

AGUA, ENERGÍA Y MEDIOAMBIENTE



Joaquín Melgarejo Moreno
M^a Inmaculada López Ortiz
Patricia Fernández Aracil



AGUA, ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

© los autores, 2022
© de esta edición: Universitat d'Alacant
ISBN: 978-84-1302-184-3

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

TABLA DE CONTENIDO

BLOQUE I - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA, JURÍDICA Y AMBIENTAL

Integración de la energía solar fotovoltaica en los esquemas de gestión del agua Miguel Ángel Pérez	23
Análisis tendencial del cambio climático registrado en las variables hidrológicas en España Luis Garrote, Álvaro Sordo-Ward, Javier Montalvo y Alberto González	35
Agua, agricultura y efectos económicos en el campo de Cartagena Alberto del Villar García y Marcos García López	55
Energía en el regadío y posibles actuaciones para reducirla Luis Juana y Raúl Sánchez	91
Herramientas y soluciones innovadoras para la gestión del nexo Agua-Energía-Alimentos- Ecosistemas: GoNEXUS Manuel Pulido-Velázquez, Héctor Macián-Sorribes y Sergio Segura	115
Sobreexplotación de acuíferos, subsidencia y su impacto en el riesgo de inundación. El caso paradigmático del Valle del Alto Guadalentín Javier Valdés, María I. Navarro-Hernández, Roberto Tomás, Serena Tessitore, Pablo Ezquerro y Gerardo Herrera	121
Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Desalación Domingo Zarzo	139
Optimización energética en bombeo de aguas subterráneas Miguel Fernández-Mejuto y Héctor Fernández Rodríguez	153
Microgeneración y mejora de bombeos en redes de distribución de agua: un compromiso con la Sostenibilidad Camila Andrea García Rodríguez, Modesto Pérez-Sánchez, Francisco-Javier Sánchez-Romero y Petra Amparo López-Jiménez	171
Avances y limitaciones en el desarrollo de un gemelo digital del Mar Menor Javier Senent, Adrián López Ballesteros, Francisco José Segura Méndez, Anders Nielsen, Dennis Trolle, Salvador Peña-Haro y José María Cecilia	187
Smart Metering: las redes inteligentes al servicio del agua César Vázquez y Vicent Joan Martínez Soler	205
Proyecto NAIADES: un ecosistema para la digitalización del ciclo urbano del Agua Ignacio Casals, Manuel Ramiro, Juan Manuel Fernández Montenegro y Leonardo Alfonso	215
Solución al problema del agua y de la energía en España Francisco Javier Flores Montoya	237
Herramienta para la gestión de riesgos incorporando el impacto del cambio climático en infraestructuras críticas hidráulicas Ignacio Escuder y Adrián Morales Torres	271
Experiencias prácticas en la integración de la gestión del agua de lluvia en el paisaje urbano Sara Perales y Miguel Rico-Cortés	277
Cambio global y aguas subterráneas en un contexto de escasez y sequías David Pulido, Leticia Baena, Antonio Juan Collados, África de la Hera, Juan de Dios Gómez, José Luis García- Aróstegui, Francisco J. Alcalá y Juan Grima Olmedo	293

Posibilidades para la optimización y reducción del uso del agua y la energía en el riego de la zona mediterránea. Retos para su implementación Miguel Ángel Jiménez-Bello, Fernando Martínez-Alzamora, Juan Manuel Carricondo, Joan Carles Alonso Campos y Manuel Pulido-Velázquez	315
Instrumentos Innovadores para la Gestión Integrada de las Aguas Subterráneas en un contexto de escasez creciente de recursos hídricos (Proyecto Interreg Sudoe AQUIFER) José Luis García Aróstegui et al.	335
Nueva dimensión en la gestión patrimonial de redes Raúl González.....	349
Nuevos retos de la reutilización Amador Rancaño Pérez, M ^a del Mar Micó Reche y Aina Soler-Jofra.....	359
Evaluación de la recarga del acuífero Solana. Análisis de escenarios de cambio climático María Alejandra Feinstein, Miguel Fernández Mejuto y José Miguel Andreu Rodes	381
Cálculo de la huella de carbono como herramienta de gestión ambiental. Caso de éxito de la EDARi Helados Alacant Mercedes A. Calzada Garzón, Juan Carlos Bugallo Tena, Elena Campos Pozuelo, Domingo Zarzo Martinez y Enrique Ortiz González	393
Reducción de boro en parcela mediante ósmosis inversa y resinas de intercambio iónico. Aspectos técnicos y económicos José Francisco Maestre Valero, Alberto Imbernón Mulero, Belén Gallego Elvira, Victoriano Martínez Álvarez y Bernardo Martín Górriz	403
Derechos de agua de riego diferenciados por su prioridad a nivel de cuenca José A. Gómez-Limón, Carlos Gutiérrez-Martín y Nazaret M. Montilla-López	413
Algoritmo de sincronización entre la energía consumida en una red de riego y producida por módulos solares fotovoltaicos Francisco José Navarro-González, Miguel Ángel Pardo, Housseem Eddine Chabour y Tarek Alksaif	425
Boro en la red de azarbes de la Vega Baja del Segura y el Baix Vinalopó (Alicante) Jose Navarro Pedreño, Teresa Rodríguez Espinosa, María Belén Almendro Candel, Ana Pérez Gimeno, Ignacio Gómez Lucas e Ignacio Meléndez Pastor	439
Tratamiento ecológico para la eutrofización y la anoxia en balsas de riego Ricardo Mateos Aparicio.....	451
Estimación de la movilización del suelo como efecto de la escorrentía en viñedos mediante ISUM (Improved Stock Unearthing Method) en el Sureste de España Antonio Jódar Abellán, Amparo Melián Navarro y Jesús Rodrigo-Comino.....	459
Estimación de la evapotranspiración real, escorrentía superficial y recarga de acuíferos mediante dos modelos hidrológicos en el Sureste de España Antonio Jódar Abellán, Ryan T. Bailey, Dámaris Núñez-Gómez, Pablo Melgarejo, Derdour Abdessamed y Pilar Legua.....	467
Cálculo de la evaporación de agua en la microcuenca agrícola del río Coñaque, Ecuador José Gerardo Becerra Carrión, Antonio Jódar Abellán y Miguel Ángel Pardo Picazo	479
Aplicación del método de precipitación rápida controlada para estudios del efecto del tratamiento electromagnético en agua de elevada dureza Sergio Martínez Moya, Nuria Boluda Botella, María Dolores Saquete Ferrándiz y Jaime García Quiles	491
Un modelo matemático para la gestión de riesgos Ramón Egea Pérez y Francisco J. Navarro González	499

