm/año, lo que representa el 48±30 % de la

descarga en la salida de cuenca. Las bajas concentraciones de cloruros en aguas subterráneas y superficiales en dicha salida (1,61±1,03 y 1,55±0,56 mg/L, respectivamente) respaldan la relevancia de este proceso. El balance de cloruros estima una recarga total de 96±145 mm/año, equivalente al 92±143 % de la descarga media anual, de la cual los careos podrían aportar aproximadamente el 52±83 %.

Este estudio demuestra que las actividades humanas pueden modificar de forma sustancial el comportamiento hidrológico de cuencas de alta montaña semiáridas. Asimismo, pone en valor el conocimiento ecológico local como herramienta de adaptación a la escasez hídrica y resalta la necesidad de estudios hidrológicos e hidrogeoquímicos detallados en entornos alpinos.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por el proyecto AQUAKARST (PLSQ-2023–00284), H2RISE (PID2024–161600OB-I00) y INCHA (PID2022–140092OB-I00), financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y cofinanciados por el FEDER, Unión Europea.

Indicadores hidrogeológicos de la degradación de humedales mediterráneos en el sur de la Península Ibérica: Influencia de la extracción de aguas subterráneas y variabilidad climática

Alejandro Jiménez Bonilla[1], José Luís Yanes Conde[1], Fernando Gázquez[2], Miguel Rodríguez Rodríguez[2]

[1]*Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, Seville, Spain*
[2]*Water Resources and Environmental Geology Research Group, Department of Biology and Geology, University of Almeria, Almeria, Spain*

Palabras clave: Laguna tipo playa, Degradación, Cambio Climático, Modelización hidrológica

Resumen. La modelización hidrológica se presenta como una herramienta fundamental para comprender y analizar los procesos que regulan el funcionamiento de los humedales, permitiendo evaluar su estado de degradación y aportar información clave para su gestión y conservación sostenible. Este trabajo se basa en un estudio hidrogeológico para evaluar la respuesta hidrológica de los humedales durante un año hidrometeorológico húmedo (2024/2025) que siguió a un periodo prolongado de sequía, lo que permite analizar su capacidad de resiliencia. Para ello, se diferencian entre humedales desarrollados sobre sustratos de alta permeabilidad, fuertemente conectados con las aguas subterráneas, y aquellos sobre sustratos de baja permeabilidad, donde la dinámica hidrológica depende en mayor medida de la escorrentía superficial y de las condiciones climáticas. Los casos de estudio son las lagunas peridunares más importantes del Parque Nacional de Doñana, lagunas de Campillos y las lagunas de El Conde, El Gosque y Ratosa.

La comparación entre los niveles de agua observados y los niveles simulados mediante modelización hidrogeológica usando el software Trasero, junto con el análisis del sesgo medio (mean bias) y el hidroperiodo, permitió clasificar el grado de degradación hidrológica en tres niveles de 1 a 3, siendo el 3 el de mayor degradación.

Los humedales desarrollados sobre sustratos permeables muestran respuestas contrastadas en función de su proximidad a zonas de extracción de aguas subterráneas. Aquellos situados lejos de áreas de bombeo intensivo (lagunas Dulce y Santa Olalla; Doñana) presentan una fuerte correlación entre los datos observados y modelizados y mantienen una elevada capacidad de recuperación hidrológica (Nivel 1). Por el contrario, los humedales localizados cerca de zonas de extracción intensiva (lagunas de Taraje y Zahíllo, Doñana) muestran valores de sesgo medio negativos y menores correlaciones, lo que indica alteraciones hidrológicas moderadas (Nivel 2).

En el caso de los humedales desarrollados sobre sustratos de baja permeabilidad se observa una mayor heterogeneidad en la respuesta hidrológica. Algunas lagunas tipo playa muestran una buena capacidad de recuperación tras episodios de sequía (Nivel 1; lagunas de Campillos), mientras que otras reflejan un elevado grado de degradación hidrológica (Nivel 3; laguna de El Conde), vinculado principalmente a cambios en el uso del suelo, especialmente a la agricultura intensiva.

Los resultados permiten identificar dos grandes factores de degradación: (1) las extracciones de aguas subterráneas para abastecimiento o desarrollo de regadío intensivo y (2) el aumento de la variabilidad climática caracterizada por períodos de sequía prolongada. En este contexto, las estrategias de restauración deberían orientarse a la recuperación de la conectividad hidrológica, la reducción de las extracciones de aguas subterráneas, la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y la implementación de una gestión del agua a escala de cuenca. Asimismo, resulta fundamental disponer de programas de monitorización a largo plazo y con alta resolución temporal.

Agradecimientos: Monitorizacion hidrológica y modelización de la relación laguna-acuífero en los mantos eólicos de doñana. Seguimiento y ampliación del inventario between Pablo de Olavide University and the Spanish Guadalquivir River Basin Authority (CHG- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico)

Influência das condições hidrodinâmicas na salinização de sistemas aquíferos costeiros em regiões semi-áridas

Mohamed Neji[1], Ghassen BenZid[1], Malek Drissi[1], Sameh Chargui[2], Olivier Grunberger[3], Margarida Antunes[4], Fethi Lachaal[1]

[1]*Georesources Laboratory, Water Research and Technology Centre, PO Box 273 Soliman 8020, Tunisia. University of Tunis El Manar, Faculty of Sciences of Tunis, 2092 El Manar, Tunis, Tunisia*
[2]*Georesources Laboratory, Water Research and Technology Centre, PO Box 273 Soliman 8020, Tunisia*
[3]*LISAH, Univ. Montpellier, INRAE, IRD, SupAgro, Montpellier, France*
[4]*ICT | Institute of Earth Sciences, Pole of University of Minho, Campus de Gualtar, Braga, Portugal*

Palabras clave: Aquífero Plio-Quaternário, intrusão marinha, hidrogeoquímica, gestão de água subterrânea

Resumen. Os sistemas aquíferos costeiros das regiões mediterrânicas semiáridas apresentam uma vulnerabilidade crescente à salinização da água subterrânea devido à combinação de exploração intensiva, variabilidade climática e redução da recarga natural. Em alguns destes sistemas, os reservatórios superficiais contribuem para a recarga dos aquíferos e para a mitigação da intrusão marinha. Contudo, em períodos de seca prolongada e elevada pressão antrópica, este efeito de recarga pode tornar-se insuficiente nos processos de degradação da qualidade da água subterrânea. Nestes sistemas, a intrusão de água do mar constitui um dos principais mecanismos de salinização, especialmente em áreas de intensa atividade agrícola. O aquífero costeiro Plio-Quaternário da planície de Lebna (Nordeste da Tunísia), tem registado nas últimas décadas um agravamento significativo da salinização, associado principalmente à intensificação da exploração de água subterrânea e à diminuição da disponibilidade de recursos hídricos superficiais.

Este trabalho tem como objetivo caracterizar as condições hidrodinâmicas atuais do sistema aquífero, analisar a distribuição espacial da salinidade e identificar os principais mecanismos responsáveis pela mineralização da água subterrânea. Para tal, considera-se uma abordagem integrada que combina monitorização

piezométrica e análise hidrogeoquímica. Os dados foram em campanhas de campo, realizadas em 2022 e 2023, nas quais foram medidos níveis piezométricos, em cerca de 100 poços distribuídos pela área de estudo, incluindo zonas costeiras, áreas agrícolas e setores a jusante da barragem de Lebna. Nestes pontos, foram determinados parâmetros físico-químicos in situ, como Condutividade Elétrica, Temperatura e pH, e recolhidas amostras de água subterrânea, superficial e do mar para determinação dos principais iões.

Os resultados obtidos evidenciam alterações significativas nas condições hidrodinâmicas do sistema aquífero. A distribuição espacial da piezometria mostra a formação de um cone de depressão, a jusante da barragem de Lebna, com níveis piezométricos que atingem localmente 10 m abaixo do nível do mar. Esta situação favorece o estabelecimento de gradientes hidráulicos inversos e promove a migração de água marinha para o interior do aquífero. Os valores de Condutividade Elétrica variam entre 1,2 e 21,3 mS/cm, indicando níveis elevados de salinização, sobretudo nas zonas próximas da linha de costa e da foz do Wadi Lebna, enquanto as áreas situadas a montante apresentam valores significativamente mais baixos.

A análise hidrogeoquímica mostra a predominância de fácies Na–Cl e Ca–Na–Cl–SO_4, com aumento progressivo das concentrações de sódio e cloreto em direção ao litoral. Esta distribuição reflete processos de mistura entre água doce e água marinha, acompanhados por mecanismos de troca catiónica inversa durante a interação entre a água intrusiva e os sedimentos do aquífero. A água menos mineralizada, identificada em setores mais interiores, apresenta composições mistas associadas à recarga continental e à dissolução de minerais carbonatados e, localmente, ao efeito de recarga induzida associado ao reservatório da barragem de Lebna.

A interpretação conjunta dos dados hidráulicos e geoquímicos indica que a intrusão marinha constitui atualmente o principal mecanismo responsável pela salinização do aquífero da planície de Lebna. Este processo é intensificado pela exploração intensiva de água subterrânea para irrigação e pelas condições de seca prolongada entre 2020 e 2023, que reduziram significativamente a recarga natural e o papel regulador da barragem de Lebna. Consequentemente, o efeito de recarga associado ao reservatório revela-se espacialmente limitado e insuficiente para contrariar o avanço da intrusão marinha.

Estes resultados evidenciam a elevada vulnerabilidade do sistema aquífero e destacam a importância da integração de ferramentas hidrodinâmicas e hidrogeoquímicas para apoiar estratégias de gestão sustentável da água subterrânea em ambientes costeiros mediterrânicos sujeitos a forte pressão climática e antrópica.

Agradecimientos: The work is included in the framework of the UID/04683/2025, https://doi.org/10.54499/UID/04683/2025, through FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

Influencia del bombeo en la dinámica de las sequías de aguas subterráneas: análisis mediante índices estandarizados y simulaciones contrafactuales

Daniela Cid Escobar[1], Natalia Limones[2], María Fernández Martínez[1], Lucia De Stefano[1]

[1]*Universidad Complutense de Madrid*
[2]*Universidad de Sevilla*

Palabras clave: modelización contrafactual, sequía antropogénica, SGI

Resumen. Este trabajo tiene como objetivo contribuir a la comprensión de cómo la explotación intensiva de los acuíferos afecta la propagación de los eventos de sequía meteorológica en las aguas subterráneas. Dicha comprensión es especialmente importante para el diseño de medidas que contrarresten los efectos negativos de la explotación intensiva en regiones áridas y semiáridas. Presentamos un método para separar los controles hidroclimáticos y antropogénicos de las anomalías de nivel freático en dos acuíferos hidráulicamente conectados de la cuenca del Ebro: el Pliocuaternario de Alfamén y el Campo de Cariñena.

Primero, reconstruimos series temporales de niveles piezométricos (1980–2025) de 50 puntos de observación mediante modelos de función de transferencia con ruido implementados en el paquete Pastas, usando como forzantes la precipitación, evapotranspiración potencial y series mensuales de bombeo reconstruidas. De dichas series se obtienen los índices estandarizados de agua subterránea (SGI) para el periodo considerado, que se comparan con el índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado (SPEI) a múltiples escalas para caracterizar el acoplamiento clima-agua subterránea y la distribución espacial de los distintos tipos de respuesta. En segundo lugar, aislamos el efecto de la extracción mediante la construcción de simulaciones contrafactuales sin bombeo a partir de la descomposición lineal de los modelos calibrados y la eliminación de las contribuciones del bombeo. Esto permite realizar comparaciones entre escenarios para cada piezómetro. Cuantificamos cómo el bombeo modifica las características de los episodios de déficit (2010–2025; SGI < −1), analizando el

número de eventos, métricas de duración, el momento de inicio y del pico, la reclasificación mensual y el efecto instantáneo del bombeo.

Los resultados muestran que, bajo condiciones de bombeo, el acoplamiento clima-agua subterránea se intensifica a medida que aumenta la escala temporal de acumulación climática. Espacialmente, los tipos de respuesta y el acoplamiento a escalas largas muestran un comportamiento coherente con las zonas intensamente cultivadas. Los descensos persistentes del SGI bajo bombeo se concentran en las partes centrales de ambos acuíferos, coincidiendo con las zonas de riego subterráneo más intensas, mientras que los piezómetros situados cerca de los bordes de los acuíferos registran con mayor frecuencia descensos transitorios o no significativos.

La eliminación del bombeo modifica sustancialmente la escala temporal de los episodios de anomalía negativa de niveles piezométricos. El SGI sin bombeo muestra señales que se alinean más estrechamente con anomalías climáticas anuales (en torno a SPEI12), con picos de correlación de hasta 0.8 y promedios cercanos a 0.45 en ambos acuíferos, lo que indica que las tendencias descendentes observadas en el SGI están determinadas externamente por la extracción.

Los diagnósticos contrafactuales revelan además una reorganización temporal sustancial: el bombeo genera anomalías más largas y persistentes, incrementa la frecuencia de meses clasificados bajo condiciones de déficit moderado y desplaza los inicios de los eventos hacia finales de otoño-principios de invierno y, en el acuífero de Cariñena, hacia un segundo periodo en junio. En promedio, entre un 29–31 % de los meses cambian de clasificación entre los escenarios con y sin bombeo, evidenciando una modificación significativa de la estructura temporal de las anomalías subterráneas.

En conjunto, observamos que el bombeo aumenta la persistencia de anomalías moderadas, retrasa la recuperación tras episodios de sequía meteorológica y prolonga la memoria del sistema. Durante meses no deficitarios, el SGI con bombeo es en promedio 1.15 unidades estandarizadas menor en Alfamén y 1.24 en Cariñena respecto al escenario sin bombeo, lo que evidencia una supresión sistemática de la recuperación incluso bajo condiciones climáticas favorables. En consecuencia, las señales observadas se aproximan más a una sequía antropogénica que a una respuesta exclusivamente climática.

El método aplicado permite estimar y caracterizar la contribución de la variabilidad climática y de los bombeos de aguas subterráneas a partir de los SGI derivados de niveles observados en acuíferos intensamente explotados. Los resultados sugieren que medidas de gestión focalizadas en periodos críticos de

extracción podrían ser más efectivas que restricciones uniformes anuales y muestran el potencial de este enfoque para apoyar decisiones sobre reducción de extracciones, sustitución de recursos y adaptación frente a sequías en regiones mediterráneas.

Agradecimientos: El proyecto GroundedExtremes ha recibido financiamiento de la Agencia Estatal de Investigación en el marco del Proyecto PCI2024-153506 (financiado por MCIU/AEI/10.13039/501100011033) y del Programa Horizonte Europa de la Unión Europea en el marco de la convocatoria transnacional conjunta de 2022 del programa europeo Water4All (acuerdo de subvención n.º 101060874).

Integración de ensayos hidráulicos complejos y modelización MODFLOW para la obtención de parámetros individualizados en un acuífero multicapa

Laura Blanco Núñez[1], Xavier Alemany Monsó[1]

[1]*Anufra sl*

Palabras clave: Modflow, Bombeo, Acuífero, Multicapa

Resumen. El acuífero detrítico del Pla de Barcelona constituye un sistema multicapa altamente heterogéneo, formado por alternancias de arcillas, limos, arenas y gravas cuaternarias y terciarias con propiedades hidráulicas muy contrastadas. Esta heterogeneidad, tanto lateral como vertical, dificulta la obtención de parámetros representativos mediante ensayos convencionales, especialmente en el contexto de obras subterráneas profundas que requieren abatimientos temporales del nivel freático en entornos urbanos sensibles.

Este trabajo presenta una metodología integrada para la caracterización hidrogeológica y la construcción de un modelo numérico de flujo subterráneo en un acuífero multicapa. A lo largo del año 2025 se recopilaron e interpretaron ensayos hidráulicos existentes —bombeos simples, Lefranc y slug— junto con datos granulométricos obtenidos por tamizado. Las curvas de Breddin permitieron establecer valores iniciales de conductividad hidráulica coherentes con la litología observada.

Posteriormente, también en 2025, se ejecutó un ensayo de interferencia de alta complejidad, con varios pozos bombeando simultáneamente durante varios días y piezómetros ranurados a diferentes niveles. Todos los puntos de control fueron instrumentados, registrando niveles y temperatura de forma continua, generando una base de datos de alta resolución temporal y espacial desde el pre bombeo hasta la recuperación.

A partir de esta información se elaboró un modelo geológico 3D simplificado, estructurado en unidades hidrogeológicas representativas del acuífero multicapa y sus cambios laterales de facies. Este modelo se implementó en MODFLOW 6, incorporando condiciones de contorno basadas en piezometría histórica y gradientes regionales derivados del mapa geotécnico del Pla de Barcelona. La

calibración, combinando ajuste manual y PEST, permitió ajustar conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento para reproducir la respuesta observada durante el ensayo.

La metodología desarrollada proporciona parámetros individualizados por capa, esenciales para simular escenarios de abatimiento y evaluar su impacto en obras subterráneas de alta complejidad. El enfoque propuesto constituye una herramienta robusta para la gestión del nivel freático y la planificación segura de intervenciones subterráneas en el Pla de Barcelona y en otros entornos urbanos con acuíferos multicapa heterogéneos.

Inundaciones hidrogeológicas en entornos urbanos kársticos: lecciones aprendidas tras el episodio de lluvias extremas de febrero del 2026 en las sierras de Endrinal y Líbar (provincias de Cádiz y Málaga)

Sergio Martos Rosillo[1], Fernando Ruiz Bermudo[1], Claus Kohfahl[1], José Antonio Serrano Reina[1], José Manuel Gómez Fontalva[1], Ana Ruiz Constán[1], Antonio González Ramón[1], Jorge Jiménez Sánchez[1], Crisanto Martín Montañez[1], Károly Hidas[1], Antonio Pedrera Parias[1], Carlo Brusini Jiménez[1], Juan Carlos García López-Davalillo[1], Inés Galindo Jiménez[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*

Resumen. Desde el inicio del año hidrológico hasta comienzos de febrero de 2026, la Serranía de Ronda y la Sierra de Cádiz registraron un episodio extremo de precipitaciones que alcanzó más de 3200 mm en Grazalema, con precipitaciones diarias incluso de 554 mm. Este evento desencadenó una respuesta excepcional en los acuíferos kársticos de las Sierras del Endrinal y Líbar, activando surgencias epifreáticas inéditas, saturación del epikarst y fenómenos de inundación hidrogeológica que afectaron directamente a los núcleos urbanos de Grazalema (Cádiz) y Benaoján (Málaga). Un equipo del IGME-CSIC, integrado en el Grupo de Asesoramiento en Desastre y Emergencias del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (GADE-CSIC), llevó a cabo actuaciones de emergencia relacionadas con los efectos de las inundaciones hidrogeológicas. Las intervenciones incluyeron inspecciones de campo, instalación de instrumentación piezométrica, análisis de datos meteorológicos e hidrodinámicos e identificación de puntos críticos de descarga.

En Grazalema, la intensidad excepcional de las lluvias superó la capacidad de infiltración del epikarst y activó diferentes surgencias epifreáticas, generando escorrentía subsuperficial que se drenó en el interior de edificaciones, en patios interiores y por excavaciones para cableado e infraestructuras de abastecimiento y saneamiento de aguas urbanas. El agua surgió en zonas topográficamente bajas, dentro del casco urbano, sin que existieran evidencias de un ascenso del nivel freático regional hasta la cota de las viviendas afectadas. Los manantiales temporales de Los Tajos y la estavella de La Olla, situados a menor cota que el

casco urbano, se activaron y posteriormente redujeron su caudal hasta agotarse rápidamente tras el cese de las precipitaciones. En Benaoján, el acuífero de la Sierra de Líbar mostró ascensos bruscos del nivel piezométrico y un incremento sin precedentes del caudal en sus principales manantiales. En el manantial de Benaoján, que presenta un caudal mediano del orden de 650 L/s, se midieron 45.530 L/s, el 5 de febrero. En el casco urbano se produjeron surgencias epifreáticas del orden de 100 L/s. Esta descarga lateral, no asociada al nivel freático regional, afectó a viviendas localizadas bajo un escarpe carbonatado. Tanto en Grazalema como en Benaoján se registraron ruidos y movimientos turbulentos típicos de redes kársticas presurizadas durante eventos de recarga extremos, que coincidieron en el tiempo, con un pequeño enjambre sísmico con terremotos de baja magnitud.

Las actuaciones del IGME-CSIC permitieron interpretar, en tiempo real, los procesos hidrogeológicos responsables de las inundaciones y apoyar a la Agencia de Seguridad y Gestión Integral de Emergencias de Andalucía (ASEMA) en la toma de decisiones. Entre las recomendaciones una vez terminada la emergencia destacan: la construcción de piezómetros, instalación de sensores piezométricos y estaciones de aforo con telemetría; inspecciones geofísicas y geotécnicas en zonas afectadas; obras de drenaje para gestionar futuras descargas epifreáticas y el desarrollo de sistemas de alerta temprana específicos para acuíferos kársticos soportados en las lecturas de control piezométrico. Parte de estas actuaciones se van a llevar a cabo con el proyecto KARST-ALERT, financiado con fondos del CSIC.

Estos eventos ponen de manifiesto los límites de la capacidad de regulación/amortiguación de los sistemas kársticos frente a precipitaciones extremas y la necesidad de integrar medidas de monitorización, modelización y gestión del riesgo hidrogeológico en áreas urbanas construidas sobre acuíferos kársticos.

Agradecimientos: Este trabajo es una contribución al Proyecto Intramural Especial financiado con fondos propios del CSIC "Gestión del riesgo de inundaciones hidrogeológicas en acuíferos kársticos: conocimiento, alerta y adaptación. Aplicación a los sistemas kársticos del Endrinal-Hondón-Ubrique y Sierra de Líbar (KARST-ALERT- 202630E130)"

Investigaciones relacionadas con la contaminación puntual de las aguas subterráneas. Localización del origen de contaminaciones históricas

Juan Sánchez Anguita[1], Roberto Espínola Cazorla[1], Montserrat Toribio Sánchez[1], Emilio Orejudo Ramírez[1]

[1]*Agència Catalana de l'Aigua*

Palabras clave: Contaminación puntual

Resumen. La Agència Catalana de l'Aigua (ACA) entre sus competencias incluye la mejora y recuperación de acuíferos vinculada a episodios de contaminación puntual de las aguas subterráneas.

En situaciones en las que se detecta una contaminación y hay dudas sobre la responsabilidad de una empresa o no hay un responsable conocido, la ACA planifica y realiza directamente investigaciones del subsuelo con el objetivo de localizar el origen de la contaminación.

Estas caracterizaciones del subsuelo implican la búsqueda previa de posibles actividades potencialmente contaminantes en el entorno del emplazamiento, tanto históricas como actuales, así como la elección de la ubicación de los sondeos/piezómetros y del tipo de pruebas a realizar, en función del tipo de contaminante y de las características de los materiales del subsuelo.

Las investigaciones se suelen realizar por fases. La ubicación del foco de contaminación se va acotando progresivamente en base a la distribución espacial de las concentraciones de contaminantes en las aguas y/o la zona no saturada.

En esta comunicación se presentarán algunos ejemplos de las dificultades, condicionantes y complejidad de abordar este tipo de investigaciones, particularmente cuando se trata de actividades históricas.

Se explicarán dos casos. El primero está asociado a una contaminación industrial histórica, por plaguicidas clorados y clorobencenos, en el ámbito del Delta del Besós. El último és una contaminación por percloroetileno y tricloroetileno en la riera de Sant Pol que afecta a pozos de abastecimiento.

Destino de los edulcorantes artificiales en acuíferos urbanos: Evaluación de la atenuación natural mediante modelos de mezcla

Lyen Castro[1], Santiago Gomez[1], Victoria Osorio[1], Anna Jurado[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona*

Palabras clave: edulcorantes artificiales, modelo de mezcla, acuíferos urbanos

Resumen. Destino de los edulcorantes artificiales en acuíferos urbanos: evaluación de la atenuación natural mediante modelos de mezcla

La gestión de las aguas subterráneas urbanas como recurso hídrico alternativo enfrenta desafíos crecientes por la contaminación antropogénica y la variabilidad climática. En el caso del acuífero del Delta del río Besòs (Barcelona), su calidad depende en gran medida de la recarga del río Besòs, receptor de una variedad de contaminantes orgánicos mediante efluentes de estaciones depuradoras (EDAR). Entre estos contaminantes, los edulcorantes artificiales (EA) son substancias que se consideran pseudo-persistentes en las aguas receptoras debido a su consumo frecuente, limitada metabolización y recalcitrancia a los tratamientos convencionales, favoreciendo su dispersión en el medio ambiente. La limitada información sobre el destino de los EA en acuíferos urbanos, junto con la evidencia de sus efectos subletales en la biota acuática, los posiciona como contaminantes de preocupación emergente.

Este estudio analiza la presencia de acesulfamo, ciclamato, sacarina y sucralosa en el sistema río-acuífero del Besòs, y propone una metodología para evaluar su atenuación natural mediante proporciones de mezcla, complementada con una evaluación de la velocidad de atenuación para una reacción de primer orden.

Para ello, se realizaron campañas de muestreo mensualmente bajo condiciones hidrológicas contrastantes: sequía (2021) y recuperación (2024-2025). El análisis químico de los compuestos se realizó mediante extracción en fase sólida y evaporación asistida por vacío para su enriquecimiento y aislamiento, seguido de separación mediante cromatografía líquida de alta eficacia y identificación por espectrometría de masas de alta resolución.

Las concentraciones de todos los EA fueron superiores durante la sequía, destacándose la sucralosa como el compuesto más abundante, con máximos en

aguas superficiales de 47 µg/L, que disminuyeron a un promedio de 2,8 µg/L durante el periodo de recuperación. Pese a la atenuación general observada a lo largo de la línea de flujo, la sucralosa mantuvo concentraciones de un orden de magnitud superiores al resto de los compuestos analizados en todo el acuífero.

Respecto al modelo de mezcla, estudios previos identificaron tres fuentes de recarga necesarias para explicar la variabilidad hidroquímica del río: W1 (periodos húmedos; baja carga química) y D1/D2 (condiciones secas). Las proporciones de mezcla indican que durante el periodo de sequía el agua subterránea está fuertemente dominada por condiciones secas (D1+D2), que representan aproximadamente el 92 % de la mezcla, mientras que W1 contribuye solo 8 %. En el periodo húmedo, la contribución de W1 aumenta hasta aproximadamente el 35 %, aunque la contribución de las condiciones de sequía continúa representando la mayor fracción del agua residente en el acuífero (~65 %). Con estas proporciones de mezcla, se evaluará la atenuación natural de los EA presentes.

Finalmente, los resultados de las constantes de atenuación (k) muestran que las tasas de atenuación son mayores durante la sequía; por ejemplo, la sucralosa mostró k más bajas, con una vida media que se triplicó durante el periodo de recuperación, lo que demuestra un aumento significativo de su pseudo-persistencia ambiental. Por el contrario, el ciclamato fue el edulcorante más fácilmente atenuado, con tasas rápidas e idénticas independientemente de la estación. Estos hallazgos demuestran cómo la variabilidad climática puede influir en el comportamiento y atenuación de los contaminantes orgánicos en el acuífero.

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del proyecto ATTENUATE (PID2022-138556OB-C21). Los autores agradecen el apoyo de la beca de la Fundación «la Caixa» (código de beca LCF/BQ/DI23/11990072) y del contrato Ramón y Cajal financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (RyC2021-034685-I) para el desarrollo de este proyecto.

La contaminación puntual de aguas subterráneas. Pasado, presente y futuro.

Emilio Orejudo Ramírez[1], Roberto Espínola Cazorla[1], Montse Toribio Sánchez[1], Joan Sánchez Anguita[1]

[1]*Agencia Catalana del Agua*

Palabras clave: Contaminación, Actividad industrial, Restauración de acuíferos, Caracterización

Resumen. El objetivo principal de la presentación es identificar los aspectos más relevantes que deben considerarse en la detección y caracterización de episodios de contaminación puntual de las aguas subterráneas. Para ello, es necesario abordar la problemática desde una perspectiva integral, incorporando tanto el foco de contaminación como los receptores o usuarios del agua subterránea.

Recientemente, en España se ha publicado el Real Decreto 665/2023, de 18 de julio, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico. Esta normativa incorpora como novedad la consideración de la contaminación de las aguas subterráneas por fuentes puntuales. Asimismo, establece los valores genéricos de calidad de las aguas subterráneas para determinadas sustancias químicas, lo que permite evaluar la afección derivada de este tipo de contaminación con mayor seguridad técnica.

Con el objetivo de contextualizar esta problemática, se realizará una revisión histórica de la experiencia en Cataluña, prestando especial atención al tipo de contaminantes, las actividades industriales involucradas, su distribución territorial y unidades hidrogeológicas afectadas, así como los instrumentos de control de las actividades.

A continuación, se abordarán los aspectos críticos relacionados con la caracterización y diagnóstico ambiental. Entre ellos cabe destacar los siguientes:

- Relación entre suelos y aguas subterráneas.
- Retos asociados a la caracterización geológica e hidrogeológica de la contaminación puntual.
- Principales contaminantes esperables en las aguas subterráneas.
- Actividades históricas y pasivos ambientales.

- Cómo abordar la investigación de contaminantes emergentes, como los PFAS.

Finalmente, se plantearán algunas reflexiones y propuestas de actuación orientadas a abordar la descontaminación de las aguas subterráneas de manera más eficiente y económicamente viable.

En resumen, el tratamiento eficaz de la contaminación puntual de las aguas subterráneas requiere la elaboración de un modelo conceptual robusto que permita identificar, con la mayor precisión posible, el foco de contaminación, los mecanismos de transporte y los receptores afectados.

La contaminación química de acuíferos rurales y estrategias de tratamiento de aguas subterráneas para la obtención de recursos hídricos alternativos

Santiago Gómez-Herrera[1], Mariuxi de los Ángeles Ramos Araujo[2], Iker Álvarez-Mora[3], Paula Carrera Fernández[2], Victoria Osorio Torrens[1]

[1]Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC, ONHEALTH
[2]Centre Tecnològic BETA. Universitat de Vic. Tecnologías Ambientales
[3]Research Centre for Experimental Marine Biology and Biotechnology (PIE), University of the Basque Country (UPV/EHU)

Palabras clave: Micro-contaminantes orgánicos, Nitratos, Acuíferos rurales, Tecnologías de tratamiento de aguas

Resumen. El proyecto colaborativo DesNitraqua tiene como objetivo obtener recursos hídricos seguros para consumo humano, riego y usos industriales mediante tecnologías avanzadas de tratamiento, contribuyendo a maximizar los recursos hídricos disponibles en zonas afectadas por contaminación difusa. En la comarca de Osona (Cataluña, noreste de España), las aguas subterráneas presentan concentraciones de nitratos que superan los límites establecidos por la OMS para agua potable debido principalmente a actividades agrícolas y ganaderas intensivas.

En este contexto, el CT BETA evalúa la viabilidad de la electrodiálisis para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas, mientras que el IDAEA-CSIC investiga la presencia de mezclas de micro-contaminantes orgánicos mediante enfoques analíticos dirigidos y no dirigidos, con el objetivo de caracterizar la contaminación química por sustancias mayoritariamente no reguladas presentes en el sistema acuífero de Osona. Este estudio colaborativo tiene como última finalidad contribuir a la mejora de la monitorización, gestión y reutilización segura de los recursos hídricos subterráneos en zonas rurales afectadas por contaminación difusa.

Las aguas subterráneas de la comarca de Osona presentan un perfil claramente marcado por la actividad agrícola y ganadera. De las 16 fuentes analizadas en este proyecto, 10 presentaron niveles por encima del límite establecido para el agua

potable (50 mg NO_3^-/L, Real Decreto 3/2023). IDAEA-CSIC realizó un análisis dirigido de 120 compuestos sospechosos, incluyendo pesticidas, productos farmacéuticos y compuestos de uso industrial típicamente asociados a actividades antropogénicas. Las muestras de agua subterránea procedentes de 16 fuentes de la comarca fueron analizadas mediante extracción y enriquecimiento de micro-contaminantes, separación por cromatografía líquida de ultra alta resolución y detección mediante espectrometría de masas de alta resolución. El análisis cuantitativo permitió detectar un total de 103 micro-contaminantes, con concentraciones totales superiores a 1000 ng/L en todas las fuentes y máximos de hasta 4000 ng/L. En cuanto a los índices de contaminación de las 16 fuentes muestreadas, el análisis cuantitativo evidenció dos fuentes altamente contaminadas con niveles totales de micro-contaminantes de 2711 y 3955 ng/L con respecto al total de fuentes restantes que alcanzaron un máximo de 1761 ng/L. Entre los compuestos detectados en mayores concentraciones destacaron los edulcorantes ciclamato (3,31 - 198 ng/L) y sucralosa (2,61 - 177 ng/L), los herbicidas e insecticidas diurón (0,38 - 226 ng/L), imidacloprid (17,6 - 194 ng/L). Las concentraciones de la mayoría de compuestos se determinar en un orden de magnitud inferior con respecto a las reportadas para los mismos en estudios previos en aguas subterráneas urbanas de la ciudad de Barcelona. Actualmente, se está trabajando en la clasificación de las fuentes según los niveles de contaminación detectados y su riesgo potencial asociado, así como en el análisis no dirigido de compuestos desconocidos y sospechosos para completar la caracterización del estado químico de las aguas subterráneas estudiadas.

Para la evaluación de la tecnología de electrodiálisis, el CT BETA seleccionó tres fuentes representativas a niveles bajo, intermedio y alto con respecto a los intervalos determinados. Esta selección permite analizar el rendimiento del sistema de electrodiálisis en aguas con diferentes perfiles de contaminación. Actualmente se están realizando los análisis de nitratos y micro-contaminantes en las diversas pruebas de la tecnología de electrodiálisis realizadas para evaluar su eficacia en la reducción de niveles de contaminación.

Agradecimientos: Actividad de Demostración de Transferencia del Conocimiento (ACC_2023_EXP_SIA002__24_0000016). Actuación del Pla estratègic de la PAC 2023-2027 cofinanciada por la Unión Europea, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y la Generalitat de Catalunya. SGH agradece el apoyo de AEI (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) y VO el contrato Ramón y Cajal (RyC2021-034685-I) financiados por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España.

La EUropean Groundwater Monitoring database (EUGM) como base para la contribución ibérica a iniciativas europeas financiadas

Georgina Arnó[1], László Sórés[2], Mariana Gomez[3], Montse Colomer[1], Tjerk Heijboer[4], Bentje Brauns[5], Héctor Aguilera Alonso[6], Stefan Broda[3], Peter van der Keur[4]

[1]*Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)*
[2]*Szabályozott Tevékenységek Felügyelet Hatósága (SZTFH)*
[3]*Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, abbreviated (BGR)*
[4]*De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)*
[5]*Natural EnvironmentResearch Council - British Geological Survey (UKRI-BGS)*
[6]*Instituto Geológico y Minero de España (CSIC-IGME)*

Palabras clave: series temporales, nivel piezométrico, ontología híbrida, modelo de datos

Resumen. Con contribuciones de instituciones ibéricas como el IGME-CSIC y el ICGC, la European Groundwater Monitoring database (EUGM), desarrollada en el marco del proyecto Horizon Europe GSEU 2023-2027 (Geological Service for Europe), representa un avance clave en la harmonización de datos de niveles piezométricos (GWL) e hidroquímicos a escala paneuropea, supera la fragmentación tradicional de redes de monitoreo, formatos y controles de calidad variables entre países.

La EUGM compila 29.198 series temporales de GWL procesadas de 23 países, sirviendo como base para el desarrollo de todo tipo de actividades y estudios relacionadas con el cambio climático, la ocurrencia de sequías, la evaluación de tendencias, los modelos predictivos y las estrategias europeas de gestión hídrica.

Por otra parte, la EUGM incluye también tablas de valores agregados de más de 40 parámetros químicos procedentes de unos 120.000 puntos de control alrededor de Europa.

La base de datos se sustenta en una arquitectura desarrollada especialmente para recopilar también datos en tiempo casi real (Near Real Time) de los puntos de control del nivel piezométrico equipados con telemetría alrededor de Europa que

una vez operativos dentro de la base permitirán el desarrollo de modelos predictivos a corto y medio plazo.

La creación del modelo de datos de la EUGM ha seguido flujos estandarizados alineados con los principios FAIR y diversas directrices de la OGC (Open Geospatial Consortium) asegurando su accesibilidad e interoperabilidad. A diferencia de otros repositorios globales como GGIS/GGMN o GROW con coberturas incompletas y metadatos locales faltantes la EUGM ofrece series temporales paneuropeas de alta resolución procesadas consistentemente por los diferentes servicios geológicos nacionales.

Para la recopilación harmonizada de series GWL disponibles en los diferentes estados contribuidores del proyecto se establecieron unos requerimientos mínimos incluyendo una longitud mínima de registro de 5 años, una resolución temporal de registros diarios, semanales o mensuales (se excluyeron datos anuales), y el reporte explícito de huecos y anomalías como errores de medición o cambios de calibración. Las longitudes de los registros varían de 5 a 188,5 años, con una media de 34,5 años y una mediana de 33 años. Aproximadamente el 40% de las series temporales abarcan entre 40 y 100 años. Se identificaron también aquellos puntos que disponen de la infraestructura necesaria para proveer la posición del nivel piezométrico en tiempo casi real, obteniendo un conjunto de unos 2000 puntos en diferentes países contribuidores.

El desarrollo de la EUGM y su modelo de datos ha sido realizado paralelamente al desarrollo de un vocabulario controlado y su ontología híbrida que estandariza términos hidrogeológicos y su significado semántico. La contribución ibérica a este proyecto y a la EUGM favorece el análisis de acuíferos compartidos, apoyando la Directiva Marco del Agua a través de la visualización de los resultados en la plataforma European Geological Data Infrastructure (EGDI).

Agradecimientos: Los autores de esta presentación son sólo una representación del gran equipo de trabajo que ha hecho posible la creación de la European Groundwater Monitoring database (EUGM) y actuan de parte de todos los socios contribuyentes de los grupos de trabajo "Groundwater Resources" y "European Geological Data Infrastructure (EGDI)".

La hidrogeología en el diseño del humedal regulable de San Cristobal de La Laguna (Tenerife)

Elena Abarca[1], Elena Fraile[1], Salvador Jordana[1]

[1]*Amphos 21 Consulting*

Palabras clave: Soluciones Basadas en la Naturaleza, humedal regulable, modelización numérica, interacción agua subterránea-agua superficial

Resumen. Las Soluciones Basadas en la Naturaleza están ganando protagonismo como herramientas eficaces para afrontar retos actuales de la gestión del agua, como la mitigación de inundaciones, la recarga de acuíferos, la mejora de la calidad del agua y la restauración de ecosistemas. En este contexto, la hidrogeología juega un papel clave, ya que permite comprender y cuantificar las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas, evaluar la viabilidad de las soluciones propuestas y optimizar su diseño para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

El humedal regulable de San Cristóbal de La Laguna se plantea como un parque inundable ubicado en la depresión natural de la Vega de La Laguna, en la zona donde en el siglo XV se localizaba una laguna natural que funcionaba como área terminal de la cuenca endorreica. El diseño combina elementos naturales y de ingeniería, incorporando láminas de agua temporales, zonas de infiltración y un sistema de drenaje controlado, que permite gestionar los episodios de llenado y vaciado de forma segura. Este humedal no solo actúa como un sistema de laminación de avenidas, reduciendo el riesgo de inundación en el entorno urbano, sino que también favorece la recarga del acuífero somero y la mejora de las condiciones ecológicas del área. Su funcionamiento se basa en un equilibrio entre la retención temporal del agua, la infiltración hacia el subsuelo y la evacuación controlada mediante drenes, asegurando la compatibilidad con las infraestructuras y edificaciones existentes en las zonas colindantes.

En este caso, el estudio hidrogeológico se centró en evaluar en qué medida el humedal podía cumplir sus funciones hidráulicas y ambientales sin inducir impactos no deseados en el entorno urbano, como la inundación de sótanos en edificaciones próximas por elevación del nivel freático. Para ello, se desarrolló un modelo numérico de flujo subterráneo con COMSOL Multiphysics, en régimen transitorio y bajo condiciones de saturación variable. El modelo incorporó escenarios de llenado rápido de la laguna tras una avenida y su posterior vaciado

por infiltración al acuífero, así como escenarios de drenaje tras periodos de recarga intensa, representativos de niveles freáticos altos. Las condiciones de contorno del modelo se acoplaron dinámicamente al vaciado o llenado de la laguna.