Reducción del contenido en fósforo en aguas de riego mediante filtro verde construido con residuos Teresa Rodríguez Espinosa, Jose Navarro Pedreño, María Belén Almendro Candel, Ignacio Gómez Lucas, Ignacio Meléndez Pastor y Manuel Jordán Vidal	513
Casos de estudio de soluciones basadas en la naturaleza para la adaptación a las inundaciones en zonas agropecuarias María José Marcos Palacios y Esther Sánchez Almodóvar	525
Análisis hidrológico-edáfico para la gestión ambiental de un Sistema Léntico Artificial de alta montaña en Colombia Breiner Dan Bastidas Osejo, Antonio Jódar Abellán y Pablo Melgarejo	539
Evaluación del efecto del cambio climático en dos cultivos de secano en la provincia de Alicante Yailin Fernández González, Javier Valdes-Abellan, Marlon Mederos Corrales y Concepción Pla	551
Perspectiva de las partes interesadas en la gestión de las aguas subterráneas en cuatro cuencas mediterráneas bajo estrés hídrico: prioridades y desafíos Roberta Boni et al.	563
Estudio de los parámetros más relevantes en el periodo de amortización de un bombeo solar en la provincia de Alicante Héctor Fernández Rodríguez y Miguel Ángel Pardo Picazo	585
El impacto de la continuidad de negocio y la gestión del riesgo en el ciclo integral del agua. Caso de Estudio: Aguas Municipalizadas de Alicante, E. M. Andrés Miguel Roca Lloret, Andrés Pina Martínez, Manuel Latorre Gijón y Joaquín Marco Terrés	597
Inundaciones compuestas: modelación computacional en zonas urbanas-costeras Daniela Córdova de Horta	611
Análisis del ciclo de vida de la red de riego de la Universidad de Alicante Daniel Elie Benalcázar Murillo y Miguel Ángel Pardo Picazo	623
Conducción Júcar - Vinalopó: binomio Agua y Energía Estefanía Blasco Casal y Vicente José Richart Díaz	635

BLOQUE II - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA, JURÍDICA Y AMBIENTAL

Construcción de una <i>Biblioteca de Mensajes</i> para la comunicación del riesgo de inundación Pablo Aznar-Crespo, Guadalupe Ortiz y Antonio Aledo	647
La relación agua, territorio y urbanismo en un nuevo escenario Rosa Arce	659
El binomio agua y energía: claves jurídicas para la transición a un sistema energético autosuficiente y sostenible Asensio Navarro Ortega y Estanislao Arana García	675
Economía circular y regulación de los lodos de EDAR Ángel Ruiz de Apodaca Espinosa	691
Efecto de los caudales ecológicos sobre la disponibilidad de agua en la España peninsular Álvaro Sordo, Paola Bianucci, Beatriz de Lama Pedrosa y Luis Garrote	715
Costes energéticos de la desalación Jaime Lora María, Fernanda López Pérez y Carlos Carbonell Alcaína	727
Uso eficiente del agua en el diseño y control del riego de jardines y zonas verdes: una experiencia formativa práctica Fernando Echarri	745

Los ingenieros en el suministro de agua potable en España (siglo XIX)	
Juan Manuel Matés-Barco	759
Economía circular en el ciclo del agua	
Fernando Morcillo Bernaldo de Quirós y Andrés Guerra-Librero Castilla	775
La recarga artificial como técnica resiliente ante el cambio climático. Aplicación a los parques naturales y masas de agua subterránea de la provincia de Alicante (España)	
José Manuel Murillo Díaz y Alberto Padilla	795
Análisis agronómico, económico y ambiental de distintos escenarios de sustitución de aguas del trasvase Tajo-Segura por agua marina desalinizada	
Victoriano Martínez, Bernardo Martín, José Francisco Maestre, Belén Gallego y Alberto Imbernón	819
El vencimiento de las concesiones hidroeléctricas y su nueva explotación	
José Antonio Blanco	841
La extinción y reversión de las concesiones hidroeléctricas (a propósito del Salto Lafortunada Cinqueta)	
Esteban Arimany	861
Governança da água e adaptação justa	
Carla Gomes y Luísa Schmidt	881
Proyecto <i>Life Baetulo</i> en Badalona: gestión operativa de crisis ante eventos climáticos	
Monste Martínez, Ángel Villanueva y Beniamino Russo	895
La degradación ambiental y sus implicaciones socioeconómicas en cultivos leñosos bajo un escenario climático difícil de predecir: el caso del viñedo mediterráneo de la provincia de Valencia.....	
Jesús Rodrigo-Comino, Andrés Caballero-Calvo, José María Senciales-González, Jesús Fernández-Gálvez y Artemi Cerdà	905
La utilización de paneles solares fotovoltaicos para reducir la factura energética del trasvase Tajo-Segura	
Marcos García, Borja Montañó Sanz y Joaquín Melgarejo Moreno	925
Perspectivas jurídicas del trinomio Agua-Energía-Cambio Climático	
Jesús Conde Antequera	941
Generación y eficiencia energética en el ciclo del agua urbana. Retos desde la óptica del Derecho.....	
Andrés Molina Giménez	959
El papel de la desalación frente a una demografía y demanda crecientes	
Borja Montañó Sanz, Marcos García-López y Joaquín Melgarejo Moreno	969
Sustentabilidad y gobernanza transnacional como fundamentos para la difusión de nuevas matrices energéticas	
Paulo Marcio Cruz y Maria Cláudia da Silva Antunes de Souza	989
La eficiencia energética del trasvase Tajo-Segura en comparación con sus posibles alternativas	
Marcos García-López, Borja Montañó Sanz y Joaquín Melgarejo Moreno	1001
Desarrollo de proyectos hidroeléctricos en Ecuador. Oportunidades frente a los conflictos socioambientales	
Andrés Martínez-MoscOSO e Israel Castro-Enríquez	1011
Enseñar las inundaciones para incrementar la resiliencia socio-territorial. El <i>PATRICOVA</i> como recurso didáctico	
Álvaro-Francisco Morote	1023
Sostenibilidad y eficiencia hídrica en el «agroecosistema» de la Vega Baja del Segura: estudio histórico-jurídico y ambiental	
Francisco José Abellán Contreras	1033

Estimación de los sobrecostos producidos por las alternativas para paliar el déficit mediante el bombeo de agua desalinizada en la Demarcación del Segura José Alberto Redondo Orts, Joaquín Melgarejo Moreno y Patricia Fernández Aracil	1045
Nuevos métodos en marketing social para conseguir comportamientos proambientales Carla Rodríguez-Sánchez.....	1057
Aceitação social da reutilização de água para adaptação às alterações climáticas no sul europeu: uma análise de instrumentos políticos de Portugal e Espanha Marcella Conceição y Carla Gomes.....	1067
El derecho humano al agua. Alcances sobre la normativa internacional y peruana Flor Gianina Paucar Aedo.....	1079
Over-fertilising, water pollution and Climate Change: overview of the European and German regulatory framework Mariana Moreno Kuhnke y Josefina Lyda.....	1087
Eficiencia del riego por aspersión en la máquina de pivote central de la finca «El Marqués», Cuba Yoangel Jesu Miranda Agüero	1101
Evaluación de la calidad del riego para el cultivo de la patata en la cooperativa «Amistad Cubano-Búlgara», Cuba Heriberto Vargas Rodríguez, Caridad Sánchez Veranes y Fabienne Torres Menéndez	1111
Buenas prácticas medioambientales a implementar en la Unidad Empresarial de Servicios Técnicos (UEBIST) «Talleres y Desmonte Artemisa», Cuba Fabienne Torres Menéndez, Heriberto Vargas Rodríguez y Zulema Lombillo Laferte.....	1119
Educação ambiental e legislação ambiental: uma reflexão necessária na inserção dentro do ambiente escolar no ensino público Aline Hoffmann y Liton Lanes Pilau Sobrinho	1129
A regulação como mecanismo de proteção dos valores da livre iniciativa e da livre concorrência André Emiliano Uba.....	1137
El uso del instrumento de licencia por admisión y compromiso como medio para la necesaria desburocratización de la generación eléctrica en Brasil Alexandre Waltrick Rates	1149
Evaluación de la gestión y eficiencia de la actividad de riego en la UBPC Granja Arroyo, La Habana (Cuba) Daniel Acosta Rivero, Caridad Sánchez Veranes y María del Carmen Falcón Acosta.....	1157
Valoración económica de la producción agraria española en zonas inundables Adela Bellver Baca, Jesús Garrido Manrique, Margarita Navarro Pabsdorf y Eduardo Cuenca García.....	1169
Smart cities e a dignidade da pessoa humana no transtorno do espectro autista: experiências que vêm do sul do Brasil Liton Lanes Pilau Sobrinho, Vanessa Ramos Casagrande, Franco Scortegagna y Elys Marina Hack	1183
Legal issues of Chinese water rights system Yang Yang	1193
Inconstitucionalidad de la ley y del reglamento de recursos hídricos en Ecuador Luis Alfonso Castillo Vaca	1201
Regulamentação jurídica das águas subterrâneas no Brasil Denise Schmitt Siqueira Garcia y Heloise Siqueira Garcia	1213
Economía circular en el uso del agua en la Región de Murcia y en la Demarcación Hidrográfica del Segura José María Gómez Espín, José María Gómez Gil, Encarnación Gil Meseguer.....	1223

La desalinización como seguro hídrico en el Sureste Ibérico	
Encarnación Gil Meseguer, José María Gómez Gil, Ramón Martínez Medina, José María Gómez Espín	1233
Energía fotovoltaica y conducción Júcar-Vinalopó	
Vicente José Richart Díaz	1241