La modelización permitió estimar la dinámica de infiltración, la evolución de los niveles piezométricos y el caudal que debería ser evacuado por el sistema de drenaje. Estos resultados fueron fundamentales para definir umbrales de funcionamiento y criterios de diseño, minimizando riesgos como el ascenso del nivel freático en las proximidades de edificios e infraestructuras. En conjunto, este caso pone de manifiesto que la integración de la hidrogeología en el diseño de humedales regulables no solo mejora la fiabilidad técnica de la solución, sino que también permite incorporar los procesos subterráneos en una estrategia más amplia de adaptación, resiliencia urbana y gestión sostenible del agua.

La huella isotópica de situaciones meteorológicas extremas en España: una invitación a la colaboración para el estudio del clima y la hidrología con isótopos ambientales

Silvino Castaño Castaño[1], Javier Rodríguez Arévalo[1], Miriam Martín Ruiz[1], Ramón Martínez Navarro[2]

[1]*Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*
[2]*Confederación Hidrográfica del Júcar*

Palabras clave: isótopos ambientales, precipitaciones extremas, origen de la escorrentía

Resumen. La composición isotópica de la precipitación proporciona información valiosa sobre el origen del vapor de agua que la genera, así como sobre los procesos de mezcla y condensación que experimenta este vapor desde su formación hasta su precipitación en forma de lluvia, nieve o granizo. Además, refleja las situaciones meteorológicas asociadas que producen los diferentes tipos de precipitación ya sea frontal, convectiva u orográfica.

La huella isotópica de la precipitación queda marcada en las escorrentías, directa, subsuperficial o subterránea. En cuencas hidrográficas y acuíferos de respuesta rápida a la precipitación, esta huella coincide con la de los eventos más recientes o intensos. En otros casos, se ve modificada por la del agua almacenada previamente con mayor tiempo de residencia en el suelo y los acuíferos. Estas diferencias permiten comprender mejor la distribución de la precipitación en el espacio y el tiempo, así como la generación de flujo superficial o recarga subterránea, según las condiciones meteorológicas, incluidas las precipitaciones excepcionales.

Para detectar y comprender las variaciones espaciales y temporales de la huella isotópica en los ciclos hidrológicos regionales, resulta esencial disponer de valores de referencia adecuados obtenidos durante períodos de tiempo prolongados. Desde el año 2000, el Centro de Estudios y Experimentación en Obras Públicas (CEDEX) gestiona la Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación (REVIP) en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Esta red proporciona registros mensuales de la composición isotópica de la precipitación

en estaciones representativas del clima y la hidrología en España. En Madrid, además, se dispone de datos isotópicos de eventos de precipitación desde el año 2000, y con registro más frecuente desde 2012. El CEDEX dispone también de información isotópica de aguas superficiales y subterráneas procedentes tanto de proyectos propios como de estudios realizados durante varias décadas por encargo de la Dirección General del Agua y diversas Confederaciones Hidrográficas.

En este trabajo se presentan ejemplos de la singularidad de las huellas isotópicas de eventos extremos de precipitación (DANAs, borrascas de gran impacto, ciclones tropicales) en Madrid, Tenerife y Valencia. En esta última se analizan los efectos de precipitaciones extraordinarias en aguas superficiales y subterráneas a partir de su señal isotópica, entre los que destaca la identificación de recarga preferente en acuíferos kársticos en clima mediterráneo.

Estas observaciones revelan diferencias notables en las composiciones isotópicas, lo que ha impulsado al CEDEX a promover su interpretación conjunta con expertos en el estudio del clima, la atmósfera e hidrología, a quienes se invita a participar en su interpretación con el objetivo de correlacionar la información isotópica de las situaciones meteorológicas extraordinarias que están afectando a España, cada vez con mayor frecuencia, con las huellas isotópicas encontradas en los distintos compartimentos del ciclo hidrológico. De este modo, se busca confirmar o refutar hipótesis sobre su génesis, y contribuir a la prevención de sus impactos.

Agradecimientos: La mayor parte de los datos utilizados en este trabajo proceden de encargos de la Confederación Hidrográfica del Júcar al CEDEX como medio propio de la Administración General del Estado, y de la colaboración con la AEMET para la gestión de la Red Española de Vigilancia de Isótopos en la Precipitación (REVIP)

La noción de hidrosistema natural, un concepto útil para la hidrogeología

Juan José Durán Valsero[1], Sergio Raúl Durán Laforet[2]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*
[2]*Amphos 21*

Palabras clave: acuíferos, cuenca hidrográfica, divisoria, teoría de sistemas

Resumen. La Teoría General de Sistemas (TGS) fue desarrollada por el biólogo austríaco Ludwig von Bertalanffy durante la primera mitad del siglo XX. Un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados e interdependientes que funcionan como un todo, cuya dinámica va más allá de la suma de las partes. Existen sistemas cerrados y abiertos, en función de los intercambios con el entorno. El geomorfólogo Richard John Chorley, en 1962, definió los ríos como sistemas abiertos, iniciando una nueva vía de análisis de los sistemas naturales relacionados con el agua.

Laurent Touchart, un geógrafo especializado en limnología, estableció, ya en el siglo XXI, una definición de hidrosistema como un sistema compuesto por el agua y por los ambientes acuáticos asociados existentes dentro de una entidad geográfica bien delimitada.

Las acepciones del término se han ido multiplicando, con diferentes enfoques: por ejemplo, el hidrosistema como equivalente a un ecosistema acuático; o el hidrosistema geográfico, en el que los elementos vinculados a la acción antrópica también se encuentran incluidos. Desde el punto de vista más ligado al origen del concepto (la geomorfología fluvial), un hidrosistema se ha ido considerando como un sistema cada vez más amplio y complejo. Inicialmente, con un conjunto de elementos con relaciones longitudinales conectadas aguas arriba y aguas abajo, en el marco de una cuenca hidrográfica; posteriormente, incorporando las relaciones laterales existentes entre los diferentes elementos de la cuenca: cauces de diferentes órdenes, sedimentos detríticos y químicos aluviales, formaciones vegetales, y humedales y cuerpos aislados y efímeros de agua; y, finalmente, incluyendo también las relaciones verticales existentes entre las aguas superficiales y las subterráneas. Es decir, el concepto de hidrosistema se ha ido ampliando, incorporando progresivamente todas las interrelaciones espaciales y funcionales posibles, longitudinales, laterales y verticales, entre los distintos elementos biofísicos presentes en una cuenca hidrográfica.

Sin embargo, la realidad física o geológica de los hidrosistemas naturales va, en muchas ocasiones, más allá de las propias cuencas hidrográficas, sobrepasando sus límites. Por ello, es necesario fijar adecuadamente el concepto de hidrosistema natural. Un hidrosistema natural puede definirse como el espacio físico cuyas aguas, contenidas o soportadas, drenan, superficial o subterráneamente, hacia un punto determinado de la corteza terrestre. Cada hidrosistema tiene un tamaño que depende del punto de origen considerado y de la escala de trabajo, así como de la dimensionalidad del análisis: 2D, 3D o 4D, esta última incorporando también el factor tiempo.

En las investigaciones y estudios hidrogeológicos, el establecimiento del modelo conceptual del hidrosistema y su delimitación espacial, a través de las sucesivas iteraciones entre las divisorias de las cuencas hidrográficas superficiales y las hidrogeológicas de los acuíferos, en especial los kársticos, es fundamental para el adecuado entendimiento del ciclo del agua en su fase terrestre. De esta manera, el conocimiento integral de las relaciones entre las aguas superficiales y las subterráneas ayudará a entender la hidrodinámica regional y a conservar y gestionar mejor los recursos hídricos, los ecosistemas asociados y los espacios naturales protegidos donde el agua es fundamental.

La recarga de acuíferos como tratamiento complementario del efluente de estaciones de regeneración del agua en el Área Metropolitana de Barcelona

Meritxell Minoves Ruiz[1], Marta Ganzer Martí[1], Beatriz De la Loma González[2], Sara Espinosa Martínez[2]

[1]*Aigües de Barcelona*
[2]*Cetaqua, Centro Tecnológico del Agua*

Palabras clave: Recarga gestionada de acuíferos, Agua regenerada, Balsa de infiltración, Sanitation Safety Plan (SSP)

Resumen. La recarga de acuíferos con fuentes de agua alternativas es una herramienta de resiliencia hídrica frente al cambio climático que se ha postulado recientemente como solución clave en el Área Metropolitana de Barcelona.

En la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) del Baix Llobregat, el agua procedente del tratamiento secundario con eliminación de nutrientes se somete a un tratamiento terciario. Este último consiste en un proceso de coagulación-floculación-decantación lastrada seguido de una microfiltración (10 µm) y una desinfección con radiación ultravioleta seguida de una cloración final con hipoclorito sódico.

En abril de 2024 se inició una prueba a escala real consistente en verter agua procedente del tratamiento terciario de la estación de regeneración (ERA) del Baix Llobregat en una balsa de infiltración de 4.000 m^2, sin lecho reactivo, ubicada en el municipio de Sant Vicenç dels Horts. Dicha balsa, con una capacidad total de recarga que alcanza 1 Hm^3/año, se encuentra aguas arriba de los 2 principales campos de pozos utilizados para el abastecimiento de agua potable en el Área Metropolitana de Barcelona.

En paralelo, gracias al impulso del proyecto Horizon MARCLAIMED (MAR: Managed Aquifer Recharged; CLAIMED: Reclaimed Water), se ha evaluado en profundidad el efecto de la recarga por lo que respecta a un amplio espectro de compuestos que van desde los nutrientes clásicos, salinidad, materia orgánica y parámetros microbiológicos hasta microcontaminantes y contaminantes

emergentes, incluyendo plaguicidas y sus metabolitos, productos farmacéuticos, PFAS, compuestos industriales, etc.

Tras dos años de recarga con agua regenerada a través de esta infraestructura, con elementos de monitorización en continuo (CTDs) así como muestreos cada 6 semanas tanto del agua empleada para la recarga como de distintos puntos de observación aguas arriba y abajo de la misma, los resultados demuestran que compuestos de la lista de observación como pueden ser diclofenaco o azitromicina, presentes en el agua de recarga, se ven completamente atenuados cuando el agua regenerada alcanza la zona saturada. Con un comportamiento bien diferente cabe clasificar compuestos industriales recalcitrantes como el 1,4-dioxano y agentes de contraste radiológico como el iomeprol, para los cuales el efecto de dilución con otras fuentes de recarga natural se considera clave. Finalmente, en el caso específico de los compuestos perfluorados (PFAS), lo que se observa es una distribución de especies distinta en el agua regenerada que en el sí del acuífero, apuntando a procesos de transformación de los mismos en el proceso de recarga y tránsito por el acuífero.

De forma complementaria, la determinación de compuestos sospechosos mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas de alta resolución (ORBITRAP) ha permitido concretar la presencia de potenciales productos de transformación en el agua subterránea una vez efectuado el proceso de infiltración.

Aun considerando los distintos comportamientos observados, atribuibles al tipo de molécula y características de cada parámetro, se constata que todos los compuestos analizados se encuentran en el acuífero por debajo de sus correspondientes valores PNECs (Predicted Non-effect Concentration).

Finalmente, todos los resultados obtenidos del monitoreo han sido claves para la elaboración de un Plan de Gestión del Riesgo (Sanitation Safety Plan, SSP) para este uso específico del agua regenerada.

La experiencia aquí reportada de recarga con agua regenerada en el acuífero de la Vall Baixa y Delta del Llobregat permite tener datos suficientes para posicionar esta estrategia como potencial medida estructural y contribuir, de esta forma, a atenuar la vulnerabilidad a la sobreexplotación y a la intrusión salina que padece dicho acuífero. Asimismo, se reafirma que la Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR) constituye un tratamiento natural adicional seguro y efectivo para el agua regenerada y una herramienta crucial para mejorar la seguridad hídrica en la región.

Agradecimientos: El proyecto MARCLAIMED ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizon Europe de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención HORIZON-CL6-2023-climate-01

La relación río-acuífero en la cuenca alta del río Palancia (Castellón - España)

Jose Antonio Domínguez Sánchez[1], Juan Grima Olmedo[1], Marta Domínguez Morales[1], Aránzazu Fidalgo Pelarda[2], Silvia Rosado Piqueras[1], Carlos Baquedano Estévez[1], Nieves Mondéjar Martín[2], Ana Nieto Arias[2], Bruno José Ballesteros Navarro[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC)*
[2]*Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ)*

Palabras clave: relación, río, acuífero, Palancia

Resumen. En la cuenca alta del río Palancia el trayecto comprendido entre las localidades de Teresa y Jérica (Castellón) tiene un claro carácter perdedor, hecho que es conocido desde hace décadas. Con objeto de caracterizar con precisión la relación río-acuífero en este tramo, se ha aplicado la metodología propuesta por Ballesteros et al. (2017) basada en el análisis de los diversos factores geológicos e hidrológicos que la condicionan. Esta metodología, además del clásico criterio del sentido de la relación ganador-perdedor, determina la existencia o no de continuidad hidráulica entre la lámina de agua del cauce y el nivel piezométrico en el acuífero, la configuración espacial de la relación, su temporalidad y el volumen de intercambio de recursos. Con esta finalidad se han utilizado los resultados de campañas mensuales de aforo en 18 secciones del cauce, realizadas entre junio de 2023 y noviembre de 2025.

El primer criterio, que define el sentido de la relación, indica que el trayecto de río analizado se comporta como perdedor (tipo P). El segundo que hay discontinuidad hidráulica (tipo D) entre el río y el acuífero, ya que la cota de la lámina de agua del primero es sensiblemente superior a la del nivel piezométrico, quedando entre ambas una zona no saturada o parcialmente saturada. En cuanto al tercer criterio, que establece la forma de intercambio según la litología del acuífero y la localización de los dispositivos de intercambio, es de tipo múltiple (M). Esta tiene lugar a través de formaciones karstificadas, afectadas por una intensa fisuración y fracturación tectónica, con transferencias puntuales muy significativas. Algunos de estos puntos se concentran en ciertos sectores, por lo que puede considerarse que el intercambio de recursos hídricos se verifica también de modo difuso. Así, se dan tipologías de la relación denominadas efecto ducha , efecto fractura y/o efecto sumidero .

Para el cuarto criterio, que define la relación río-acuífero según el volumen implicado, se ha constatado la presencia de tramos en los que las pérdidas de caudal del río son muy significativas, con ratios de infiltración muy elevadas, de hasta 0,95 L/s/m, como el comprendido entre las secciones de aforo de la EDAR de Teresa y el azud del Grillo, o entre el paraje de El Sargal y la Hoz de Jérica. Los cálculos realizados indican que para un año medio el volumen transferido está entre los 20 y 25 hm^3/año, valor que, según la metodología aplicada, corresponde a un orden 5.

El último criterio, que define la temporalidad de la relación, se fundamenta en que el río queda parcialmente seco durante varios meses al año en algunos tramos, tanto en épocas secas como húmedas, por lo que la existencia de intercambio hídrico en estos sectores no es permanente, sino ocasional (tipo O).

En conclusión, la metodología elegida para la caracterización de la relación río-acuífero en la cuenca alta del río Palancia ha permitido caracterizarla con el código PDM-5O, ofreciendo una información mucho más precisa que las utilizadas habitualmente, al incluir no sólo el criterio del sentido de la relación, sino además otros de carácter cualitativo, cuantitativo y temporal.

Las aguas subterráneas del sur de Chile: oportunidades y desafíos en un laboratorio natural

Marcelo Aliaga Alvarado[1], Pablo Sanchez-Alfaro[2]

[1]*Dirección General de Aguas, Universidad Austral de Chile*
[2]*Universidad Austral de Chile*

Palabras clave: Chile, Monitoreo, Interaccion Superficial-Subterránea, Hierro

Resumen. En el Sur de Chile, el sistema acuífero Valdivia–Río Bueno (SAVR) se extiende bajo un clima del tipo templado lluvioso, con una alta pluviosidad que alcanza una media de 1,900 mm/año. Está conformado principalmente por depósitos glacio-fluviales y fluvio-estuarinos, limitados al oeste por un complejo metamórfico regional y al este por secuencias volcánicas e intrusivos de los Andes del Sur. Si bien la región se caracteriza por una abundante hidrografía y vegetación, los registros pluviométricos (1853-2025) muestran una preocupante tendencia de disminución, en torno a un 30%. En este contexto, el uso de aguas subterránea ha experimentado un fuerte crecimiento, prueba de ello es que los Derechos de Aprovechamiento Subterráneo se han duplicado en la última década, alcanzando un total de 3,415 registros a 2025.

El objetivo de esta investigación es aportar a la comprensión de los procesos hidrogeológicos que controlan la disponibilidad y calidad del agua en el SAVR, un sistema relativamente poco estudiado y que destaca por una singular y compleja interacción entre el clima, los recursos hídricos superficiales, y procesos geológicos en un ambiente de arco volcánico activo. Para ello, se integró información bibliográfica, con los datos obtenidos de la perforación e instrumentación de 19 nuevos pozos de monitoreo, complementada con campañas de muestreo hidroquímico y prospecciones geofisicas mediante TEM y ERT.,

El análisis de series de tiempo registrados en los niveles de aguas subterráneas indicó profundidades relativamente someras (entre 0.59 a 33.1 m b.n.t.) y una dirección del flujo regional preferente hacia el oeste. En general, todos los piezómetros mostraron una respuesta inmediata frente a eventos de precipitación, pero con diferencias significativas de amplitud en las fluctuaciones de nivel (que varía entre -0.7 a 1.20 m). Esto confirma la estrecha conexión

superficial-subterránea, pero también destaca la heterogeneidad de las unidades hidrogeológica que se asocia a fuertes contrastes en la resistividad eléctrica obtenida de los perfiles geofísicos.

La sistematización de información hidroquímica en pozos identificó concentraciones elevadas de hierro a nivel regional, con una media de 1.39 mg/l, máximos de 39.3 mg/l (n=250). Se destaca una alta variabilidad espacial, incluso en pozos cercanos, además de variaciones estacionales, con mayores concentraciones en meses estivales. El análisis sugiere que la recarga de aguas meteóricas oxigenadas influye en las condiciones redox y por tanto en la solubilidad y precipitación del hierro.

Hacia el este, una serie de afloramientos hidrotermales asociados al Sistema de Falla Liquiñe–Ofqui evidencian un ambiente volcánico activo. En el río Nilahue, las concentraciones medias de cloruros aumentaron de 6.2 a 25.8 mg/l tras la erupción del complejo Puyehue–Cordón Caulle en 2011, lo que se asocia a cambios en la dinámica de los flujos subterráneos. Esta tendencia, sumada a un caudal específico particularmente alto en los meses estivales (0.05 a 0.08 m^3/s por km^2), entrega antecedentes de la compleja interacción entre procesos superficiales y subterráneos en ambientes volcánicos.

Agradecimientos: Los autores agradecen el financiamiento otorgado a través del programa Piloto Becas de Postgrado para Inserción de Talentos, financiado por el Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (FIC-R) del Gobierno Regional de Los Ríos.

Lisímetros de succión pasiva de bajo coste para la estimación de la recarga en el acuífero de Doñana. Análisis de datos obtenidos.

Fernando Ruiz Bermudo[1], Claus Kohfahl[1], José Manuel Gómez Fontalva[1], José Antonio Serrano Reina[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*

Palabras clave: recarga, Doñana, lisímetro

Resumen. Las formaciones costeras compuestas por mantos eólicos y cordones litorales están integradas, en su mayoría, por materiales detríticos arenosos. En conjunto, constituyen acuíferos que desempeñan funciones esenciales: desde sostener ecosistemas dependientes de aguas subterráneas hasta actuar como defensa natural frente a la intrusión salina. Estos sistemas se encuentran frecuentemente sometidos a una elevada presión, principalmente en relación a sus recursos hídricos, provocada por actividades humanas como la agricultura, el turismo o el abastecimiento urbano, a lo que se suman los impactos derivados del cambio climático. Por ello, una gestión responsable y sostenible de estos acuíferos resulta imprescindible. Para lograrlo, es fundamental conocer con precisión las aportaciones naturales de agua que reciben, proceso conocido como recarga. Existen multitud de metodologías para el cálculo o estimación de la recarga, siendo el uso de lisímetros uno de los pocos procedimientos por los que se obtiene una medida directa de la misma. En el Parque Nacional de Doñana, el IGME-CSIC cuenta con 4 lisímetros de precisión (dos de 1 m^2 de superficie y 1,5 m de profundidad y dos de 0,2 m^2 de superficie y 0,9 m de profundidad). Además, se complementan con sensores de humedad del suelo, instalados desde la superficie hasta 3 m de profundidad, y con una estación meteorológica completa. Todo este equipamiento se encuentra incorporado en la Infraestructura Científica y Tecnológica Singular ICTS-RBD, gestionada por la EBD-CSIC en la Reserva Biológica de Doñana. En lo que a la recarga se refiere, los resultados muestran valores muy similares si se comparan los datos de los lisímetros de mayor y menor tamaño. Sin embargo, el coste de instalación e instrumentación de estos equipos hace inviable hacer extensiva su implementación a la totalidad de superficie del acuífero. Para intentar solventar este inconveniente, en diciembre de 2025, se han instalado, en el mismo emplazamiento, dos lisímetros de succión pasiva de bajo coste. Estos equipos son de construcción propia y con materiales

convencionales (principalmente suministros de fontanería). Consisten en un tubo de PVC de 250 mm de diámetro y 70 cm de largo (donde se alberga una muestra de suelo inalterado), una base drenante (gravilla calibrada entre 1-2 mm e hilos de fibra de vidrio) y un tubo de PVC de 100 mm de diámetro y 100 cm de largo (que hace de depósito de agua drenada). Este depósito está conectado a la superficie con otro tubo de PVC que funciona como registro donde se aloja un sensor de nivel que monitoriza la evolución del agua infiltrada y además se utiliza para drenar el agua almacenada con una bomba de pequeño diámetro. De aportar datos fiables, resultaría un equipamiento muy práctico para estudiar diferentes emplazamientos y hacerlo extensivo al resto del acuífero, siempre que las condiciones del terreno lo permitan. En esta contribución se presentará una descripción de la instrumentación de bajo coste instalada, así como los resultados preliminares (desde enero de 2026) en comparación con los datos proporcionados con los lisímetros de alta resolución existentes.

Más allá de la línea de costa: Como los datos obtenidos en el mar nos informan del comportamiento de los acuíferos costeros en tierra.

Albert Folch[1], Jose Tur[2], Bella Almillategui[1], Jiangyue Gin[2], Marc Diego[2], Valentí Rodellas[4], Manuel Espino[4], Manel Grifoll[4], Daniel Fernàndez-Garcia[1], Juanjo Ledo[5], Jesús Carrera[6]

[1]*Department d'Enginyeria Civil i Ambiental (DECA), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain*
[2]*Unitat Associada: Hydrogeology Group (UPC-CSIC), Spain*
[3]*Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona*
[4]*Departament de Física i and Institut de Ciència i Tecnologia Ambiental, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra*
[5]*Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid*
[6]*Institut de Diagnòstic Ambiental i Estudis de l'Aigua (IDAEA), CSIC*

Palabras clave: Hidrogeología costera, Intrusión marina, Descarga submarina de agua subterránea, Geofísica

Resumen. Tradicionalmente, el estudio y la modelización de los acuíferos costeros se ha centrado casi exclusivamente en su parte terrestre, partiendo de la idea de que los procesos marinos que influyen en estos sistemas quedan suficientemente representados abarcando lo que ocurre hasta la línea de costa. Sin embargo, en la zona marina del acuífero tienen lugar procesos como mareas, temporales o la descarga submarina de agua subterránea, que pueden generar variaciones presión y salinidad afectando la parte sumergida del acuífero. Dado que estos procesos actúan a escalas temporales más cortas que las que suelen dominar el flujo subterráneo en tierra —principalmente controlado por variaciones estacionales—, limitar las observaciones al dominio terrestre puede llevar a una representación incompleta de la dinámica real de los acuíferos costeros.

En este trabajo mostramos cómo datos obtenido en el mar, como medidas de salinidad, calidad del agua costera o medidas geofísicas marinas, pueden mejorar la comprensión del comportamiento del acuífero costero en tierra. Asimismo, demostramos que el acoplamiento de modelos numéricos hidrogeológicos y oceanográficos nos ayuda a entender y cuantificar mejor los procesos que tienen lugar en la parte terrestre del acuífero tales como la intrusión marina. Está perspectiva tierra-mar de los acuíferos costeros es especialmente relevante para mejorar la comprensión de estos sistemas complejos y gestionarlos adecuadamente, en particular en lo referente a intrusión marina y descarga de agua subterránea al mar.

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada por el proyecto MUCHOGUSTO (PID2022-140862OB-C21 y PID2022-140862OB-C22, financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, Una manera de hacer Europa), y por SecuCoast, financiado por la Comisión Europea y la Agencia Estatal de Investigación (AEI) en el marco de la convocatoria conjunta de 2023 de la Asociación Europea 101060874 — Water4All

Más allá del número de puntos: integración de datos auxiliares y análisis de incertidumbre para mapear el nivel piezométrico en Cataluña

Sandra Armengol[1], Víctor Camps[1], Georgina Arnó[1], Ignasi Herms[1], Xavier Sánchez-Vila[2], Montse Colomer[1]

[1]*Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)*
[2]*Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*

Palabras clave: Cokriging, Nivel piezométrico, Análisis de la incertidumbre, Acuiferos de Cataluña

Resumen. Tradicionalmente, los estudios hidrológicos destacan la escasez de datos como principal limitación. Sin embargo, el análisis realizado por el ICGC muestra que, incluso con más de 23 000 observaciones, la estimación de la profundidad del nivel piezométrico en Cataluña sigue siendo compleja debido a su elevada variabilidad geográfica, donde coexisten en distancias cortas zonas de montaña, planicies y áreas costeras. Esto evidencia que no basta con incrementar el volumen de datos, sino que es necesario incorporar información auxiliar y aplicar métodos geoestadísticos avanzados para mejorar la precisión de las estimaciones.

Para abordar esta complejidad se aplicó un método de estimación geoestadística multivariable o cokriging, utilizando como variable principal la cota piezométrica. Se realizó previamente un filtrado de las observaciones para garantizar la consistencia del conjunto de datos, eliminando aquellas que correspondían claramente a niveles dinámicos. Asimismo, se incorporaron como variables auxiliares la cota topográfica derivada del Modelo Digital de Elevaciones del ICGC y datos estimados de cota piezométrica asociados a cuerpos de agua superficial permanentes, como ríos, humedales, embalses y la línea de costa. La selección del modelo óptimo se llevó a cabo mediante validación cruzada, evaluando los estadísticos EM, RMSE y RMSSE.

El resultado obtenido es un mapa continuo de profundidad piezométrica que cubre aproximadamente el 60 % del territorio de Cataluña, correspondiente a las zonas con densidad de datos estadísticamente representativa. Este mapa se acompaña de una capa de incertidumbre que cuantifica la desviación estándar de las estimaciones. Al considerar todos los datos como una única población

estadística, la incertidumbre está controlada principalmente por la topografía regional y la distribución espacial de las observaciones, mostrando un gradiente general en dirección SE–NO. Los valores de incertidumbre son bajos en las zonas costeras y depresiones litorales, mientras que aumentan progresivamente hacia las áreas pirenaicas.

No obstante, esta incertidumbre también está condicionada por la variabilidad temporal de las observaciones, ya que proceden de distintas campañas de medición, así como por la propagación de error asociada al uso de resoluciones espaciales diferentes entre la piezometría y el Modelo Digital del Terreno (MDT), lo que influye en el cálculo de la profundidad del nivel freático.

Este primer mapa de clases de profundidad piezométrica de Cataluña y su análisis de incertidumbre constituyen herramientas útiles para la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en contextos de sequía, la protección de ecosistemas dependientes de aguas subterráneas y la planificación agrícola y urbana. Además, sirven como base para la modelización de acuíferos, la evaluación de riesgos geotécnicos y el análisis de vulnerabilidades ambientales y sociales. En conjunto, el trabajo demuestra que en sistemas hidrogeológicos heterogéneos la densidad de observaciones, aunque esencial, no es suficiente por sí sola para obtener estimaciones robustas. Es necesario complementar los datos con metodologías geoestadísticas adecuadas, análisis explícitos de incertidumbre e integración de información auxiliar, lo que mejora significativamente la fiabilidad de las estimaciones espaciales y refuerza la planificación territorial frente al cambio climático.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Agencia Catalana del Agua (ACA) la cesión de parte de los datos utilizados en este trabajo.

Mejora de la Eficiencia Operacional de la Recarga Gestionada de Acuíferos mediante Herramientas Basadas en IA: Proyecto MARCLAIMED

David Rosado Rodríguez[2], Laurent Joseph Emile Pouget[2], Brigitta Larisa Bursuc[2], Lupicinio Garcia Ortiz[1], Sara Espinosa Martínez[1], Francesco Giancarlo Offeddu[2], Beatriz de la Loma González[2]

[1]*cetaqua Andalucía*
[2]*cetaqua Barcelona*

Palabras clave: Recarga Gestionada de Acuíferos, Agua Regenerada, Gestión de Riesgos, Sensores Virtuales

Resumen. La Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR) constituye una estrategia fundamental para la gestión sostenible de recursos hídricos, especialmente en contextos de creciente estrés hídrico derivado del cambio climático y la presión demográfica. La reutilización de recursos hídricos alternativos, como el agua regenerada, en sistemas MAR representa una solución prometedora para incrementar la disponibilidad de agua subterránea. Sin embargo, estos sistemas presentan retos operacionales críticos que limitan su eficiencia y sostenibilidad: i) el monitoreo continuo y en tiempo real de la calidad del agua requiere inversiones significativas en instrumentación costosa; ii) la predicción de la disponibilidad de recursos hídricos resulta compleja; y iii) la gestión integral de riesgos sanitarios, ambientales y operacionales requiere de marcos metodológicos robustos y adaptativos. La transformación digital y la aplicación de tecnologías de Inteligencia Artificial (IA) permiten una gestión más eficiente, predictiva y resiliente de los sistemas MAR. En este contexto, el proyecto MARCLAIMED desarrolla un Sistema Integrado de Apoyo a la toma de Decisiones (MARCLAIMED IDST) que combina tres herramientas digitales, MARVIS y PREDMAR (ambas basadas en IA) y MARAISER (que utiliza, entre otros elementos, los resultados de las dos anteriores.), para abordar estos desafíos de manera sistemática y holística.

MARVIS proporciona sensores virtuales rentables para el monitoreo continuo de nitratos, reemplazando sensores tradicionales costosos. Esta herramienta representa un avance significativo en el monitoreo avanzado de la calidad del agua, permitiendo la correlación de parámetros fácilmente medibles (conductividad eléctrica, temperatura, pH, oxígeno disuelto, materia orgánica y

turbidez) con concentraciones de nitratos utilizando modelos avanzados de aprendizaje automático. Se obtienen resultados sMAPE por debajo del 10% en la predicción de concentraciones de nitratos sobre datos no vistos por el modelo (conjunto de prueba independiente), abarcando diferentes condiciones operativas y escenarios de calidad del agua. PREDMAR mejora la toma de decisiones operativas y estratégicas mediante capacidades predictivas integradas en múltiples horizontes temporales. A corto plazo, genera predicciones de caudales en puntos de aforo, así como el estado de sequía del sistema a escala mensual con un sMAPE por debajo del 15% en ambos casos. A muy largo plazo, se apoya en escenarios climáticos (CMIP6 RCP-SSP) para proyectar el estado futuro del sistema, proporcionando a los planificadores una herramienta de gran valor para la toma de decisiones estratégicas. MARAISER fortalece la resiliencia operacional mediante evaluación integral de riesgos combinando marcos de la OMS, EPA y CEDEX, proporcionando un sistema de alerta temprana basado en indicadores para la mitigación de riesgos sanitarios, ambientales y operacionales en sistemas MAR con agua regenerada.

La validación de la IDST se ha realizado en 3 casos de estudio: Llobregat (España), Comporta (Portugal) y Texel (Países Bajos), demostrando adaptabilidad a diversos contextos hidrogeológicos, marcos regulatorios y tipos de infraestructura MAR. Los resultados indican mejoras significativas en la eficiencia operacional mediante reducción de costes de monitoreo, capacidades mejoradas de toma de decisiones, programas de mantenimiento optimizados y garantía de cumplimiento normativo. Este enfoque integrado representa un cambio de paradigma hacia la gestión adaptativa de MAR basada en datos.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo financiero del Programa de investigación e innovación Horizonte Europa de la Unión Europea, en virtud del acuerdo de subvención n.º 101136799: proyecto MARCLAIMED.

Metamodelos híbridos de Bosques Aleatorios y Procesos Gaussianos aplicados a la simulación del transporte reactivo en interacciones entre bentonita y productos de corrosión

Brais Sobral[1], Javier Samper[1], Alba Mon[1], Luis Montenegro[1]

[1]*Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos. Centro Interdisciplinar de Química e Bioloxía (CICA). Universidade da Coruña. Campus de Elviña, A Coruña, 15071, Spain*

Palabras clave: Metamodelos híbridos, Aprendizaje automático, Transporte reactivo

Resumen. Los modelos de transporte reactivo de alta fidelidad se utilizan para evaluar el comportamiento a largo plazo de barreras de ingeniería en un almacenamientos geológicos profundos (AGP) de residuos radiactivos de alta actividad. El elevado coste computacional de estas simulaciones limita la realización de análisis de sensibilidad detallados. En este trabajo se presentan metamodelos diseñados como sustitutos (surrogates) eficientes de los módulos de especiación química de los modelos de transporte reactivo y se presenta su aplicación a las interacciones entre arcillas y los productos de corrosión de los contenedores de acero de un AGP. Se ha desarrollado un metamodelo híbrido para un sistema geoquímico cuyas variables de entrada son las concentraciones totales de hierro, hidrógeno y oxígeno. Se generaron 500 000 muestras utilizando una secuencia de hipercubo latino (LHC) y se realizaron cálculos con el código de transporte reactivo CORE2Dv5. Los metamodelos se desarrollaron para estimar la evolución de la concentración total de especies disueltas y precipitadas, magnetita, goethita, pH y Eh. El metamodelo híbrido se compone de Bosques Aleatorios (Random Forests) para la identificación de grupos geoquímicos y Procesos Gaussianos para la predicción de las variables de salida (concentraciones). Se definieron un total de 7 grupos basados en la presencia de minerales y en los rangos de pH/Eh. Los resultados indican que los metamodelos de Proceso Gaussiano son especialmente precisos en la predicción de las fases sólidas (concentraciones totales precipitadas, magnetita y goethita). La definición de 7 grupos mejora significativamente la precisión del modelo. Sin embargo, se observa un peor ajuste en la concentración total de hierro disuelto, el pH y el Eh.

El uso de transformaciones logarítmicas en las variables de entrada y de salida ha demostrado ser eficaz para evitar la predicción de concentraciones negativas y mejorar el ajuste. El tiempo de cálculo para el entrenamiento de los Procesos Gaussianos aumenta considerablemente al aumentar el tamaño de la muestra, lo que exige una solución de compromiso entre el número de muestras utilizadas para el entrenamiento y la precisión del metamodelo. Actualmente, se trabaja en la optimización de las predicciones y en la integración de los metamodelos en CORE2Dv5, lo que permitirá una reducción significativa del tiempo de cálculo de los modelos de transporte reactivo.

Agradecimientos: Este estudio ha sido financiado por ENRESA a través de Proyectos de Investigación dentro del paquete de trabajo ACED de EURAD (European Joint Programme on Radioactive Waste Management of the European Union), HERMES paquete de trabajo de EURAD 2 (No. 101166718), el Proyecto HERCULES (PID2023-153202OB-I00) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España y el Proyecto de Consolidación GRC de la Xunta de Galicia (Ref.: ED431C 2025/55).

Metodología integrada de análisis del impacto de los riesgos derivados del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos

Vitor Ariza Malagutti[1], Meritxell Minoves Ruiz[2], Daniel Fernàndez-Garcia[3], Eduardo Martinez Gomariz[3], Marta Ganzer Marti[2]

[1]*Aigues de Barcelona y Universidad Politecnica de Catalonia*
[2]*Aigues de Barcelona*
[3]*Universidad Politecnica de Catalonia*

Palabras clave: Cambio climático, Modelación hidrológica-hidrogeológica, Riesgo probabilístico, Gestión integrada de recursos hídricos

Resumen. El cambio climático introduce riesgos crecientes y no estacionarios en sistemas de abastecimiento que dependen de la interacción entre aguas superficiales y subterráneas. En regiones mediterráneas, donde los acuíferos actúan como elemento regulador frente a sequías y eventos extremos, resulta necesario un marco de evaluación que conecte procesos físicos, incertidumbre climática y consecuencias operativas cuantificables.

Este trabajo presenta una metodología integrada de análisis de riesgo climático estructurada en torno a cuatro ejes de riesgo directos y medibles: déficit de suministro, incumplimiento sanitario, sobreexplotación estratégica del recurso subterráneo y coste económico operativo.

El enfoque combina un modelo físico acoplado hidrológico e hidrogeológico con modelos probabilísticos bayesianos. Las proyecciones climáticas regionalizadas bajo distintos escenarios socioeconómicos se traducen en forzamientos hidrometeorológicos que alimentan el modelo acoplado, el cual simula caudales fluviales, niveles de embalse, recarga, niveles piezométricos y flujos de intercambio río-acuífero. Estas variables físicas constituyen la base para estimar la probabilidad diaria de peligros hidrológicos tanto de cantidad como de calidad, tales como sequía, caudales críticos, turbidez y conductividad elevadas o concentraciones altas de amonio materia orgánica y clorofila, mediante modelos bayesianos que cuantifican la probabilidad condicional de superación de umbrales operativos en función del estado hidrológico simulado.

La incertidumbre asociada a las proyecciones climáticas, a la variabilidad hidrológica y a los propios modelos probabilísticos se propaga mediante

simulaciones de Monte Carlo. Cada iteración combina realizaciones climáticas, estados hidrológicos y respuestas operativas, permitiendo simular la activación de reglas de gestión como la parada de captaciones superficiales y cambio de fuente de captación—del río al acuífero, o el incremento en la dosificación de reactivos. Estas activaciones se traducen en consecuencias cuantificables: déficit anual esperado de suministro, número de días de incumplimiento sanitario, evolución de niveles de acuífero y aumento de costes operativos.

En lugar de producir estimaciones deterministas, el enfoque genera distribuciones de probabilidad de impacto acumulado para cada eje de riesgo. Estas distribuciones permiten caracterizar no solo el valor esperado del impacto, sino también su dispersión y los percentiles extremos, configurando una curva probabilística del riesgo que representa explícitamente la incertidumbre asociada a cada escenario climático.

La metodología establece un puente explícito entre proyecciones climáticas, dinámica superficie-subsuelo y toma de decisiones operativas, poniendo de relieve el papel del acuífero como amortiguador estratégico frente a la variabilidad climática y permitiendo evaluar simultáneamente el riesgo de su sobreexplotación bajo futuros más extremos. El enfoque es transferible a otras cuencas con gestión integrada de recursos y proporciona una base cuantitativa para priorizar medidas de adaptación bajo incertidumbre profunda.

Metodología integrada para evaluar el impacto del cambio climático sobre las aguas subterráneas y las sequías en España

Maia Vercelli[1], Ximena Venier[1], Aitor Iraola[1], Albert Nardi[1], Salvador Jordana[1], Álvaro Sáinz-García[1]

[1]*Amphos 21 S.L.*

Palabras clave: Cambio climático, Recursos hídricos, Sequías

Resumen. En España, las proyecciones climáticas apuntan hacia un incremento de las temperaturas, una mayor duración de los periodos secos y alteraciones en los patrones de precipitación y, en consecuencia, sobre la disponibilidad de recursos hídricos. En este contexto, se presenta una metodología orientada a evaluar de forma integrada cómo el cambio climático puede afectar tanto a las aguas subterráneas como a las superficiales, proporcionando una base útil para el análisis de vulnerabilidad hídrica y la planificación adaptativa a diferentes escalas territoriales.

La metodología es aplicable al conjunto del territorio español y permite analizar tanto la evolución de la recarga de acuíferos como los cambios esperables en la generación de recursos superficiales. El análisis parte de una caracterización inicial del funcionamiento hidrogeológico e hidrológico de la zona de estudio, con el objetivo de establecer un escenario de referencia frente al cual comparar las alteraciones futuras. A partir de esta base, se analizan tendencias hasta el horizonte 2100 para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, agrupando los resultados en periodos de 30 años, 1980-2010 como referencia, y 2030-2060, 2050-2080 y 2070-2100 como periodos futuros.

Los datos de la posible evolución de los recursos hídricos proceden de la aplicación CAMREC, que aglutina los outputs de los modelos SIMPA desarrollados por el CEDEX. Estos modelos transforman proyecciones climáticas en variables hidrológicas y representan, de forma distribuida y mensual, los principales componentes del ciclo hidrológico, como la evapotranspiración, la humedad del suelo, la infiltración, la recarga y la escorrentía total. Además del análisis de la recarga y la disponibilidad de agua subterránea, la metodología permite evaluar la variación en la frecuencia, duración e intensidad de las sequías y su afección a las aguas superficiales, a partir de déficits de escorrentía respecto a condiciones

de referencia. Esto permite relacionar directamente los cambios climáticos proyectados con la evolución de los recursos superficiales y con situaciones de estrés hídrico prolongado.