Aplicación del método de precipitación rápida controlada para estudios del efecto del tratamiento electromagnético en agua de elevada dureza

Sergio Martínez Moya

Instituto Universitario de Ingeniería de Procesos Químicos,
Universidad de Alicante, España
s.martinez@ua.es

Nuria Boluda Botella

Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales,
Universidad de Alicante, España
nuria.boluda@ua.es

María Dolores Saquete Ferrándiz

Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales,
Universidad de Alicante, España
md.saquete@ua.es

Jaime García Quiles

Ecotecnica Energy Systems S.L.,
Elche, España
jaime@ecotecnicaes.com

RESUMEN

La formación de incrustaciones en conducciones y sistemas por los que circula el agua caliente ocasiona grandes pérdidas económicas en sistemas domésticos e industriales. Para evitar estas incrustaciones se pueden utilizar diversas técnicas, como la aplicación de campos electromagnéticos. Con este fin, la empresa Ecotecnica Energy Systems S.L. ha patentado el dispositivo TK3K, que genera pulsos electromagnéticos y está siendo instalado en sistemas domésticos e industriales. Para evaluar el efecto del tratamiento en agua sintética se ha realizado la puesta a punto del método de precipitación rápida controlada (PRC). Se estableció la concentración de calcio y las velocidades de agitación óptimas para la realización de estos ensayos, estudiando finalmente el efecto del electromagnetismo en agua sintética con 320 ppm de Ca^{2+} . La capacidad de precipitación del agua fue caracterizada a partir de las curvas de pH y conductividad frente al tiempo, en las que un cambio brusco indicaba el principio de la precipitación. Además, se determinó la concentración de calcio en el agua al inicio y final de los ensayos con el propósito de determinar la tasa de precipitación del carbonato cálcico. Los resultados confirman la influencia del tratamiento electromagnético, debido a que se reduce y retrasa la precipitación de CaCO_3 , con respecto a lo que sucede en el agua no tratada.

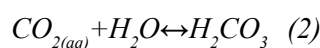
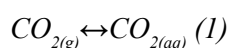
1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas asociados a la dureza del agua es la obstrucción de tuberías a lo largo de la trayectoria del agua que, con el paso del tiempo, puede llegar a reducir el diámetro nominal más de un 40 % (Crabtree y Johnson, 1999). Los sistemas que se ven más afectados por esta problemática son intercambiadores de calor, calderas, depósitos, válvulas, entre otros, a nivel industrial y los calentadores, lavavajillas, lavadoras, entre otros, a nivel doméstico. Todo ello, se traduce en un incremento de los costes económicos debido a la pérdida de eficiencia energética y productividad en las empresas, al ser necesario realizar paradas técnicas en las líneas de producción para realizar operaciones de sustitución y limpieza, además del propio coste de sustitución de equipos y sistemas que trabajan con aguas con tendencia a producir incrustaciones (Ghizellaoui et al., 2006).

Hay diversos métodos que permiten controlar la formación de incrustaciones como se menciona en (Martínez y Boluda, 2021). Algunos de estos métodos implican la precipitación de la sustancia que las produce con cal o sosa, la adición de reactivos inhibidores de depósitos o el reemplazo de los iones más insolubles (calcio, magnesio) por iones solubles (sodio) como sucede en el método más extendido, intercambio iónico. En los últimos años se ha extendido el uso de tratamiento por membranas como la ósmosis inversa, donde se produce la separación de los iones que producen incrustaciones.

Alternativamente a los procedimientos anteriores, otros métodos para tratar el agua se basan en la creación de un campo electromagnético que no produce alteraciones en la composición del agua y reduce la formación de precipitados de carbonato cálcico (Latva et al., 2016).

El equilibrio carbonato/bicarbonato/ CO_2 es fundamental en todas las aguas naturales, ya que contienen cantidades significativas de dióxido de carbono disuelto. Este gas está presente en estas aguas debido al intercambio producido en la interfase agua-atmósfera, regido por la diferencia de concentraciones existentes entre ambas fases. Diversos procesos como la fotosíntesis o la respiración influyen dicho intercambio (Ingrosso et al., 2016). La solubilidad determinará la cantidad de CO_2 intercambiado a lo largo de la interfase océano-atmósfera, debido a su relación inversa con la salinidad y la temperatura. La solubilidad del CO_2 en el agua pura a 25 °C es de 1.45 g/L. Cuando el CO_2 (g) de la atmósfera y del suelo se disuelve en agua se transforma en CO_2 acuoso (aq), y algunos de estos se asocian con moléculas de agua generando ácido carbónico (H_2CO_3). Así, primero tiene lugar la Ecuación (1) y subsecuentemente, la Ecuación (2):



En realidad, el CO_2 acuoso es a 25 °C, unas 600 veces más abundante que el ácido carbónico, pero para facilitar los cálculos se adopta una convención en la que las dos especies se resumen como . Así la reacción global se convierte en la Ecuación (3) que se puede observar en la Tabla 1, donde es la suma de (Appelo & Postma, 2005). El ácido carbónico a su vez se disocia como bicarbonato HCO_3^- , que es muy soluble, y como protón ácido de acuerdo con la Ecuación (4) (Tabla 1).