De forma complementaria, se incorpora una revisión cualitativa de riesgos de transición, considerando la evolución normativa, la planificación hidrológica y la posible intensificación de conflictos entre usos y la evolución de la demanda. Para ello, se revisan las tendencias en concesiones, restricciones asociadas a sequías y posibles cambios regulatorios, junto con la evolución esperable de la demanda a partir de proyecciones demográficas, superficie de regadío y grandes extracciones. Este análisis permite identificar de forma complementaria posibles tensiones entre usos y escenarios en los que la reducción de recursos hídricos podría verse agravada por cambios en la gestión y acceso al agua.

En conjunto, la metodología propuesta constituye una herramienta integrada para evaluar los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos en España, incorporando tanto la respuesta de las aguas subterráneas y superficiales como la evolución de las sequías y de los factores de gestión asociados. Su aplicación permite identificar tendencias de vulnerabilidad, anticipar escenarios de estrés hídrico y aportar una base técnica sólida para la planificación adaptativa y la toma de decisiones en un contexto de creciente incertidumbre climática.

Métodos lagrangianos para la simulación del transporte reactivo en modelos integrados de agua superficial-subterránea

Daniel Fernàndez-Garcia[1], Davide Furlanetto[1], Rodrigo Pérez-Illanes[2]

[1]*Universitat Politècnica de Catalunya, Grupo de Hidrología Subterránea, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Barcelona, Spain*
[2]*Technical University of Darmstadt, Institute of Applied Geosciences, Aquatic Geochemistry Group, Germany*

Palabras clave: Modelización del transporte de contaminantes, Modflow, Numerical methods, Interacción río-acuífero

Resumen. Los modelos tradicionales de partículas para simular el transporte de solutos como MODPATH suelen tratar las aguas superficiales como sumideros terminales, eliminando efectivamente los contaminantes de la simulación y despreciando cualquier intercambio dinámico y bidireccional de masa entre el río y el acuífero. Este trabajo presenta la implementación del intercambio de masa entre aguas superficiales y subterráneas con métodos lagrangianos de random-walk en el entorno del programa MODPATH-RW. Al permitir que las partículas transiten sin problemas entre el acuífero y el río, el modelo preserva el balance de masa global y simula con precisión la compleja dinámica de la interfaz. Esta integración resuelve las limitaciones de los modelos de aguas subterráneas clásicos, proporcionando una herramienta más rigurosa y físicamente realista para evaluar las reacciones de los contaminantes, la atenuación natural y los riesgos ecológicos interconectados de los sistemas hidrológicos acoplados.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos:

- "Reptes de qualitat i solucions basades en la natura per a l'ús i reutilització dels recursos hídrics del Besòs: maximitzant la sostenibilitat (RECLAM)", financiado por el Ajuntament de Barcelona con código de subvención 24S05783-001.

- "Challenges and solutions for advanced water resources management in the Besòs River basin (waterSOS)-Programa Prismas y Problemas de la Fundación BBVA 2023".

- "Managed Aquifer Recharge for a circular water future (AQUICIRC)" financiado por la Agencia Española de Investigación con referencia PCI2025-167222-2.

- "Optimización de la recarga gestionada de acuíferos mediante sustratos reactivos para garantizar la seguridad y disponibilidad hídrica (OPTIMAR)" con referencia PID2024-162869OB-I00, financiado por MICIU/ AEI / 10.13039/501100011033/ FEDER / UE.

Modelación de flujo y transporte con densidad variable en roca fracturada, excavación del repositorio profundo ONKALO® (Finlandia)

Álvaro Sáinz-García[1], Elena Fraile[1], Aymane Talha[1], Elena Abarca[1], Virve Iisalmi[2], Jyri Laakso[2]

[1]*Amphos21 Consulting*
[2]*Posiva Oy*

Palabras clave: Roca fracturada heterogénea, Mezcla de aguas subterráneas,, flujo dependiente de densidad, repositorio geológico profundo

Resumen. Finlandia está cerca de poner en operación ONKALO®, el primer repositorio geológico profundo del mundo para el almacenamiento de combustible nuclear gastado, situado en la isla de Olkiluoto. La excavación progresiva de esta instalación ha generado una oportunidad excepcional para analizar la respuesta hidrogeológica transitoria de un medio fracturado frente a perturbaciones inducidas por obra subterránea. Durante su evolución, la excavación modifica el campo de flujo, altera los gradientes hidráulicos y favorece procesos de mezcla entre aguas de distinta composición, incluyendo la posible movilización de aguas salinas profundas. Comprender estos procesos es clave tanto para la interpretación del comportamiento hidrogeológico del emplazamiento como para la evaluación de la seguridad y el desempeño de repositorios geológicos profundos.

En este trabajo se presenta un modelo hidrogeológico tridimensional de flujo y transporte con densidad variable desarrollado con el código DarcyTools, con el objetivo de reproducir y analizar la evolución hidrogeológica del emplazamiento durante las primeras décadas de construcción del repositorio. El modelo cubre aproximadamente 8 × 6 km y tiene unas nueve millones de celdas, lo que permite representar con elevado detalle la geometría del sistema, la heterogeneidad geológica y las principales estructuras hidrogeológicas que condicionan el flujo.

Las condiciones iniciales y los parámetros hidráulicos se definieron a partir de datos de campo del emplazamiento, incluyendo ensayos hidráulicos, niveles piezométricos y caracterización hidrogeoquímica. Un aspecto especialmente relevante del trabajo es la incorporación explícita del avance de la excavación como condición de contorno dependiente del tiempo. Lo que permite integrar la

evolución real de la obra dentro del modelo numérico y contrastar los resultados simulados con la respuesta observada en la red de monitorización.

El modelo fue calibrado para reproducir el nivel piezométrico previo al inicio de la excavación y posteriormente se utilizó para simular aproximadamente 22 años de evolución hidrogeológica desde el comienzo de la construcción. Los resultados obtenidos incluyen la estimación de los caudales de entrada hacia las galerías, la evolución de las presiones hidráulicas y la respuesta progresiva del sistema a medida que avanzan las excavaciones.

Las simulaciones reproducen de forma satisfactoria los cambios observados en la composición del agua subterránea, incluyendo procesos de dilución asociados a la infiltración de agua meteórica y fenómenos localizados de ascenso de aguas salinas profundas. Los resultados muestran que estos procesos están fuertemente controlados por la conectividad del medio fracturado, la heterogeneidad hidráulica y la construcción de la instalación.

Este trabajo pone de manifiesto el valor de la modelización hidrogeológica 3D acoplada como herramienta para interpretar respuestas transitorias en sistemas complejos, integrar datos de monitorización y anticipar impactos hidrogeológicos durante la construcción y operación de infraestructuras subterráneas profundas.

Modelación de sistemas kársticos utilizando openKARST

Jannes Kordilla[1], Juan J. Hidalgo[1], Marco Dentz[1]

[1]*Instituto de Diagnostico Ambiental y Estudios del Agua, Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

Palabras clave: karst, modelación numérica, mdelación de flujo y transporte

Resumen. La modelación del flujo de agua y transporte de solutos es una tarea difícil debido a la naturaleza heterogénea de las redes de conductos y la dinámica compleja del flujo, que puede darse en condiciones presurizadas, de lámina libre y turbulentas con números de Reynolds que exceden el millón. A menudo estás condiciones se dan simultáneamente en el mismo sistema, dependiendo de los diámetros de los conductos y su rugosidad.

Presentamos en este trabajo la herramienta openKARST para la modelación de flujo en redes de conductos kársticos. openKARST resuelve la ecuación de onda dinámica en régimen transitorio utilizando un esquema iterativo. Las transiciones de flujo de superficie libre a presurizado en los conductos se realizan mediante un enfoque de ranura de Preissmann (Preissmann slot) combinado con las leyes de Darcy-Weisbach y Manning para el cálculo de las pérdidas de presión por fricción. Los coeficientes de fricción se calculan mediante la formulación de Churchill. Esta formulación es continua y mitiga las fluctuaciones numéricas que se producen en la transición entre los regímenes laminar y turbulento cuando se usa, por ejemplo, la relación de Colebrook-White. openKARST admite las condiciones de contorno habituales en los sistemas kársticos e incluye funciones para la importación, exportación y visualización de redes. openKarst está verificado con soluciones analíticas y datos experimentales. Como ejemplo de utilización presentamos un modelo de un evento de recarga en el sistema kárstico de Ox Bel Ha (México), uno de los más grandes explorados hasta el momento.

Agradecimientos: Los autores agradecen la financiación de la Unión Europea a través de la ayuda ERC-KARST 101071836.

Modelación matemática de la contaminación por nitratos en el acuífero de la Plana de Valencia

María Elena Rodrigo-Clavero[1], Javier Rodrigo-Ilarri[1], Eduardo Cassiraga[1], Laura Escrivá-Benito[1]

[1]*Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València (UPV), 46022, Valencia, España.*

Palabras clave: nitratos, MODFLOW, MT3DMS, contaminación

Resumen. La contaminación difusa por nitratos de origen agrario constituye uno de los principales problemas de calidad del agua subterránea en la Comunidad Valenciana. El acuífero de la Plana de Valencia, intensamente explotado y estrechamente ligado al regadío, presenta una elevada vulnerabilidad debido a la presión agrícola, los retornos de riego y la fuerte dependencia del recurso subterráneo. El objetivo principal del trabajo es desarrollar, por primera vez para este sistema, un modelo matemático de transporte de nitratos capaz de reproducir razonablemente la distribución espacial y temporal de las concentraciones observadas en la Plana Norte y la Plana Sur. De forma complementaria, se analiza la aplicabilidad de ModelMuse como entorno de modelación libre y el uso conjunto de MODFLOW y MT3DMS para simular flujo subterráneo y transporte de solutos en zona saturada.

Se define un modelo conceptual hidrogeológico para una superficie aproximada de 953 km², discretizada en cuatro capas. El esquema incluye los principales componentes del balance hídrico: infiltración de lluvia, retornos de riego, interacción río-acuífero, transferencias laterales, bombeos, descargas a acequias y humedales, y conexión con la Albufera y el mar. El modelo de flujo se implementa en MODFLOW a partir de trabajos previos, incorporando discretización espacial y temporal, condiciones de contorno y parámetros como conductividad hidráulica, almacenamiento específico y rendimiento específico. La calibración hidráulica se realiza manualmente en régimen estacionario y transitorio. Sobre esta base se desarrolla el modelo de transporte en MT3DMS. La carga de nitratos se estima a partir de usos del suelo y cultivos obtenidos de la base Corine y de la normativa valenciana de fertilización nitrogenada, considerando la lixiviación como el mecanismo de transferencia del nitrógeno aplicado en superficie hacia el acuífero. Para ello, se adopta inicialmente un coeficiente de lixiviación del 10 %, posteriormente ajustado al 7 % durante la

calibración del modelo de transporte. El modelo incorpora porosidad eficaz y dispersividades longitudinal y transversal, introduciendo la masa mediante el paquete fuente-sumidero.

Las concentraciones simuladas se comparan con datos observados en pozos de control de la Confederación Hidrográfica del Júcar. El modelo reproduce de manera aceptable las concentraciones registradas en la mayor parte de los puntos, observándose en numerosos casos un mejor ajuste en la capa inferior. Aunque persisten discrepancias locales, la calibración manual proporciona una representación coherente del comportamiento hidrogeoquímico del sistema. Los resultados evidencian una contaminación generalizada por nitratos en el acuífero, con frecuentes superaciones del límite normativo de 50 mg/L. Asimismo, se identifica una tendencia temporal creciente de las concentraciones, incluso bajo escenarios compatibles con la regulación vigente.

El modelo constituye una primera aproximación técnicamente consistente para simular el transporte de nitratos en el acuífero de la Plana de Valencia y una base útil para futuros refinamientos, incluyendo calibración automática y ajuste de parámetros. El estudio confirma la magnitud del problema de contaminación difusa por nitratos y refuerza la consideración del sistema como zona vulnerable. Además, los resultados sugieren que, sin medidas adicionales de gestión, la afección podría intensificarse en el futuro. En consecuencia, el modelo se plantea como una herramienta de apoyo para evaluar escenarios de gestión agraria, sequía, intrusión marina y recuperación ambiental del sistema.

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada por el Proyecto PAID-06-24 Aplicación de técnicas geoestadísticas para la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por fertilizantes: el caso del acuífero de la Plana de Valencia y el Parque Natural de l'Albufera . (01/01/25 - 31/12/26). Investigación competitiva proyectos. Universitat Politècnica de València.

Modelación termo-hidro-mecanica de fracturas preexistentes para mejorar la inyectividad de CO_2 en acuíferos carbonatados de baja permeabilidad

Hammer Ojeda Chulla[1], Jesús Carrera[1], Alfonso Rodriguez Dono[2], Sebastià Olivella Pastalle[2], Victor Vilarrasa[3]

[1]*Institute of Environmental Assessment and Water Research -IDAEA - CSIC*
[2]*Universidad Politécnica de Cataluña*
[3]*Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

Palabras clave: Almacenamiento geológico de CO_2, Acoplamiento termo-hidro-mecánico, Inyectividad

Resumen. El almacenamiento geológico de CO_2 en acuíferos salinos profundos constituye una de las estrategias más prometedoras para reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera. Sin embargo, la baja permeabilidad de algunos reservorios limita la tasa de inyección y puede generar incrementos significativos de presión, comprometiendo la viabilidad técnica y económica de los proyectos de almacenamiento a gran escala. Aunque la fracturación hidráulica ha sido considerada como una alternativa para mejorar la inyectividad, su aplicación puede inducir efectos no deseados, como fracturación no controlada, sismicidad inducida y pérdida de integridad de la roca sello.

En este contexto, el presente estudio propone una estrategia alternativa basada en el aprovechamiento de fracturas preexistentes del reservorio, con el objetivo de incrementar su apertura y transmisividad mediante procesos acoplados termo-hidro-mecánicos, complementados con estimulación química. Para ello, se desarrolla un modelamiento numérico utilizando CODE_BRIGHT, orientado a evaluar la influencia de la presión hidráulica, la deformación mecánica y los gradientes térmicos generados durante la inyección. En particular, se analiza la inyección de agua fría, aproximadamente a 20 °C, en un acuífero carbonatado cuya temperatura natural se encuentra del orden de 60-70 °C. Este contraste térmico induce contracción térmica de la roca, modifica el estado tensional alrededor de la fractura y favorece su apertura.

Para el caso de referencia, el acuífero se representa como una formación carbonatada de baja permeabilidad, con una permeabilidad intrínseca de 1×10^{-15} m² y un módulo de Young de 35 GPa. La junta preexistente se define a partir de

una apertura hidráulica de referencia del orden de 1×10^{-5} m. No obstante, debido a las limitaciones asociadas a la representación explícita de una discontinuidad tan delgada en un modelo de escala reservorio, especialmente en términos de mallado y convergencia numérica en Code Bright, se adopta una zona de junta equivalente escalada. En este enfoque, las propiedades hidráulicas y mecánicas de la junta se ajustan para mantener una respuesta equivalente de la fractura, lo que justifica el uso de una permeabilidad inicial de 1×10^{-15} m² y una rigidez de 31 GPa, ligeramente diferentes a las propiedades del acuífero.

Bajo estas condiciones, las simulaciones preliminares muestran que el acoplamiento termo-hidro-mecánico incrementa significativamente la apertura de la fractura en comparación con el caso hidromecánico. Después de 240 h de inyección, la apertura máxima aumenta desde aproximadamente 4.9×10^{-6} m en el caso HM hasta 2.3×10^{-4} m en el caso THM. Este incremento se asocia con un aumento local de la permeabilidad de la junta desde un valor inicial de 1×10^{-15} m² hasta valores del orden de 10^{-12} m² cerca de la zona de inyección, así como con una reducción de presión de aproximadamente 1.5–1.6 MPa respecto al caso HM.

De manera complementaria, se plantea un modelo numérico independiente para estudiar la estimulación ácida del pozo mediante la inyección de ácido clorhídrico o ácido acético, con el fin de promover la disolución localizada de minerales carbonatados. Esta disolución podría amplificar el incremento de transmisividad cerca del pozo, mejorando la conectividad hidráulica entre el pozo inyector y las fracturas preexistentes.

No obstante, la estrategia propuesta requiere un control cuidadoso de la presión de inyección, la evolución de la apertura de fracturas y la posible interacción con la roca sello, con el fin de evitar la propagación no deseada de fracturas o la reactivación de discontinuidades críticas. En este sentido, el enfoque propuesto no busca generar nuevas fracturas, sino inducir una activación controlada de estructuras preexistentes bajo condiciones operacionales seguras.

En conjunto, los resultados preliminares sugieren que la combinación de procesos THM y estimulación química podría representar una alternativa viable para mejorar la inyectividad en formaciones carbonatadas de baja permeabilidad sin recurrir a fracturación hidráulica convencional.

Agradecimientos: Se agradece al proyecto Eastern Lights, financiado por la Unión Europea, por el apoyo brindado al desarrollo de esta investigación doctoral, orientada al estudio del almacenamiento geológico de CO_2 en acuíferos salinos profundos.

Modelización 3D de flujo y transporte con densidad variable para el diseño de una nueva barrera hidráulica frente a la intrusión salina en el delta del Llobregat

Carlos Pérez Castro[1], Daniel Fernàndez-Garcia[1]

[1]*Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental (Universitat Politècnica de Catalunya). Grup d'Hidrologia Subterrània (UPC-CSIC)*

Palabras clave: Intrusión salina, Barrera hidráulica, Modelización hidrogeológica, Cambio climático

Resumen. El acuífero principal del delta del Llobregat es un recurso estratégico para el abastecimiento del área metropolitana de Barcelona. La intensa explotación del sistema durante la segunda mitad del siglo XX provocó importantes descensos piezométricos, favoreciendo la intrusión marina y el deterioro de la calidad del agua subterránea. Para frenar este proceso, en 2007 se construyó una barrera hidráulica basada en la inyección de agua regenerada procedente de la EDAR del Baix Llobregat.

Aunque las primeras fases de la barrera mejoraron parcialmente las condiciones hidráulicas, persistían zonas insuficientemente protegidas frente a la intrusión salina. Por ello, se planteó una tercera fase con nuevos pozos de inyección destinados a reforzar el gradiente hidráulico y mejorar la contención del frente salino, especialmente ante escenarios futuros de cambio climático.

Para diseñar esta ampliación se desarrolló un modelo hidrogeológico tridimensional de flujo y transporte de cloruros con densidad variable mediante MODFLOW 6. El modelo reproduce la evolución del acuífero entre 1966 y 2025 e integra los principales procesos hidrológicos y de gestión. La calibración se realizó ajustando niveles piezométricos y concentraciones de cloruros de la red de control, logrando representar adecuadamente la dinámica de la intrusión marina.

Sobre el modelo calibrado se analizaron distintos escenarios climáticos (SSP1-2.6 y SSP5-8.5), considerando variaciones en la recarga y en las condiciones marinas, así como diferentes configuraciones operativas de la nueva barrera. Los resultados muestran que la fase 3 corrige las deficiencias de la infraestructura existente y permite contener la intrusión salina incluso bajo condiciones

hidrológicas desfavorables. El estudio confirma además la utilidad de la modelización hidrogeológica de densidad variable para optimizar la gestión de acuíferos costeros.

Modelización acoplada aguas superficiales–subterráneas en la cuenca del río Besòs para la mejora de las predicciones de escenarios futuros

Francesco Demichele[1], Luciana Scrinzi[1], Anna Jurado[1], Pujades Estanislao[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*

Palabras clave: Modelos hidro(geo)lógicos acoplados, Recarga subterránea, Simulaciones de escenarios de cambio climático

Resumen. La cuenca del río Besòs (Cataluña, España) es una cuenca mediterránea altamente urbanizada con un alto potencial para cubrir parte de la demanda de agua de la zona metropolitana de Barcelona. Sin embargo, debido a problemas históricos de contaminación sus recursos hídricos se encuentran infrautilizados. Teniendo en cuenta el incremento de la frecuencia, intensidad y duración de los eventos extremo, es fundamental mejorar el conocimiento sobre los recursos hídricos en esta cuenca y desarrollar herramientas predictivas para permitir su gestión sostenible en el futuro. Es por ello que se ha desarrollado un modelo acoplado hidrológico-hidrogeológico que nos permita conocer la evolución de los recursos hídricos bajo diferentes escenarios climáticos y diseñar medidas de mitigación.

El modelo hidrológico se ha desarrollado mediante el mesoscale Hydrologic Model (mHM), implementado en malla distribuida sobre toda la cuenca del Besòs y forzado con datos meteorológicos observados. El modelo se parametriza utilizando la técnica de regionalización multiescala de parámetros (MPR), que permite capturar la heterogeneidad espacial en usos del suelo, suelos, topografía y geología, preservando al mismo tiempo el balance de masa a la escala de control. Una vez calibrado considerando los caudales observados en ocho estaciones de aforo, mHM proporciona la recarga subterránea distribuidas en el espacio y en el tiempo para el periodo 1996–2010.

El flujo subterráneo se simula con MODFLOW, y hasta la fecha, se ha implementado únicamente en la subcuenca del rio Ripoll, que tiene amplias áreas urbanas e industriales. El modelo en diferencias finitas consta de dos capas hidroestratigráficas principales y utiliza condiciones de contorno de tipo Cauchy a lo largo del río, contornos de flujo nulo en las divisorias y condiciones tipo dren

en manantiales y cauces efímeros. Las conductividades hidráulicas y parámetros de almacenamiento se asignan inicialmente a partir de la cartografía geológica e hidrogeológica y de valores bibliográficos, y se ajustan posteriormente mediante calibración frente a niveles piezométricos observados en seis puntos de control. El modelo se ejecuta en primer lugar en régimen estacionario, utilizando valores de recarga medios, y posteriormente en régimen transitorio con pasos de tiempo mensuales entre 1996 y 2010, considerando la recarga calculada por mHM.

El acoplamiento conduce a una representación de la recarga físicamente más consistente que las estimaciones agregadas o empíricas convencionales, lo que se traduce en una mejora notable de la representatividad de los resultados del modelo hidrogeológico. En particular, el uso conjunto de la recarga de mHM y de los niveles observados reduce la ambigüedad de los parámetros y proporciona una distribución espacial más robusta de estos. A partir del modelo calibrado se pueden obtener estimaciones espaciales de las variaciones de almacenamiento subterráneo durante eventos extremo de sequía o precipitación, lo cual es fundamental para (i) cuantificar la respuesta del sistema a estos eventos, (ii) diseñar estrategias de adaptación a las consecuencias del cambio climático y (iii) mejorar la gestión de los recursos hídricos de una forma integral.

Finalmente, el modelo desarrollado se ha utilizado para explorar el comportamiento de los recursos hídricos combinando diferentes escenarios climáticos con distintos esquemas de bombeo y estrategias de recarga gestionada de acuíferos. Las simulaciones de escenarios aportan métricas cuantitativas sobre la evolución de los niveles piezométricos, los déficits y recuperaciones de almacenamiento asociados a eventos de precipitación y los flujos de intercambio río-acuífero, proporcionando una herramienta de apoyo para la gestión de los recursos hídricos.

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada por (i) el proyecto WATER4MED, financiado en la convocatoria PRIMA en 2023, concretamente mediante financiación del MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y de la Unión Europea a través del proyecto PCI2024-153452, y (ii) el proyecto AqUADAPT (CNS2023-144051) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

Modelización de flujo y transporte en humedales construidos para la optimización del tratamiento

Clara Selena Gómez Marante[1], Carme Barba[1], Ferrer Núria[1], Daniel Fernàndez-Garcia[1]

[1]*Department of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain*
[2]*Associated Unit: Hydrogeology Group (UPC-CSIC)*

Palabras clave: Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal, modelos de flujo y transporte de solutos, fitoremediación, soluciones basadas en la naturaleza

Resumen. Los Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal (HSSFCW) se han consolidado como una solución basada en la naturaleza fundamental para el tratamiento terciario de aguas residuales, integrando procesos físico-químicos y biológicos en un marco de ingeniería regenerativa. En el contexto de la restauración del río Besòs (Barcelona), estos sistemas demostraron una alta eficacia en la eliminación de contaminantes durante su fase inicial de operación. Sin embargo, tras más de dos décadas de funcionamiento ininterrumpido, en la actualidad se desconoce su eficiencia real de descontaminación a largo plazo.

Desde una perspectiva hidrogeológica, estos sistemas operan gracias a sustratos granulares sobre una base impermeable, por lo que su funcionamiento puede asimilarse al de un acuífero poroso somero.

Para dar respuesta a esta incógnita, este trabajo presenta el desarrollo de un modelo de flujo y transporte implementado mediante el software Hydrus-1D. La construcción del modelo se sustenta en una caracterización detallada del medio, fundamentada en muestreos y ensayos de campo orientados a determinar los parámetros hidráulicos y las propiedades físicas del suelo. La robustez de la modelización reside en la integración de un conjunto de datos multidimensional, que combina información satelital de NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) para la monitorización de la fenología vegetal, con medidas in situ de la zona radicular y las propiedades físicas del sustrato. La investigación integra series de monitorización continua de caudales y calidad hidroquímica en la entrada y salida del sistema, permitiendo la calibración del modelo a lo largo de las diferentes fases del ciclo biológico del carrizo (Phragmites australis). Esta

aproximación permite desglosar con precisión el balance hídrico y cuantificar las variaciones en los procesos de depuración condicionadas por el desarrollo vegetativo. En última instancia, el modelo se presenta como una herramienta diagnóstica y predictiva esencial para evaluar la capacidad depurativa actual del sistema frente al desconocimiento existente, y proponer estrategias de gestión orientadas a la optimización del tratamiento y la sostenibilidad de estas infraestructuras hídricas.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos:

- "Reptes de qualitat i solucions basades en la natura per a l'ús i reutilització dels recursos hídrics del Besòs: maximitzant la sostenibilitat (RECLAM)", financiado por el Ajuntament de Barcelona con código de subvención 24S05783-001.

- "Challenges and solutions for advanced water resources management in the Besòs River basin (waterSOS)-Programa Prismas y Problemas de la Fundación BBVA 2023".

- "Managed Aquifer Recharge for a circular water future (AQUICIRC)" financiado por la Agencia Española de Investigación con referencia PCI2025-167222-2.

- "Optimización de la recarga gestionada de acuíferos mediante sustratos reactivos para garantizar la seguridad y disponibilidad hídrica (OPTIMAR)" con referencia PID2024-162869OB-I00, financiado por MICIU/ AEI / 10.13039/501100011033/ FEDER / UE.

Modelización de la dinámica redox en un acuífero urbano situado en el delta del río Besòs (NE de la península ibérica)

Carmen Sáez Camacho[1], Janek Greskoviak[2], Gudrun Massmann[2], Enric Vázquez[1], Anna Jurado[1], Estanislao Pujades[1]

[1]*Departamento de Geociencias, Instituto de Evaluación Ambiental y Diagnóstico del Agua (IDAEA-CSIC)*
[2]*Instituto de Biología y Ciencias Ambientales, Universidad Carl von Ossietzky de Oldenburg, Alemania*

Palabras clave: Numerical modeling, redox processes, PFAS

Resumen. Ante los crecientes periodos de escasez hídrica, las aguas subterráneas urbanas representan una alternativa para cubrir la demanda de agua dulce. Sin embargo, los acuíferos urbanos son susceptibles de estar contaminados por una amplia variedad de sustancias orgánicas, incluyendo compuestos farmacéuticos, productos de cuidado personal, sustancias industriales y/o sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS). En este contexto, es fundamental investigar los procesos que controlan el comportamiento de estos contaminantes en los acuíferos para conocer cuándo y cómo las aguas subterráneas urbanas pueden consumirse de forma segura.

En una investigación previa realizada en el acuífero superficial del delta del rio Besòs a la altura del municipio de Sant Adrià del Besòs, se identificó la influencia del estado redox del acuífero en la evolución de algunos PFAS. Sin embargo, los principales resultados de este estudio fueron a nivel cualitativo. El presente estudio pretende ir un paso más allá y cuantificar, a través de modelización numérica, la evolución de PFAS y otras sustancias orgánicas considerando el estado hidroquímico del acuífero.

En 2024 se realizó una campaña de muestreo en la zona de estudio que consistió en la recogida semanal de dos muestras de agua del río y nueve de agua subterránea durante un mes y medio. Un tiempo suficiente conociendo que el tiempo de viaje en la zona de estudio es de unos 30 días. Los datos hidroquímicos obtenidos se están empleando para desarrollar y calibrar un modelo de transporte reactivo con el código PHT3D, con el objetivo de obtener los parámetros cinéticos que controlan el comportamiento de compuestos orgánicos

seleccionados. Se presentará el proceso en detalle y los resultados obtenidos hasta la fecha.

La relevancia de esta investigación radica en el hecho de que los parámetros calculados podrán utilizarse en otros acuíferos para predecir el comportamiento de los compuestos considerados bajo diferentes escenarios.

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada por la subvención de los proyectos: (i) WATERCLIMATE (referencia: 2023 CLIMA 0101) financiado por la AGAUR en el marco de la convocatoria Ajuts per finançar projectes de recerca per la mitigació i adaptació al canvi climàtic 2023 y (ii) ATTENUATE (PID2022-138556OB-C21) financiado por el AEI en la convocatoria Generación de Conocimiento 2023 . Los autores desean agradecer al Ayuntamiento de Sant Adrià del Besòs y a EUSAB (Estacionaments Urbans de Sant Adrià del Besòs) por su apoyo en la logística y en los trabajos de campo realizados.

Modelización del flujo subterráneo en el depósito controlado de la Vall d'en Joan (Macizo del Garraf): cuantificación de posibles filtraciones hacia un sistema kárstico

Núria Ferrer[1], Carme Barba[1], Ariadna Herrero[1], Daniel Fernàndez-Garcia[1]

[1]*Department of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Girona 31, Barcelona, 08034, Spain*

Palabras clave: lixiviado, vertedero, kárstico, modelización

Resumen. El crecimiento industrial y el aumento sostenido de la población urbana han incrementado significativamente la presión sobre la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU). En este contexto, los depósitos controlados han constituido históricamente una solución ampliamente utilizada para la disposición final de residuos. Sin embargo, estos sistemas representan una potencial fuente de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas debido a la generación de lixiviados.

El depósito controlado de la Vall d'en Joan, situado en el Macizo del Garraf (Cordilleras Costeras Catalanas), fue construido para absorber la elevada producción de residuos del área metropolitana de Barcelona. El vertedero operó entre 1974 y 2006, acumulando más de 26 millones de toneladas de residuos con espesores que superan los 80 m. El emplazamiento se localiza sobre un sistema kárstico altamente fracturado desarrollado en materiales carbonatados jurásicos y cretácicos, lo que plantea un riesgo potencial de transferencia de lixiviados hacia el acuífero subyacente. Aunque la base del depósito fue revestida con materiales de baja permeabilidad, existen indicios de infiltración de agua de lluvia a través del vaso del vertedero. Durante episodios de precipitación intensa, la surgencia de la Falconera parece actuar como uno de los principales puntos de descarga del sistema, registrándose aguas de coloración marrón, olores intensos y evidencias de contaminación asociada a residuos.

Con el objetivo de evaluar y cuantificar posibles filtraciones desde la base del vertedero hacia el acuífero kárstico, se ha desarrollado un modelo numérico tridimensional de flujo subterráneo utilizando el código MODFLOW 6. El modelo integra un balance de masas que considera las principales entradas (recarga por

precipitación e infiltración lateral) y salidas del sistema (bombeo de lixiviados y flujo regional). Asimismo, se ha incorporado la influencia de las principales discontinuidades estructurales del macizo, como fallas y simas, mediante un análisis de sensibilidad de la conductancia hidráulica. El modelo se ha calibrado mediante estimación inversa de parámetros utilizando ModelMate de ModelMuse, permitiendo evaluar el papel de estas estructuras en el control del flujo y en el potencial transporte de lixiviados hacia el acuífero. Los resultados del modelo numérico indican la existencia de una aportación continua desde el vertedero hacia la unidad kárstica, relativamente independiente de la precipitación, lo que sugiere un flujo persistente de lixiviados hacia el sistema acuífero.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado y apoyado por el Área Metropolitana de Barcelona (AMB) y por el proyecto RDI001/24/000039 de la Agència Catalana de l'Aigua.

Modelización geológica y de DNAPL 3D e hidroquímica 2D del emplazamiento de Sardas (Sabiñánigo)

Cora Almorox Zapico[1], Esperanza Montero-González[1], Pedro Martínez-Santos[1], Víctor Gómez-Escalonilla[1]

[1]*Universidad Complutense de Madrid*

Resumen. En el vertedero de Sardas (Sabiñánigo) se depositaron los excedentes de la producción del lindano, un pesticida organoclorado especialmente tóxico. El sellado deficiente y el traslado de residuos hacia la parcela adyacente al embalse desembocaron en una situación crítica. En el año 2009 se detectó fase densa libre o DNAPL en el pie del vertedero, lo que motivó la implementación del Seguimiento Hidrogeológico de Sardas.

La persistencia del DNAPL y la formación de focos secundarios que alimentan penachos de contaminación en los acuíferos limitan la eficacia de las estrategias de remediación a medio y largo plazo.

En este trabajo se han desarrollado un modelo geológico, uno de roca afectada por DNAPL y 30 modelos hidroquímicos, con el software Leapfrog Geo. El objetivo principal es mejorar el modelo conceptual del emplazamiento, integrar en un mismo entorno distintas bases de datos, visualizar la evolución espaciotemporal de los penachos de contaminación y evaluar la eficacia de los tratamientos de remediación.

El conjunto de datos de entrada comprendió 220 sondeos, su caracterización litológica y la identificación de tramos con presencia cualitativa de fase libre, así como registros de conductividad eléctrica y concentraciones de clorobenceno y HCH total obtenidos entre 2015 y 2023.

En el caso de los modelos hidroquímicos del acuífero aluvial, se realizó un análisis variográfico manual para caracterizar la estructura espacial de los datos. A partir de este análisis, se seleccionaron como interpoladores el Kriging Ordinario y las Funciones de Base Radial (RBF).

Los modelos geológico y de fase libre 3D obtenidos ofrecen una mayor precisión y fiabilidad en la estimación de los volúmenes litológicos y de las acumulaciones (pools) de DNAPL en comparación con los estudios previos. No obstante, el

modelado de roca afectada por DNAPL presenta limitaciones que son inherentes a la complejidad de su detección.

La validación cruzada leave-one-out de las estimaciones hidroquímicas detectó una marcada sensibilidad a la configuración espacial de los datos, pese a lo cual el Kriging Ordinario demostró ser el estimador más robusto de los métodos evaluados.

Los mapas hidroquímicos facilitaron el análisis de las anomalías de concentración registradas en 2019 y la evaluación de la eficacia de las técnicas de remediación in situ implementadas a lo largo de la serie temporal analizada.

Agradecimientos: Esta investigación se ha beneficiado de los fondos del proyecto CARESOIL-CM (TEC-2024/ECO-69), financiado por la Comunidad Autónoma de Madrid.

Modelización hidrogeoquímica como herramienta para comprender los procesos que influyen en la mineralización del agua subterránea en el valle de Rodalquilar, Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar (Almería)

Javier Buera Cuerva[1], Matías Mudarra Martínez[1], Bartolomé Andreo Navarro[1]

[1]*Centro de Hidrogeología de las Universidad de Málaga (CEHIUMA)*

Palabras clave: Cabo de Gata, Meteorización química, Roca volcánica, Agua Subterránea

Resumen. El valle de Rodalquilar se ubica en la zona central del Parque Natural Cabo de Gata-Níjar, la región más árida de Europa, con precipitación inferior a 250 mm/año. El sustrato geológico está formado por rocas volcánicas y, discordante sobre ellas, carbonatos del Mioceno Superior. En las zonas deprimidas se han depositado materiales detríticos de origen fluvial y coluvial, que conforman el acuífero detrítico de Rodalquilar (4,5 km^2). El objetivo de este trabajo es comprender qué procesos condicionan la mineralización del agua subterránea en el acuífero detrítico a lo largo del flujo hacia el mar, a partir de un modelo hidrogeoquímico con PhreeqC. Para ello, se reconstruyó la composición mineralógica de las rocas volcánicas gracias a estudios petrológicos previos y se establecieron las relaciones molares entre Ca, Mg, Na y K y HCO3 (meteorización química con CO2) y SO4 de los minerales. Paralelamente, se hicieron campañas de medida de nivel piezométrico y muestreo de aguas subterráneas. Finalmente, se realizó el modelo inverso en PhreeqC (llnl.dat).

La meteorización de piroxeno, biotita y plagioclasa es la fuente principal del Ca y Mg disuelto en el agua subterránea de la roca volcánica. Los resultados obtenidos con el modelo indican una meteorización de biotita (0,36 mmol/l), enstatita (0,59) y anortita (0,63), junto con la disolución de yeso (1,09) y halita (13,60) presentes como consecuencia de la evapoconcentración en el suelo. Para el proceso de meteorización son necesarios 6,34 mmol/l de CO2 y se producen 0,81 mmol/l de caolinita (disolución incongruente). Estas concentraciones iónicas son semejantes a los resultados analíticos del agua procedente de las rocas volcánicas.

Por su parte, los procesos que influyen en la composición química del agua subterránea del acuífero detrítico son la disolución de calcita, yeso, halita (aerosol marino) y la evapoconcentración en la zona no saturada, mientras que en la zona saturada predomina el intercambio iónico. El modelo hidrogeoquímico fue dividido en dos tramos a lo largo de una línea de flujo (3 km) en el acuífero de Rodalquilar (flujo general O-E): desde la cabecera hasta la parte central (1,5 km), donde ocurre mezcla de agua procedente del sustrato volcánico (parámetro del modelo inverso), y desde la zona central hasta la línea de costa (final de la línea de flujo). Con un 65% de agua de la roca volcánica y un 35% del acuífero detrítico, en el primer tramo precipita calcita (0,15 mmol/l) y tanto yeso (1,10) como halita (0,50) sufren disolución, mientras que el Na es retenido en arcillas y se libera Ca. En el segundo tramo ocurre la disolución de calcita (0,10 mmol/l), yeso (7,00) y halita (23,14), y la evaporación adquiere mayor importancia (4848 mmol/l). Finalmente, tiene lugar la retención de Na y Ca y la liberación de Mg y K.

El modelo de PhreeqC ayuda a corroborar los procesos de interacción agua – roca en los materiales volcánicos y los procesos de disolución y precipitación que ocurren en el acuífero. Así como el intercambio iónico en los minerales de la arcilla en el valle de Rodalquilar.

Agradecimientos: Este trabajo es una contribución del Grupo de Investigación RNM-308 del PAIDI de la Junta de Andalucía. Ha sido financiado por el proyecto Lifewatch Environmental and Biodiversity Climate Change Lab (EnBiC2-Lab). También ha contado con la financiación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España a través de la beca FPU21 (Formación de Profesorado Universitario).

Modelización hidromecánica acoplada de asientos inducidos por bombeo en entornos urbanos

Franco Ricchetti Campos[1], Franco Coscia[2], Enric Vázquez-Suñé[2]

[1]*Facultat de Ciències de la Terra Universitat de Barcelona. Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile. Geolambda Ingeniería Limitada Chile*
[2]*Departamento de Geociencias Instituto de Diagnostico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC)*

Palabras clave: Drenaje, Asientos, Modelización Numérica

Resumen. En el ámbito de la ingeniería civil, las excavaciones profundas en entornos urbanos frecuentemente requieren la implementación de sistemas de drenaje para controlar la interferencia entre las obras subterráneas y el nivel freático. Estas intervenciones generan descensos en los niveles piezométricos del acuífero, lo que produce una disminución de las presiones intersticiales y, en consecuencia, un aumento de las tensiones efectivas del suelo. Este proceso puede provocar deformaciones geomecánicas en el terreno, manifestadas principalmente como asientos. En zonas urbanas densamente edificadas, estas deformaciones pueden afectar estructuras cercanas, por lo que resulta fundamental contar con herramientas capaces de predecir y evaluar dichos efectos.

El presente trabajo tiene como objetivo principal estimar los asientos inducidos en estructuras aledañas como consecuencia de un ensayo de bombeo realizado en un entorno urbano. Para ello, se emplean el uso de herramientas de simulación numérica capaces de acoplar el flujo de agua subterránea con la respuesta mecánica del medio poroso.

El estudio se enmarca en el contexto de una ciudad mediterránea española. En la zona de estudio, durante siete días se realizó un ensayo de bombeo, donde se registraron simultáneamente los descensos del nivel hidráulico y deformaciones del terreno mediante instrumentación de auscultación.

Para ello, se construyó un modelo 3D de elementos finitos mediante el código FEFLOW 10.0, integrando la estratigrafía del sector y la información de un modelo axisimétrico existente. A partir de la modelación numérica del ensayo de bombeo, se calibraron los parámetros hidráulicos del acuífero. Asimismo, se realizó una

caracterización geomecánica del sector de estudio, con el propósito de recopilar los parámetros necesarios para la implementación del modelo numérico.

A continuación, se incorporó el comportamiento geomecánico mediante un módulo basado en el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi, junto con una formulación constitutiva elástica fundamentada en la ley de Hooke.

Este módulo considera la relación entre cambios en la presión de poro con variaciones en la porosidad del medio y las modificaciones en las propiedades hidráulicas del acuífero. De esta manera, permite estimar la consolidación del terreno mediante la integración espacial y temporal de los cambios de porosidad.

Finalmente, se evalúan las deformaciones calculadas por el modelo y se comparan con los registros de auscultación disponibles en el entorno de la obra. Este análisis permite determinar si el módulo geomecánico es capaz de reproducir adecuadamente los asientos observados, evaluando así su desempeño como herramienta para la predicción de deformaciones inducidas por variaciones en el régimen de aguas subterráneas en contextos urbanos.

Modelización integrada mediante el acoplamiento de procesos hidrológicos e hidrogeológicos para la evaluación de la recarga efectiva, la evapotranspiración y la escorrentía.

Tybaud Goyetche[1], Celia Aranda[1], Elena Fraile[1], Salvador Jordana[1]

[1]*Amphos 21 Consulting S.L.*

Palabras clave: Recarga, Modelización acoplada, Balance hídrico, Zona no saturada

Resumen. La recarga de acuíferos depende de la interacción de procesos superficiales y de subsuelo. Sin embargo, la mayoría de los modelos numéricos de flujo subterráneo estiman la recarga efectiva mediante enfoques empíricos, ya que los procesos superficiales e hidrogeológicos rara vez se acoplan de forma explícita. Esto obliga a recurrir a estimaciones simplificadas del flujo hacia el acuífero y dificulta una representación rigurosa del balance hídrico. En este trabajo se presenta una metodología de modelización acoplada orientada a mejorar la estimación de la recarga efectiva mediante la consideración explicita de los procesos de precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía.

La metodología se basa en un modelo numérico de agua subterránea de elementos finitos en Feflow, al que se incorpora una representación explícita de los procesos superficiales mediante su acoplamiento con Python a través de la interfaz IFM. Este acoplamiento permite obtener, para cada nodo y paso de tiempo, valores de presión, nivel y saturación, e implementar de forma explícita los cálculos de los distintos componentes del balance hídrico superficial. De este modo, se estiman valores de evapotranspiración real en función de la saturación, la evapotranspiración potencial, la profundidad del nodo y el uso y tipo de suelo, así como valores de infiltración y escorrentía en función del nivel piezométrico. Estos resultados se incorporan como condiciones de contorno actualizadas en el paso de tiempo siguiente, de manera que se tienen en cuenta en el cálculo del flujo subterráneo y en la transferencia vertical hacia la zona saturada.

La validación del modelo FEFLOW-Python desarrollado considera tanto casos de referencia como la simulación de distintos escenarios con series de precipitación, tipos de suelo y coberturas variables. Los resultados se analizan a escala

elemental del mallado y mediante su agregación en microcuencas contributivas, lo que permite derivar indicadores útiles para el dimensionamiento de potenciales sistemas de drenaje, almacenamiento y reinfiltración.

El enfoque planteado permite superar las simplificaciones hidrológicas en las que la recarga efectiva había sido tratada de forma más heurística. La inclusión explícita del acoplamiento superficie-subsuelo proporciona una representación más realista del funcionamiento del sistema, especialmente en condiciones transitorias y no lineales. Esta aproximación mejora la cuantificación de los flujos de recarga efectiva, evapotranspiración y escorrentía, y refuerza la robustez de los balances hídricos. Asimismo, proporciona una base más fiable para la evaluación del riesgo de inundación y la optimización de medidas de protección frente al ascenso del nivel freático. En conjunto, el trabajo constituye una aportación metodológica aplicable a proyectos en los que la interacción entre hidrología superficial, zona no saturada e hidrogeología resulta clave para abordar distintos retos de ingeniería civil y ambiental.

Modelización numérica avanzada e integración de modelos geológicos 3D, teledetección y aprendizaje automático para la mejora del conocimiento: caso de Xinzo de Limia (NW de España)

Lorena Bermejo Santos[1], Sergio Raúl Durán Laforet[1], M. Candela Ruiz[2], Ximena Venier[2], María Pool[2], Elena Abarca[2], Aitor Iraola[2]

[1]Amphos 21 Consulting. C/ Raquel Meller, 7. 28027. Madrid
[2]Amphos 21 Consulting. C/ Pujades, 340, 4ª planta. 08019 Barcelona

Resumen. La cuenca de Xinzo de Limia, situada en la cuenca del río Miño-Sil en el noroeste de España, ha sufrido numerosas modificaciones hidromorfológicas históricas, especialmente el drenaje de la Laguna de Antela durante el siglo XX, que transformó significativamente el régimen hidrogeológico natural, afectando a los procesos de recarga, circulación y descarga del agua subterránea.

El acuífero se desarrolla en una cuenca detrítica postorogénica rellena por sedimentos terciarios de la Formación Xinzo de Limia. Desde el punto de vista litoestratigráfico, el sistema presenta una configuración multicapa formada por tres unidades principales: una unidad detrítica superior que constituye un acuífero libre somero, una unidad intermedia de arcillas y lignitos que actúa como acuitardo, y una unidad detrítica inferior que conforma un acuífero profundo por sectores confinado. Esta estructura estratificada condiciona de manera decisiva la conectividad hidráulica vertical, los patrones de flujo subterráneo y las posibles trayectorias de transporte de contaminantes dentro del sistema.

Con el objetivo de mejorar la caracterización hidrogeológica de la masa de agua, se desarrolló un flujo de trabajo basado en la integración de diferentes herramientas de modelización y análisis de datos con capacidad predictiva. En primer lugar, se construyó un modelo geológico tridimensional mediante el software Leapfrog, integrando información procedente de numerosos sondeos históricos, asociados principalmente a la explotación de lignitos, junto con nuevas campañas de perforación y reinterpretaciones estratigráficas recientes. Este modelo permitió definir con mayor precisión la geometría de las unidades litoestratigráficas y su continuidad espacial.

A partir de este modelo geológico y del modelo conceptual desarrollado, se construyó un modelo numérico de flujo subterráneo orientado a reproducir la piezometría regional y analizar las interacciones hidráulicas entre los distintos niveles acuíferos. El modelo permite representar la heterogeneidad litológica del sistema, las transferencias verticales a través del acuitardo y la influencia de la recarga y de las extracciones de agua subterránea. La calibración del modelo se llevó a cabo utilizando datos piezométricos disponibles, lo que permitió evaluar el funcionamiento hidrodinámico del sistema y su respuesta frente a diferentes condiciones de explotación y recarga. Además, se realizaron simulaciones de escenarios futuros para analizar la evolución potencial del sistema bajo presiones antrópicas, climáticas, y cambios en el uso del suelo.

De forma complementaria, se incorporaron productos derivados de herramientas de teledetección y observación de la superficie terrestre, incluyendo servicios satelitales como Copernicus EGMS, con el fin de analizar la evolución espacial y temporal de los cambios en el uso del suelo. Además, se aplicaron técnicas de aprendizaje automático para identificar relaciones no lineales entre variables hidroquímicas, piezométricas y territoriales, mejorando así el entendimiento integral del sistema y la capacidad predictiva del marco de modelización.

La integración de modelización geológica tridimensional, modelización numérica de flujo y herramientas avanzadas de análisis de datos ha permitido mejorar significativamente la comprensión del funcionamiento hidrogeológico del sistema en general, y en particular de los principales factores que controlan la contaminación por nitratos. Este enfoque proporciona una base sólida para apoyar la toma de decisiones y avanzar hacia una gestión preventiva y adaptativa de masas de agua subterránea en riesgo químico.

Modelo conceptual hidrogeológico de los acuíferos jurásicos y cretácico la Sierra de segura (SE de España).

Antonio Lope Morales González[1], Jorge Jódar-Bermúdez[2], Francisco Moral-Martos[3], Rosario Jiménez-Espinosa[1], Fernando Gázquez Sánchez[4], Antonio González-Ramón[2]

[1]*Departamento de Geología de la Universidad de Jaén*
[2]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*
[3]*Universidad Pablo de Olavide*
[4]*Universidad de Almería*

Palabras clave: Isótopos, Acuífero, Sierra de Segura, Recarga

Resumen. La Sierra de Segura, al NE de la provincia de Jaén, se localiza dentro del mayor espacio protegido de España y segundo de Europa. En el sector del Relieve Invertido de la Sierra de Segura se localizan dos masas de agua subterránea tradicionalmente consideradas independientes: Segura–Madera–Tus (ES070MSBT000000015), asociada a los afloramientos cretácicos del relieve invertido (~300 km²), y Acuíferos Inferiores de la Sierra de Segura (ES070MSBT000000017), vinculada a las formaciones carbonatadas jurásicas subyacentes (~1600 km²).

El análisis conjunto de la composición química e isotópica de aguas meteóricas y subterráneas ha permitido redefinir el funcionamiento hidrogeológico regional y proponer un nuevo modelo conceptual. Los resultados evidencian la existencia de conexiones hidráulicas verticales entre los acuíferos cretácicos superiores y los acuíferos jurásicos inferiores, a través de la formación de baja permeabilidad de las Utrillas (Cretácico Inferior).

La recarga se produce principalmente por infiltración directa de la precipitación sobre los afloramientos carbonatados cretácicos. En el sector cretácico se ha determinado mediante balance de cloruros una recarga del 60% aprox, alimentando tanto manantiales locales como flujos descendentes hacia los acuíferos jurásicos, que constituyen el principal reservorio regional y donde la recarga por precipitación desciende al 33% estimada mediante la misma metodología, teniendo en cuenta que el resto de la recarga proviene de la transferencia superior.

Las alturas de recarga, así como las composiciones isotópicas ($\delta^{18}O$) y datos hidroquímicos de los manantiales asociados al Jurásico y Cretácico, indican procesos de mezcla entre recarga local y aportes procedentes del sistema cretácico, confirmando la conexión entre ambas masas de agua. El modelo propuesto sugiere la existencia de un único sistema hidrogeológico multicapa con circulación regional jerarquizada, donde la recarga del Jurásico se produce tanto por la precipitación sobre el mismo afloramiento como por las transferencias superiores del Cretácico.

Modelo geológico y numérico del Delta del Besòs y la Cubeta de la Llagosta para la gestión de los recursos hídricos subterráneos

Esteban Hormigo Sánchez[1], Lorena Álvarez Álvarez[1], Olga Raventós Ortega[1], Enric Vázquez-Suñé[2]

[1]*iAquant*
[2]*IDAEA-CSIC*

Palabras clave: iAquant, Modelación geológica, Modelación numérica, Besós y Cubeta de la Llagosta

Resumen. Los acuíferos del delta del río Besòs y de la Cubeta de la Llagosta constituyen un sistema hidrogeológico estratégico para el abastecimiento y la gestión de los recursos hídricos en el área metropolitana de Barcelona. La elevada presión antrópica, junto con la variabilidad climática y las demandas de agua crecientes, hacen necesario disponer de herramientas avanzadas que permitan analizar el comportamiento del sistema y apoyar la toma de decisiones en su gestión.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo hidrogeológico integrado que combina un modelo geológico tridimensional detallado y un modelo numérico de flujo subterráneo. El modelo geológico ha sido construido mediante el software Leapfrog, integrando información procedente de sondeos, datos geofísicos y la interpretación hidrogeológica del subsuelo. Este modelo permite definir con mayor precisión la geometría y la continuidad de las unidades hidroestratigráficas, proporcionando la base conceptual para la construcción del modelo de flujo.

A partir de esta base geológica se ha desarrollado un modelo numérico regional de flujo subterráneo mediante el software FEFLOW, que representa el funcionamiento hidrogeológico conjunto de los acuíferos del delta del Besòs y la Cubeta de la Llagosta. El modelo incorpora información hidrodinámica procedente de redes piezométricas, datos de explotación de captaciones y otras fuentes hidrogeológicas relevantes. El proceso de calibración se ha realizado tanto en régimen estacionario como en régimen transitorio, permitiendo reproducir adecuadamente la evolución piezométrica del sistema y su respuesta frente a las principales presiones hidrológicas.

El modelo constituye una herramienta avanzada para la gestión del recurso, permitiendo evaluar el impacto de distintos escenarios de explotación, analizar la respuesta del sistema ante escenarios de cambio climático y apoyar la planificación sostenible del uso de las aguas subterráneas en el ámbito del delta del Besòs y la Cubeta de la Llagosta. El desarrollo del modelo ha sido realizado por iAquant como parte de los trabajos orientados a mejorar el conocimiento y la gestión de los acuíferos en el área metropolitana de Barcelona.

Agradecimientos: El estudio se enmarca dentro del Proyecto Plan de Adaptación y Transformación Integral para la Digitalización del Agua (PAITIDA) promovido por el Consorci Besòs Tordera (CBT) y se encuentra financiada por fondos europeos y la Agencia Catalana del Agua (ACA).

Modelo hidrogeológico del acuífero de la Plana de Valencia Norte

Daniela Alanoca Choque[1], Enric Vázquez-Suñé[1], Franco Coscia[1], Bismar Durán Vargas[1], Estanislao Pujades Garnes[1], Bruno Ballesteros Navarro[2]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua*
[2]*Instituto Geológico y Minero de España*

Palabras clave: DANA 2024, Contaminación, Modelación numérica, Acuífero Valencia

Resumen. El acuífero de la Plana de Valencia Norte constituye uno de los sistemas hidrogeológicos costeros más relevantes de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, tanto por su extensión como por su uso intensivo agrícola y urbano industrial, así como su interacción con ecosistemas de alto valor ecológico, como la Albufera de Valencia y los marjales litorales.

En octubre de 2024, un episodio de precipitaciones extremas asociado a la DANA provocó inundaciones, generando condiciones favorables para la infiltración de contaminantes hacia el subsuelo, evidenciando la vulnerabilidad del acuífero frente a eventos hidrometeorológicos extremos. Este trabajo desarrolla un modelo conceptual para caracterizar su funcionamiento hidrogeológico y, a partir de este, implementa un modelo numérico de flujo y transporte (FEFLOW v.7.1) para estimar el impacto potencial de la contaminación.

El modelo conceptual define un acuífero detrítico multicapa con conectividades hidráulicas variables y gradientes regionales suaves orientados predominantemente de Oeste a Este, hacia el mar Mediterráneo y humedales costeros. El sistema incluye dos tramos permeables: un tramo superior formado por sedimentos miocuaternarios con permeabilidades relativamente altas (K=0.01–1000 m/d; espesor 100–400 m), y un tramo inferior constituido por materiales del mioceno de menor permeabilidad (K=0.1–30 m/d; espesor 50–500 m), apoyado sobre un sustrato carbonatado permeable del Cretácico superior. La interacción de aguas subterráneas–superficiales está condicionada por tramos ganadores y perdedores de ríos, canales y retornos de riego, con una recarga neta estimada entre 42–92 mm/año.

Se implementó un modelo numérico de flujo en régimen estacionario en los primeros 100 m del tramo superior, considerando un dominio definido a partir de

subcuencas hidrográficas. La calibración, mediante un ajuste iterativo de conductividades hidráulicas y conductancias río acuífero frente a datos piezométricos observados entre 2010 y 2025, muestra un ajuste aceptable (RMS= 1.5 m; Error Medio Absoluto= 1.2 m, $R2 \approx 0.9$). La simulación de transporte de un contaminante puntual inducido hipotéticamente en zonas inundadas bajo un escenario post DANA evidencia que la migración de la pluma está controlada principalmente por advección y limitada parcialmente por dispersión, alcanzando aproximadamente 5 a 6 km, llegando a zonas próximas a la Albufera y el mar Mediterráneo.

Los resultados subrayan la necesidad de reforzar el monitoreo piezométrico e hidroquímico en puntos críticos, con el fin de validar predicciones y apoyar la gestión preventiva del acuífero frente a eventos climáticos extremos.

Modelo numérico para la gestión hidrogeológica de un embalse en un entorno minero

Esteban Hormigo Sánchez[1], Lorena Álvarez Álvarez[1], Olga Raventós Ortega[1], Milena Téllez Beltrán[2]

[1]*iAquant*
[2]*WES*

Palabras clave: iAquant, Modelación Numérica, Embalse, Gestión minera

Resumen. La gestión ambiental de instalaciones asociadas a la actividad minera requiere herramientas que permitan evaluar de forma cuantitativa el comportamiento hidrogeológico del entorno y los posibles impactos sobre los recursos hídricos subterráneos. En este contexto, los modelos numéricos de flujo y transporte constituyen instrumentos clave para analizar la evolución de contaminantes y apoyar la toma de decisiones durante las fases de operación, cierre y post-cierre de las instalaciones.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo numérico hidrogeológico orientado a evaluar el funcionamiento de una balsa de lixiviados asociada a una explotación minera y su posible influencia sobre el acuífero circundante. El modelo ha sido desarrollado mediante el software FEFLOW e integra tanto la simulación del flujo de agua subterránea como el transporte de solutos, centrado específicamente en la evolución y dispersión de sulfatos.

El dominio de modelización se ha definido a escala regional con el fin de representar adecuadamente las condiciones hidráulicas del sistema, incorporando posteriormente un refinamiento espacial local en el entorno de la balsa mediante técnicas de remallado. Este enfoque permite reproducir con mayor detalle los gradientes hidráulicos y los procesos de transporte que controlan la posible migración de contaminantes desde la instalación.

El modelo conceptual incorpora la complejidad hidrogeológica del entorno, caracterizado por una geología estructuralmente compleja y la presencia de cursos fluviales próximos que condicionan el régimen de flujo subterráneo. La parametrización se ha basado en la integración de información hidrogeológica disponible, incluyendo datos geológicos, piezométricos y de calidad de agua.

A partir del modelo se han evaluado distintos escenarios asociados a las fases de cierre y post-cierre de la explotación minera, analizando la evolución potencial de

las concentraciones de sulfatos y su posible propagación en el acuífero. Los resultados obtenidos permiten identificar los principales mecanismos de control del transporte y constituyen una herramienta de apoyo para el diseño de medidas de gestión y seguimiento ambiental de la instalación.

Monitoreo de la humedad del suelo en charcas temporales mediterraneas con imagenes satelitales SAR

Maria Casamitjana Causa[1], Anna Menció Domingo[1]

[1]*Universitat de Girona*

Resumen. Las lagunas y charcas temporales mediterráneas son núcleos de biodiversidad, de regulación hidrológica y de suministro de servicios ecosistémicos. Se caracterizan por un tamaño reducido y un periodo de retorno de inundación variable y se consideran indicadoras de cambio climático debido a la fragilidad de sus ecosistemas. Están catalogadas como hábitat prioritario en la UE para la conservación de biotopos y especies endémicas y singulares.

La humedad del suelo es un parámetro clave para el intercambio de iones y energía, que condiciona la presencia de vegetación. El monitoreo de la humedad del suelo es clave para los estudios ecohidrológicos, de evolución de la sequía y de manejo de recursos hídricos. La presente investigación está enmarcada en el Proyecto Origen y funcionamiento de los sistemas acuífero-laguna: su rol en procesos de contaminación y su adaptación al cambio climático (AquiPondSys) y se localiza en el extremo nororiental de los Pirineos, al noroeste de la península Ibérica, concretamente en el Sistema de charcas temporales de la Albera.

Dentro de este proyecto se está realizando un ensayo de monitoreo periódico de la humedad del suelo en tres charcas cercanas, con condiciones similares de tamaño, relieve, suelo y vegetación, a lo largo de un periodo de secado-inundación Julio 2025-agosto 2026.

Periodicamente, cada 12 días, coincidiendo con la toma de imágenes satelitales registradas por la ESA (Agencia Espacial Europea), se realizan mediciones in situ de humedad del suelo. Estas mediciones se realizan con una sonda de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) FieldScout en una retícula (10x10m) con un total de 80 puntos fijos por charca, distribuidos de manera uniforme y marcados en campo, coincidiendo con la resolución de las imágenes satelitales de 10 m.

El objetivo es obtener una correlación de los datos de humedad medidos en campo con la información de los píxeles de las imágenes de radar registradas cada

12 días por el sensor satelital Sentinel 1 de la misión ESA mediante sensores SAR (sensores de apertura sintética).

Los sensores del satélite Sentinel 1- SAR emiten microondas que al alcanzar la superficie de la tierra se dispersan en dos polarizaciones (bandas VH y VV), las cuales se pueden correlacionar con la humedad del suelo y la rugosidad del terreno, permitiendo monitorear la humedad y cambios en la superficie de las charcas.

Mediante la correlación de los datos se prevé poder encontrar patrones de secado-inundación con información espacio-temporal relevante para conocer el comportamiento de las charcas temporales mediterráneas.

Agradecimientos: Este estudio se realiza en el marco del consorcio del proyecto internacional colaborativo TREASURE (PCI2024-153436), financiado en el marco de Water4All, 2022 (Comisión Europea y la Agencia Estatal de Investigación (AEI) – Agencia Estatal de Investigación de España): Gestión de los recursos hídricos: resiliencia, adaptación y mitigación frente a eventos hidroclimáticos extremos y herramientas de gestión . También ha sido apoyado por el proyecto AquiPondSys (PID2023-147186OB-I00), MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)

Monitoreo satelital InSAR como herramienta clave para la explotación y gestión sostenible de la explotación de acuíferos

Pablo Blanco[1], Isora Brito[1], Beatriz Royo[1], Isabel Martínez[2], Raúl Nogueras[2]

[1]*TRE ALTAMIRA, SLU*
[2]*Canal de Isabel II, S.A. M.P.*

Palabras clave: InSAR, Gestión de acuíferos, Aguas subterráneas

Resumen. La Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR), que usa imágenes de satélite para medir movimientos de la superficie con precisión milimétrica, es una herramienta clave para evaluar estos impactos tanto a escala regional como local. En este estudio el InSAR se aplicó con éxito en el acuífero terciario detrítico de la Comunidad de Madrid para monitorizar el comportamiento del suelo en las zonas en las que se ubican los campos de pozos de extracción de agua gestionados por Canal de Isabel II, S.A. M.P. Este estudio además permitió evidenciar una relación directa entre los volúmenes de agua extraída y los movimientos del terreno.

La técnica InSAR Multitemporal (MT-InSAR) utilizada en el estudio fue SqueeSAR® [1]. Los datos utilizados consisten en 441 imágenes radar de mediana resolución (píxel de 20 x 5 m) adquiridas por el Sentinel-1 entre el 8 de febrero de 2015 y el 11 de noviembre de 2024 en geometría descendente.

El estudio pone de manifiesto diversos episodios de subsidencia en el área del acuífero. En particular, en la masa de agua subterránea Manzanares-Jarama (zona norte de Madrid), se produjo una extracción de agua en el periodo de abril 2023 a noviembre 2023. Dicha extracción generó un fenómeno de subsidencia en superficie en la zona de influencia correspondiente seguida de un levantamiento debido a la recuperación del terreno una vez cesada la extracción. En algunos puntos de dicha zona se observaron descensos superficiales de hasta 67 mm. Tomando como referencia los puntos más cercanos a los pozos de los cuales se dispone de registro de cota y volúmenes de extracción, se calculó el factor de correlación (parámetro R) entre el registro de cota y las series temporales de dichos puntos del periodo de finales de 2022 y junio 2024. Además, también se calculó el coeficiente de relación entre el descenso de cota (en metros) y el descenso en el movimiento superficial (parámetro K) y el offset temporal entre

ambas señales (parámetro T), como medida del retraso entre el cese de la extracción y el comienzo de la recuperación superficial.

Como ejemplo del comportamiento observado en el área de estudio, se observa en la lectura de la cota de un piezómetro de la zona y en el desplazamiento escalado mediante el correspondiente parámetro K de los tres puntos más cercanos un alto grado de correlación, lo que prueba la relación causa-efecto. Del mismo modo, se observa que el desplazamiento mínimo se produce cierto tiempo después del cese del bombeo, momento a partir del cual empieza la recuperación del terreno, sin que este recupere su nivel inicial.

Monitorización virtual de aguas subterráneas mediante análisis de datos DInSAR y Machine Learning

Abraham Peraza[1], Jorge López-Rebollo[1], Adolfo Molada-Tébar[1], Susana Del Pozo[1], Diego González-Aguilera[1]

[1]*Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad de Salamanca. Hornos Caleros, 50, 05003, Ávila, España*

Palabras clave: Monitorización, Piezometría, DInSAR, Machine Learning

Resumen. La monitorización continua de las aguas subterráneas es esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en un contexto de cambio global y presiones antrópicas crecientes. Sin embargo, la escasez y distribución irregular de redes de observación piezométrica in situ limitan la capacidad de caracterizar acuíferos a escala regional. Para abordar este desafío, se presenta una novedosa metodología de monitorización virtual para la reconstrucción de series temporales piezométricas en ubicaciones no instrumentadas, empleando principalmente datos de sensores remotos.

Para comprender la relación no lineal existente entre la deformación vertical (subsidencia y levantamiento del terreno) y las dinámicas de variación piezométrica (pérdida y recuperación) a través de un enfoque poro elástico, se propone el empleo de datos satelitales de nivel 3. Específicamente, se utilizan series temporales de deformación vertical obtenidos mediante el método avanzado de interferometría SBAS, basados en Sentinel-1 SLC.

El principal reto técnico radica en que estas series SBAS combinan respuestas elásticas estacionales, procesos de consolidación inelástica irreversible y ruido estocástico, lo que dificulta enormemente la inferencia bayesiana y el acople de modelos basados en inteligencia artificial. Para superar esta barrera, se propone una estrategia de modelado híbrido, que proyecta las series temporales a un espacio latente normalizado. Esta estandarización permite entrenar un único modelo regional capaz de inferir series en múltiples ubicaciones espaciales.

El núcleo de la metodología consiste en transformar los datos de deformación superficial en variables predictoras con estricto sentido físico. Mediante un

procesamiento avanzado, se realiza una descomposición espectral de la deformación para identificar el predominio de los distintos ciclos hidrológicos. Estableciendo umbrales basados en la distribución de energía temporal de la señal, la deformación se separa ortogonalmente en dos componentes físicas distintas: una banda elástica, que captura la respuesta reversible estacional del acuífero, y una banda inelástica, asociada a tendencias hidrogeológicas de largo plazo o consolidación irreversible.

Para fundamentar el modelo predictivo en los principios de la mecánica de suelos, el sistema integra la respuesta poroelástica del medio. Asumiendo que la deformación superficial actúa como un proxy físico de la presión de poro, el estado tensional actual depende de la trayectoria histórica de esfuerzos y la memoria mecánica del sistema. Por ello, se introducen variables que evalúan la divergencia entre la respuesta elástica rápida local y la tendencia lenta regional. Esto permite reconstruir la historia de carga y descarga, identificando anomalías invisibles en el desplazamiento simple.

La validación espacial cruzada, aplicada en el sistema del Campo de Montiel (Guadiana, España), demuestra una alta robustez. El modelo global alcanzó índices de eficiencia que superan los umbrales operativos de la modelización hidrológica clásica, obteniendo un $R2 > 0.65$ en el espacio latente y un $KGE > 0.7$ en las predicciones desnormalizadas. Los análisis de modelos de explicabilidad (XAI) corroboran que las variables poroelásticas derivadas de DInSAR dominan la inferencia del modelo, validando la viabilidad técnica de generar datos piezométricos sintéticos precisos sin requerir nueva infraestructura física.

Muestreadores pasivos cerámicos para la monitorización de PFAS en aguas subterráneas y superficiales: aplicación en la cuenca del río Besòs

Giacomo Moro[1], Sergio Santana-Viera[1], Sandra Pérez[1], Silvia Lacorte[1]

[1]*Departamento de Química Ambiental, IDAEA-CSIC, c/Jordi Girona 18, 08034 Barcelona, España*

Resumen. Las sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS) son contaminantes orgánicos persistentes ampliamente detectados en sistemas acuáticos y, en particular, en acuíferos sometidos a presión antrópica. En medios aluviales altamente conectados con las aguas superficiales, la caracterización de la contaminación resulta compleja debido a las bajas concentraciones presentes y a la elevada variabilidad temporal de las concentraciones de los contaminantes presentes en el agua.

Los muestreadores pasivos cerámicos (Ceramic Passive Samplers, CPS) consisten en un cilindro cerámico poroso relleno con un sorbente. Durante su despliegue, se sumergen en el agua durante un periodo determinado (típicamente 2–3 semanas), a lo largo del cual los contaminantes atraviesan la membrana cerámica por difusión y quedan retenidos en el sorbente. Tras la recuperación del muestreador, los compuestos acumulados se extraen y analizan mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas, lo que permite estimar concentraciones medias integradas en el tiempo. Para convertir la masa acumulada en el muestreador en una concentración media en agua, es necesario determinar previamente tasas de muestreo específicas para cada compuesto. Por ello, en este trabajo se calibraron dispositivos CPS para siete PFAS en condiciones controladas de laboratorio durante 20 días, con el objetivo de determinar las tasas de muestreo correspondientes para cada uno de ellos.

Posteriormente, los CPS calibrados se depositaron durante 14 días en aguas subterráneas y superficiales dentro de la cuenca del río Besòs (Barcelona), un sistema hidrogeológico dominado por un acuífero aluvial estrechamente conectado con el río. Las concentraciones totales de PFAS oscilaron entre 19.7 y 250 ng/L y mostraron valores comparables entre las aguas del río y las subterráneas, lo que sugiere una fuerte conexión hidráulica y un intercambio activo entre ambos compartimentos. Estos niveles se sitúan dentro del rango

descrito para ríos europeos afectados por presiones urbanas e industriales y para distintos focos de contaminación por PFAS.

Los resultados ponen de manifiesto el potencial de los CPS como herramienta para la caracterización hidrogeoquímica de acuíferos contaminados, proporcionando concentraciones representativas a escala temporal y facilitando la evaluación de la interacción entre aguas superficiales y subterráneas en sistemas fluviales urbanizados.

Aplicación de cálculo interactivo para el análisis de datos hidroquímicos desarrollada mediante código abierto (R-Shiny)

Georgina Arnó[1], Ernest Orriols[2], Ignasi Herms[1], Sandra Armengol[1], Montse Colomer[1], Víctor Camps[1]

[1]*Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)*
[2]*Sin afiliación actual*

Resumen. En el marco de las nuevas tecnologías en hidrogeología, HidroGeoR-Shiny v1.0 se presenta como una herramienta digital de acceso libre desarrollada por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) para mejorar la comprensión de los recursos hídricos. Esta aplicación permite analizar y visualizar datos hidroquímicos de forma sencilla, reproducible y orientada tanto a la práctica profesional como a la investigación y responde a las necesidades de cualquier estudio hidrogeológico preliminar de analizar los datos hidroquímicos de base en un contexto donde el impacto del cambio climático y la presión sobre los acuíferos están en augmento.

HidroGeoR-Shiny es un cuadro de mando web interactivo basado en el lenguaje R y librerías como Shiny, ShinyDashboard y Leaflet, que proporciona una interfaz intuitiva para la visualización, análisis e interpretación de facies hidroquímicas. Desarrollada en el marco del proyecto europeo GSEU (Horizon Europe) la herramienta integra datos hidroquímicos para su visualización, análisis y posterior descarga, y permite cargar al usuario datos propios mediante una plantilla estandarizada de cualquier lugar del mundo.

La aplicación que considera los cationes y aniones mayoritarios en al agua, así como los principales parámetros físico-químicos, trata los datos como composicionales (CoDa), aplicando transformaciones log-ratio isométricas para realizar análisis estadísticamente robustos e incorpora la posibilidad de imputar valores no detectados o no disponibles en un conjunto de datos preseleccionado.

Entre sus funcionalidades clave destacan:

- La visualización SIG interactiva en un mapa con selección/filtrado espacial, cruzado con capas oficiales como la delimitación de Unidades Hidrogeológicas 1:50.000 (basadas en INSPIRE) y cartografía geológica del ICGC.

- EL análisis univariante y bivariante de los datos: diagramas de Piper y Schoeller interactivos para la clasificación de las facies del agua, gráficos tipo violín y gráficos de las ratios iónicas con las líneas estequiométricas teóricas más usados en hidrogeología.

- El análisis multivariante del grupo de datos seleccionado. Éstos se clasifican mediante un método soft de mezclas gaussianas donde es posible refinar manualmente los modelos aplicados. Posteriormente los resultados se exportan al mapa de visualización para su interpretación espacial.

- La generación de informes: la aplicación permite al usuario exportar en formato HTML el análisis de los datos realizados de principio a fin para guardar y reportar los resultados obtenidos.

- La aplicación incluye una guía de uso donde se muestra tanto la manera de usar la aplicación como la base matemática de los análisis que es capaz de realizar.

HidroGeoR-Shiny facilita el acceso a un análisis avanzado de datos hidroquímicos de base, siendo accesible para administraciones públicas, consultorías, universidades y centros de investigación que trabajan con grandes volúmenes de datos hidroquímicos y necesitan agilizar tareas de control, diagnóstico y seguimiento del estado de las masas de agua.

Origen de los manantiales termales de Alhama de Aragón y Jaraba. Modelización hidrogeológica del flujo regional del sistema geotermal, Cuenca de Almazán, Cordillera Ibérica, España.

Joaquín Sanz De Ojeda[1], Francisco Javier Elorza Tenreiro[1]

[1]*ETSI de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid.*

Palabras clave: Acuífero kárstico, Manantiales termales, Modelización numérica de flujos, Recursos de aguas subterráneas

Resumen. Los manantiales termales de Alhama de Aragón y Jaraba constituyen uno de los conjuntos termales más relevantes de España por su caudal total (1.200 l/s, de los cuales 711 l/s superan los 30 °C) y representan, además, uno de los principales enclaves balnearios del país. A pesar de su gran relevancia histórica, el origen y funcionamiento hidrogeológico de estos manantiales ha sido una gran incertidumbre, lo que ha motivado la necesidad de realizar un estudio detallado para su esclarecimiento. Con este objetivo, se ha aplicado una metodología multidisciplinar basada en la integración de diferentes fuentes de información geológica, hidrogeológica, hidroquímica e isotópica, junto con la realización del primer modelo numérico de flujo subterráneo aplicado a la zona de estudio, lo que ha permitido establecer de forma consistente el origen y funcionamiento del sistema geotermal que los alimenta. El estudio constituye un ejemplo representativo del comportamiento de sistemas termales de baja temperatura asociados a acuíferos carbonatados profundos en régimen natural.

El principal acuífero del sistema está constituido por calizas y dolomías del Cretácico Superior, con un espesor medio aproximado de 300 m y afectadas por una intensa karstificación prepaleógena, que confiere una porosidad y permeabilidad generalizada. Esta unidad se dispone estructuralmente en forma de sinclinorio de dirección NO-SE bajo los materiales del Paleógeno y Neógeno poco permeables de la Cuenca de Almazán. Aunque presenta cabalgamientos y discontinuidades tectónicas que pueden afectar localmente al flujo, mantiene una continuidad regional significativa. En su sector noreste, cerca de la localidad de Almazán, alcanza profundidades superiores a 3.000–4.000 m, configurando el foco térmico del sistema bajo condiciones de gradiente geotérmico normal.

La modelización numérica del flujo regional desarrollada mediante el modelo de diferencias finitas MODFLOW confirma que la recarga principal se produce en los afloramientos carbonatados cretácicos situados al norte de la Cuenca de Almazán. Desde allí, el flujo subterráneo sigue una trayectoria NO-SE, atravesando incluso la divisoria hidrográfica Duero-Ebro gracias al gradiente topográfico entre ambas cuencas. Este comportamiento pone de manifiesto la existencia de comunicación hidráulica subterránea entre dominios superficiales aparentemente independientes.

El modelo matemático reproduce coherentemente la evolución progresiva de temperatura, mineralización, edad del agua y caudal observada en los manantiales a lo largo del eje de flujo. Los datos isotópicos (tritio) indican edades crecientes conforme aumenta la profundidad y la distancia a la zona de recarga. Asimismo, la calibración del modelo numérico ha permitido confirmar la baja permeabilidad de los materiales del Paleógeno y Neógeno que se depositan sobre las calizas del cretácico superior, cuantificar la zona de recarga y evaluar el papel limitado de las fallas como conductos preferentes incapaces de explicar por sí solas los elevados caudales descargados.

El flujo profundo alcanza cotas máximas estimadas de hasta 3500-4.000 m, donde el calentamiento se produce exclusivamente por gradiente geotérmico normal. A lo largo del recorrido se generan descargas parciales en manantiales semitermales situados a cotas progresivamente más bajas (Almazul, Deza, San Roquillo, Embid de Ariza), donde se observa un incremento sistemático de temperatura y edad del agua. Finalmente, la mayor parte del flujo converge hacia el extremo sureste del sinclinorio, donde se localizan los manantiales principales de Alhama de Aragón y Jaraba, a unos 70 km de la zona de recarga. Estos presentan los mayores caudales, temperaturas más elevadas y edades que probablemente superan los 60 años.

El modelo matemático desarrollado constituye una herramienta potencial de apoyo a la gestión del acuífero, permitiendo delimitar perímetros de protección de los balnearios, así como identificar áreas vulnerables a la contaminación. Asimismo, facilita la evaluación de la respuesta del sistema ante cambios externos, como variaciones de recarga a causa del cambio climático o explotaciones de aguas subterráneas.

Papel de la zona no saturada y la presencia de distintas especies de plantas en la eliminación de contaminantes en un sistema de tratamiento Suelo-Acuífero

Lurdes Martinez-Landa[1], Sara Bagés Estopà[2], Miranda González Rodríguez[2], Joan Campos Ferrer[2], Tiphaine Chantal Anderbouhr[2], Jesús Carrera[3], Cristina Valhondo González[3]

[1]*Dpto. Ingeniería Civil y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Unidad Asociada: Grupo Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC), Barcelona.*
[2]*COMAIGUA*
[3]*Instituto Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Unidad Asociada: Grupo Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC), Barcelona*

Palabras clave: Recarga Gestionada, renaturalización, soluciones basadas en la naturaleza, zona no saturada

Resumen. Las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR) tratan cada día grandes volúmenes de agua que van a parar a los cauces de los ríos o mediante emisarios submarinos al mar, favoreciendo la expansión de los contaminantes que no se eliminan en las EDARs como contaminantes emergentes, genes de resistencia antibiótica, NH_4^+, NO_3^-, patógenos, entre otros. Estos volúmenes pueden ser renaturalizados aprovechando la capacidad regeneradora del suelo mediante sistemas de tratamiento suelo-acuífero (SAT). Los sistemas SAT han demostrado ser eficaces reduciendo dichos contaminantes mediante procesos de retención y biodegradación. Estos procesos se ven potenciados con la instalación de una barrera reactiva permeable en las balsas de infiltración. Este tipo de barreras esta generalmente formada por materia orgánica local (madera) que aporta carbono fácilmente degradable, además de sedimentos de la excavación de la balsa para dar resistencia, y una menor proporción de otros materiales sorbentes, como el biochar o la zeolita, que permiten retener a los contaminantes, y arcillas para retener a los compuestos catiónicos. Todo ello ayuda a mejorar la eliminación de los contaminantes por biodegradación, a partir de la instalación de colonias de microorganismos, adaptadas a las condiciones del sistema y del agua de recarga, asociadas en biofilms, dentro de los que se produce gran parte de la biodegradación.

El agua de recarga, distribuida por la superficie de las balsas de infiltración, tiene que poder infiltrarse y atravesar la zona no saturada hasta alcanzar el acuífero y mezclarse con las aguas subterráneas autóctonas. Para ello, es imprescindible conocer la naturaleza de las formaciones que atravesarán y sus características hidrogeológicas.

En el caso de la EDAR de Cambrils, se encuentra sobre depósitos formados por capas horizontales con gradaciones laterales de facies desde materiales más groseros a más finos, produciendo cambios de tamaño de grano en la horizontal, además de la superposición vertical de capas de diferentes composiciones, incluyendo finas capas de caliches, componiendo un escenario altamente heterogéneo. Estas capas menos permeables podrían haber sido un problema para la infiltración sino fuera por su escasa continuidad lateral lo que permite la infiltración escalonada buscando las zonas más permeables a su paso, produciendo zonas de distintas velocidades y favoreciendo la mezcla de aguas.