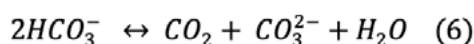
Reacciones	Constantes de equilibrio	Ecuación
$\text{CO}_{2(g)} + \text{H}_2\text{O} \xrightleftharpoons{K_H} \text{H}_2\text{CO}_3^*$	$K_H = [\text{H}_2\text{CO}_3^*]/[\text{pCO}_2] = 10^{-1.5}$	(3)
$\text{H}_2\text{CO}_3^* \xrightleftharpoons{K_1} \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	$K_1 = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]/[\text{H}_2\text{CO}_3^*] = 10^{-6.3}$	(4)
$\text{HCO}_3^- \xrightleftharpoons{K_2} \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$	$K_2 = [\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-] = 10^{-10.3}$	(5)

Tabla 6. Sistema de equilibrio carbonato/bicarbonato/ CO_2 con constantes de equilibrio a 25°C. Fuente: Appelo & Postma (2005).

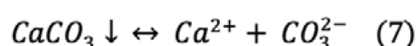
La distribución de las especies de carbonato disueltas puede ser determinada según dos casos (sistema abierto y cerrado con respecto al dióxido de carbono gaseoso). En el sistema abierto la presión parcial del CO_2 es una constante conocida, y en el segundo caso, no existe intercambio de materia con los alrededores, por lo que el carbono inorgánico total (TIC) es una constante conocida.

Durante la disociación, el ácido carbónico libera paso a paso dos protones, y por lo tanto presenta dos constantes de equilibrio sucesivas K_1 y K_2 como se aprecia en las Ecuaciones (4 y 5) (Tabla 1). Las concentraciones de las especies de carbonato disueltas dependen por lo tanto del pH de la disolución (Appelo & Postma, 2005).

Teniendo en cuenta las ecuaciones 4 y 5, se obtiene la reacción global (6) de los equilibrios de bicarbonato y carbonato con dióxido de carbono:



El carbonato cálcico en agua presenta la reacción de equilibrio que se muestra a continuación:



Esta reacción es fundamental para entender el proceso de disolución y precipitación del carbonato cálcico. La disolución de CO_2 (g) de la atmósfera en el agua provoca la disminución del pH de la misma (tabla 1), lo que hace que disminuya la concentración de carbonatos presentes en el agua, ya que se transforman en las especies mayoritarias existentes a pH más bajos. Esta disminución provoca la disolución del CaCO_3 debido al desplazamiento de la Ecuación 7 hacia la derecha para compensar la desaparición de los carbonatos del medio. Paralelamente, estas ecuaciones leídas en sentido inverso explicarían el proceso de degasificación (tabla 1) y precipitación de carbonato de calcio (ecuación 7) (Appelo & Postma, 2005).

El método de precipitación rápida controlada (PRC) (Alimi et al., 2006; Mahmoud et al., 2016) empleado en este trabajo se basa en eliminar el CO_2 de la muestra mediante agitación y producir la precipitación de carbonato cálcico. En esta investigación se puso a punto del método PRC y se aplicó en aguas tratadas y no tratadas electromagnéticamente con el equipo TK3K, para estudiar la capacidad de precipitación.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Preparación de agua sintética

El agua sintética se preparó disolviendo carbonato de calcio al 99% en 2 L de agua biosmotizada con 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por tanto, el agua sólo contiene iones Ca^{2+} , CO_3^{2-} y HCO_3^- .

Una vez añadida la cantidad de carbonato cálcico a disolver (0.076, 0.504, 1.010 y 1.614 g para obtener 15, 100, 200 y 320 ppm de calcio), se burbujeó con CO_2 en un agitador magnético hasta completa disolución del CaCO_3 en suspensión. La preparación del agua se realizaba normalmente el día anterior al de realización del ensayo. Al comienzo del mismo el agua sintética se ajustaba a $\text{pH} = 7$ mediante recirculación durante 20 minutos en el dispositivo utilizado, con o sin conectar el equipo TK3K.

2.2. Sistema de tratamiento electromagnético

El equipo TK3K fue empleado en el ensayo de tratamiento electromagnético (TEM). El dispositivo experimental (Figura 1) (Martínez et al., 2019) consta de un depósito de 5 L conectado a una bomba EHEIM Universal 300, con caudal constante de 300 L/h que impulsaba el agua a través de conducciones de PVC de 13 mm de diámetro recirculándola por el equipo TK3K. El montaje experimental permaneció durante la realización del ensayo en un laboratorio termostatzado a 23 °C.

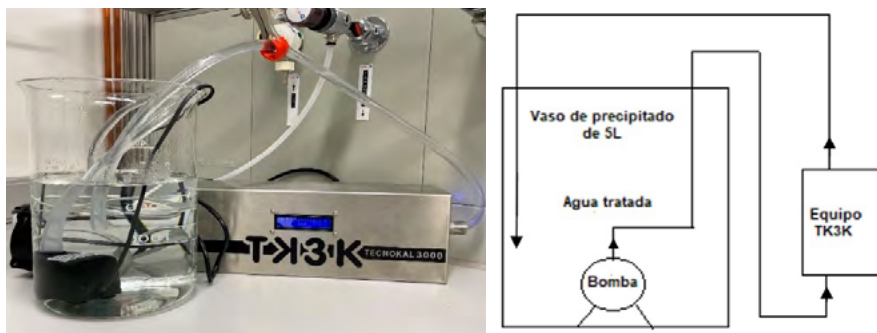


Figura 2. Montaje experimental de ensayos con TEM. Fuente: elaboración propia.