El sistema piloto está formado por dos balsas de infiltración de 400 m^2 de superficie cada una, en las que se realiza una recarga alterna de aproximadamente 400 m^3/día, equivalente al 3–4 % del volumen total tratado en la EDAR. En dicho sistema se dejó crecer la vegetación local en una de las balsas (B2) y se plantaron typhas (por su resistencia a condiciones de inundación) en la otra (B1), para evitar la colmatación superficial, aportar carbono orgánico al sistema y aumentar la diversidad microbiana. La recarga se realiza mediante la alternancia de ciclos húmedos y secos entre las dos balsas, para permitir la recuperación de la capacidad de infiltración durante el ciclo seco. Los puntos de muestreo más someros, a 7 m de profundidad, se ubican sobre una capa menos permeable por lo que muestrean el agua infiltrada antes de mezclarse con el agua autóctona ya que el nivel freático se encuentra alrededor de los 13 m de profundidad. El punto de control del sistema SAT se encuentra a 95 m aguas abajo de las balsas de infiltración.

En la barrera reactiva, primer metro de zona no saturada, se han instalado sensores de humedad, temperatura y oxígeno disuelto (OD), para ver la evolución temporal de estos parámetros a varias profundidades. Se observan diferencias en la penetración del OD dentro de las barreras reactivas en cada balsa. Cuando para la recarga (ciclo seco), el OD tarda unos minutos en penetrar la capa de arena en la B1, 2 días en llegar a 25 cm y 8 días hasta los 45 cm, mientras que en la B2 los tiempos aumentan a más del doble, para llegar a las mismas posiciones: 6 horas a 10 cm, 5.5 días a 25 cm y 17 días a los 45 cm. La diferencia fundamental entre estas dos balsas son las especies vegetales, mientras que en la B1 se plantaron typhas, en la B2 crece vegetación local formada por plantas más arbustivas y con raíces menos desarrolladas que las typhas, lo que puede justificar la diferencia en

la entrada del oxígeno entre balsas al parar la recarga. Durante el ciclo de recarga se consume enseguida el OD en las tres profundidades de los electrodos.

Esta diferencia en el comportamiento del oxígeno puede ser la causante de la diferente distribución del frente redox en la zona no saturada bajo las dos balsas de recarga. Bajo la B2 se alcanzan condiciones de manganeso reducción, con concentraciones medias de Mn^{2+} superiores a 2 ppm a 7 m de profundidad, que se reducen aproximadamente a la mitad con la profundidad (13 m). En cambio, a 7 m de profundidad bajo la B1, no se detecta la presencia de manganeso. Además, en los primeros 7 m de profundidad la B1 presenta mayores tasas de nitrificación y en la B2 de desnitrificación, no observándose diferencias entre balsas a 13 m de profundidad.

Los indicadores patógenos (E-Coli, Bacterófagos y Clostridium) se detectan a los 7 m de profundidad, con una reducción de 3-4 órdenes de magnitud, para E-Coli, 2 órdenes de magnitud para Clostridium, bajo ambas balsas con respecto a la infiltración, eliminando un poco mejor la B1 que la B2. En cualquier caso, se eliminan completamente al llegar al acuífero a los 13 m de profundidad.

Con todas estas observaciones concluimos que la zona no saturada es la parte del sistema SAT en la que se producen la mayor parte de las reacciones, la presencia de plantas en superficie es importante para ayudar a evitar la colmatación además de crear distintas condiciones redox debido a la modificación de la textura de los primeros centímetros del suelo permitiendo un comportamiento diferente en la entrada de oxígeno al sistema durante los ciclos secos. Esto nos puede ayudar a mejorar el diseño y operación de estos sistemas, ayudándonos a optimizar su funcionamiento.

Agradecimientos: AGAUR-SGR00609 y al programa Life EU (LIFE REMAR LIFE20 ENV/ES/000284)

PFAS en aguas subterráneas de Catalunya: hacia una solución destructiva y sostenible.

Ester Vilanova[1], Julia Tudela García[1], Paula Vignoni[1], Nick Duinslaeger[2], Johan Andrés Pasos[2], Jelena Radjenovic[2]

[1]*Amphos 21 Consulting SL*
[2]*Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA)*

Palabras clave: PFAS, contaminantes emergentes, contaminación, electroquímico

Resumen. La contaminación por sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) en aguas subterráneas constituye un reto emergente para la gestión del agua en toda Europa. En Catalunya, es especialmente relevante dado que el recurso subterráneo desempeña un papel estratégico en el abastecimiento, la actividad industrial y el mantenimiento de ecosistemas acuáticos. Su elevada persistencia, movilidad y resistencia a los tratamientos convencionales hacen necesaria la combinación de estrategias avanzadas de caracterización y tecnologías de eliminación verdaderamente destructivas.

En este contexto, el proyecto FOREVER-WATER se centra en la caracterización de PFAS en aguas subterráneas de Catalunya y en la demostración de una tecnología avanzada para su eliminación que incorpora la mejora de materiales. El estudio considera tanto compuestos de cadena larga como de cadena corta, así como distintas familias de PFAS no poliméricos y poliméricos, con el fin de identificar patrones de presencia, composición y comportamiento en matrices reales y establecer las condiciones más adecuadas de tratamiento. El enfoque analítico se complementa con la evaluación de parámetros hidroquímicos y de calidad del agua para definir las condiciones más adecuadas de tratamiento.

El proyecto plantea la aplicación de un sistema electroquímico basado en electrodos de esponjas de grafeno, capaz de degradar PFAS mediante la aplicación de corriente eléctrica, sin adición de reactivos químicos y evitando la mera transferencia del contaminante a otra fase. Para aguas subterráneas con bajas concentraciones iniciales de PFAS, el sistema podrá integrarse con una etapa de preconcentración. Entre las principales ventajas de esta tecnología destacan su operación a temperatura y presión ambiente, su carácter modular y escalable, su potencial para tratar PFAS de cadena corta y ultracorta, y la ausencia de subproductos clorados tóxicos asociados a otros procesos electroquímicos. Además, el uso de corriente intermitente y la optimización del reactor permiten

reducir el consumo energético, lo que refuerza su interés para aplicaciones descentralizadas y adaptadas a casos reales. En base a los ensayos de laboratorio se esperan reducciones de PFAS superiores al 90%.

El proyecto Forever Water está financiado Consejo Europeo de Innovación (EIC) y los socios del proyecto son el ICRA (coordinador), Fraunhofer IKTS, Amphos21 y CEA-Leti. Incluye la creación de una spin-off, GRAPHEC, para comercializar las innovaciones.

En conjunto, el proyecto pretende avanzar en el conocimiento de la contaminación por PFAS en aguas subterráneas de Catalunya y demostrar una alternativa de tratamiento más sostenible y robusta para su futura implementación.

Plan piloto para la implementación de recarga inducida en un sistema de represas ubicado en una microcuenca de la Sierra de las Cruces, México

Mario Alberto Hernández Hernández[1], Graciela Herrera Zamarrón[1], Nelly Ramírez Serrato[1], Alejandra Cortés Silva[1], Guillermo Hernández García[1]

[1]*Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica*

Palabras clave: Recarga de acuíferos, Comunidad originaria, Prueba piloto de recarga, Gestión integral del agua

Resumen. La comunidad de Santa Rosa Xochiac, localizada en la Sierra de las Cruces al oeste de la Ciudad de México (México), enfrenta una creciente escasez de agua debido al incremento en la demanda y la disminución en la recarga natural, fenómeno que afecta la descarga de sus manantiales. Este territorio, que se extiende por 343 hectáreas de bosque fundamentales para la regulación hídrica regional, ha basado históricamente su abastecimiento en dichos manantiales. Ante esta problemática, el Grupo de Investigación en Gestión Integral del Agua (GIGIAS) de la UNAM puso en marcha el proyecto "Restaurando Nuestros Manantiales: Santa Rosa Xochiac", cuyo objetivo es explorar estrategias de recarga inducida para aumentar la disponibilidad de agua en la zona.

Como parte de este esfuerzo, se plantea continuar con la implementación de una prueba piloto de recarga inducida mediante un sistema de represas en una microcuenca de la Sierra de las Cruces. El estudio se sustenta en tres componentes clave que a la fecha ya se han desarrollado en la zona: caracterización geofísica para identificar las áreas con mayor permeabilidad y potencial de infiltración; análisis hidrogeoquímicos e isotópicos para evaluar la calidad y procedencia del agua; y modelación hidrológica utilizando datos históricos sobre precipitación y caudal. Estos elementos son usados para determinar las ubicaciones óptimas donde se construirán estructuras que favorezcan la retención y filtración, maximizando así la recarga del acuífero.

La metodología contempla el análisis del funcionamiento actual de las represas de mampostería y gaviones existentes, considerando su capacidad de almacenamiento, infiltración y el manejo del caudal excedente que podría

aprovecharse en proyectos adicionales de recarga. Además, se incluye la participación activa de la comunidad y las autoridades locales, buscando garantizar una apropiada transferencia de conocimiento y promover intervenciones sostenibles.

Los resultados permitieron identificar estratos geológicos prioritarios para optimizar la recarga hídrica, clasificar el agua (química e isotópicamente) como agua bicarbonatada sódica de reciente infiltración, el aumento en la disponibilidad de agua en los manantiales, y el desarrollo de un modelo hidrológico replicable adaptable a otras microcuencas con condiciones similares.

Este proyecto no solo pretende aliviar la escasez de agua en Santa Rosa Xochiac, sino también mejorar su resiliencia frente a los efectos del cambio climático y contribuir a la recarga natural y el mantenimiento de un ecosistema vital para la Cuenca de México. El trabajo presenta los avances en el diseño de la prueba piloto, los retos técnicos y sociales enfrentados durante su desarrollo, y las lecciones obtenidas para gestionar el agua eficientemente en contextos vulnerables. Asimismo, pone de manifiesto el compromiso de la UNAM con investigaciones aplicadas y colaboraciones interdisciplinarias que buscan abordar responsablemente los desafíos hídricos en México.

Agradecimientos: Proyecto SECIHTI, financiado por el programa de Ciencia de Frontera 2023. Título: Soluciones basadas en la naturaleza a la contaminación del agua subterránea por especies de nitrógeno. Clave: CF-2023-G-904

Potencial del análisis isotópico (^{34}S y ^{18}O) del persulfato y sulfato para evaluar la activación del persulfato en tratamientos de oxidación avanzada

Albert Fernández-Lagunas[1], Sergio Gil-Villalba[1], Mònica Rosell[1], Albert Soler[1], Cristina Domènech[1], Jordi Palau[1]

[1]*Grup MAiMA. SGR Mineralogia Aplicada, Geoquímica i Hidrogeologia (MAGH). 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 i Franquès s/n, 08028, Barcelona, España*

Palabras clave: Contaminación, oxidación química avanzada, peroxidisulfato, isótopos estables

Resumen. El persulfato (anión peroxidisulfato, $S_2O_8^{-2}$, PS) es una especie oxidante comúnmente utilizada en la oxidación química in situ (ISCO, por sus siglas en inglés) de contaminantes orgánicos en aguas subterráneas. El tratamiento ISCO típicamente conlleva la introducción de una solución de elevada concentración de un oxidante fuerte a través de varios pozos de inyección. La reacción del PS con contaminantes comunes es relativamente lenta y, por lo tanto, para aumentar las tasas de degradación de los contaminantes, este se activa mediante su descomposición y formación de radicales altamente reactivos, como el anión radical sulfato (SO_4●-) y el radical hidroxilo (HO●). La activación del PS puede llevarse a cabo con distintas técnicas, como la termólisis, la hidrólisis alcalina o la reducción mediante metales de transición y compuestos orgánicos.

En este contexto, la evaluación de la activación del PS proporcionaría información valiosa para optimizar su uso en tratamientos ISCO. Sin embargo, las concentraciones de PS en aguas subterráneas pueden verse afectadas por varios procesos como la dilución, la dispersión y la sorción. De manera similar, las concentraciones de sulfato producido durante la activación del PS también pueden verse afectadas por procesos de transporte en aguas subterráneas y/o por reacciones posteriores (p.ej. sulfato reducción). Por tanto, es necesario el uso de datos complementarios para mejorar la evaluación de la activación del PS.

El objetivo de este estudio es evaluar el potencial del análisis isotópico ($^{34}S/^{32}S$, $^{18}O/^{16}O$) del PS y del sulfato generado para: i) cuantificar el grado de activación

del PS mediante diferentes mecanismos de activación y ii) identificar los procesos que controlan su activación en campo.

Con este fin, se llevó a cabo una serie de experimentos a escala de laboratorio para investigar el fraccionamiento isotópico dual (S, O) del PS durante la activación por diferentes técnicas: activación alcalina, térmica y reducción con ácido ascórbico. Para el análisis isotópico de PS y sulfato, las muestras se analizaron mediante EA-IRMS ($^{34}S/^{32}S$) y EA-TC-IRMS ($^{18}O/^{16}O$). Los resultados preliminares mostraron un fraccionamiento isotópico significativo de S y O tanto en el PS remanente como en el sulfato producido. La composición isotópica del sulfato producido mostró la tendencia de Rayleigh esperada para el producto acumulado. A su vez, la combinación del fraccionamiento de S y O del PS mostró diferentes tendencias para los diferentes mecanismos de activación estudiados. Estos resultados ilustran el potencial de los análisis isotópicos de PS y sulfato generado para monitorizar la activación del PS en lugares contaminados.

Agradecimientos: Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto REMECLOR (PDC2021-120861-C21), financiado por el Gobierno de España (MICIU/AEI/10.13039/501100011033) y por la Unión Europea (NextGenerationEU/PRTR). También recibió financiación del proyecto ADVANCE4WATER-ISOTRACE (PID2022-139911OB-C4-01), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE, y el apoyo del Grupo de Investigación Consolidado (2021SGR00308), financiado por la AGAUR (Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca, Govern de Catalunya). Se agradece al IdRA (Institut de Recerca de l'Aigua), a los CCiT-UB (Centres Científics i Tecnològics de la Universitat de Barcelona) y a Eduard Monera su contribución a este trabajo, y a la AGAUR el contrato predoctoral de Albert Fernández-Lagunas (2022 FI_B 00498).

Predicción de la sensibilidad de los acuíferos costeros a la subida del nivel del mar mediante ERT time-lapse

Eduard Madaula Izquierdo[1], Carles Roqué Pau[3], Anna Menció Domingo[3], Mario Zarroca Hernández[2]

[1]*Universitat Autònoma de Barcelona. Universitat de Girona.*
[2]*Universitat Autònoma de Barcelona*
[3]*Universitat de Girona*

Palabras clave: Dinámica mareal subterránea, Islas Cíes (NO de España), Intercambio mar–acuífero, Monitoreo geofísico

Resumen. Las dinámicas litorales de las aguas subterráneas son clave para comprender los flujos de salinidad, las descargas de nutrientes hacia el mar y, por tanto, el funcionamiento de los ecosistemas costeros, actualmente amenazados por la presión antrópica y el cambio climático. Este trabajo analiza cómo la marea controla la intrusión y recirculación de agua marina y la descarga de agua dulce en el sistema costero de Praia das Figueiras (Islas Cíes, NO de España), formado por arenas cuaternarias de playa y un basamento granítico fracturado, con un rango mareal de ~3 m. Para ello se aplicó Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) multiperfil y time-lapse con los objetivos de: (i) cuantificar la variabilidad mareal de la resistividad como proxy de la salinidad del agua de poro, (ii) identificar vías preferentes de intercambio mar-acuífero que controlan la respuesta mareal, y (iii) evaluar la vulnerabilidad a la intrusión salina y su monitorización, así como su relevancia ante la subida del nivel del mar.

Se realizaron tres perfiles ERT en septiembre de 2021: E1 (320 m) y E2 (160 m, mayor resolución) paralelos a la costa (a ~12 m de la línea de costa en pleamar), y E3 (80 m), perpendicular a la línea de costa. El perfil E2 se repitió seis veces a lo largo de un ciclo mareal, mientras que E1 y E3 se midieron dos veces en distintos estados de marea. Los datos se invirtieron con EarthImager 2D (RMS ~10%).

Los resultados muestran que la señal mareal se concentra en la franja próxima a la costa: variaciones de ~1 m del nivel del mar generan cambios de resistividad detectables hasta ~50 m tierra adentro, difiriendo claramente entre el acuífero arenoso y el granítico. La cobertura arenosa (3–6 m) presenta resistividades bajas, especialmente en la zona saturada y cercana al mar (medianas 12,7–17,9 Ω·m en

E2), asociadas a saturación salina y a una elevada conectividad hidráulica con el mar, pero relativamente estables (variaciones medianas de hasta 23,6%). En contraste, el granito fracturado próximo a la costa muestra una variabilidad mucho mayor (medianas 16,4–37,2 Ω·m en E2 y variaciones entre perfiles de hasta ~64,8%), atribuida a la circulación de agua salina por redes de fracturas con alta conectividad hidráulica. Además, los extremos de resistividad aparecen retardados respecto a pleamar/bajamar, lo que se interpreta como una respuesta subsuperficial no instantánea controlada por la propagación de la señal hidráulica y por la evolución temporal de la mezcla y recirculación agua dulce–agua marina. La respuesta es más rápida en el granito que en las arenas, coherente con vías preferentes de flujo en fracturas.

En conjunto, el estudio evidencia el potencial de la ERT time-lapse para monitorizar la dinámica mareal de salinidad en acuíferos costeros intergranulares y fracturados, aportando información relevante para la gestión y la evaluación de vulnerabilidad frente a intrusión marina. Estos resultados ayudan a comprender procesos que condicionan el intercambio de agua mar-acuífero y ofrecen un marco para anticipar cambios en la salinización bajo escenarios de subida del nivel del mar.

Agradecimientos: Este estudio se ha realizado en el marco del proyecto Diversidad microbiana y biogeoquímica oculta en las aguas subterráneas costeras de los parques nacionales marítimos (SPIP2020-02595), financiado por el programa Proyectos de Investigación Científica en la Red de Parques Nacionales 2020 del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

La participación en el congreso fue financiada por el proyecto TREASURE (PCI2024-153436), en el marco de la Joint Transnational Call of the Water4All European Partnership 2022, cofinanciado por la Comisión Europea y la Agencia Estatal de Investigación (AEI), dentro de la convocatoria Gestión de los recursos hídricos: resiliencia, adaptación y mitigación de eventos hidroclimáticos extremos e instrumentos de gestión . También ha contado con el apoyo del proyecto AquiPondSys (PID2023-147186OB-I00), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por "ERDF+ A way of making Europe". El proyecto AquiPondSys también ha financiado el contrato de E. Madaula (PAS-PR-171/24).

Predicción de transmisividad y respuesta hidráulica en roca cristalina fracturada mediante aprendizaje automático

Patricio Hernández-Parra[1], Vanessa A. Godoy[1], Rafael Magnabosco[1], Pedro Assunção[2], J. Jaime Gómez-Hernández[1]

[1]*Instituto de Ingenieria del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València*
[2]*Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais*

Palabras clave: Fracturas conductivas, Ensayos de bombeo, Caracterización hidráulica

Resumen. El flujo de agua subterránea en rocas cristalinas fracturadas está controlado por un número reducido de fracturas conductivas en una matriz de baja permeabilidad, lo que genera una fuerte heterogeneidad que dificulta tanto la caracterización del medio como la predicción de su comportamiento hidráulico. Identificar qué fracturas son hidráulicamente relevantes y predecir su respuesta al estrés hidráulico constituye uno de los objetivos centrales del modelado de redes de fracturas discretas y representa una tarea de elevado coste interpretativo en la práctica.

Este trabajo desarrolla dos modelos de aprendizaje automático aplicados a datos de caracterización de múltiples sondeos profundos. La base de datos integra registros de fracturas con descriptores geométricos y geomecánicos (orientación de imagen y testigo, tipo, rugosidad, relleno, índices JR/JA, zona hidrogeológica), mediciones de transmisividad por prueba de flujo puntual y datos de caudal, carga hidráulica y presión motriz de una prueba de bombeo de larga duración.

El primer modelo predice propiedades hidráulicas de fracturas a escala de intervalo mediante un clasificador binario (fractura conductiva frente a no conductiva) y un regresor de transmisividad logarítmica. El segundo modelo predice la magnitud del flujo conectado en intervalos observadores durante la prueba de bombeo. En ambos casos se emplean random forest, gradient boosting y regresión regularizada como referencia lineal. La validación se realiza mediante validación cruzada con bloqueo por sondeo, garantizando que los sondeos de evaluación no participen en el entrenamiento.

El clasificador de conductividad muestra una capacidad de discriminación elevada entre fracturas conductivas y no conductivas. El regresor de transmisividad obtiene resultados modestos, consistentes con la alta variabilidad natural del medio fracturado. El modelo de flujo conectado generaliza bien en la mayoría de los pozos observadores, con variabilidad entre pozos coherente con la heterogeneidad hidráulica del medio.

Los resultados indican que el aprendizaje automático con validación espacialmente estricta puede identificar fracturas conductivas y predecir la magnitud de la respuesta hidráulica a ensayos de bombeo, con potencial para reducir la carga interpretativa del flujo de trabajo de caracterización en medios fracturados.

Agradecimientos: Patricio Hernández-Parra agradece el apoyo financiero de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Chile, a través de Becas Chile N.º 72230124 (Beca de Doctorado en el Extranjero, Convocatoria 2023).

Presencia de contaminantes emergentes en la franja litoral y acuífero del Mar Menor

Nonito Ros-Berja[1], Natalia Sáez[1], Valentí Rodellas[3], Marisol Manzano[4], Josep Mas-Pla[2], Meritxell Gros[1]

[1]*Institut Català de Recerca de l'Aigua*
[2]*Institut Català de Recerca de l'Aigua y Universitat de Girona*
[3]*Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona.*
[4]*Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.*

Palabras clave: Acuífero, Contaminantes emergentes, Aguas subterráneas, Calidad del agua

Resumen. En regiones semiáridas, la disponibilidad de agua representa un reto creciente para satisfacer las demandas humanas, agrícolas y ambientales, incrementando la dependencia de los recursos hídricos subterráneos. En este contexto, la presión antrópica derivada de la agricultura intensiva, el desarrollo urbano y las descargas de aguas residuales puede favorecer la entrada de contaminantes emergentes (CEs) en los acuíferos, comprometiendo la calidad de las aguas subterráneas. Entre estos compuestos se incluyen productos farmacéuticos, pesticidas y compuestos industriales, que han despertado un creciente interés debido a su amplia presencia en el medio acuático y al todavía limitado conocimiento sobre su comportamiento, transporte y persistencia en sistemas subterráneos. Paralelamente, la política europea del agua se encuentra en proceso de actualización, incluyendo el desarrollo de una futura Groundwater Watch List y la revisión de la Directiva Marco del Agua y la Directiva de Aguas Subterráneas, que prevé introducir nuevos estándares de calidad para determinados CEs. Esta problemática resulta especialmente relevante en sistemas costeros semiáridos, donde la conexión entre acuíferos y ecosistemas litorales puede favorecer la transferencia de estos compuestos hacia zonas ambientalmente sensibles.

La laguna del Mar Menor (SE España), una de las mayores lagunas litorales de Europa y un ecosistema altamente vulnerable a las presiones derivadas del uso intensivo del territorio, forma junto con el acuífero del Campo de Cartagena un sistema hidrogeológico costero estrechamente conectado. En este sistema, el flujo de agua subterránea hacia la franja litoral puede favorecer la transferencia de contaminantes desde el Campo de Cartagena hacia la laguna. En consecuencia,

las aguas subterráneas pueden actuar como una vía relevante para el transporte de CEs hacia el ecosistema lagunar. En este contexto, el presente estudio evalúa la ocurrencia y distribución de CEs en aguas subterráneas del sistema acuífero del Campo de Cartagena, con el fin de identificar patrones espaciales de contaminación y valorar su posible relación con la dinámica hidrogeológica del sistema acuífero-laguna.

El muestreo se llevó a cabo en tres zonas del sistema acuífero: El Carmolí, La Hita y Los Alcázares, durante diferentes periodos comprendidos entre agosto de 2024 y febrero de 2026. En El Carmolí (agosto 2024–octubre 2025) se analizaron 9 pozos, realizándose la toma de muestras a dos niveles de captación (10 y 30 m de profundidad) en cada punto. En La Hita (octubre 2024–octubre 2025) se muestrearon 6 pozos situados en el sector más próximo a la costa. Finalmente, en Los Alcázares (abril 2025–febrero 2026) se analizaron 4 pozos, con muestreo a un único nivel de captación. La determinación de 105 contaminantes emergentes se llevó a cabo mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS) utilizando un sistema QTRAP 5500 mediante un método dirigido (target) para su cuantificación. El estudio incluyó 45 productos farmacéuticos y 9 productos de transformación asociados, 32 disruptores endocrinos (EDCs) y 19 pesticidas.

De los 105 CEs analizados, se detectaron 19 compuestos en El Carmolí y La Hita, y 16 compuestos en Los Alcázares. En El Carmolí, se detectaron 9 PhACs (0.42–171 ng/L), 3 pesticidas (2.9–222.0 ng/L) y 7 EDCs (0.5–274.5 ng/L). En La Hita, se identificaron 6 PhACs (0.57–49.30 ng/L), 3 pesticidas (5.43–145.50 ng/L) y 10 EDCs (0.99–384.5 ng/L). En Los Alcázares, se detectaron 5 PhACs (0.99–34.35 ng/L), 3 pesticidas (0.25–560 ng/L) y 8 EDCs (0.15–543.50 ng/L).

En conjunto, los resultados evidencian diferencias espaciales claras en los perfiles de contaminación entre las zonas estudiadas. Estas diferencias podrían estar condicionadas no solo por la distribución de las fuentes contaminantes, sino también por la dirección del flujo subterráneo, la conectividad hidráulica con la franja litoral y los procesos de transporte dentro del acuífero. Mientras El Carmolí presenta un perfil relativamente equilibrado entre las distintas familias de compuestos, La Hita muestra una mayor presencia de EDCs, con concentraciones superiores a las registradas en El Carmolí. Por su parte, Los Alcázares presenta una menor diversidad de CEs, pero las concentraciones más elevadas, particularmente para pesticidas y EDCs. La detección recurrente de CEs en sectores próximos a la laguna refuerza la hipótesis de que las aguas subterráneas pueden actuar como una vía relevante de transferencia de contaminantes hacia el Mar Menor. Estos resultados aportan información clave para la evaluación de

la calidad química del acuífero y para la gestión integrada de la interacción acuífero-laguna en un contexto de elevada presión antrópica.

Agradecimientos: Financiación: Proyectos OPAL (AEI PID2019-110311RB-C22), REMÉDIATE (AEI TED2021-131005B-C32, TED2021-131005B-C33) y EC-FATE (AEI PID2022-139911OB-C42).

Presencia de fármacos y antibióticos en las aguas subterráneas de Cataluña

Meritxell Gros[1], Natalia Sáez[1], Nonito Ros-Berja[1], Teresa Garrido[2], Marta Expósito[2], Josep Fraile[2], Josep Mas-Pla[3]

[1]Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA)
[2]Agencia Catalana de l'Aigua (ACA)
[3]Universitat de Girona (UdG)

Palabras clave: Fármacos, Antibióticos, Agua subterránea, Análisis de riesgo

Resumen. La presencia de fármacos y antibióticos en aguas subterráneas es un indicador relevante de la presión antrópica sobre los recursos hídricos y de la conectividad entre los sistemas de saneamiento, las actividades agroganaderas y los acuíferos. Este trabajo analiza la distribución, los posibles mecanismos de incorporación y el riesgo asociado a estos contaminantes emergentes en las masas de agua subterránea de Cataluña, a partir de datos procedentes de redes oficiales de control.

Entre los compuestos más frecuentes destacan carbamazepina, sulfametoxazol, ácido amidotrizoico y primidona, junto con sulfonamidas de uso veterinario. Los fármacos aparecen en más del 25% de los puntos de muestreo, y los antibióticos en aproximadamente un tercio de las muestras analizadas. Las concentraciones registradas presentan una elevada variabilidad espacial, reflejo de la diversidad de fuentes emisoras y de la influencia de las características hidrogeológicas de cada acuífero, con valores medios de 7-184 ng/L en fármacos (máximo ~1 µg/L para el ácido amidotrizoico) y de 2-40 ng/L en antibióticos, salvo la doxiciclina, que alcanza 1,5 µg/L de forma puntual.

En áreas urbanas y periurbanas, la presencia de fármacos se asocia principalmente al vertido de aguas residuales tratadas en cauces superficiales, que actúan como vectores de transferencia hacia los acuíferos a través de procesos de infiltración inducidos por la interacción río-acuífero. Este patrón es especialmente evidente en acuíferos aluviales de elevada permeabilidad, donde la recarga desde ríos con aportes de efluentes depurados favorece la entrada continua de compuestos farmacéuticos. Asimismo, en determinadas zonas agrícolas, el uso de agua regenerada para riego puede contribuir a la recarga difusa de estos contaminantes.

Por su parte, los antibióticos muestran una relación más directa con la actividad ganadera intensiva. Las concentraciones más elevadas se localizan en acuíferos fluvio-deltaicos y aluviales situados en regiones con alta densidad de explotaciones, donde la aplicación de purines y estiércoles constituye una fuente relevante de entrada al subsuelo. En sistemas semiconfinados, la detección de antibióticos sugiere procesos de infiltración preferencial a través de discontinuidades en las capas de baja permeabilidad. En contraste, las masas de agua desarrolladas sobre materiales sedimentarios compactos o de baja transmisividad presentan menor incidencia de detecciones.

El análisis estadístico no evidencia correlaciones consistentes entre compuestos de un mismo grupo terapéutico, lo que apunta a dinámicas de emisión diferenciadas y a comportamientos específicos en función de su persistencia y afinidad con el medio. Los altos coeficientes de variación observados confirman una distribución espacial heterogénea, condicionada por factores hidrogeológicos y por la intensidad de las presiones antrópicas locales.

Desde la perspectiva del riesgo ambiental, la mayoría de las masas de agua presentan valores de cociente de riesgo (HQ) en rangos bajos a moderados. Solo en casos puntuales determinados compuestos, como el ácido amidotrizoico o el sulfametoxazol, superan el umbral HQ>1. En términos de salud humana, las estimaciones indican niveles generalmente inferiores a los de preocupación. Asimismo, el riesgo potencial asociado al desarrollo de resistencias antibióticas se considera globalmente bajo, con la mayor parte de las masas de agua situándose por debajo de umbrales indicativos de impacto significativo.

En conjunto, los resultados evidencian que, si bien los niveles detectados no son mayoritariamente elevados, la presencia recurrente de fármacos y antibióticos confirma la vulnerabilidad de determinados acuíferos frente a presiones urbanas y agroganaderas. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de mantener programas de seguimiento continuado e incorporar estrategias preventivas orientadas a reducir la entrada de estos compuestos en el ciclo hidrológico subterráneo.

Agradecimientos: Agència Catalana de l'Aigua (Contrato: CTN2200303); Proyecto EC-FATE (PID2022-139911OB-C42), financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Presencia de microplásticos en aguas superficiales y subterráneas de la Laguna de Gallocanta (SW Aragón, España)

Luigi Mastrodonato[1], Albert Contreras-Llin[2], Silvia Díaz-Cruz[2], Anna Jurado[1], Estanislao Pujades[1], Jesús Causapé[3], Miguel Ángel Marazuela[1]

[1]*Departamento de Geociencias, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Jordi Girona 18–26, 08034 Barcelona, España*
[2]*Departamento de Química Ambiental, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Jordi Girona 18–26, 08034 Barcelona, España*
[3]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Av. De Montañana 1005, 50059 Zaragoza, España*

Palabras clave: Microplásticos, Contaminación, Cuenca endorreica, Agua residual

Resumen. Los microplásticos constituyen una amenaza emergente para ecosistemas acuáticos debido a su persistencia, movilidad y efectos potenciales sobre la fauna y la calidad del agua. Pese a su importancia, existe un escaso conocimiento sobre su presencia en lagos salinos endorreicos, donde los procesos de evapoconcentración y la ausencia de drenaje externo podrían favorecer su acumulación. Este estudio explora por primera vez la ocurrencia y distribución de microplásticos en la cuenca de la Laguna de Gallocanta, un lago terminal protegido bajo la Convención de Ramsar. Se realizaron muestreos en 14 puntos estratégicos, abarcando aguas superficiales y subterráneas, efluentes de depuradoras, vertidos sin tratar y la propia laguna, durante septiembre y octubre de 2024. Las muestras fueron procesadas mediante digestión química de la materia orgánica con peróxido de hidrógeno, separación por densidad con cloruro de zinc, filtración, y análisis por microscopía óptica y espectroscopía FTIR, con el fin de caracterizar la abundancia, tamaño, forma y composición polimérica de los microplásticos presentes. Este estudio permitirá identificar patrones espaciales y posibles fuentes de contaminación, aportando información inédita sobre el papel de los lagos endorreicos como sumideros de microplásticos. Los resultados esperados proporcionarán una base sólida para futuras investigaciones, estrategias de monitoreo y acciones de conservación, integrando estos hallazgos

con estudios previos sobre contaminantes emergentes químicos en la misma cuenca. Con ello, se contribuye a comprender mejor la interacción entre contaminantes plásticos y químicos en ecosistemas semiáridos sensibles, reforzando la necesidad de gestión ambiental informada y específica para estos sistemas únicos.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de los proyectos PACTOSAL (PID2024-160795OA-I00; IP: Miguel Ángel Marazuela) y AGROSOS (PID2023-147588OB-I00; IP: Jesús Causapé).

Presencia de PFAS en las aguas subterráneas de Cataluña

Meritxell Gros[1], Natalia Sáez[1], Nonito Ros-Berja[1], Teresa Garrido[2], Marta Expósito[2], Josep Fraile[2], Josep Mas-Pla[3]

[1]Instituto Catalán de Investigación del Agua (ICRA)
[2]Agencia Catalana del Agua (ACA)
[3]Universitat de Girona (UdG)

Palabras clave: PFAS, Agua subterránea, Evaluación del riesgo, Exposición ambiental y humana

Resumen. Las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) representan una preocupación ambiental creciente debido a su elevada persistencia, movilidad y potencial toxicidad. Su amplio uso industrial y su persistencia favorece su acumulación en el medio y su transporte hacia las aguas subterráneas. En regiones con fuerte presión urbana e industrial, los acuíferos pueden actuar como receptores finales de estos compuestos, comprometiendo los ecosistemas dependientes y los usos de abastecimiento. Este estudio evalúa la distribución, identifica las posibles fuentes y analiza el riesgo ambiental y sanitario asociado a los PFAS en las masas de agua subterránea de Cataluña, con el objetivo de aportar evidencias para su gestión. Se analizaron datos procedentes de programas oficiales de monitorización, y se incluyeron compuestos representativos como los ácidos perfluorocarboxílicos (ácido perfluoropentanoico PFPeA y el ácido perfluorooctanoico PFOA) y los ácidos perfluorosulfónicos (sulfonato de perfluorooctano PFOS). El análisis incluyó frecuencias de detección, estadística descriptiva y evaluación espacial en función del contexto hidrogeológico (tipología de acuífero, permeabilidad y presión antrópica). Se calcularon cocientes de riesgo (HQ) para estimar el riesgo ambiental y para la salud humana.

Los PFAS presentan una elevada ubicuidad, con frecuencias de detección superiores al 85% en los puntos de muestreo, confirmando su presencia generalizada en el medio subterráneo. Las concentraciones muestran alta heterogeneidad espacial, con coeficientes de variación elevados. Esta variedad y la ausencia de correlaciones entre compuestos sugieren la coexistencia de múltiples fuentes y comportamientos diferenciados. Las mayores concentraciones se localizan en acuíferos aluviales asociados a cuencas con

intensa actividad urbana e industrial, donde la interacción río-acuífero y la infiltración de aguas residuales tratadas emergen como mecanismos clave de entrada. En medios porosos de alta permeabilidad, los PFAS presentan notable capacidad de migración y dispersión, mientras que en materiales de baja permeabilidad la incidencia es menor. No se observaron correlaciones significativas entre los compuestos analizados, lo que sugiere fuentes múltiples o comportamientos diferenciados según sus propiedades fisicoquímicas.

En términos de riesgo ambiental, aproximadamente un 12% de las masas de agua subterránea presentan HQ>1, indicando riesgo potencial para los ecosistemas dependientes. El PFOA y el PFOS son los principales contribuyentes al riesgo ambiental. Un 13,1% adicional muestra riesgo moderado (0,1<HQ≤1). Respecto al riesgo para la salud humana, un 13% de los escenarios supera niveles de preocupación (HQ>10), especialmente en puntos con concentraciones totales superiores a 100 ng/L, situados en demarcaciones con elevada densidad poblacional e industrial.

En conjunto, los resultados evidencian que la contaminación por PFAS en aguas subterráneas está fuertemente controlada por factores hidrogeológicos y por fuentes antrópicas difusas, y ponen de manifiesto un riesgo no despreciable en determinadas zonas. Esto subraya la necesidad de integrar criterios hidrogeológicos en las estrategias de monitorización y de reforzar las medidas de control en origen para mitigar su impacto ambiental y sanitario.

Agradecimientos: Agència Catalana de l'Aigua (Contrato: CTN2200303); Proyecto EC-FATE (PID2022-139911OB-C42), financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. M. Gros agradece su contrato Ramón y Cajal (RYC2020-030324-I), financiado por MCIN/AEI (10.13039/501100011033) y por el Fondo Social Europeo (ESF Investing in your future).

Presencia y acumulación de contaminantes emergentes en cuencas endorreicas: la Laguna de Gallocanta (SW Aragón, España)

Miguel Angel Marazuela Calvo[1], Juan Cruz Carrizo[2], Silvia Díaz-Cruz[2], Anna Jurado[1], Estanislao Pujades[1], Cristina Pérez-Bielsa[3], Jesús Causapé[3]

[1]*Departamento de Geociencias, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Jordi Girona 18–26, 08034 Barcelona, España*
[2]*Departamento de Química Ambiental, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Jordi Girona 18–26, 08034 Barcelona, España*
[3]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Av. De Montañana 1005, 50059 Zaragoza, España*

Palabras clave: Contaminantes de preocupación emergente (CECs), Cuenca endorreica, Contaminación, Agua residual

Resumen. Las cuencas endorreicas con lagos terminales son especialmente vulnerables a la contaminación debido a su carácter hidrológicamente cerrado, que favorece la retención y acumulación de compuestos químicos. Este estudio analiza la presencia, origen y destino ambiental de contaminantes de preocupación emergente (CECs) en la cuenca endorreica de la Laguna de Gallocanta, uno de los mayores lagos salinos de Europa y espacio protegido bajo la Convención de Ramsar. Entre septiembre y octubre de 2024 se realizó una campaña de muestreo en 24 puntos estratégicos, que incluyeron aguas superficiales, subterráneas, residuales tratadas y sin tratar, así como la propia laguna. Las mezclas complejas de CECs en los distintos compartimentos se caracterizaron mediante non-target screening y análisis semicuantitativos utilizando LC-HRMS. Los análisis multivariantes permitieron identificar huellas químicas asociadas a diversas fuentes de contaminación: efluentes de depuradoras, vertidos de aguas residuales sin tratamiento, escorrentía agrícola y aportes de cursos fluviales naturales. Los efluentes de depuradoras con tratamiento primario mostraron eliminación variable de CECs; algunos fármacos se atenuaron, mientras que otros persistieron o incluso aumentaron, evidenciando las limitaciones del tratamiento básico en contextos rurales. Los

lagos terminales mostraron las mayores cargas acumuladas, reflejando su papel como integradores de las presiones aguas arriba. Destaca el repelente de insectos N,N-diethyl-meta-toluamide, que alcanzó concentraciones superiores a 5.000 ng/L en la laguna, muy por encima de las registradas en los aportes periféricos (<1.000 ng/L). Este patrón refleja la combinación de alta estabilidad química del DEET y, posiblemente, procesos de evapoconcentración bajo condiciones semiáridas, provocando acumulaciones desproporcionadas incluso con entradas moderadas. En conjunto, los resultados muestran que las cuencas endorreicas actúan como focos de acumulación de CECs persistentes y subrayan la necesidad de considerar el carácter cerrado del sistema, los procesos internos del lago y la gestión de aguas residuales al evaluar riesgos de contaminación y diseñar estrategias de mitigación.

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de los proyectos PACTOSAL (PID2024-160795OA-I00; IP: Miguel Ángel Marazuela) y AGROSOS (PID2023-147588OB-I00; IP: Jesús Causapé).

Presencia y distribución de contaminantes emergentes (CECs) en acuíferos volcánicos del Valle Central (Costa Rica)

Helga Madrigal-Solís[1], Marta Inés Llamas-Dios[2], Pablo Jiménez-Gavilán[2], Clemens Ruepert[1], Alicia Fonseca Sánchez[1], Luis Quesada-Hernández[1], Hazel Calderón-Sánchez[1], Iñaki Vadillo Pérez[2]

[1]*Universidad Nacional de Costa Rica*
[2]*Universidad de Málaga*

Palabras clave: Valle Central (Costa Rica), Acuífero volcánico, Contaminantes emergentes, Hidrogeología urbana

Resumen. El Valle Central de Costa Rica (3.250 km²) concentra hasta el 70 % de la población del país (3,5 millones de habitantes). Las aglomeraciones urbanas más grandes se concentran en la parte baja del Valle, ocupando el 60 % de ese territorio. La gestión de las aguas residuales se realiza principalmente mediante fosas sépticas, lo que hace que los acuíferos sean muy vulnerables a la contaminación procedente de la actividad urbana; y a los residuos agrícolas y ganaderos en la parte alta.

En noviembre de 2022 se llevó a cabo una campaña de muestreo de aguas subterráneas (24 muestras), que incluyó análisis hidroquímicos generales, isótopos estables y la detección de 134 contaminantes de preocupación emergente. Los resultados mostraron concentraciones elevadas de nitratos en zonas urbanas y agrícolas/urbanas, superando en varias ocasiones los 50 mg/L. Los contenidos de nitratos y los patrones espaciales similares en las zonas agrícolas y urbanas del acuífero poco profundo de Barva sugieren contribuciones comparables de los fertilizantes nitrogenados y las aguas residuales urbanas, a pesar del aumento gradual de la cobertura urbana y la reducción de las zonas agrícolas. A pesar de los resultados inorgánicos, se han detectado 47 compuestos de interés emergente: 2 edulcorantes artificiales, 9 drogas de abuso, 1 betabloqueante, 13 antibióticos y 22 otros compuestos farmacéuticos. Se han detectado dieciocho compuestos en todos los puntos de la red de monitoreo (sulfato de etilo, cotinina, nicotina, cocaína, benzoilecgonina, trimetoprim, sulfanilamida, roxitromicina, claritromicina, tilosina, carbamazepina, cafeína,

gemfibrozilo, fenofibrato, pindolol, ácido mefenámico, diclofenaco y fenilbutazona).

Procesos de flujo y transporte en la zona no saturada: Limitaciones de los modelos y experimentos bidimensionales en un mundo tridimensional

Guillem Solé Marí[1], Saif Farhat[2], Diogo Bolster[2]

[1]*Universitat Politècnica de Catalunya*
[2]*University of Notre Dame*

Palabras clave: flujo y transporte, zona no saturada, dimensionalidad, escala de poro

Resumen. La descripción de los procesos de flujo y transporte en la zona no saturada constituye un desafío clave en hidrogeología, debido a la interacción entre múltiples fases, la complejidad geométrica del medio poroso y la fuerte heterogeneidad espacial. Con frecuencia, estos procesos se estudian mediante modelos y experimentos bidimensionales (2D), cuya simplicidad permite un mayor control y resolución, pero introduce limitaciones en la representación de sistemas tridimensionales (3D).

En esta contribución se presentan resultados recientes de simulaciones numéricas tridimensionales a escala de poro, que permiten analizar de forma directa el impacto de la dimensionalidad en condiciones parcialmente saturadas. Mediante la comparación sistemática con configuraciones bidimensionales equivalentes, se evidencia que la dimensionalidad condiciona de forma determinante propiedades fundamentales como la conectividad de fases, la organización de los caminos de flujo, la aparición de regiones de baja velocidad y la estructura de los campos de transporte. Estas diferencias estructurales se traducen en comportamientos distintos en términos de mezcla, dispersión y reactividad, incluyendo la aparición de respuestas no monótonas con la saturación en 3D que no se observan en 2D.

Estas discrepancias ponen de relieve que tanto los modelos como los experimentos en 2D pueden inducir interpretaciones no representativas del comportamiento real de los procesos en el subsuelo, especialmente bajo condiciones no saturadas. En consecuencia, resulta necesario incorporar de forma

explícita los efectos tridimensionales o reinterpretar los resultados obtenidos en sistemas simplificados.

Agradecimientos: NSF Grant EAR2049688

European Commission (MixUp, MSCA-101068306)

MICIU/AEI/10.13039/501100011033 (PID2024-162869OB-I00)

Center for Research Computing (CRC) at the University of Notre Dame

Propuesta preliminar del modelo hidrogeológico de la isla mayor del Parque Nacional Marítimo Terrestre de Cabrera como herramienta para mitigar el efecto del Cambio Climático en las aguas subterráneas

Pedro Agustín Robledo Ardila[1], Natalia G García Bravo[2], Juan José Durán Valsero[2], Raquel Morales García[2], Fus Micheo[3], Salud Deudero Company[4], Carme Alomar Mascaró[4], Sandra Pérez[5], Flor Árecega Cabrera[6]

[1]*Unidad del IGME-CSIC en las Islas Baleares*
[2]*IGME-CSIC*
[3]*ICGC*
[4]*IEO-CSIC (COB)*
[5]*IDAEA-CSIC*
[6]*Uidad de Química en Sisal (UNAM)*

Palabras clave: acuífero, costa, descargas aéreas, manantiales submarinos

Resumen. El parque Nacional Marítimo-Terrestre Cabrera es un archipiélago con áreas protegidas terrestres y marinas. En este trabajo se propone un nuevo modelo hidrogeológico para la isla principal. La geología de Cabrera es compleja y, junto con la tectónica, determina la dinámica hidrogeológica actual. La serie estratigráfica abarca desde el Triásico hasta el Cuaternario. Desde el Cretácico superior hasta el Mioceno medio los procesos compresivos y distensivos han configurado un sistema complejo de pliegues, cabalgamientos y fallas, normales e inversas. Los materiales triásicos del Keuper tienen un papel doble, ya que actúan como base impermeable del acuífero y como superficie de despegue de los cabalgamientos que afectan a los materiales del Jurásico Inferior (Lías). Estos materiales definen el horizonte permeable regional del acuífero que determina la dinámica de las aguas subterráneas actual en Cabrera. El modelo hidrogeológico de la isla muestras dos zonas hidrogeológicas: el margen sur, la más extensa y el margen norte. 1) La zona sur está configurada por un sistema de superficies mecánicas de bajo ángulo, (cabalgamientos, fallas y planos de corrimiento) con una dirección principal NE-SO con sistemas de retrocabalgamientos asociados dirección SO. Esta estructura delimita dos unidades acuíferas diferentes: a) una

regional en los calizas y dolomías del jurásico inferior (Retiense-Lías). En esta unida las cotas piezométricas varían lateramente entre 1 m s.n.m en el borde litoral y 4 m s.n.m en su zona central, dando lugar a una geometría en domo, con un flujo radial que descarga hacía en el mar a través de surgencias subacuáticas.; b) un sistema de acuíferos colgados coincidentes con los estratos cabalgantes del Lías sobre rocas poco permeables del Cretácico inferior y del Eoceno. La descarga es aérea con un flujo en la dirección de cabalgamiento hacia el NO. 2) El margen Norte de la isla es un bloque independiente e individualizado del anterior por una gran falla normal dirección NO-SE y otras fallas conjugadas NE-SO que ponen en contacto el Eoceno con el Cretácico inferior. Las estructuras mecánicas son de ángulo pronunciado y en su conjunto funciona como un acuífero semiconfinado, sin aparente conexión hidráulica con el primer gran bloque acuífero, con un flujo subregional semi radial que drena al mar a través de los materiales de Jurásico inferior en los bordes NE y NO. En este sector los cabalgamientos, normales y retrovergentes no parecen haber desarrollado acuíferos colgados de entidad y la cota del agua cerca de la costa se estima en torno a 1,5 m s.n.m. No obstante, se ha observado una importante compartimentación de acuíferos en ambos sectores, lo que puede determinar un sistema hidrogeológico de bloques semi asilados que defina un cierto comportamiento hidráulico muy local en cada uno de ellos. Esto tiene un efecto directo sobre el impacto que el agua dulce tiene en los ecosistemas de la costa litoral y sobre posibles procesos de salinización. El previsible efecto local de ambos confiere, por una parte, que las descargas de agua subterránea zonifiquen la presencia de ecosistemas marinos, más ricos en zona de descargas más de mayor volumen. Por otra parte, la intrusión de agua marina puede estar en cierto modo limitada por el propio aislamiento de los bloques acuíferos lo que confiere también una cierta protección frente a procesos de salinización del agua subterránea. Por todo ello, la elaboración de un modelo hidrogeológico robusto es clave para las futuras acciones en la gestión y mitigación de los efectos del cambio climático sobre las aguas subterráneas en espacios naturales protegidos.

Agradecimientos: Este trabajo se enmarca en el proyecto e PROTEO 2998/202 financiado por Organismo Autónomo de Parques Nacionales (OAPN).

Propuestas de mejora en la explotación y el mantenimiento de las balsas de Sant Vicenç dels Horts, Barcelona, Catalunya

Joana Pérez Gomà[1]

[1]CUADLL (Comunitat Usuaris de la Vall Baixa i Delta del Llobregat)

Resumen. El acuífero de la Vall Baixa y Delta del Llobregat es una de las principales reservas de agua subterránea del área metropolitana de Barcelona, sus usos son principalmente para abastecimiento urbano, pero también para la industria y la agricultura. Este acuífero ha sido catalogado en mal estado en todos los sucesivos planes hidrológicos de cuenca desde la implantación de la Directiva Marco del Agua y tampoco está previsto que alcance el buen estado antes del 2033. Este acuífero ha sufrido una elevada demanda y décadas de explotación intensiva provocando su sobreexplotación con un descenso de nivel piezométrico por debajo el nivel del mar y con consecuentes problemas de intrusión salina.

En este contexto, las balsas de recarga artificial desempeñan un papel clave, ya que permiten infiltrar agua superficial del Llobregat o regenerada de la ERA del Prat al subsuelo, contribuyendo a recuperar los niveles del acuífero, mejorar la calidad del agua y garantizar la sostenibilidad del recurso, especialmente ante periodos de sequía cada vez más frecuentes. Este 2025 ha supuesto una recarga de 357.137 m^3 con tasas de infiltración alrededor de 0.5 $m^3/m^2/d$.

Las balsas de Sant Vicenç dels Horts estuvieron recargando entre 2010 y 2016 con agua del río Llobregat. Entre 2017 y 2023 las balsas estuvieron inoperativas y se aprovechó para cambiar su lecho orgánico por un lecho de gravas. Desde mayo de 2024 han vuelto a ponerse en funcionamiento, utilizando en este caso agua regenerada para la recarga. El sistema dispone de una balsa de decantación y otra de infiltración, además de un conjunto de sensores que permiten controlar tanto el caudal de entrada como los niveles de agua.

El objetivo principal del estudio es proponer un conjunto de mejoras para la explotación y el mantenimiento de las balsas en base a todos los datos históricos.

Para ello, en primer lugar, se ha estudiado la posibilidad de incrementar la superficie de recarga. La balsa de decantación desempeñaba un papel importante durante los años en que la recarga se realizaba con agua del río, pero actualmente, al utilizar agua regenerada -con una turbidez inferior a 5 NTU- ha

perdido su función original. Por este motivo, se ha llevado a cabo un estudio de la balsa de decantación mediante catas y toma de muestras. Con ello se ha podido determinar un espesor de material que se clasifica como SM (arena limosa) alrededor de 2.5 m. A partir de estos resultados se evalúa la viabilidad de movilizar este volumen de tierra y transformar la balsa.

En segundo lugar, se ha realizado una comparación exhaustiva entre la recarga con agua del río Llobregat y la recarga con agua regenerada. Este análisis incluye tanto parámetros cuantitativos -niveles, caudales, tasas de infiltración, disponibilidad de agua y costes -como químicos-turbidez, cloruros, nitratos, entre otros parámetros químicos-.

Se determina de forma general, el agua regenerada presenta mejores resultados respecto el agua de río principalmente des del punto de vista cuantitativo, y des del punto de vista químico, el agua de río presenta valores de calidad más favorables para los cloruros i el contenido de TOC.

Finalmente, para poder evaluar con detalle la tasa de infiltración, corroborar que parámetros la condicionan y que relación tienen entre ellos, se ha elaborado un modelo 2D con Feeflow 10.0 que incluye tanto la zona no saturada del terreno como la saturada. En el modelo se ha incluido todas las variables que condicionan la tasa de infiltración como: la viscosidad del flujo, colmatación biológica, etc, y junto con las condiciones de contorno pertinentes, se han analizado los resultados de las simulaciones.

Recarga gestionada del acuífero con agua tratada de la EDAR de Cambrils

Sara Bagés Estopà[1], Tiphaine Anderbouhr[1], Joan Campos Ferré[1], Miranda González Rodríguez[1], Silvia Díaz-Cruz[2], Jesús Carrera[3], Cristina Valhondo González[3], Lurdes Martínez Landa[4]

[1]*Comaigua*
[2]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona*
[3]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona. Unidad Asociada: Grupo de Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC)*
[4]*Dpto. de Ingeniería Civil y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Unidad Asociada: Grupo de Hidrología Subterránea (GHS: UPC-CSIC)*

Resumen. La escasez hídrica es un problema creciente en los países mediterráneos, agravado por el cambio climático. El aumento de la demanda asociado al crecimiento poblacional, el turismo, la agricultura y la industria está provocando la sobreexplotación de acuíferos, especialmente en zonas costeras, favoreciendo fenómenos como la intrusión marina. La comarca del Baix Camp (Tarragona, España) sufre escasez de agua desde la década de 1970 y durante el verano la presión sobre los recursos hídricos subterráneos aumenta significativamente debido al turismo y a las mayores necesidades de riego.

El proyecto LIFE REMAR (2021–2025) se desarrolló con el objetivo de incrementar la disponibilidad de recursos hídricos y mejorar la calidad del agua mediante la demostración de un sistema de tratamiento suelo-acuífero con barreras reactivas (SATrb), una tecnología de recarga gestionada de acuíferos (MAR), utilizando el efluente de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Cambrils, en Tarragona. Este sistema aprovecha procesos naturales de sorción y biodegradación para mejorar la calidad del agua infiltrada.

En la EDAR de Cambrils, el agua residual se trata mediante un proceso convencional de depuración y se vierte el agua residual tratada al mar, perdiéndose así un recurso potencialmente aprovechable. Mediante el sistema SATrb, una parte de este efluente se recupera y renaturaliza. El sistema consiste en dos balsas de infiltración de 400 m² cada una en las que se instaló una barrera reactiva de 80 cm compuesta por sedimentos locales, compost vegetal, astillas de madera, biochar y zeolitas. Sobre esta barrera se dispuso una capa de arena fina

de 20 cm para evitar la flotación de los materiales y favorecer la filtración de partículas finas.

El sistema opera en ciclos alternos húmedos y secos para minimizar la colmatación. El monitoreo incluye sensores CTD instalados en la red de piezómetros (aguas arriba, en las balsas y aguas abajo de las balsas de infiltración) y campañas periódicas de muestreo del efluente, del agua de la zona no saturada y del acuífero.

Durante 21 meses de operación se recargaron más de 129.000 m^3 de agua residual tratada, mejorando localmente el nivel piezométrico del acuífero y contribuyendo a la reducción de nitratos presentes inicialmente en el acuífero, por efecto de dilución. El sistema también mejoró significativamente la calidad del agua infiltrada; se observaron elevadas eficiencias de eliminación para Escherichia coli (100%), Clostridium perfringens (99,99%), coliformes totales (99,98%), colífagos (99,98%), nitrógeno (82,7%) y fósforo (96,5%). Asimismo, no se detectaron huevos de cestodos ni nematodos. Adicionalmente, se analizaron compuestos emergentes, microplásticos, PFAS, genes de resistencia a antibióticos, compuestos orgánicos volátiles y metales, observándose también reducciones relevantes. Además, las balsas generaron un nuevo hábitat que favoreció la biodiversidad local.

Los resultados demuestran que el sistema SATrb es una solución eficaz, ambientalmente sostenible y replicable para mejorar la gestión de los recursos hídricos en regiones mediterráneas con estrés hídrico. Aunque el proyecto LIFE REMAR finalizó en noviembre de 2025, su éxito ha permitido continuar con las operaciones de recarga en la masa de agua del Baix Camp.

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

Relevancia del análisis hidroquímico en la determinación de los límites de las cuencas hidrogeológicas. Cuenca del Salar de Atacama (Chile)

Joaquin Salas Navarro[1], Javier Rivera Vega[1], Miguel Luna Barberán[2]

[1]*Variscan GeoSciences Services S.L.*
[2]*INECO*

Palabras clave: Salar de Atacama, hidroquímica, cuencas altiplánicas, salares

Resumen. La cuenca del Salar de Atacama (Comuna de San Pedro de Atacama, Chile) es una región con gran estrés hídrico, derivado de (1) la baja disponibilidad de agua, y (2) la alta demanda asociada a las necesidades de producción minera, el abastecimiento de las comunidades locales y la actividad turística, y los caudales ecológicos de humedales con alto valor ecosistémico (incluidos varios sitios Ramsar). Por ello, se han desarrollado estudios hidrogeológicos como antecedentes de las evaluaciones ambientales de las actividades industriales y mineras (cuantificación de recursos hídricos y análisis de impactos, principalmente), y proyectos de investigación para el diseño de herramientas de gestión hídrica que consideren escenarios predictivos. Estas herramientas numéricas se retroalimentan de los modelos conceptuales sobre el funcionamiento hidrodinámico de la cuenca tradicionalmente aceptados. En este contexto, entre los años 2011 y 2015, el proyecto ProEcoServ, financiado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF), e implementado a nivel global por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), recopiló y analizó la información pública existente relativa a la geología, hidro-meteorología, hidrogeología e hidroquímica de la cuenca del Salar y las cuencas altiplánicas circundantes. La información hidroquímica e isotópica ha sido determinante no sólo para la descripción de las tipologías de las calidades químicas de las masas de agua, también para la revisión de la conceptualización del funcionamiento hidrodinámico de la cuenca. Como resultado, se han identificado indicios de posibles interconexiones entre la cuenca del Salar y las cuencas altiplánicas del sector E, para justificar (1) los caudales necesarios para la pervivencia de los humedales existentes y la recarga del núcleo salino, y (2) la composición química e isotópica de dichas masas de agua. Esto no se ha observado únicamente en la

cuenca del Salar, sino que también justifica el funcionamiento hidrodinámico entre las cuencas altiplánicas. De confirmarse lo anterior, sería necesario actualizar los análisis de cuenca, y su implementación en los modelos numéricos desarrollados a la fecha. También tendría incidencia en la evaluación de los recursos hídricos de la región, siendo necesario re-evaluar cómo las concesiones de agua podrían afectar a la seguridad hídrica de todos los potenciales usuarios.

Agradecimientos: Proyecto PROECOSERV (PNUMA)

Comunidad Atacameña de Socaire

Resiliencia de los sistemas hidrogeológicos a las sequías en base a índices estandarizados. Aplicación a las cuencas internas de Cataluña.

Warren Meredith[1], Josep Mas-Pla[2]

[1]*Institut Català de Recerca de l'Aigua*
[2]*Institut Català de Recerca de l'Aigua y Universitat de Girona*

Resumen. Los episodios de sequía se están intensificando en las regiones mediterráneas como consecuencia de la variabilidad climática y del aumento de las temperaturas, lo que supone un riesgo creciente para los recursos hídricos subterráneos. Comprender cómo responden los sistemas acuíferos ante periodos prolongados de estrés climático es fundamental para una gestión sostenible del agua subterránea. En este trabajo se evalúa la resiliencia de los sistemas acuíferos frente a la sequía mediante índices climáticos e hidrogeológicos estandarizados aplicados a una red de piezómetros en las cuencas internas de Cataluña. Las condiciones de sequía meteorológica se caracterizaron mediante el índice SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), calculado a partir de series temporales de precipitación y temperatura. Se utilizó una escala temporal de 12 meses para representar condiciones de sequía hidrológica prolongada relevantes para los sistemas de aguas subterráneas. Para la estandarización de los índices se desarrolló un protocolo automatizado en R que permite seleccionar la función de distribución estadística más adecuada para las series temporales de SPEI y SGWI. La respuesta del agua subterránea se evaluó mediante el índice SGWI (Standardized Groundwater Index), obtenido a partir de niveles piezométricos. Además, se aplicó un análisis de correlación cruzada entre SPEI y SGWI para cuantificar la propagación de la sequía y estimar tiempos de respuesta en acuíferos someros y profundos. La resiliencia del sistema acuífero se evaluó mediante tres indicadores complementarios: resistencia, tiempo de recuperación e índice de resiliencia. Estos indicadores se aplicaron a tres episodios recientes de sequía: 2011–2013, 2015–2017 y 2021–2024. Los resultados muestran un aumento significativo en la severidad y persistencia de las sequías durante el periodo analizado. El episodio 2021–2024 presentó una duración excepcional, con hasta 42 meses continuos de sequía meteorológica (SPEI ≤ −1), muy superior a los eventos anteriores. La respuesta del sistema subterráneo varió según las características hidrogeológicas de los acuíferos. Los acuíferos someros presentaron respuestas más rápidas y recuperaciones relativamente eficientes

durante eventos moderados, mientras que los acuíferos profundos y confinados mostraron mayores retardos temporales y respuestas más persistentes asociadas a una mayor capacidad de almacenamiento y memoria del sistema. Sin embargo, durante la sequía prolongada de 2021–2024 varios acuíferos profundos mostraron retrasos en la recuperación y persistencia de condiciones de sequía subterránea, sugiriendo una reducción de la capacidad de amortiguación frente a sequías multianuales prolongadas. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia del almacenamiento, la conectividad hidráulica y las dinámicas de recarga en la capacidad de los sistemas acuíferos para amortiguar los efectos de sequías prolongadas. La integración de índices estandarizados de sequía, datos piezométricos e indicadores de resiliencia proporciona un marco cuantitativo útil para evaluar la respuesta de los sistemas de aguas subterráneas frente a eventos climáticos extremos y apoyar estrategias de gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

Agradecimientos: Proyecto TREASURE (PCI2024-153494), convocatoria conjunta 2022 de la Unión Europea i MCIU/AEI 101060874-Water4All.

Resolución en GPU de problemas de transporte reactivo y macrodispersión en medios porosos altamente heterogéneos mediante métodos Eulerianos

Pablo Gamazo[1], Lucas Bessone[1], Marco Dentz[2], Julián Ramos[1], Andrés Saracho[1], Elena Alvareda[1]

[1]*Departamento del Agua, CENUR Litoral Norte, Universidad de la República, Uruguay*
[2]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua - CSIC*

Palabras clave: Macrodispersión, Medios porosos heterogéneos, Computación en GPU, Métodos Eulerianos

Resumen. El estudio del transporte en medios porosos con alta heterogeneidad presenta desafíos computacionales significativos. Las arquitecturas de Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU, por sus siglas en inglés) se consolidan cada vez más como un estándar en la mecánica computacional para superar estas clásicas limitaciones de cómputo.

Este trabajo desarrolla y evalúa métodos Eulerianos eficientes basados en GPU para simular el transporte de solutos conservativos y evaluar la macrodispersión en medios porosos heterogéneos en 2D y 3D. Comúnmente, la resolución de estos problemas se realiza mediante métodos Lagrangianos, los cuales son adecuados para escenarios puramente advectivos. Sin embargo, al considerar efectos difusivos, el número de partículas necesarias para describir el sistema se eleva drásticamente. Esto incrementa la demanda computacional y genera sobrecargas significativas al modelar procesos que involucran interacciones con fases no móviles.

Por el contrario, los métodos Eulerianos presentan claras ventajas para resolver problemas que implican la interacción entre fases móviles y no móviles, como la disolución o precipitación de minerales. Al combinarse con esquemas de alta resolución, como los esquemas de Variación Total Decreciente (TVD), resultan altamente eficaces para resolver problemas advectivo-difusivos en los que el transporte reactivo afecta el campo de velocidades.

En este trabajo se presenta la implementación de estos esquemas de alto orden TVD en arquitecturas GPU, logrando computar eficientemente el transporte en dominios de hasta 134,5 millones de celdas utilizando una sola tarjeta. Asimismo, se exponen las limitaciones de los esquemas TVD al acoplarlos con procesos reactivos. En zonas de alto gradiente, la naturaleza no lineal de estos métodos genera un transporte diferencial entre las especies o componentes. Este artefacto numérico puede inducir inconsistencias y desencadenar comportamientos sin sentido físico. Para mitigar este problema, se evaluaron diversas estrategias de resolución.

Este trabajo suma evidencia de que los métodos Eulerianos basados en GPU permiten realizar análisis precisos de macrodispersión de alta resolución, prescindiendo de enfoques basados en partículas. Adicionalmente, constituye una base robusta para el desarrollo de nuevos algoritmos que permitirán aprovechar las ventajas de estas arquitecturas en la resolución de problemas acoplados de transporte reactivo y flujo no estacionario.

Respuesta dinámica del almacenamiento de agua durante sequías meteorológicas

Guillermo Barrientos Alarcón[1], Rafael Rubilar Pons[2], Efrain Duarte Castañeda[2], Paul Sandoval Quilodrán[2], Mauricio Aguayo Arias[3]

[1]*Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Obras Civiles, Universidad Católica del Maule, Talca, Chile*
[2]*Cooperativa de Productividad Forestal y Laboratorio de Investigación en Suelos, Aguas y Bosques (LISAB), Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencias Forestales Universidad de Concepcion, Concepcion, Chile*
[3]*Facultad de Ciencias Ambientales, Departamento de Planificación Territorial, Universidad de Concepcion, Concepcion, Chile*

Palabras clave: Respuesta hidrológica, Sequía meteorológica, Almacenamiento de agua, Cuenca hidrográfica

Resumen. El almacenamiento dinámico de agua refleja el movimiento del agua dentro de una cuenca hidrográfica, incluyendo la infiltración desde la superficie hasta el subsuelo. En este estudio, abordamos dos preguntas: (a) ¿Cuáles son los patrones espaciotemporales del almacenamiento dinámico de agua durante 13 eventos de sequía extrema? y (b) ¿Cómo se correlacionan estos patrones con características hidroclimáticas y fisiográficas específicas? Para responder a estas preguntas, analizamos la variabilidad del almacenamiento dinámico de agua dS(t), estimada mediante un enfoque de balance hídrico, $dS(t)=\sum(t-1)\ R(t) - Q(t) - PET(t)$, como el aumento o disminución del almacenamiento a lo largo del tiempo desde el inicio hasta el final de la temporada de lluvias en 43 cuencas hidrográficas del centro-sur de Chile (1980-2020), centrándonos en cómo las sequías meteorológicas influyen en la dinámica del almacenamiento de la cuenca. Nuestros resultados muestran que el almacenamiento dinámico de agua responde rápidamente a la precipitación, con valores máximos que oscilan entre 17 mm y 632 mm, y disminuye a valores negativos durante los períodos secos. En promedio, se observaron picos de almacenamiento 126 días después del inicio de la precipitación. La reducción inicial del almacenamiento durante las sequías promedió 51 mm. Los almacenamientos más bajos se asocian con condiciones climáticas más secas (valores negativos del Índice de Precipitación Estandarizado [SPI] y el Índice de Severidad de Sequía de Palmer [PDSI]), un mayor número de días secos consecutivos tanto en verano como en invierno, y características de la cuenca como mayor altitud, pendientes más pronunciadas y mayores velocidades

deflujo. Los cambios estacionales en el almacenamiento, con acumulación al comienzo de la estación húmeda y una rápida disminución a valores negativos al final de la estación seca, reflejan períodos de conectividad y desconexión hídrica, lo que ofrece información crucial para la modelización hidrológica y las estrategias de mitigación de sequías. Interpretamos el período de desconexión como uno en el que los niveles de agua superficial disminuyen debido a la ausencia de precipitación y al aumento de las tasas de evapotranspiración, lo que destaca la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas a los eventos climáticos extremos.

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado por el Gobierno de Chile a través de ANID FONDECYT (N° 11250081), UCM (UCM-IN-25204), ANID IDea I+D (ID23I10011) y ANID BASAL FB210015 (CENAMAD). Reconocemos el apoyo y la infraestructura proporcionada por el Departamento de Obras Civiles y Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad Católica del Maule, Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD) de la Universidad Pontificia Católica de Chile, Laboratorio de Investigación de Suelos, Aguas y Bosques (LISAB) y Cooperativa de Productividad Forestal de la Universidad de Concepción, Chile. También agradecemos a la DGA-Chile por proporcionar datos esenciales.

Respuesta hidroquímica a la recarga asociada a eventos de tormenta tras una sequía prolongada en un sistema río–acuífero mediterráneo desconectado

Nuria Ferrer[1], Paula Rodriguez Escales[1], Carles Pérez[1], Daniel Fernàndez-Garcia[1]

[1]*1Department of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain*

Palabras clave: Relación río-acuífero, Mezcla, Metales pesados, Hidroquímica

Resumen. Los episodios recurrentes de sequía característicos del clima mediterráneo —intensificados en las últimas décadas por el cambio climático—, junto con la sobreexplotación de los acuíferos costeros, están favoreciendo la desconexión hidráulica entre ríos y acuíferos. Al mismo tiempo, la creciente variabilidad climática provoca transiciones rápidas entre periodos prolongados de sequía y episodios de precipitaciones intensas. Durante estos eventos, los caudales fluviales experimentan aumentos significativos que podrían favorecer la recarga del acuífero. Sin embargo, este proceso suele verse limitado por la baja permeabilidad de las llanuras aluviales o por la alteración de las zonas de inundación. En este contexto, promover la infiltración en la llanura fluvial mediante el aumento de su permeabilidad en las proximidades del río podría contribuir a incrementar la recarga del acuífero, mejorar la disponibilidad de recursos hídricos y reducir las pérdidas de agua hacia el mar. No obstante, el impacto de estos procesos sobre la calidad del agua subterránea sigue siendo poco conocido, especialmente tras periodos prolongados de sequía, cuando tanto las aguas subsuperficiales como la precipitación pueden presentar concentraciones elevadas de contaminantes, como metales traza.

El objetivo de este estudio es caracterizar la respuesta hidrológica e hidroquímica del acuífero aluvial sobreexplotado de la Vall Baixa del Llobregat (Barcelona) a los procesos de recarga inducidos durante eventos de tormenta bajo condiciones de desconexión hidráulica con el río Llobregat tras la sequía de 2022–2023. En particular, se analiza la respuesta hidráulica del acuífero a los aumentos del nivel del río asociados a la primera precipitación tras una sequía prolongada (marzo de 2023), así como los cambios observados en la hidroquímica y en la composición isotópica estable del agua subterránea, del agua del río y de la lluvia, con el fin de

identificar las vías de recarga y los procesos de mezcla entre las distintas masas de agua. Asimismo, se evalúa la posible movilización de metales traza durante este episodio, tanto por escorrentía superficial como por deposición húmeda asociada a la precipitación. A partir de la integración de observaciones hidráulicas, químicas e isotópicas, este trabajo propone un modelo conceptual que describe los procesos de recarga focalizada tras periodos de sequía y sus implicaciones para la calidad del agua subterránea en sistemas río–acuífero mediterráneos.

Agradecimientos: 22S09395-001, MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN Y UNIVERSIDADES PID2023-148543OA-I00

Resultados preliminares del contenido físico-químico e isotópico del agua subterránea en la Cuenca de la Garganta de San Gregorio (Aldeanueva de la Vera, Cáceres)

Antonio González-Ramón[1], Thomas Zakaluk[1], Blas Ramos-Rodríguez[1], Almudena De la Losa Román [1], Ana Fernández-Ayuso[2], Carlos Marín-Lechado[1], Héctor Aguilera Alonso[1], Jorge Jódar[1], Nuria Naranjo-Fernández[1], Sergio Martos-Rosillo[1]

[1]*IGME-CSIC*
[2]*Universidad Autónoa de Madrid*

Palabras clave: Hidroquímica, Pesqueras, Isótopos, Lhem

Resumen. La cuenca de la Garganta de San Gregorio se localiza en el extremo occidental de la Sierra de Gredos, a cotas comprendidas entre 1812 m (Canchal de la Panera) y 594 m en el punto de control monitorizado en el río principal, junto al núcleo urbano de Aldeanueva de la Vera. Está formada por dos subcuencas principales drenadas por los arroyos de los Horcajos, por su vertiente occidental, y el arroyo del Yedrón por la oriental. Toda la cuenca está excavada en materiales granitoides parcialmente alterados a lhem formados por arenas cuarzo-feldespáticas con matriz limo-arcillosa. Las aguas drenadas por ambos arroyos se derivan a diferentes cotas mediante 4 acequias principales denominadas localmente como pesqueras cuyo único objetivo es infiltrar el agua en las zonas de alteración durante la época de lluvias, para retrasar su salida de la cuenca e incrementar el poder regulador de los materiales que la conforman. Durante el año 2025 se realizó un inventario de puntos de descargas de agua subterránea en la toda la cuenca estudiada, que ha incluido la recogida de muestras para su análisis físico-químico e isotópico, tanto de aguas de los manantiales, como de aguas derivadas por las pesqueras, del río principal y de los principales cauces secundarios. Se programó una campaña de muestreo en aguas altas, entre los días 12 al 14 de mayo de 2025, en 37 manantiales, 4 cauces superficiales y 4 pesqueras. La segunda campaña de aguas bajas se realizó entre el 27 y el 30 de octubre del mismo año, programada en los mismos puntos, si bien el muestreo de manantiales se redujo a 28 puntos ya que el resto se encontraban secos y a 4 pesqueras y 3 cauces. Hasta el momento se han analizado los datos de la campaña de aguas altas que muestran aguas muy poco mineralizadas con valores de

conductividad eléctrica (CE) medios de 33 µS/cm, con un máximo en la cuenca baja de 199 µS/cm y un mínimo de 10,6 µS/cm en uno de los manantiales a mayor cota. La temperatura (Tª) media es de 13,1 ^{o}C con un rango entre 10-18,1 ^{o}C. El pH presenta valores ácidos en casi todas las muestras con una media de 5,5 y un rango entre 4,5 y 7. La facies en el campo de los aniones evoluciona desde aguas cloruradas en las pesqueras, cauces y manantiales más elevados hacia aguas bicarbonatadas en los manantiales a menor cota. En el campo de los cationes evolucionan desde aguas sódicas a cálcicas. Los valores del nitrato indican evidencias de contaminación por prácticas agrícolas o aguas residuales en lo manantiales cercanos y por debajo del núcleo urbano, con un máximo de 32,8 mg/l, pero en la mayoría de las muestras son inferiores a 8 mg/l con algunos manantiales en cotas elevadas ligeramente afectados por el pastoreo vacuno. El contenido isotópico permite diferenciar grupos de aguas en función de la cota a la que se sitúan los manantiales, sin embargo, se observan agrupaciones de puntos con similar contenido en ^{18}O y valores más ligeros que los que les corresponderían, lo que ocurre aguas abajo de las derivaciones de las pesqueras. Esto convierte al ^{18}O en el mejor indicador de la influencia de las pesqueras en la infiltración de las aguas en su cauce y permite trazar el flujo y el efecto de esta agua infiltrada intencionadamente. La influencia de las pesqueras en los manantiales es especialmente manifiesta en las aguas que surgen entre las cotas 800 y 1000 m.

Agradecimientos: Esta investigación ha sido realizada en el marco del proyecto INCHA (PID2022–140092OB-I00), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y cofinanciados por FEDER, Unión Europea.

Resultados preliminares del contenido físico-químico e isotópico del agua subterránea en la Cuenca de la Garganta de San Gregorio (Aldeanueva de la Vera, Cáceres)

Antonio González-Ramón[1], Thomas Zakaluk[1], Blas Ramos-Rodríguez[1], Almudena De la Losa Román [1], Ana Fernández-Ayuso[2], Carlos Marín-Lechado[1], Héctor Aguilera[1], Jorge Jódar[1], Nuria Naranjo-Fernández[1], Sergio Martos-Rosillo[1]

[1]IGME-CSIC
[2]Departamento de Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid

Palabras clave: Hidroquímica, Pesqueras, Isótopos, Lhem

Resumen. La cuenca de la Garganta de San Gregorio se localiza en el extremo occidental de la Sierra de Gredos, a cotas comprendidas entre 1812 m (Canchal de la Panera) y 594 m en el punto de control monitorizado en el río principal, junto al núcleo urbano de Aldeanueva de la Vera. Está formada por dos subcuencas principales drenadas por los arroyos de los Horcajos, por su vertiente occidental, y el arroyo del Yedrón por la oriental. Toda la cuenca está excavada en materiales granitoides parcialmente alterados a lhem formados por arenas cuarzo-feldespáticas con matriz limo-arcillosa. Las aguas drenadas por ambos arroyos se derivan a diferentes cotas mediante 4 acequias principales denominadas localmente como pesqueras cuyo único objetivo es infiltrar el agua en las zonas de alteración durante la época de lluvias, para retrasar su salida de la cuenca e incrementar el poder regulador de los materiales que la conforman. Durante el año 2025 se realizó un inventario de puntos de descargas de agua subterránea en la toda la cuenca estudiada, que ha incluido la recogida de muestras para su análisis físico-químico e isotópico, tanto de aguas de los manantiales, como de aguas derivadas por las pesqueras, del río principal y de los principales cauces secundarios. Se programó una campaña de muestreo en aguas altas, entre los días 12 al 14 de mayo de 2025, en 37 manantiales, 4 cauces superficiales y 4 pesqueras. La segunda campaña de aguas bajas se realizó entre el 27 y el 30 de octubre del mismo año, programada en los mismos puntos, si bien el muestreo de manantiales se redujo a 28 puntos ya que el resto se encontraban secos y a 4 pesqueras y 3 cauces. Hasta el momento se han analizado los datos de la campaña de aguas altas que muestran aguas muy poco mineralizadas con valores de

conductividad eléctrica (CE) medios de 33 µS/cm, con un máximo en la cuenca baja de 199 µS/cm y un mínimo de 10,6 µS/cm en uno de los manantiales a mayor cota. La temperatura (Tª) media es de 13,1 ^{o}C con un rango entre 10-18,1 ^{o}C. El pH presenta valores ácidos en casi todas las muestras con una media de 5,5 y un rango entre 4,5 y 7. La facies en el campo de los aniones evoluciona desde aguas cloruradas en las pesqueras, cauces y manantiales más elevados hacia aguas bicarbonatadas en los manantiales a menor cota. En el campo de los cationes evolucionan desde aguas sódicas a cálcicas. Los valores del nitrato indican evidencias de contaminación por prácticas agrícolas o aguas residuales en lo manantiales cercanos y por debajo del núcleo urbano, con un máximo de 32,8 mg/l, pero en la mayoría de las muestras son inferiores a 8 mg/l con algunos manantiales en cotas elevadas ligeramente afectados por el pastoreo vacuno. El contenido isotópico permite diferenciar grupos de aguas en función de la cota a la que se sitúan los manantiales, sin embargo, se observan agrupaciones de puntos con similar contenido en ^{18}O y valores más ligeros que los que les corresponderían, lo que ocurre aguas abajo de las derivaciones de las pesqueras. Esto convierte al ^{18}O en el mejor indicador de la influencia de las pesqueras en la infiltración de las aguas en su cauce y permite trazar el flujo y el efecto de esta agua infiltrada intencionadamente. La influencia de las pesqueras en los manantiales es especialmente manifiesta en las aguas que surgen entre las cotas 800 y 1000 m.

Agradecimientos: Esta investigación muestra parte los resultados del proyecto de investigación INCHA (PID2022–140092OB-I00), financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033/ y por FEDER. Una manera de hacer Europa

Salinização em agroecossistemas do oásis tunisino: causas, impactes e desafios de gestão

Dalila Moussa[1], Latifa Dhaouadi[2], Margarida Antunes[3], Mohamed Ouassar[1]

[1]*Laboratory of Eremology and Combating Desertification at the Arid Zones Research Institute (IRA), Djorf km 22 Mednine, Tunisia.*
[2]*Laboratory of Eremology and Combating Desertification at the Arid Zones Research Institute (IRA), Djorf km 22 Mednine, Tunisia. Regional Center for Research in Oasian Agriculture, km 1 route de Tozeur CP. 2260 Deguache Tunisia.*
[3]*Institute of Earth Sciences, Pole of University of Minho, Departement of Earth Sciences, University of Minho, Campus Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal*

Palabras clave: degradação do solo, qualidade da água, ambiente árido, Norte de África

Resumen. A salinização da água representa uma importante limitação à sustentabilidade da agricultura, em particular no oásis do sul da Tunísia, devido à acumulação progressiva de sais solúveis no solo e na água de irrigação. Em condições hiperáridas, caracterizadas por uma precipitação anual inferior a 100 mm/ano e evapotranspiração superior a 2000 mm/ano, a irrigação depende quase totalmente de água subterrânea proveniente dos sistemas aquíferos Continental Intercalaire (CI) e Complex Terminal (CT), localizados na Tunísia.