2.3. Test de precipitación rápida controlada (RCP)

Las aguas se sometían al método PRC (Figura 2), para ello se emplearon volúmenes de 500 mL. El ensayo se realizaba por duplicado utilizando vasos de 600 mL donde la muestra se sometía a agitación mediante sendos agitadores magnéticos. Con el fin de evitar la influencia del aumento de temperatura provocado por la agitación, se colocó un aislante entre el agitador magnético y el vaso de precipitado. Se tomaron valores de pH y conductividad cada 10 minutos.



Figura 3. Imagen del ensayo experimental PRC llevado a cabo por duplicado (izquierda inicial, derecha final). Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Aplicación del test PRC a aguas sintéticas de diferente concentración sin TEM

En las Figuras 3 y 4 se representa la evolución de pH y conductividad frente al tiempo para el agua sintética preparada a diferentes concentraciones de calcio (15 ppm, 100 ppm y 200 ppm) durante la aplicación del método de análisis PRC.

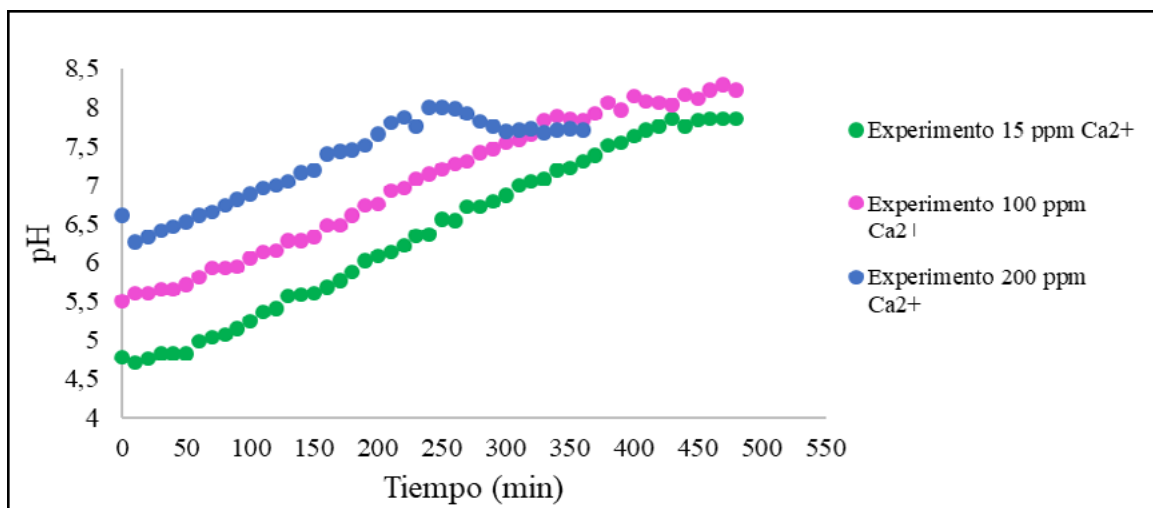


Figura 4. Curva de pH-tiempo: Puesta a punto del método con agua sintética a 600 rpm. Fuente: elaboración propia.

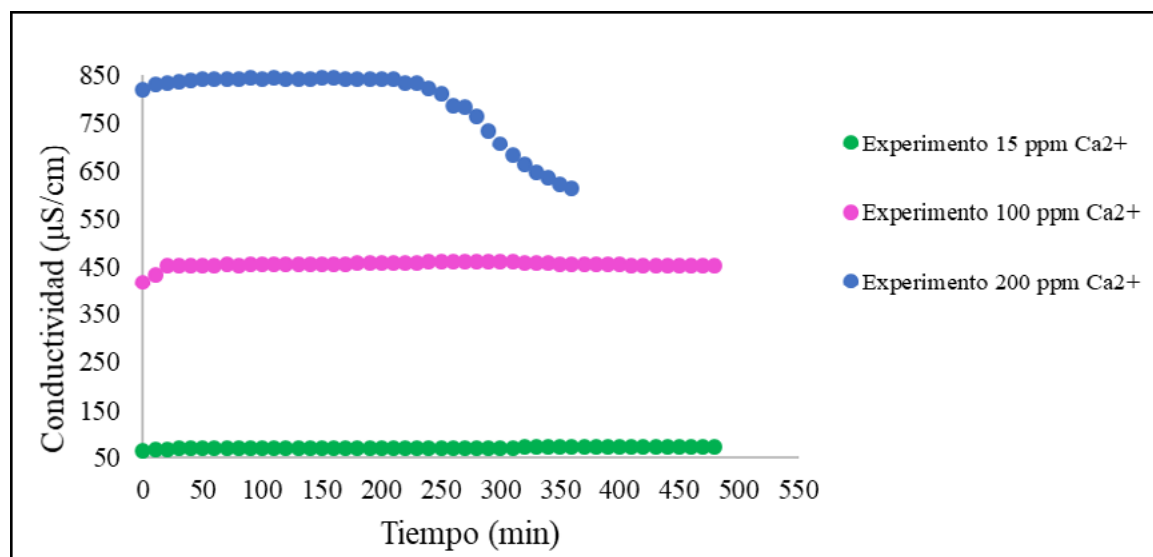


Figura 5. Curva de conductividad-tiempo: Puesta a punto del método con agua sintética a 600 rpm. Fuente: elaboración propia.