A água subterrânea destes sistemas aquíferos é altamente mineralizada, com condutividade elétrica variando entre 2,9 e 10,05 mS cm^{-1} e sólidos totais dissolvidos, entre 1,95 e 8,15 g L^{-1}, para o período temporal de 2019 a 2021. Indicadores hidroquímicos revelam riscos de contaminação significativos associados aos teores de sódio, com valores da Relação de Adsorção de Sódio (SAR) entre 3,8 e 23,6; indicando que uma grande proporção da água disponível tem aptidão limitada para fins de irrigação. Os riscos de salinização são agravados por sistemas de irrigação por bacias hidrográficas ineficientes, caracterizados por baixas eficiências (40–60%), extração intensiva de água subterrânea e infraestruturas de drenagem inadequadas. Estes fatores contribuem para a degradação. A gestão sustentável dos agroecossistemas de zonas de oásis exige a melhoria das técnicas de irrigação, a implementação de sistemas de drenagem eficazes e a monitorização contínua da qualidade da água de irrigação.

Agradecimientos: The work is included in the framework of the UID/04683/2025, https://doi.org/10.54499/UID/04683/2025, through FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

Sensórica y monitoreo de aguas subterráneas urbanas: el proyecto URBANM2O en el caso de estudio de Sant Adrià del Besòs

Edwyn Andrés Pérez-Ortiz[1], Enric Vázquez-Suñé[2], Anna Jurado[2], Marinella Farré[3], Marta Llorca[3], David Alcaide[3], Assela Coll Bosch[4], Denia Bellver Morte[4], Luca Vezzaro[5], Estanislao Pujades-Garnes[2]

[1]*Departamento de Geociencias, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC). Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad de Barcelona (UB)*
[2]*Departamento de Geociencias, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC)*
[3]*Departamento de Química Ambiental, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC)*
[4]*Sección de Medio Ambiente, Ayuntamiento de Sant Adrià del Besòs*
[5]*Department of Environmental and Resource Engineering (DTU Sustain), Technical University of Denmark*

Palabras clave: Aguas subterráneas, Contaminantes antropogénicos, Sensores, URBANM2O

Resumen. En el contexto actual de cambio global, la presión sobre los recursos hídricos está aumentando, especialmente en las zonas urbanas, donde se concentra la mayor parte de la población. Por ello, es necesario identificar fuentes alternativas de agua dulce que permitan satisfacer el incremento de la demanda, especialmente durante las épocas secas. Las aguas subterráneas urbanas representan una alternativa de gran potencial. Sin embargo, pueden estar contaminadas por una amplia gama de compuestos de origen antropogénico que alcanzan los acuíferos a través de diferentes vías, como fugas en los sistemas de alcantarillado o la interacción río-acuífero. Por lo tanto, es necesario disponer de herramientas que permitan conocer el estado y la evolución de la calidad de las aguas subterráneas para decidir cuándo y cómo utilizarlas de forma segura.

En este contexto, el objetivo del proyecto URBANM2O es evaluar la idoneidad de los sensores disponibles en el mercado, así como la fiabilidad de otros sensores actualmente en desarrollo, para monitorizar la evolución de la calidad del agua en diferentes matrices. En el caso de Sant Adrià del Besòs, el proyecto se centrará

en el estudio de las aguas subterráneas. En la zona de estudio se dispondrá de más de 15 puntos de observación donde se instalarán sensores de nivel, temperatura y conductividad eléctrica, passive samplers para el monitoreo de diferentes tipos de compuestos (iones mayoritarios, metales, pesticidas, compuestos farmacéuticos y de uso personal y PFAS), y sensores para la medición de oxígeno disuelto, turbidez y materia orgánica, entre otros. Las mediciones de los sensores, combinadas con los análisis de calidad del agua de muestras tomadas en los diferentes puntos, nos permitirán establecer parámetros medibles en tiempo real por diferentes tipos de sensores, que servirán como indicadores de calidad y permitirán adoptar decisiones con base en los datos medidos.

De forma paralela, el proyecto pretende desarrollar un modelo predictivo de la zona mediante el acoplamiento de un modelo simplificado, que estima el impacto del drenaje urbano en la calidad de los recursos hídricos superficiales, con un modelo de transporte para el medio subterráneo. Este modelo se alimentará de datos provenientes de los sensores para mejorar la fiabilidad de sus predicciones.

Agradecimientos: Esta investigación forma parte del proyecto UrbanM2O que está financiado por el programa de investigación e innovación Horizon Europe (subvención n.º 101180710) y por la Secretaría de Estado de Educación, Investigación e Innovación de Suiza (SERI).

Separación de hidrogramas en una cuenca de llanura mediante EMMA-MIX: el agua de avenida tiene una fracción vieja, pero no muy vieja.

Romina Marcovecchio,[1], Jesús Carrera[2], Sebastián Dietrich[1], María Emilia Zabala[1]

[1]*Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff", Azul, Buenos Aires, Argentina*
[2]*IDAEA; GHS UPC-CSIC; Barcelona, España*

Palabras clave: EMMA, hidrograma, interacción rio acuífero, isótopos

Resumen. Comprender las fuentes y la dinámica del caudal fluvial, así como su interacción con los acuíferos, es esencial para entender los recursos hídricos de las cuencas fluviales y su respuesta al cambio climático. Sin embargo, sigue siendo un reto, especialmente en zonas de llanura, debido a la baja profundidad del nivel freático, lo que provoca bajos coeficientes de almacenamiento y una rápida respuesta de la escorrentía a las precipitaciones. El resultado es un sistema relativamente complejo en el que varias fuentes de agua contribuyen al caudal del río. En este estudio, aplicamos la metodología EMMA-MIX a la cuenca alta del arroyo Azul (Argentina) para cuantificar las proporciones de mezcla de las aguas de los extremos y refinar así el modelo conceptual de generación de caudales. El enfoque integra datos hidroquímicos e isotópicos para evaluar la contribución de cuatro posibles extremos de agua (lluvia, zona no saturada y aguas subterráneas someras y profundas) a lo largo del año hidrológico. Los resultados ponen de relieve la solidez del enfoque a la hora de abordar la variabilidad isotópica de las precipitaciones y procesos como la desnitrificación. Atribuimos esta solidez al uso de múltiples especies, que pueden compensar los errores en una especie o la incertidumbre en la composición de los extremos. Más allá de cuantificar las contribuciones de las fuentes, la metodología demostró su eficacia a la hora de probar y mejorar los modelos conceptuales, ofreciendo un marco para interpretar la separación de hidrogramas. Los resultados muestran que las aguas subterráneas profundas dominan el caudal de base, hasta un 75 % en condiciones de bajo caudal, pero su contribución disminuye a medida que sube el nivel del río, hasta el punto de desaparecer durante las crecidas. Como resultado, la contribución de las aguas subterráneas durante las crecidas es relativamente alta. El agua de crecida es antigua (anterior al evento), pero la fracción de aguas muy antiguas se anula. Por ello, en el contexto del debate sobre la paradoja del agua

antigua , concluimos que el agua de avenida tiene una fracción vieja, pero no mucho.

Simulación y gestión agéntica de modelos Modflow en una plataforma cloud

Aitor Iraola[1], Xavier Mosquera[1], María Pool[1], Albert Nardi[1]
[1]*Amphos 21*

Palabras clave: Modflow, Agentes de IA, Inteligencia Artificial, Hidrogeología

Resumen. El auge reciente de la inteligencia artificial está abriendo nuevas posibilidades para transformar los flujos de trabajo en hidrogeología numérica. En este contexto, presentamos una plataforma cloud para la simulación y gestión agéntica de modelos Modflow, concebida para integrar agentes de IA en dos etapas clave: la exploración de datos y el proceso de modelización. En la fase de la exploración de datos, la herramienta permite al usuario interactuar con la base de datos del modelo mediante lenguaje natural, formular preguntas, generar visualizaciones y realizar cálculos complejos de manera intuitiva. Para preservar la confidencialidad, el agente accede únicamente a un esquema de alto nivel de la base de datos, mientras que el procesamiento efectivo de los datos se realiza de forma local, evitando el envío de información sensible a la nube.

Además, los agentes se han incorporado directamente al flujo de modelización. La plataforma permite interactuar con los modelos Modflow existentes y reproducir o modificar el proceso de construcción del modelo mediante instrucciones en lenguaje natural, incluyendo cambios en parámetros y condiciones de contorno, la adición o modificación de pozos, la configuración de simulaciones, su ejecución y la consulta de resultados, todo ello en entorno cloud. De este modo, tareas que tradicionalmente requieren interacción compleja con múltiples interfaces y ficheros pueden resolverse a través de una interacción conversacional más natural y accesible.

Desde el punto de vista técnico, el núcleo de la solución es una API amplia y versátil, capaz de exponer de forma estructurada las operaciones necesarias sobre los modelos y sus datos. Sobre esta base se han desarrollado tools específicas para el agente, entendidas como funciones especializadas y acotadas que encapsulan acciones concretas, como clonar un modelo Modflow, inspeccionar la geometría y propiedades de la malla, consultar materiales, modificar entradas, configurar ejecuciones o recuperar resultados. El agente no opera de forma libre sobre el sistema, sino que razona sobre el objetivo planteado por el usuario y selecciona dinámicamente qué herramientas invocar, en qué secuencia y con qué parámetros. Esta aproximación permite que el trabajo se

beneficie directamente de las actualizaciones futuras de los LLM. A medida que se actualicen estos últimos, el producto gana de manera automática capacidad de razonamiento, planificación e interpretación.

En conjunto, la herramienta busca democratizar la modelización hidrogeológica, desplazando parte de la complejidad operativa hacia el agente y permitiendo que el especialista centre su trabajo en la definición conceptual del modelo y en la interpretación de los resultados.

Soluciones ancestrales basadas en la Naturaleza para la recarga de acuíferos en cauces fluviales: el caso de los tapes ecuatorianos y las boqueras almerienses

Sergio Martos-Rosillo[1], Maribel Aguilar-Aguilar[2], Gricelda Herrera-Franco[3]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España - CSIC*
[2]*Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), ESPOL Polytechnic University, ESPOL. Guayaquil. Ecuador.*
[3]*Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE). Ecuador.*

Resumen. En numerosos territorios de Iberoamérica se conservan prácticas tradicionales de manejo hídrico que pueden considerarse auténticas Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) para la recarga de acuíferos, desarrolladas mucho antes de la formulación moderna de la Recarga Gestionada de Acuíferos. Entre estos sistemas de Siembra y Cosecha de Agua (SyCA) destacan los tapes de la costa ecuatoriana y las boqueras del levante español, surgidos en contextos climáticos semiáridos pero con respuestas técnicas y funcionales diferenciadas.

Este trabajo tiene como objetivo analizar y comparar, desde una perspectiva hidrogeológica y de gestión del recurso, el funcionamiento de ambos sistemas, identificando sus principios funcionales, similitudes y diferencias, así como su potencial como SbN frente a la escasez hídrica y la variabilidad climática. Las boqueras, desarrolladas como respuesta campesina a la aridez mediterránea, se basan en la derivación de avenidas de ramblas hacia parcelas abancaladas que permiten la inundación controlada, favoreciendo simultáneamente el riego, la fertilización del suelo y la recarga de acuíferos detríticos aluviales. Por su parte, los tapes ecuatorianos actúan como diques transversales en cauces fluviales, promoviendo la retención de agua, la recarga artificial de acuíferos y la mitigación de problemas asociados a la sobreexplotación y la intrusión salina.

A pesar de las diferencias en escala, tipología hidráulica y contexto socioambiental, ambos sistemas comparten funciones clave como la laminación de avenidas, el incremento de la infiltración y la mejora de la resiliencia hídrica de las comunidades locales. Como resultado, se destacan criterios cualitativos de comparación relacionados con su funcionamiento hidrológico, condiciones

geoambientales, grado de intervención humana y potencial de replicabilidad, que constituyen una base metodológica para futuras evaluaciones cuantitativas de eficiencia.

El estudio pone de relieve el valor de estos sistemas ancestrales como SbN aplicables a la gestión sostenible del agua y a la adaptación al cambio climático en regiones vulnerables.

Agradecimientos: Este trabajo contó con el soporte del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), a través de la red "Red SbN-GIA – Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión integrada del agua en comunidades vulnerables", con el código de subvención 625RT0176.

Subsidencia inducida por explotación de aguas subterráneas y su impacto en infraestructuras críticas: el acuífero del Alto Guadalentín (SE de España)

Concepción Pla[1], María Inés Navarro-Hernández[1], Javier Valdés-Abellán[1], Roberto Tomás[1]

[1]*Universidad de Alicante*

Palabras clave: Subsidencia del terreno, Peligrosidad, Escenarios futuros

Resumen. La subsidencia del terreno asociada a la sobreexplotación de acuíferos constituye uno de los riesgos geológicos más relevantes en regiones semiáridas con elevada dependencia de las aguas subterráneas. En el sureste de España, el acuífero del valle del Alto Guadalentín (Murcia) representa uno de los casos más emblemáticos de subsidencia inducida por bombeo intensivo para usos agrícolas. Este trabajo analiza el impacto potencial de este fenómeno sobre infraestructuras críticas (hospitales, carreteras, etc.), considerando tanto la situación actual como escenarios futuros asociados al cambio climático y a un incremento de la explotación de aguas subterráneas.

La metodología aplicada se basa en el desarrollo de mapas de peligrosidad por subsidencia mediante la integración de variables ambientales y antrópicas en un sistema de análisis espacial. En primer lugar, se evaluó la susceptibilidad a la subsidencia a partir de cuatro factores principales: litología, pendiente, usos del suelo y clima. Se implementó una aproximación para estimar la probabilidad espacial de subsidencia en función de las características del medio físico. Posteriormente, la peligrosidad se obtuvo incorporando indicadores relacionados con la explotación de agua subterránea, calculados mediante la combinación de variaciones en el almacenamiento subterráneo, áreas irrigadas y niveles de estrés hídrico. Finalmente, se definieron escenarios futuros considerando incrementos en las tasas de explotación del acuífero del 20, 30 y 50 por ciento, asociados a un contexto climático más árido previsto para finales del siglo XXI.

Los resultados muestran que, en la situación actual, la mayor parte del territorio del Alto Guadalentín presenta niveles de peligrosidad entre media-baja y media-alta, concentrándose los valores más elevados en la zona central de la cuenca,

caracterizada por sedimentos cuaternarios poco consolidados y una intensa actividad agrícola dependiente del riego con aguas subterráneas. Bajo los escenarios futuros analizados, se observa un incremento significativo de las áreas clasificadas como de alta peligrosidad. En particular, la superficie con niveles altos de subsidencia podría aumentar en más de 500 km cuadrados para un incremento del 20 por ciento en la explotación del acuífero y superar los 900 km cuadrados en el escenario del 50 por ciento.

La evaluación del impacto sobre infraestructuras se realizó mediante el cruce espacial de los mapas de peligrosidad con bases de datos geográficas de infraestructuras críticas obtenidas de OpenStreetMap, incluyendo carreteras, líneas ferroviarias, oleoductos y gasoductos, líneas eléctricas y equipamientos estratégicos. Los resultados indican que, en la situación actual, gran parte de estas infraestructuras se localizan ya en áreas con peligrosidad media-alta. Sin embargo, los escenarios futuros muestran un incremento notable de la exposición: con un aumento del 20 por ciento en la explotación del acuífero, aproximadamente un tercio de la red viaria podría situarse en zonas de alta peligrosidad, mientras que en el escenario más extremo más del 50 por ciento de su longitud se encontraría en estas condiciones. Tendencias similares se observan para las infraestructuras ferroviarias y energéticas.

Estos resultados evidencian que el incremento de la explotación de aguas subterráneas, combinado con condiciones climáticas más áridas, podría intensificar significativamente los procesos de subsidencia en la zona del Alto Guadalentín y aumentar la exposición de infraestructuras estratégicas. En consecuencia, la gestión sostenible de los acuíferos y la incorporación de la subsidencia como factor de riesgo en la planificación territorial y el diseño de infraestructuras resultan elementos clave para reducir los impactos socioeconómicos futuros.

Agradecimientos: Este estudio se ha llevado a cabo en el marco del proyecto RESERVOIR, financiado por el programa Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area (PRIMA), con el apoyo de la Unión Europea (Acuerdo de Subvención 1924).

Transporte de calor en fracturas considerando múltiples escenarios de rugosidad

Sebastián González-Fuentes[1], Víctor Vilarrasa Riaño[2], Sandro Andrés Martínez[3], Silvia De Simone[4]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DECA), Universidad Politécnica de Cataluña·BarcelonaTech (UPC)*
[2]*Grupo de Investigación del Cambio Global (GCRG), IMEDEA, CSIC-UIB*
[3]*Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)*
[4]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del agua (IDAEA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*

Palabras clave: transferencia de calor, rugosidad de las fracturas, flujo de fluidos, modelo numérico

Resumen. Este estudio se centra en la influencia de la geometría y rugosidad de las superficies de una fractura en la transferencia de calor en rocas fracturadas saturadas, un aspecto clave para el desarrollo, la gestión y la optimización de la extracción de energía geotérmica profunda y la disposición de residuos nucleares. Analizamos la respuesta a la inyección de un pulso frío bajo diversos escenarios de rugosidad, basándonos en soluciones analíticas y simulaciones numéricas de campos de aperturas, tanto sintéticos como reales. Las fracturas actúan como las principales vías para el flujo y el transporte advectivo de calor, mientras que el intercambio térmico con la matriz rocosa circundante ocurre predominantemente por difusión. Investigamos el impacto de la rugosidad de las fracturas en el transporte de calor y la respuesta del sistema a cambios en el campo de apertura de las fracturas, inducidos por el deslizamiento relativo entre superficies mecánicamente activadas en la dirección normal al flujo del fluido.

Los resultados analíticos, calculados en fracturas sintéticas con perfiles sinusoidales, muestran curvas de llegada (breakthrough curves) diferenciadas dependiendo del deslizamiento relativo entre las paredes de la fractura. Esto se observa en el análisis de dos distintos enfoques de deslizamiento entre las paredes de las fracturas, lo que induce diferentes cambios en los campos de apertura. En ambos escenarios, mayores deslizamientos dan lugar a campos de

apertura con valores promedio más altos y distribuidos en un rango más amplio, lo que se traduce en temperaturas pico más tempranas debido a un comportamiento advectivo dominante. Las colas de las curvas de llegada presentan una pendiente transitoria de -1.4, que evoluciona hacia un comportamiento asintótico con una pendiente característica de -1.5 para largos periodos de tiempo, confirmando que el intercambio difusivo gobierna en el largo plazo.

Los cálculos numéricos son validados con la solución analítica de fracturas sinusoidales, para posteriormente, modelar fracturas generadas a partir de imágenes escaneadas de una superficie rugosa real, considerando distintas condiciones de deslizamiento relativo entre las superficies de la fractura. Los resultados, en una misma sección de observación y para diferentes magnitudes de deslizamiento, muestran un flujo cada vez más canalizado perpendicular a la dirección del deslizamiento en la medida que este aumenta. La temperatura pico y el tiempo de llegada de este pico muestran una buena concordancia con el ajuste de la solución analítica sinusoidal, mientras que la evolución de la pendiente de las curvas de llegada ajustadas se aproxima progresivamente al régimen asintótico asociado al intercambio difusivo de calor entre la fractura y la matriz. En conjunto, estos resultados amplían nuestra comprensión de cómo el deslizamiento relativo de las superficies de una fractura y el subsecuente cambio en el campo de apertura influyen en el transporte de calor en rocas fracturadas al inducir canalización y un arribo térmico acelerado, contribuyendo a mejorar el desempeño y la operación a largo plazo de la extracción de energía geotérmica profunda.

Agradecimientos: Este trabajo forma parte del proyecto HydroPoreII (referencia PID2022-137652NB-C44) financiado por MICIU /AEI/ 10.13039/501100011033 y por ERDF, EU . IMEDEA es una Unidad de Excelencia "Maria de Maeztu" acreditada (concesión CEX2021-001198, financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033). S.D.S. agradece el apoyo del contrato 'Ramón y Cajal' (referencia RYC2021-032780-I) financiado por MICIU /AEI /10.13039/501100011033 y por la "Unión Europea - Next Generation EU/PRTR "

Transporte de sedimento en suspensión en acuíferos kársticos e implicaciones como vector de contaminación fecal. El caso de estudio de la Sierra de Ubrique (S España)

Jaime Fernández-Ortega[1], Juan Antonio Barberá Fornell[1], Bartolomé Andreo Navarro[1]

[1]*Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), 29071 Málaga, España*

Palabras clave: karst, sedimentos, bacterias, consumo humano

Resumen. En acuíferos kársticos, el desarrollo de conductos favorece la entrada, movilización y almacenamiento de sedimentos en su interior. En estos sistemas, el transporte de partículas en suspensión está controlado por su funcionamiento hidrogeológico (modalidades de recarga, grado de karstificación), pero también por las condiciones hidrodinámicas. Durante episodios de recarga, los flujos rápidos y turbulentos pueden provocar variaciones abruptas de turbidez en el agua de manantiales y/o sondeos. Dado que las partículas en suspensión actúan como portadoras de bacterias, su presencia en captaciones destinadas al abastecimiento puede tener implicaciones directas para la salud humana si no se interrumpe la explotación. Además, las diferentes actividades que se desarrollan sobre el área de recarga (ganadería, industria, depuración de aguas, etc.) pueden influir en la entrada de contaminantes al acuífero. Por estos motivos, la presente investigación pretende determinar los principales mecanismos de transporte de sedimentos en el acuífero investigado y precisar el papel que desempeñan en la movilización de bacterias hacia los puntos de captación de agua subterránea destinada al consumo humano.

Se ha seleccionado como caso de estudio el acuífero kárstico (binario) de la Sierra de Ubrique, situado en el NE de la provincia de Cádiz, de cuyas aguas subterráneas se abastece la población homónima. Entre octubre de 2020 y septiembre de 2023 se midieron de forma continua parámetros hidroclimáticos (precipitación) e hidrogeológicos (caudal, conductividad eléctrica -CE-, turbidez) en el agua de los manantiales permanentes (Cornicabra y Algarrobal) que drenan el acuífero, así como en la que se infiltraba en la sima de Villaluenga. Al mismo tiempo, se tomaron muestras de agua subterránea para la determinación de Escherichia coli

en laboratorio. En concreto, se analizaron las respuestas del arroyo infiltrado en la sima de Villaluenga y de los dos manantiales permanentes durante episodios de lluvia intensa que provocaron la recarga del acuífero.

Los resultados muestran el gran aporte de sedimentos introducido por la sima de Villaluenga, que varía entre 8.494 y 11.646 kg en función del evento, así como un valor máximo de turbidez de 1.281 UNT en la entrada del sumidero. En el manantial de Cornicabra se midieron valores máximos de turbidez de hasta 64 UNT y de un orden de magnitud superior (332 UNT) en el del Algarrobal. El análisis temporal de las crecidas permitió identificar en Algarrobal aumentos de CE -sin presencia de actividad bacteriana- coincidentes con el primer pico de turbidez. Esto se interpretó como la movilización de sedimento para-autóctono en el interior del sistema por flujos de tipo pistón procedentes de la zona saturada del acuífero. Los sucesivos picos de turbidez, coincidentes con descensos de CE y una elevada actividad de E. coli (> 2.900 NMP/100 mL), se explican por la llegada de flujos rápidos y concentrados desde la sima de Villaluenga. En el manantial de Cornicabra se observó esta misma secuenciación temporal de respuestas naturales tras las primeras lluvias efectivas del año hidrológico, mientras que en condiciones hidrodinámicas intermedias/altas, se apreció una mayor proporción de mezcla de agua de la zona saturada y, por tanto, una disminución de la carga de sedimento y actividad de E. coli. La mayor conectividad sumidero-conducto favorece la entrada de sedimento al sistema, mientras que la existencia de sifones actúa como trampas de sedimento.

Agradecimientos: Esta investigación es una contribución al proyecto europeo KARMA (Karst Aquifer Resources availability and quality in the Mediterranean Area – ANR-18-PRIM-0005), financiado por la convocatoria PRIMA y al proyecto español PCI2019–103675, del Programa Combinado Internacional del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Los autores agradecen al Ayuntamiento de Ubrique y a la «Empresa Mixta de Aguas de Ubrique» su colaboración.

Tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina mediante sustratos reactivos con caliza y cenizas de combustión de biomasa de olivar

Katheryn López-Laserra[1], M. Carmen Hidalgo Estévez[1], M. José de la Torre[1], Rosendo Mendoza[1], Javier Rey[1], Cristian Prieto[1], José Benavente[2]

[1]*Universidad de Jaén. Dpto. de Geología/CEACTEMA. Campus Científico Tecnológico de Linares. 23700 Linares (España)*
[2]*Universidad de Granada. Instituto del Agua. 18071 Granada (España)*

Palabras clave: metales disueltos, drenaje de mina, remediación pasiva

Resumen. El tratamiento pasivo del drenaje ácido de mina potencia procesos biogeoquímicos naturales que permiten neutralizar la acidez y eliminar metal(oid)es del agua, sin requerir energía eléctrica ni adiciones constantes de reactivos químicos. Entre estos métodos se encuentra el uso de mezclas reactivas compuestas por un material alcalino disperso en una matriz inerte de alta porosidad. Este sustrato disperso proporciona una superficie específica mayor para las reacciones químicas, lo que conduce a una neutralización más rápida y aumenta la generación de alcalinidad. En el caso de un sistema reactivo constituido por caliza, el valor de pH del agua tratada suele estabilizarse entre 6,5 y 7,5. Esto hace que no sea muy eficaz para la eliminación de metales divalentes, dado que se requiere un pH mayor para que puedan precipitar eficientemente. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en unos experimentos en columna para probar la efectividad de la ceniza de combustión de biomasa de olivo (un reactivo altamente alcalino) para la eliminación de Zn y Mn. Las aguas de drenaje de dos minas abandonadas en el distrito minero de La Carolina (Jaén) — con un pH de 3,8–4,5 y altas concentraciones de sulfato (1200-1600 mg/L), Fe (6-31 mg/L), Mn (5-20 mg/L) y Zn (1-3 mg/L) — se pasaron a través de dos columnas reactivas dispuestas en serie. La primera columna se rellenó con una mezcla de caliza triturada y virutas de madera; la segunda, con ceniza de biomasa y virutas de madera. Se analizaron los parámetros físico-químicos (pH y conductividad eléctrica) y los metal(oid)es disueltos en el agua a la entrada y salida de cada columna. Se mantuvo un flujo continuo mediante una bomba peristáltica, con un tiempo de residencia promedio de 24 horas por columna. Durante las siete semanas del experimento, el agua de mina tratada con sustrato calizo alcanzó valores de pH entre 6,9 y 8,1 a la salida de la columna, y se eliminó

casi todo el Fe y entre 65-85 % del Zn disuelto. En la salida de la columna de ceniza de biomasa, los valores de pH fueron superiores a 10 durante la primera semana, lo que resultó en una reducción drástica del contenido de Mn y Zn disuelto en el agua. El pH disminuyó a 8,7 al final del ensayo, lo que condujo a una menor eficiencia en la eliminación de Mn, aunque el porcentaje de retención en la columna se mantuvo en torno al 70 %. Los análisis mineralógicos de los precipitados generados en las columnas mostraron que estos elementos quedaban retenidos en nuevas fases como sulfatos de Ca y Mg, oxihidróxidos de Fe (con sustitución parcial de Fe por Zn y Mn), schwertmannita (oxihidroxisulfato de Fe) y fosfato de calcio, que ocasionalmente incorpora Fe y Mn.

Agradecimientos: Esta comunicación es parte del proyecto PID2021-123506OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE

Una aplicación a la hidrogeología de emergencia, el caso del incendio forestal de Las Médulas de 2025

Raquel Morales García[1], José María Ruiz Hernández[1], Almudena de la Losa Román[1], Juan José Durán Valsero[1]

[1]*Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)*

Palabras clave: incendios forestales, emergencias, contaminación, acuíferos

Resumen. En una situación de emergencia, la población necesita una ayuda especializada, rápida y eficaz. Las autoridades competentes, para decretar un estado de emergencia y la gestión del seguimiento del periodo de recuperación posterior, necesitan un juicio experto para tomar las decisiones pertinentes respecto a la seguridad ciudadana. Cada vez sufrimos más fenómenos meteorológicos adversos y necesitamos estar preparados para afrontar este imparable cambio climático, y el papel de la hidrogeología en esta emergencia climática contribuye, sin duda, a mitigar el impacto de estos fenómenos y desastres naturales. En las últimas décadas los incendios están creciendo desmesuradamente en extensión e intensidad, causando grandes desastres, especialmente en el arco mediterráneo y en España. Constituyen uno de los mayores riesgos para la naturaleza hoy en día y generan, en ocasiones, una alteración importante de la calidad de las aguas subterráneas, principalmente por el aporte de cenizas y compuestos químicos que se infiltran en el suelo tras el paso del fuego. Los cambios en la calidad del agua subterránea pueden comprometer su uso para el abastecimiento urbano de las poblaciones del entorno, la agricultura o los ecosistemas dependientes. Por este motivo es importante llevar a cabo una rápida investigación post-incendio, que pueda ayudar al desarrollo de estrategias de gestión, basadas en una monitorización prolongada y una adecuada restauración eco-hidrológica. Este trabajo de hidrogeología de emergencia, una aplicación novedosa de la ciencia hidrogeológica, contribuye a aumentar el bajo grado de conocimiento existente en la evaluación de la calidad de las aguas subterráneas post-incendio y proporciona un marco metodológico aplicable a contextos de emergencia climática. El incendio de Yeres (León, agosto de 2025) que afectó a 4.416 ha en el entorno del BIC de Las Médulas, motivó la activación del Grupo de Hidrogeología del GADE-CSIC (Grupo de Asesoramiento en Desastres y Emergencias del Consejo

Superior de Investigaciones Científicas), para realizar un estudio de caracterización hidrogeológica de los acuíferos de la zona, evaluando la posible afección sobre las aguas subterráneas, utilizadas en gran medida para abastecimiento de los núcleos urbanos afectados. Se realizaron dos campañas de muestreo (septiembre y octubre de 2025), con 26 puntos de control que incluyeron manantiales, pozos, sondeos y lagunas. En cada punto se midieron parámetros físico-químicos del agua in situ y se analizaron compuestos mayoritarios, metales, COVs, PAHs y plaguicidas. Los resultados en laboratorio, muestran una hidroquímica dominada por aguas bicarbonatadas, con características químicas coherentes con los cuatro acuíferos identificados: aluvial, mioceno detrítico, pizarras paleozoicas y calizas ordovícicas. La mayoría de las aguas presentan buena calidad y estabilidad hidroquímica, sin indicios claros de alteración atribuible al incendio, debido probablemente a la inmediatez de los muestreos realizados. No obstante, se detectaron algunas anomalías puntuales relacionadas con la presencia de metales pesados como Fe, Mn, Al, así como variaciones del pH en algunas de las lagunas muestreadas, probablemente relacionadas con la escorrentía superficial de cenizas. La comparación de estas campañas con datos históricos puntuales sugiere la existencia de posibles incrementos de la conductividad eléctrica del agua en algunos puntos tras el incendio, aunque sin evidencias concluyentes. En conjunto, los resultados indican que el sistema hidrogeológico mantuvo en el momento inmediato al incendio su funcionalidad y calidad, si bien la presencia de ciertas anomalías justificaría un seguimiento temporal, durante un periodo no inferior a un año hidrológico.

Agradecimientos: Fundación Las Médulas, Paisaje y Patrimonio de la Consejería de Cultura, Turismo y Deporte de la Junta de Castilla y León.

Grupo de Asesoramiento en Desastres y Emergencias (GADE) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Uso de temperatura como trazador y modelización estocástica para el análisis de recarga gestionada

Marta García-Gámez[1], Carlos Duque[1], Christian Montoro-Paredes[1]

[1]*Universidad de Granada*

Palabras clave: temperatura, trazador, recarga gestionada, modelo estocástico

Resumen. Uno de los retos en recarga gestionada de acuíferos es evaluar con precisión la trayectoria de las aguas recargadas en el acuífero y cuantificar las proporciones de mezcla entre el agua de recarga y el agua subterránea. El uso de trazadores constituye una herramienta fundamental para analizar la dinámica del flujo, los procesos de dispersión y la evolución en el acuífero. La temperatura se ha propuesto como un trazador hidrogeológico especialmente interesante debido a varias ventajas: es un trazador natural, permite obtener medidas inmediatas, no afecta a la calidad del agua y evita posibles impactos asociados al uso de trazadores artificiales. Sin embargo, no se trata de un trazador estrictamente conservativo, ya que puede verse afectada por procesos naturales y su interpretación requiere considerar propiedades como la conductividad térmica, cuya estimación puede resultar compleja en medios heterogéneos. Este estudio tiene como objetivo abordar estos retos mediante el uso de temperatura como trazador para caracterizar el flujo en una parcela experimental de recarga gestionada.

Para ello, se realizaron varios ensayos de recarga mediante agua a distinta temperatura con el objetivo de generar un contraste térmico entre el agua infiltrada y el acuífero. La monitorización se llevó a cabo mediante una red de 20 piezómetros equipados con sensores de presión y temperatura de alta frecuencia para registrar la evolución temporal, complementada con perfiles verticales realizados puntualmente con sonda en pozos seleccionados para caracterizar la distribución de la temperatura en profundidad. Este contraste térmico facilita utilizar la temperatura como trazador para analizar los tiempos de respuesta en los distintos puntos de control y los patrones de propagación del agua recargada.

Los resultados de los ensayos se interpretaron en el marco de un modelo geológico desarrollado mediante técnicas de estadística multipunto, condicionado directamente a los datos de los sondeos. El modelo reproduce

heterogeneidades a pequeña escala y transiciones litológicas abruptas características de acuíferos aluviales. La distribución de litologías obtenida resulta coherente con los tiempos de respuesta y los patrones de propagación observados durante los ensayos. Esta integración entre los ensayos de recarga y el modelo geológico estocástico facilita interpretar de forma más realista la propagación del agua infiltrada en acuíferos aluviales heterogéneos y apoyar el diseño de estrategias de recarga.

Uso Emergencial dos Recursos Hídricos Subterrâneos em Minas Gerais, Brasil

José Augusto Costa Gonçalves[1], Manuela Augusta Diniz Siqueira[1], Augusto Costa Mahatma Milani[2]

[1]*Universidade Federal de Itajubá*
[2]*Universidade Federal de Viçosa*

Palabras clave: Poços Tubulares, Águas Subterrâneas, Domínios Hidrogeológicos, Bacia do Rio Paraopeba

Resumen. As águas subterrâneas podem representar uma alternativa de garantia ao acesso à água em situações de comprometimento dos sistemas convencionais de captação, que podem ser ocasionados por desastres naturais ou antrópicos, como o rompimento de barragens. Nesse contexto, o presente estudo tem por objetivo realizar uma abordagem acerca da utilização das águas subterrâneas a partir do estudo de caso realizado na bacia hidrográfica do rio Paraopeba/MG em um contexto de crise hídrica. Após o rompimento da Barragem de rejeitos B-I, houve em sequência o rompimento das barragens B-IV e B-IV-A na mina Córrego do Feijão, localizada em Brumadinho, MG. Diante da recomendação de suspensão da captação de água bruta no rio Paraopeba por parte dos órgãos competentes e como forma de atender as demandas hídricas que surgiram após o rompimento, as águas subterrâneas foram utilizadas como garantia ao direito humano de acesso à água em quantidade e qualidade. A caracterização hidrogeoquímica e hidrogeológica da bacia hidrográfica do rio Paraopeba foi realizada considerando aspectos quantitativos e qualitativos. Para a análise quantitativa foram analisados dados de vazão, profundidade, entrada d'água, nível estático, nível dinâmico, rebaixamento e domínio hidrogeológico de 151 poços, distribuídos entre o domínio Cristalino (56), Poroso-fissural (51), Metassedimentos/Metavulcânicas (33) e Formações Cenozoicas (11). Quanto à análise qualitativa, foram avaliados parâmetros físico-químicos de 89 poços, sendo 32 poços pertencentes ao domínio Cristalino, 29 ao Poroso-fissural, 20 ao Metassedimentos/Metavulcânicas e 8 ao Formações Cenozoicas. Dentre os resultados, destaca-se o domínio Poroso-fissural, por apresentar melhores condições hidrodinâmicas e maiores valores para Cálcio (Ca), Sódio (Na), Bicarbonatos (HCO3), Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Dureza Total e Condutividade Elétrica (CE) dentre a classificação dos elementos maiores e Zinco (Zn), Urânio (U), Manganês (Mn), Ferro (Fe) e Bário (Ba) dentre os elementos traço. Ademais, o estudo apresenta a eficiência da

utilização das águas subterrâneas como alternativa em contexto de crise hídrica e ressalta a importância da implementação de políticas públicas que tornem a gestão das águas subterrâneas mais efetivas e que busquem reduzir a falta de conhecimento, presente em grande parte da sociedade, desse precioso recurso.

Agradecimientos: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023.

Utilización de datos InSAR para la caracterización de acuíferos mediante análisis de series temporales.

Lisbeth Núñez Haugh[1], Anna Jurado Elices[1], Francesco Demichele[1], Estanislao Pujades Garnes[1]

[1]*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC)*

Resumen. El análisis de series temporales de nivel piezométrico es una herramienta útil para caracterizar acuíferos. Sin embargo, su aplicabilidad se ve restringida por la densidad de puntos de observación con registros suficientemente largos. Frente a esta limitación, los productos InSAR del European Ground Motion Service (EGMS) proporcionan series de deformación vertical a escala continental, de libre acceso y con alta densidad espacial. Dada la respuesta hidromecánica del subsuelo a variaciones de nivel, parte de las deformaciones observadas podrían estar vinculadas a cambios en el almacenamiento del agua subterránea. El objetivo de este trabajo es evaluar si los datos de deformación InSAR pueden analizarse de forma análoga a las series temporales de nivel piezométrico para caracterizar la respuesta temporal de los acuíferos.

Se han considerado datos piezométricos y de deformación en depósitos aluviales de diferentes lugares de Europa. En cada caso se analizan conjuntamente series de entrada (precipitación y/o recarga estimada) y señales de respuesta (niveles piezométricos y deformación vertical). Se aplican métricas en el dominio temporal (autocorrelación y correlación cruzada) para cuantificar memoria y retardo. La comparación entre zonas aluviales, considerando distintas resoluciones temporales, sugiere patrones de respuesta comparables entre registros piezométricos e InSAR a escalas temporales dominadas por procesos regionales. Además, se aplica estimación espectral para comparar la firma espectral de la respuesta observada en ambas señales y derivar tiempos característicos.

Este enfoque interpreta la respuesta del sistema acuífero como un filtro de paso bajo y vincula cambios de pendiente y tendencias espectrales con escalas temporales de respuesta. La evaluación por bandas de frecuencia permite identificar rangos de mayor coherencia y discrepancias informativas. Los resultados permiten valorar el potencial de InSAR como herramienta para ampliar espacialmente la estimación de tiempos característicos y apoyar la

regionalización de parámetros hidrogeológicos, relevantes para la gestión y el modelado hidrogeológico regional.

Agradecimientos: Esta investigación forma parte de la subvención PLEC2023-010215 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y del proyecto AqUADAPT (CNS2023-144051) financiado por MICIU/AEI/https://doi.org/10.13039/501100011033 y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

Valores de Recarga como Indicador de Sobreexplotación de Aguas Subterráneas

Nafiseh Salehi Siavashani[1], Anna Jurado Elices[1], Luis Samaniego[2], Estanislao Pujades Garnes[1]

[1]*Department of Geosciences, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC), Jordi Girona 18-26, Barcelona, 08034, Spain*
[2]*Department of Computational Hydrosystems, Helmholtz Center for Environmental Research (UFZ), Permoserstr. 15, 04318, Leipzig, Saxony, Germany; Institute of Environmental Science and Geography, University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Str. 24-25, 14476, Potsdam, Brandenburg, Germany*

Palabras clave: Modelización hidrológica, Modelización a gran escala, Sobreexplotación

Resumen. Los recursos de agua subterránea en regiones semiáridas de todo el mundo se enfrentan a una presión creciente debido a la variabilidad climática y al aumento de la demanda. La Cuenca Alta del Guadiana (CAG), en el centro de España (~16.000 km²), ejemplifica este desafío. Décadas de extracción intensiva de agua subterránea para riego han provocado la sobreexplotación de los acuíferos y un descenso continuado de los niveles piezométricos en las principales unidades hidrogeológicas. La cuantificación precisa de la recarga de agua subterránea es crucial para una gestión sostenible, sin embargo, algunas estimaciones suelen pasar por alto los efectos indirectos del bombeo sobre los procesos de recarga.

Este estudio emplea el mesoscale Hydrological Model (mHM), un modelo distribuido basado en procesos, para simular el balance hídrico a escala de cuenca y la recarga de aguas subterráneas durante el período 2006–2018. El modelo utiliza datos de precipitación y temperatura de la AEMET y se calibró frente a caudales diarios observados en múltiples estaciones de aforo distribuidas por la cuenca.

La recarga simulada resultó significativamente inferior a los valores obtenidos mediante los métodos clásicos de balance hidrogeológico o estudios regionales previos. Esta subestimación se atribuye a (i) la imposibilidad de implementar los bombeos en el código mHM y (ii) el grado de explotación del acuífero, que evita que los acuíferos superficiales aporten agua a los ríos en ausencia de precipitaciones. Durante la calibración, el modelo compensa la falta de aporte de

los acuíferos a los ríos (debida a la sobreexplotación) reduciendo las estimaciones de recarga. A pesar del error relativo a la recarga modelada, esta nos aporta información sobre el grado de sobreexplotación de los acuíferos.

Para validar esta interpretación, cuantificamos de forma independiente la recarga real mediante la estimación de la demanda de agua de riego en toda la cuenca. Las áreas de cultivos regadío se cartografiaron utilizando CORINE Land Cover (2018) y datos de parcelas agrícolas SIGPAC, mientras que los requerimientos de riego específicos por cultivo se derivaron de los coeficientes de cultivo FAO-56, la evapotranspiración de referencia local (ETo) y la precipitación efectiva. Aquellas zonas donde la recarga calculada es menor se corresponden con aquellas donde existe una mayor demanda de agua para riego.

Este enfoque representa un avance metodológico para la modelización hidrológica a gran escala en acuíferos semiáridos intensamente explotados, donde los datos directos de bombeo no suelen estar disponibles debido a pozos no registrados o ilegales. Al incorporar indirectamente los efectos de la extracción, la recarga estimada podrá usarse para implementar la recarga efectiva en modelos hidrogeológicos. Además, los patrones espaciales del déficit de recarga revelan zonas críticas de sobreexplotación, apoyando intervenciones focalizadas como la regulación del bombeo, la recarga artificial gestionada o la optimización de patrones de cultivo.

Agradecimientos: Esta investigación forma parte de la subvención PLEC2023-010215 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. N.S.S. agradece la financiación de la ayuda Juan de la Cierva (JDC2024-053428-I), financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

Variaciones en el almacenamiento de aguas subterránea en acuíferos cuencas montañosas

Josep Mas-Pla[1], Warren Meredith[2], Federico Emanuel Franco[3], Manuela Lasagna[3]

[1]*Institut Català de Recerca de l'Aigua y Universitat de Girona*
[2]*Institut Català de Recerca de l'Aigua*
[3]*Università di Torino*

Palabras clave: Almacenamiento, Balance hídrico, Cuencas montañosas

Resumen. El cambio climático está alterando los flujos hidrogeológicos con importantes implicaciones para la recarga de aguas subterráneas, la sostenibilidad del caudal base y la disponibilidad estacional de agua. Aunque los enfoques de balance hídrico a escala de cuenca se utilizan para evaluar respuestas hidrológicas al forzamiento climático, el componente almacenamiento sigue siendo difícil de cuantificar directamente, especialmente en escalas temporales subanuales. En esta comunicación presentamos un marco de diagnóstico para investigar la dinámica del almacenamiento de agua subterránea en cuencas ubicadas en zonas montañosas, donde la influencia de regímenes intensos de bombeo (es decir, las presiones antrópicas) son limitadas.

El análisis se basa en el balance hídrico clásico en el que los valores de escorrentía, Q, y un parámetro de almacenamiento, ξ, se normalizan a la diferencia entre precipitación y evapotranspiración real (P-ETR). El parámetro ξ representa dos términos relevantes: la diferencia de flujo subterráneo saliente y entrante en la cuenca, ΔGW = GWout – GWin, y la variación estacional de almacenamiento en la cuenca hidrográfica por unidad de tiempo, habitualmente denominada ΔS/Δt. El valor de ETR se obtiene del análisis basado en la formulación de Budyko, una vez la relación ETR/P ha sido calculada en base al valor de la evapotranspiración potencial y los coeficientes correspondiente a los usos del suelo (Zangh et al., 2001). El valor acumulado de ξ en función del tiempo permite descriminar para cuencas montañosas los valores de ΔGW y ΔS/Δt.

El marco se aplica a nueve cuencas que abarcan diferentes condiciones hidroclimáticas en las cuencas de los ríos Ter y Fluvià (NE de Cataluña) y cuatro cuencas de los Alpes Occidentales (Piamonte). Los resultados muestran que cada cuenca presenta un valor de ΔGW estable, aunque sensible a las variaciones del régimen hidrológico (sequías). ΔGW es habitualmente positivo (GWout > Gwin);

sin embargo, una cuenca alpina presenta GWout < Gwin, indicando la importancia de las aportaciones de cuencas vecinas a su balance hídrico. Por su parte, el término ΔS/Δt muestra tendencias estacionales que permiten evaluar la contribución mensual del sistema hidrogeológico a las salidas del sistema, concretamente evapotranspiración y escorrentía superficial.

En síntesis, los datos de las cuencas analizadas ilustran una visión original del balance hídrico para incidir en la componente superficial del ciclo hidrológico y, especialmente, en su cuantificación, aportando un análisis temporal aplicable a las zonas de recarga de los sistemas hidrogeológicos regionales sensibles a los efectos del cambio climático, especialmente sequías, y frecuentemente olvidadas en las planificaciones hidrogeológicas.

Agradecimientos: Financiación: Proyecto TREASURE (PCI2024-153494) / UE y AEI-2022-Water4All. F. Franco fue becado por la Universidad de Turín y el MUR.

Visibilizar las aguas subterráneas mediante un modelo físico

Joan Bach Plaza[1]

[1]*Unitat de Geodinàmica Externa i d'Hidrogeologia. Universitat Autònoma de Barcelona.*

Palabras clave: aguas subterráneas, ciclo del agua, ideas previas, modelo físico

Resumen. Los recursos hídricos y su punto de partida, el ciclo del agua, forman parte de un proyecto dentro de la asignatura obligatoria Mirem el món (Miremos el mundo), que se imparte en el primer curso a los alumnos de la Facultat de Ciències de l'Educació (CCEE) en la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). En ese contexto se preparó una secuencia de enseñanza, que se inició con el análisis de las ideas previas de los estudiantes sobre el ciclo del agua.

Los resultados obtenidos, igual que en otras numerosas investigaciones realizadas, pusieron de relieve que pese a enseñarse este ciclo en las escuelas desde la etapa de primaria y posteriormente en la enseñanza secundaria obligatoria (ESO), la componente subterránea del ciclo es la que presenta una mayor dificultad de comprensión y no llega a formar parte de la cultura científica de los estudiantes al finalizar esta enseñanza obligatoria e incluso al ingresar en la universidad. Solo un 20%, de una muestra de 481 estudiantes de 7 cursos académicos distintos, reconocen la existencia de las aguas subterráneas.

Esta situación, en la que un porcentaje muy elevado del alumnado no tiene una visión completa del ciclo del agua, llevó a planificar unas actividades a realizar como estrategia para reestructurar y hacer visibles las aguas subterráneas. El objetivo de esta comunicación es presentar estas actividades basadas en un modelo físico, diseñadas para producir la incorporación de las aguas subterráneas al concepto de ciclo del agua. Además, se considera que el modelo físico y las actividades que se realizan pueden adaptarse a otros niveles educativos, tanto en la educación primaria como en la ESO, para ayudar a impartir el modelo de ciclo del agua completo e incorporarlo a la cultura científica de los ciudadanos.

Se propone como actividad de aprendizaje, el uso de un modelo físico que simula un acuífero utilizando un recipiente reciclado de 8 L., que se corta longitudinalmente para dejarlo abierto en forma de cubeta, una parte del trozo de plástico que hemos cortado se aprovecha para construir una pared permeable

que separa dos compartimentos, uno más pequeño que se deja vacío para llenarlo posteriormente con agua y el grande se llena de arena de tamaño grueso. Se utiliza un pozo construido con un tubo de metacrilato de 15 mm de diámetro, del que se puede bombear agua con una jeringa adaptada con un tubo flexible. Una vez lleno de agua, los estudiantes pueden interaccionar y experimentar con él, midiendo el nivel freático y sus variaciones al bombear agua, lo que mejora la visualización de las aguas subterráneas, el concepto de acuífero y el movimiento del agua dentro del acuífero.

Una vez están familiarizados con el modelo físico, se puede aprovechar para experimentar otros procesos como actividades de aplicación, que sirvan para mejorar la comprensión de la dinámica de las aguas subterráneas y su relación con las superficiales. Por ejemplo, se puede simular la intrusión marina, la contaminación por vertidos puntuales o el ascenso del nivel del mar debido al deshielo de los glaciares.

En la actividad final de evaluación, un 80% de los estudiantes incorporaron las aguas subterráneas, respecto a un 20% que solo lo hacían en el inicio del proyecto.

Visión general del proyecto WATER4MED y su implementación en la cuenca del río Besòs (España)

Estanislao Pujades-Garnes[1], Francesco Demichele[1], Luciana Scrinzi[1], Juan Rubilar[1], Miguel Ángel Marazuela[1], Erik Mestanza[2], Sandra Pérez[2], Sergio Santana-Viera[2], Anna Jurado[1]

[1]*Departamento de Geociencias, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona, España*
[2]*Departamento de Química Medioambiental, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC), Barcelona, España*

Palabras clave: Región mediterránea, Cambio climático, Recursos hídricos superficiales y subterráneos, Resiliencia al cambio climático

Resumen. La región mediterránea está sometida a un creciente estrés hídrico como consecuencia del cambio global, cuyos efectos se manifiestan con especial intensidad en esta zona. El crecimiento de la población en las ciudades conlleva una mayor demanda y concentración del consumo de agua en torno a las áreas urbanas. Además, se prevé un incremento generalizado de la demanda hídrica impulsado por sectores clave como la agricultura, la industria y el turismo. Esta tendencia contrasta con la evolución esperada de la disponibilidad del recurso. Por un lado, se espera que los efectos del cambio climático impacten de manera significativa en la región mediterránea, aumentando la frecuencia, la intensidad y la duración de eventos extremos, como sequías y precipitaciones intensas. Paralelamente, las actividades antrópicas introducen un número creciente de nuevos contaminantes en el ciclo hidrológico, cuya evolución y efectos no se conocen aún con suficiente detalle.

En este contexto, el proyecto WATER4MED, iniciado en 2024 y actualmente en desarrollo, tiene como objetivo proporcionar herramientas que mejoren los modelos de gobernanza del agua en el Mediterráneo. Entre sus principales líneas de actuación se encuentran: el desarrollo de metodologías para evaluar el estado cualitativo y el comportamiento de los recursos hídricos en grandes áreas, la modelización de los recursos hídricos superficiales y subterráneos a escala de cuenca, el desarrollo de metodologías para evaluar la capacidad de resiliencia; y la definición de medidas orientadas a la mitigación de los efectos de eventos

extremos sobre los recursos hídricos. El proyecto se desarrolla en 6 sitios de estudio mediterráneos situados en España, Portugal, Marruecos, Túnez, Líbano y Jordania.

El caso de estudio español corresponde a la cuenca completa del río Besòs y sus afluentes. La cuenca abarca una superficie de 1.038 km² y alberga a más de 2 millones de habitantes. Presenta hábitats diversos, que incluyen: (i) áreas montañosas con algunos espacios de interés natural, (ii) asentamientos urbanos e industriales en la llanura del Vallès, y (iii) una desembocadura urbanizada dentro del área metropolitana de Barcelona. El principal desafío en esta cuenca es la degradación de la calidad del agua debido a actividades antrópicas que introducen una amplia gama de compuestos inorgánicos y orgánicos.

En sinergia con el proyecto AQUADAPT, el equipo de investigación está desarrollando dos modelos numéricos a gran escala que acoplan procesos superficiales y subterráneos. Uno de los modelos abarca la totalidad de la cuenca, mientras que el segundo se centra en la subcuenca más problemática en términos de calidad del agua y densidad poblacional: la cuenca del río Ripoll. Estos modelos permitirán integrar de manera efectiva y realista todos los recursos hídricos disponibles, contribuyendo a su gestión sostenible. Además, los modelos facilitarán el diseño de acciones orientadas a aprovechar los eventos de precipitación para aumentar el agua almacenada en los acuíferos, mejorando así la disponibilidad hídrica durante períodos secos.

En colaboración con el proyecto CLIMADAPT, se han tomado hasta 220 muestras de aguas subterráneas y superficiales (120 de ellas correspondientes a la subcuenca del Ripoll, divididas en dos campañas de muestreo realizadas en estaciones diferentes del año 2025), para analizar las concentraciones de compuestos inorgánicos, metales, contaminantes de preocupación emergente, que incluyen sustancias per- y polifluoroalquiladas, así como compuestos orgánicos de origen farmacéutico, de uso cotidiano, industrial y agrícola. La sinergia entre ambos proyectos ha permitido incrementar el número de muestras y de compuestos analizados.

En este trabajo se presentan los avances alcanzados hasta la fecha, mostrando resultados preliminares de las campañas de muestreo realizadas en la cuenca del rio Ripoll, de la evaluación de la capacidad de resiliencia frente al cambio climático y una visión general sobre los modelos numéricos hidro(geo)lógicos desarrollados.

Agradecimientos: Esta investigación se desarrolla en el marco del proyecto WATER4MED (programa PRIMA en 2023) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea a través de la subvención PCI2024-153452. Además, los autores agradecen el apoyo de los proyectos AQUADAPT (CNS2023-144051) financiado por

MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR y CLIMADAPT (CEX2018-000794-S) financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033. J.R. agradece el apoyo de ANID Becas/Doctorado Internacional folio 72240268. L.S. agradece el apoyo de la beca doctoral de fundación La Caixa (ID 100010434; código B006133. S.S.-V. agradece a la Consejería de Universidades, Ciencia e Innovación y Cultura del Gobierno de Canarias y al Fondo Social Europeo su contrato posdoctoral Catalina-Ruiz.

Vulnerabilidad frente al cambio climático de manantiales petrificantes dependientes del agua subterránea en un karst compartimentado: tipologías funcionales y gestión adaptativa en el Geoparque de Las Loras

Julio Verdejo Serrano[1], Karmah Salman[2], Nuria Mesonero Picazo[1], María Rodríguez Marcos[1]

[1]*TYPSA SA*
[2]*Geoparque Las Loras ARGEOL*

Palabras clave: Cambio climático, Travertinos, Manantiales, Geoparque

Resumen. Los manantiales petrificantes del HIC 7220 del Geoparque Las Loras constituyen ecosistemas dependientes del agua subterránea cuya persistencia está condicionada por la estabilidad del régimen de descarga, la coherencia hidrogeoquímica de las aguas bicarbonatadas cálcicas y la conservación de las condiciones geomorfológicas que favorecen la desgasificación de CO_2 y la precipitación carbonatada. El estudio aborda estos sistemas desde una perspectiva integrada, orientada a mejorar el conocimiento funcional de los acuíferos kársticos, evaluar su vulnerabilidad frente al cambio climático y establecer directrices operativas de conservación compatibles con los usos tradicionales y el desarrollo turístico sostenible.

El modelo conceptual validado interpreta Las Loras como un karst carbonatado compartimentado, con recarga predominantemente difusa sobre páramos, circulación controlada por fracturación y estratigrafía, almacenamiento significativo y descarga concentrada en bordes de páramo, contactos litológicos, escarpes estructurales y fondos de valle. Este funcionamiento genera células hidrogeológicas relativamente independientes y explica tanto la diversidad de surgencias como la persistencia de descargas en periodos de menor recarga. Las campañas de julio y noviembre de 2025 confirman condiciones dominadas por flujo base, elevada inercia del sistema y ausencia de cambios de facies entre campañas; las aguas se mantienen en el dominio bicarbonatado cálcico y las diferencias temporales responden a ajustes hidrológicos de segundo orden, no a cambios estructurales del funcionamiento hidrogeoquímico.

Sobre esta base se distinguen tres tipologías funcionales de manantiales petrificantes: manantiales colgados de ladera, surgencias kársticas en cueva y filtraciones de pie de ladera/valle, diferenciadas por escala de recarga, capacidad de almacenamiento y sensibilidad hidrológica. El análisis climático regionalizado proyecta, en el horizonte lejano, aumentos de temperatura media de hasta 5,07 °C, descensos de precipitación de hasta el 21,37 %, reducción del número de días de lluvia de hasta el 28,84 % y aumento de la evapotranspiración potencial de hasta el 32,36 %. La evaluación de vulnerabilidad y riesgo identifica como peligros principales la reducción de la precipitación, la sequía/estrés hídrico y el aumento de las precipitaciones extremas. La tipología más desfavorable es la de manantiales colgados de ladera, con riesgo muy alto frente a la disminución de la precipitación y riesgo alto frente a sequía y lluvias extremas.

El análisis climático se ha basado en el Visor de Escenarios de Cambio Climático de AdapteCCa/PNACC, empleando proyecciones regionalizadas CMIP6 para España, con regionalización estadística AEMET-CSIC, referencia espacial en rejilla de 5 km y agregación al ámbito municipal del Geoparque. Se compararon los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en tres horizontes temporales, tomando como referencia el periodo 1971–2000. Los valores más desfavorables citados corresponden al horizonte lejano 2071–2100 bajo SSP5-8.5, y deben interpretarse como un escenario de alto forzamiento para análisis de sensibilidad y riesgo, no como una predicción determinista única. En dicho escenario se proyectan aumentos de temperatura media de hasta 5,07 ºC, descensos de precipitación de hasta el 21,37 %, reducción del número de días de lluvia de hasta el 28,84 % y aumento de la evapotranspiración potencial de hasta el 32,36 %.

La aportación principal del trabajo es convertir ese diagnóstico en un marco operativo de gestión adaptativa basado en procesos. Frente a enfoques centrados en la protección puntual de surgencias, se propone una conservación apoyada en indicadores funcionales de caudal, conductividad, temperatura, alcalinidad, equilibrio carbonático y estado eco-geomorfológico, así como en umbrales locales por tipología y manantial para activar revisiones de gestión y priorizar actuaciones.

Las medidas propuestas no se limitan al seguimiento hidroquímico e hidrodinámico, sino que se orientan a la protección activa de los procesos que sostienen el HIC 7220: delimitación y protección de zonas funcionales de recarga, control de captaciones y usos del agua en acuíferos sensibles, regulación de usos del suelo en áreas de infiltración efectiva, protección física de formaciones tobáceas activas mediante limitación o redirección del acceso, ordenación del uso turístico en puntos vulnerables, prevención de actuaciones que incrementen la escorrentía superficial o alteren el régimen natural de descarga, y definición de

umbrales operativos que permitan activar medidas correctoras dentro de un esquema de gestión adaptativa.

ÍNDICE DE AUTORES

A. Godoy, 157, 182, 300, 428

A. Ribeiro, 30

Abarca, 40, 341, 370, 395

Abdelkarim, 79

Agoubi, 79

Aguayo Arias, 459

Aguilar, 221

Aguilar-Aguilar, 475

Aguilera Alonso, 65, 87, 113, 288, 339, 463, 465

Aguirre Ramos, 165, 167

Aitor, 123

Alanoca Choque, 401

Alcaide, 469

Alcaraz, 246

Alemany Monsó, 17, 328

Aliaga Alvarado, 352

Almendro-Candel, 69

Almillategui, 91, 111, 161, 356

Almorox Zapico, 387

Alomar Mascaró, 445

Alvareda, 457

Álvarez Álvarez, 399, 403

Álvarez-Mora, 337

Amino, 266

Amore, 46

Anderbouhr, 149, 451

Andrade, 22

Andreo Navarro, 35, 37, 56, 69, 153, 254, 389, 483

Andrés, 109

Andrés Martínez, 481

Andreu, 69, 103

Anriquez Mauricio, 171

Antón, 103

Antunes, 30, 79, 275, 322, 467

Aranda, 393

Árcega Cabrera, 127, 445

Archilla Castillo, 229

Argamasilla, 284

Arias, 231

Ariza Malagutti, 155, 364

Armengol, 109, 358, 413

Arnó, 109, 280, 339, 358, 413

Arumí, 173, 221

Assunção, 157, 182, 428

Aumar, 280

Bach Plaza, 44, 499

Badia, 125

Baena Ruíz, 288

Bagés Estopà, 149, 417, 451

Baldwin, 292

Ballesteros Navarro, 350, 401
Baquedano Estévez, 350
Barba, 278, 381, 385
Barberá Fornell, 56, 69, 153, 254, 483
Barbero Blanco, 147, 273
Barbieri, 208
Barrientos Alarcón, 459
Bassols Isamat, 44
Bedmar Martin Merino, 273
Belda Navarrete, 217
Bellmunt, 109
Bellver Morte, 469
Beltrán, 83
Beltran Jimenez, 196
Benavente, 129, 485
Benzid, 322
Bermejo Santos, 40, 175, 242, 395
Bernal, 302
Bertran, 71, 278
Bessone, 457
Blanch, 169
Blanco, 407
Blanco Núñez, 17, 328
Blázquez-Pallí, 198, 237
Bofill, 75
Bolster, 443
Borowiecka, 246
Bosch, 85, 198
Bosch Suades, 163
Bouarrouj, 79
Brauns, 339
Brito, 407
Broda, 339
Brusini Jiménez, 330
Buera Cuerva, 389
Bueso Sánchez, 32, 147, 273
Bustamante rua, 215
Caballero, 81
Cabello López, 42
Cabrera, 294
Calderón-Sánchez, 441
Calvache, 48
Calvo Buelga, 83
Calvo Sánchez, 288
Camargo Bonilla, 190
Campanero, 225
Campos Ferré, 149, 417, 451
Camps, 109, 358, 413
Cañete, 284
Carmona, 62, 192
Carrera, 111, 119, 149, 151, 165, 167, 196, 356, 375, 417, 451, 471
Carrera Fernández, 337
Carrero, 235, 264, 298
Carrero-Carralero, 105

Carrizo, 439
Carro, 306
Casado, 119
Casamitjana Causa, 52, 405
Casamitjana Vila, 52
Casas Mangas, 169
Casas Ponsatí, 171
Cassiraga, 300, 373
Castaño Castaño, 20, 343
Castillo Gonzales, 282
Castro, 333
Castro Gámez, 129
Castro-Severyn, 131
Causapé, 208, 435, 439
Chamane, 266
Chantal Anderbouhr, 417
Chargui, 322
Chaves, 153
Chesa, 312
Chirinos Escobar, 275
Chucuya Mamani, 290
Cid Escobar, 325
Cifuentes Sánchez, 180
Clausell Borja, 83
Codony Iglesias, 165
Coll Bosch, 469
Colomer, 109, 339, 358, 413
Contreras-Llin, 435
Corbella Reventós, 165
Córdoba-Ariza, 302
Cortés Lucas, 42
Cortés Silva, 422
Coscia, 144, 235, 391, 401
Couso Vilà, 210
Criollo, 268
Crisóstomo, 264, 298
Cruz, 22
Cruz Carrizo, 119, 196
Culí, 115
Dafonte Dafonte, 231
Daniele, 306
Daza alvarez, 215
De la Hera-Portillo, 65, 113
De la Loma González, 284, 347, 360
De la Losa Román, 87, 123, 134, 136, 142, 213, 463, 465, 487
De la Torre, 101, 485
De la Torre Martínez, 37
De Quintana Pou, 46
De Simone, 481
De Stefano, 325
Del Pozo, 93, 409
Del Pozo Tejado, 136
Del Río, 248
Del Val Alonso, 163

Delgado, 54
Demichele, 379, 493, 501
Dentz, 177, 282, 372, 457
Deudero Company, 445
Dhaouadi, 467
Díaz, 153
Díaz-Alcaide, 240
Díaz-Cruz, 119, 149, 196, 435, 439, 451
Diego-Feliu, 91, 111, 161, 356
Dietrich, 471
Díez, 264, 298
Díez Castro, 229
Domènech, 227, 268, 424
Domínguez Morales, 350
Domínguez Sánchez, 134, 350
Dopico, 231
Drissi, 322
Duarte Castañeda, 459
Duinslaeger, 420
Duque, 48, 489
Durán, 248
Durán Laforet, 40, 175, 242, 345, 395
Durán Valsero, 134, 345, 445, 487
Durán Vargas, 401
Elorza Tenreiro, 415
Emile Pouget, 360
Enrich, 89
Escalona-Orellana, 121, 208, 262
Escrivá-Benito, 373
Escuder, 268
Espinha-Marques, 77
Espino, 356
Espínola Cazorla, 140, 332, 335
Espinosa Martínez, 284, 347, 360
Estévez, 294
Estrany Planas, 147, 273
Expósito, 433, 437
Falgàs Parra, 286
Farguell Pérez, 42, 271
Farhat, 443
Faria, 196
Farré, 469
Fernández, 54, 248
Fernández Ayuso, 87, 463, 465
Fernàndez Garcia, 71, 155, 278, 356, 364, 368, 377, 381, 385, 461
Fernández Lagunas, 227, 424
Fernández Leyva, 97
Fernández Martínez, 325
Fernández-Mejuto, 103
Fernández-Ortega, 56, 153, 483
Fernandez-Turiel, 294
Ferreira Gomes, 280
Ferrer, 278, 381, 385, 461

Fidalgo Pelarda, 350
Folch, 91, 111, 119, 161, 165, 167, 356
Fonseca Sánchez, 441
Fornós, 62
Fraile, 194, 341, 370, 393, 433, 437
Francés, 157
Franco, 497
Fuentes González, 233
Furlanetto, 278, 368
Gabàs, 109
Gago, 119
Galindo Jiménez, 330
Gallés, 302
Gamallo Paz, 284
Gamazo, 457
Gangloff, 103
Ganzer Martí, 155, 347, 364
García, 75, 248, 284, 302
García Aljaro, 196
Garcia Artigas, 171, 286
García Bermudo, 97
García Bravo, 445
García-Céspedes, 109
García-Gámez, 489
García-Gscheidle, 115
Garcia Falcó, 200
García López, 50
García López-Davalillo, 330
García Martínez, 271
García Menéndez, 65, 113
García Moreno, 136
Garcia Ortiz, 360
García Senz, 97
García Souto, 27, 231
García Tomillo, 27, 231
García-Sánchez, 103
Garcia-Solsona, 115, 169
Garrido, 169, 302, 433, 437
Garrido Martín, 194
Garrido Sobrados, 136
Garriga, 85, 198
Gázquez, 320
Gázquez Sánchez, 397
Gegúndez Cámara, 134, 213
Gessa Fernández, 292
Giancarlo Offeddu, 360
Gil Muñoz, 37
Gil-Villalba, 424
Gil-Solsona, 119
Gilabert Cervera, 95
Giménez, 62
Gin, 356
Githinji, 266
Godoy, 290

Gomà Martínez, 271

Gomes, 275

Gomez, 333, 339

Gómez, 54, 125

Gómez-Alday, 296

Gómez de Liaño Pierna, 105

Gómez-Escalonilla, 65, 107, 113, 240, 387

Gómez Fontalva, 205, 330, 354

Gómez García, 190

Gómez Gómez, 288

Gómez Hernández, 157, 182, 290 300, 428

Gómez-Herrera, 89, 337

Gómez Marante, 381

Gómez Salgado, 107

Goncalves, 25

Gonçalves, 306, 491

González, 198, 237

González-Aguilera, 93, 409

González-Fuentes, 481

González Ramón, 87, 97, 142, 260, 304, 316, 330, 397, 463, 465

González Rodríguez, 149, 417, 451

Gonzalvo Henry, 46, 52

Goyetche, 248, 393

Greskoviak, 383

Grifoll, 356

Grifoll Ruiz, 42, 62

Grima Olmedo, 288, 350

Gros, 430, 433, 437

Grunberger, 322

Grundhöfer, 177

Guadaño, 54

Gual, 119

Guardiola-Albert, 19, 97, 142

Guimerà, 248, 266

H. Sawyer, 167

Heijboer, 339

Herms, 109, 358, 413

Hernández, 75

Hernández-Crespo, 300

Hernández García, 422

Hernández Hernández, 422

Hernández-Parra, 157, 182, 300, 428

Herrera Zamarrón, 422

Herrera-Franco, 475

Herrero, 75, 192, 385

Herrero Ferran, 42, 163, 271

Hidalgo, 101, 282, 372

Hidalgo Estévez, 485

Hidas, 330

Hildebrand, 213

Himi Benomar, 171

Hormigo Sánchez, 83, 399, 403

Huaman Nieto, 165, 167

Huertas Méndez, 87

Huysmans, 188, 292

Iasio, 280

Iglesias Carrera, 169,194, 286, 302

Iisalmi, 370

Infantes Brotons, 20

Inostroza, 131

Iraola, 366, 395, 473

Jannes Kordilla, 177

Jara, 131

Jaramillo Uribe, 58

Jiménez Bonilla, 60, 258, 314, 320

Jiménez Espinosa, 397

Jiménez Gavilán, 129, 223, 441

Jiménez Guíñez, 121, 159, 227, 262

Jiménez Llobet, 46

Jiménez Sánchez, 330

Jódar, 87, 97,142, 260, 304, 309, 316, 397, 463, 465

Jordana, 145, 268, 341, 366, 393

Juárez García, 147

Jurado, 235, 264, 298,

Jurado Elices, 89, 125, 138, 203, 219, 244, 256, 306, 333, 379, 383, 435, 439, 469, 493, 495, 501

Karan, 48

Keslay, 266

Khaskhoussi, 79

Klaba, 280

Kohfahl, 330, 354

Kordilla, 372

Laakso, 370

Lachaal, 322

Lacorte, 411

Lado Liñares, 231

Laja Santiago, 250

Lamas Cosío, 127

Lambán Jiménez, 260, 309, 316

Larios López, 229

Larisa Bursuc, 360

Lasagna, 497

Latres i Simó, 42

Lazaro Sanchez, 163

Ledo, 91, 161, 356

Limones, 325

Llamas Dios, 127, 223, 441

Llopis, 153

Llorca, 469

López, 75, 169

López Alonso, 275

López-Laserra, 485

López-Rebollo, 93, 409

Luna Barberán, 453

Luque Marín, 121, 159, 169, 208, 227, 262

Macau, 109

Madaula Izquierdo, 46, 52, 426

Madrigal-Solís, 441

Magnabosco, 157, 182, 300, 428

Malagón Navarro, 117

Manzano, 95, 121, 262, 430,

Marazuela, 435, 439, 501

Marco-Urrea, 198

Marcovecchio,, 471

Marcuello, 91

Margalef Marti, 121, 169, 208, 262, 296

Marín Carrillo, 97

Marín Lechado, 87, 97, 142, 304, 316, 463, 465

Marín Troya, 254

Martí, 278, 302

Martín Civantos, 87

Martín Herranz, 134

Martín-Loeches Garrido, 107

Martín Monerris, 300

Martín Montañez, 330

Martín Rodríguez, 37

Martín Ruiz, 343

Martínez, 175, 284, 407

Martinez Gomariz, 155, 364

Martínez Landa, 119, 149, 165, 167, 196, 417, 451

Martínez Moreno, 101

Martínez Navarro, 343

Martínez Pagán, 95

Martínez Pérez, 107

Martínez Prudencio, 242

Martínez Santos, 65, 113, 240, 387

Martínez Segura, 95

Martos-Rosillo, 50, 87, 97, 142, 260, 304, 316, 330, 463, 465, 475

Mas Boti, 147, 273

Màsich Polo, 105

Mas-Pla, 302, 430, 433, 437, 455, 497

Massmann, 383

Massone Grez, 142

Mastrodonato, 435

Medina-Cáceres, 131

Mejías Moreno, 288

Meléndez-Saldaña, 157

Melo lopez, 215

Menció Domingo, 46, 52, 405, 426

Mencos Bellpuig, 52

Méndez, 296

Mendoza, 485

Menéndez Pidal Navascués, 250

Meredith, 46, 455, 497

Mesonero Picazo, 504

Mestanza-Castelltort, 219, 501

Micheo, 445

Micola Colomer, 169,194, 302

Milani, 25, 491

Millán Madrid, 37

Millán Martos, 42, 62,163, 192, 271

Minaya Ovejero, 136

Minoves Ruiz, 155, 347, 364

Mira Carrión, 121

Miranda, 30

Molada-Tébar, 409

Molina Navarro, 107

Mon López, 27, 362

Mondéjar Martín, 350

Mondlane, 266

Monsalve Mejía, 58

Montenegro Pérez, 27, 231, 275, 362

Montero-González, 240, 387

Montoro-Paredes, 48, 489

Montero Ramírez, 42, 163

Montoya Moreno, 58

Moral Martos, 50, 60, 99, 314, 397

Morales García, 134, 487, 445

Morales González, 97, 397

Morales Sotaminga, 95, 121, 262

Moreno, 280

Moreno Merino, 65, 113, 123, 134, 136, 213, 288

Moreno Montes, 105

Moro, 411

Mosquera, 473

Mosquera Feijoo, 250

Moumni, 79

Moussa, 467

Msaddak, 79

Mudarra Martínez, 35, 37, 389

Muñoz-Pinyol, 91, 161

Mwakamba, 266

Naranjo Fernández, 87, 142, 304, 463, 465

Nardi, 366, 473

Nascimento, 81

Navarro-Ciurana, 115

Navarro-Hernández, 479

Navarro-Martin, 119

Naves García-Rendueles, 27, 231, 275

Ndungu, 266

Neji, 322

Nieto Arias, 350

Njuguna, 266

Nogales, 62

Nogueras, 407

Nsue-Mikue, 240

Núñez Haugh, 493

Núñez Maradiaga, 275

Oceguera Vargas, 127

Òdena Blanch, 17

Oiro, 266

Ojeda Chulla, 375

Ojeda Rodríguez, 129, 223

Okello, 266

Olivella Pastalle, 375

Omar, 266

Orejudo Ramírez, 42, 140, 332, 335

Orriols, 413

Orta Guasch, 286

Osorio, 89, 333, 337

Otero, 81, 115, 121, 169, 208, 262, 296

Ouassar, 467

Oviedo-Pineda, 67

Oyarzún, 221

Pairetti, 242

Palau, 227, 424

Palomino Gómez, 35, 37

Parra, 173, 221

Pascual i Diaz, 105

Pasos, 420

Passarell, 278

Pedrera Parias, 97, 330

Pena, 115, 169

Peña Paz, 275

Peraza, 93, 409

Pérez, 125, 219, 278, 411, 445, 461, 501

Pérez Castro, 377

Pérez Gomà, 447

Pérez-Bielsa, 439

Pérez-Gimeno, 69

Perez-Hurtado, 188

Pérez-Illanes, 368

Pérez-Ortiz, 469

Perez-Torrado, 294

Petchamé-Guerrero, 151

Pinilla Pedraza, 252

Pino Vargas, 290

Piña, 119, 167

Piris, 109

Pisani Veiga, 27, 77, 231

Pla, 479

Platikanov, 312

Pons, 169

Pool, 395, 473

Prieto, 485

Puig Borrell, 83

Puigserver, 42, 62, 75, 140, 163, 192, 271

Pujades, 89, 125, 144, 203, 219, 268, 244, 256, 306, 379, 383, 401,435, 439, 469, 493, 495, 501

Pujol Teres, 233

Pulido Velázquez, 288

Queralt, 91

Quesada-Hernández, 441

Radjenovic, 420

Ramalho, 280

Ramírez Serrato, 422

Ramos, 457

Ramos Araujo, 337

Ramos Rodríguez, 87, 142,, 304 316, 463, 465

Raventós Ortega, 83, 399, 403

Reimann, 71

Remonsellez, 131

Rey, 101, 485

Reyes Urquiza, 97

Ricchetti Campos, 391

Rincón, 75

Rivaes, 302

Rivera Vega, 453

Rivera Vidal, 173, 221

Rivero Marginedas, 171

Robledo Ardila, 445

Robles-Arenas, 121, 262

Rodellas Vila, 91, 95, 111, 121, 161, 356, 430

Rodrigo Clavero, 67,184, 373

Rodrigo Ilarri, 67,184, 300, 373

Rodríguez Arévalo, 20, 233, 343

Rodríguez del Rosario, 65, 113, 240

Rodriguez Dono, 375

Rodríguez Escales, 119, 165, 167, 461

Rodríguez Godoy, 147, 273

Rodriguez-Gonzalez, 294

Rodríguez Jiménez, 308

Rodríguez Marcos, 504

Rodríguez Náñez, 117

Rodríguez Rodríguez, 60, 258, 304, 314, 320

Rojas Hita, 229

Romero Sencianes, 56

Romero-Hernández, 67

Roqué Pau, 52, 426

Rosado Piqueras, 350

Rosado Rodríguez, 360

Ros-Berja, 430, 433, 437

Rosell, 159, 227, 424

Royo, 407

Rubilar, 501

Rubilar Contreras, 244

Rubilar Pons, 459

Ruepert, 441

Ruiz, 175, 284, 395

Ruiz Bermudo, 205, 330, 354

Ruiz Constán, 97, 304, 330

Ruiz González, 167

Ruiz Hernández, 142, 137, 487

Ruiz Ortiz, 50
Ruiz Sánchez, 37
Rusiñol, 75
Saaltink, 111
Sáez, 430, 433, 437
Sáez Camacho, 383
Sáinz-García, 366, 370
Salas Navarro, 453
Sala-Sala, 69, 103
Salazar Rojas, 50
Salehi Siavashani, 203, 256, 495
Salgado, 75
Salman, 504
Samaniego, 495
Samper, 27,54, 77, 231, 362
Sampietro Lardiés, 147, 273
San Román, 54
Sánchez, 284
Sanchez-Alfaro, 352
Sánchez Anguita, 332, 335
Sánchez Blaya, 20
Sánchez Sánchez, 40, 242, 248
Sánchez-Sosa, 101
Sánchez-Vila, 358
Sandoval Quilodrán, 459
Santamarta Cerezal, 308
Santana-Viera, 219, 411, 501
Santos, 103
Sanz, 119
Sanz de Ojeda, 250, 415
Sanz Pérez, 250
Saracho, 457
Sastre Merlín, 107
Scheiber Pagès, 306
Schmidlin, 312
Scrinzi, 138, 219, 379, 501
Sencianes, 153
Sendrós Brea-Iglesias, 171
Sepúlveda-Ruiz, 119, 196
Serra, 248
Serrano, 153
Serrano Reina, 205, 330, 354
Sheba, 266
Shokut, 266
Shurie, 266
Sierra Medina, 229
Sigoña León, 186
Silva, 246
Silva Busso, 123
Siqueira, 491
Sobral, 54, 77, 362
Solà, 169
Solà de Roa, 140
Solà Ortega, 194

Solé Marí, 278, 443

Soler, 115, 121, 159, 169, 208, 227, 262, 268, 424

Soler-Balaguer, 85, 237

Sórés, 339

Stehr, 173

Suarez, 131

Sunyer, 119

Susino-Súnico, 48

Talha, 370

Tapia Morales, 32

Tapias Pantebre, 171

Tarazona Cruz, 147

Taucare, 173, 306

Tauler, 312

Teixidó, 125, 312, 306

Téllez Beltrán, 403

Terrats Riera, 169, 194

Thaysen, 235, 312

Tinjacá Jiménez, 184

Tomás, 479

Toribio Sánchez, 332, 335

Torrentó, 81, 159, 198, 227, 268

Trabucchi, 167

Tubau Fernández, 210

Tudela, 145, 225, 420

Tur-Piedra, 91, 111, 161, 256

Turull, 264, 298

Urrea Vargas, 163

Urruela Garcia, 171

Vadillo, 127, 129, 223, 441

Valdés-Abellán, 479

Valdivielso, 138, 186, 235, 252, 264, 298

Valente, 275

Valhondo González, 119,149, 196, 417, 451

Valiente, 296

Van Cauwenbergh, 188

Van der Keur, 339

Vázquez-Suñé, 138, 144, 186, 235, 252, 264, 268, 298, 312, 383, 391, 399, 401, 469

Vélez Nicolás, 50

Venier, 145, 266, 366, 395

Ventura González, 142

Vercelli, 366

Verdejo Serrano, 504

Vezzaro, 469

Vignoni, 420

Vila, 62

Vilanova, 145, 225, 268, 420

Vilarrasa, 375, 481

Villanova de Benavent, 42

Villasante, 175

Vinyes Nadal, 81, 227

Vizcarra, 203, 256

Wachs, 217, 278
Wang, 151
Willert, 165, 167
Wong, 131
Xu, 312
Yanes Conde, 50, 60, 99, 258, 314, 320
Yuste, 115
Zabala, 471
Zakaluk, 87, 260, 304, 316, 463, 465
Zamora-Gómez, 316
Zarroca Hernández, 426
Zheng, 151