Para entender el proceso se tomará como ejemplo en las Figuras 3 y 4 el experimento que tiene una concentración de 200 ppm de Ca^{2+} (serie azul). Como se puede observar, esta muestra presenta la precipitación de CaCO_3 tras aproximadamente 4 h y 20 min de agitación a 600 rpm. La disolución saturada se detecta por tres factores, por el descenso en la curva de pH y conductividad y por la aparición de turbidez debido a la formación de CaCO_3 en el agua. Al inicio del ensayo el pH va incrementando hasta llegar a un punto máximo. Este aumento de pH se puede explicar según las ecuaciones de la Tabla 1, las reacciones están desplazadas hacia la izquierda, debido a que la concentración de dióxido de carbono disuelto va disminuyendo por la agitación aplicada, al equilibrarse con la atmósfera. Tras alcanzar el máximo, en este caso a $\text{pH} \approx 8$, el pH empieza a decrecer debido a la precipitación de carbonato cálcico, con lo que la Ecuación (5) comienza a desplazarse hacia la derecha para contrarrestar este efecto y por tanto se produce la aparición de iones H^+ en el medio y el correspondiente descenso del pH. Una vez que se alcanza un equilibrio dinámico, tras 5 h de agitación, entre la eliminación de CO_2 y la precipitación de CaCO_3 se alcanzan valores de pH prácticamente estables.

Con respecto a la curva de conductividad, el inicio de la precipitación se detecta por una disminución drástica de la misma, en este punto la conductividad pasa de 813 a 786 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tras 260 minutos de

ensayo. Esto se debe a la formación de carbonato de calcio (el cual es insoluble) lo que conlleva una pérdida de sales en disolución y por ello la disminución en la conductividad. Igual que pasa con el pH una vez que se alcanza el equilibrio dinámico entre la eliminación de CO_2 y la precipitación de CaCO_3 , la conductividad tiende a estabilizarse.

El agua sintética que contiene concentraciones de 15 y 100 ppm de Ca^{2+} no consiguió precipitar CaCO_3 . En la Figura 3, no se observó un punto de inflexión, el pH seguía aumentando, es decir seguía expulsando el dióxido de carbono disuelto en el agua. Esto junto con la estabilidad de la conductividad (Figura 4) muestra que el agua necesitaba más de 8 h para alcanzar la precipitación de los carbonatos. Por tanto, estas concentraciones pequeñas que necesitaban largos tiempo de ensayo fueron desechadas para el estudio y se determinó que se podría utilizar una concentración óptima de ensayo a partir de 200 ppm de Ca^{2+} .

3.2. Aplicación del test PRC a muestras con y sin tratamiento electromagnético y efecto de la velocidad de agitación

En estos ensayos se utilizó una concentración de 320 ppm de Ca^{2+} para comprobar la influencia del tratamiento electromagnético en el agua. Además, se modificó la velocidad de agitación (600, 900 y 1100 rpm) para estudiar el efecto de la misma en la precipitación de carbonato cálcico. Los resultados de conductividad para aguas tratadas y sin tratar se muestran en la Figura 5.

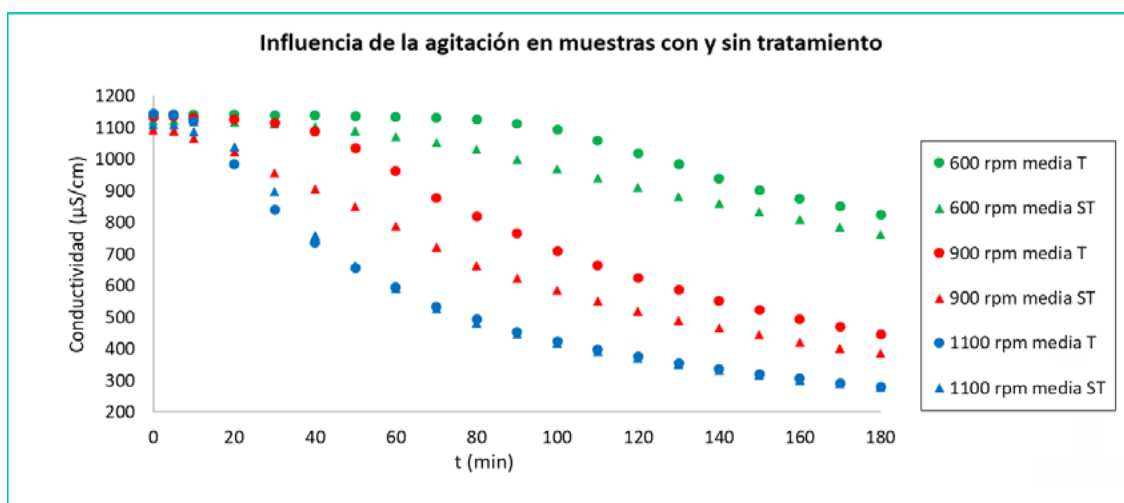


Figura 6. Variación de conductividad del agua tratada y no tratada a 600, 900 y 1100 rpm. Fuente: elaboración propia.

Para una agitación de 600 rpm (Figura 5), la precipitación de carbonato cálcico ocurrió a 50 min en el agua sin tratamiento (ST) y a 80 min en el agua tratada (T). Cuando se realizó el test PRC a 900 rpm, el tiempo de precipitación se redujo pasando a ser de 10 min en el agua sin tratamiento y 40 min en la tratada con TEM.

Si se comparan las curvas de 600 y 900 rpm se observa que al aumentar la agitación los procesos de precipitación se aceleran, apareciendo precipitado a tiempos menores. Tanto a 600 como a 900 rpm la precipitación de carbonato cálcico en el agua tratada se retrasó aproximadamente 30 minutos respecto al agua sin tratamiento.

Si se sigue aumentando la velocidad de agitación (1100 rpm) según se puede comprobar, la precipitación se adelanta tanto que deja de haber diferencias reseñables entre el agua tratada y sin tratar. Para 1100 rpm en ambas aguas comenzó la precipitación de carbonato cálcico a los 10 minutos de comenzar el ensayo.

En líneas generales se puede concluir que para una agitación adecuada el tratamiento electromagnético

hace que se retrase el punto de precipitación de CaCO_3 . La disminución del tiempo de precipitación a medida que se incrementa la agitación se debe a que aumenta la velocidad de transferencia de materia de CO_2 de la fase líquida a la fase gaseosa.

Agitación magnética (rpm)	TEM	$[\text{Ca}^{2+}]_0$ (ppm)	$[\text{Ca}^{2+}]_f$ (ppm)
600	No	325	171
600	Sí	321	172.5
900	No	326	78.25
900	Sí	323	103
1100	No	332	58.8
1100	Sí	326	75.65

Tabla 7. Caracterización por ICP-MS de la concentración de calcio del agua tratada y no tratada al inicio (0) y final (f) de los ensayos. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2 se observa la variación en la precipitación promedio de los experimentos llevados a cabo a diferentes velocidades de agitación para el agua tratada y sin tratar. La caracterización permite confirmar que al aumentar las revoluciones por minuto aumenta la tendencia a precipitar carbonato cálcico, independientemente de que el agua haya sido tratada o no.

Para una misma agitación (Tabla 2) el porcentaje de precipitación siempre es mayor en el agua no tratada, habiendo una diferencia con respecto al agua tratada de 1.1%, 7.9% y 5.5% a 600, 900 y 1100 rpm respectivamente. Por lo tanto, a pesar de que a 1100 rpm la precipitación ocurre al mismo tiempo en ambas aguas, tratada y no tratada, sí que se detecta una diferencia en la capacidad de precipitar el carbonato cálcico. Por tanto, la tasa de precipitación de CaCO_3 se ve reducida en el agua tratada, lo que indicaría que la capacidad de incrustación del agua tratada disminuye por el campo electromagnético aplicado.

4. CONCLUSIONES

El test de Precipitación Rápida Controlada debe ser empleado en agua con altas concentraciones de Ca^{2+} para poder observar la precipitación en un tiempo razonable. Una concentración de 320 ppm de calcio proporciona un tiempo de precipitación en torno a 1 h a 600 rpm.

A medida que se aumenta la velocidad de agitación disminuye el tiempo de precipitación, tanto en el agua tratada como en la sin tratar, pero en el agua tratada la cantidad de carbonato cálcico precipitada siempre es menor que en la no tratada.

En conclusión, como se observa al aplicar el método de análisis de PRC, el TEM en las aguas puede disminuir la precipitación de CaCO_3 y por tanto evitar las incrustaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha podido realizar gracias al apoyo económico de la Generalitat Valenciana (FEDE-GENT/2018/005) y la empresa ECOTÉCNICA ENERGY SYSTEMS S.L (ECOTEC-NICA1-18Y).

REFERENCIAS

- Alimi, F., Tlili, M., Gabrielli, C., Maurin G., & Ben Amor, M. (2006). Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate. *Research in Water Research*, 40 (1), 1941-1950.
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution (2nd ed)*. Balkema.
- Crabtree, M., & Johnson, A. (1999). La lucha contra las incrustaciones - Remoción y prevención. *Oilfield Review*, 11, 20.
- Ghizellaoui, S., Euvrard, M., Ledion, J., & Chibani, A. (2007). Inhibition of scaling in the presence of copper and zinc by various chemical processes. *Desalination*, 206, 185–197.
- Ingrosso, G., Giani, M., Cibic, T., Karuza, A., Kralj, M., & Del Negro, P. (2016). Carbonate chemistry dynamics and biological processes along a river-sea gradient (Gulf of Trieste, northern Adriatic Sea). *Research in Journal of Marine Systems*, 155 (1), 35-49.
- Kirk, R. E., Othmer, D. F., Grayson, M., & Eckroth, D. (1998) *Encyclopedia of Chemical Technology (4th ed.)*. Wiley.
- Latva, M., Inkinen, J., Rämö J., Kaunisto, T., Mäkinen, R., Ahonen, M., Matilainen, J., & Pehkonen, S. (2016). Studies on the magnetic water treatment in new pilot scale drinking water system and in old existing real-life water system. *Research in Journal of Water Process Engineering*, 9(1), 215-224.
- Mahmoud, B., Yosra, M., & Nadia, A. (2016). Effects of magnetic treatment on scaling power of hard waters. *Research in Separation and Purification Technology*, 171(1), 88-92.
- Martínez, S., Boluda, N., & García, J. (2019). Técnicas electromagnéticas para el tratamiento de aguas y diseño de una planta piloto con dispositivo TK3K. En: J. Melgarejo (ed.), *Congreso Nacional Del Agua 2019, Innovación y Sostenibilidad*, 1003-1014.
- Martínez Moya, S., & Boluda Botella, N. (2021). Review of Techniques to Reduce and Prevent Carbonate Scale. Prospecting in Water Treatment by Magnetism and Electromagnetism. *Water*, 13, 2365.