

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
<i>Smart Metering</i> : 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 Sudoeste 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 Martínez 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 Alcaina	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 Montaña 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 Montaña 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 Montaña 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 sobrecostes 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

Estimación de la evapotranspiración real, escorrentía superficial y recarga de acuíferos mediante dos modelos hidrológicos en el Sureste de España

Antonio Jódar Abellán

Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales,
Universidad de Alicante, España
antonio.jodar@ua.es
<https://orcid.org/0000-0003-3373-8952>

Ryan T. Bailey

Department of Civil and Environmental Engineering,
Colorado State University, USA
RyanT.Bailey@colostate.edu
<https://orcid.org/0000-0002-6539-1474>

Dámaris Núñez-Gómez

Departamento de Producción Vegetal y Microbiología,
Universidad Miguel Hernández, España
dnunez@umh.es
<https://orcid.org/0000-0003-3347-7238>

Pablo Melgarejo

Departamento de Producción Vegetal y Microbiología,
Universidad Miguel Hernández de Elche, España
pablo.melgarejo@umh.es
<https://orcid.org/0000-0003-1906-2984>

Derdour Abdessamed

Laboratory for the Sustainable Management of Natural Resources in Arid
and Semi-arid Zones, University Center Salhi Ahmed Naama, Argelia
derdour@cuniv-naama.dz
<https://orcid.org/0000-0002-1746-1765>

Pilar Legua

Departamento de Producción Vegetal y Microbiología,
Universidad Miguel Hernández de Elche, España
p.legua@umh.es
<https://orcid.org/0000-0001-5335-2198>

RESUMEN

En este trabajo se comprobó la capacidad del modelo *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) para simular el comportamiento hidrológico de una cuenca kárstica en un entorno mediterráneo semiárido (sur este de España). La calibración y validación de SWAT fueron realizadas con registros de caudal de 20 y 10 años. Adicionalmente, los resultados de SWAT fueron contrastados con los del modelo Sistema Integrado de Modelación Precipitación-Aportación (SIMPA), el modelo nacional de gestión de recursos hídricos de España. A tenor de los resultados obtenidos en la optimización del modelo SWAT (calibración y validación), el modelo simula correctamente el balance hídrico de la cuenca estudiada, que en este trabajo es representado espacialmente mediante tres variables principales: la evapotranspiración real, la escorrentía superficial y la recarga de acuíferos.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel global, los cambios demográficos, el creciente desarrollo de numerosos países, el aumento en el nivel de vida, las políticas inadecuadas de ordenación del territorio y de uso y gestión del agua, constituyen los principales elementos que incrementan la presión sobre los suministros de agua locales, nacionales y regionales necesarios para el regadío, la producción energética, los usos industriales y domésticos, y el medio ambiente (Abbaspour et al. 2015; Martínez et al. 2019; Pardo et al. 2020; Fernández-Mejuto et al. 2021). La cantidad y calidad de recursos hídricos, superficiales y subterráneos (agua azul), se encuentran considerablemente amenazadas en regiones con elevado estrés hídrico (Wada et al. 2012; Valdes-Abellan et al. 2018; Pla et al. 2021). En consecuencia, las reservas de agua dulce han disminuido, lo que acarrea impactos ambientales negativos sobre los ecosistemas asociados (Klove et al. 2014; Jodar-Abellan et al. 2022). A su vez, el suministro del agua dulce se encuentra estrechamente ligado a decisiones políticas, caso por ejemplo de los trasvases y de la desalación de agua marina en España (Molina and Melgarejo, 2015; Melgarejo-Moreno et al. 2019), lo que provoca cierta inseguridad en dicho abastecimiento especialmente en situaciones de escasez (Rodrigo-Comino et al. 2021). Al mismo tiempo, el cambio global aporta un nuevo nivel de incertidumbre en los suministros de agua dulce y en los principales sectores de uso del agua como la agricultura y la energía. Toda esta problemática incrementará las incertidumbres sobre las futuras demandas del agua, lo que, junto al continuo aumento en la frecuencia y duración de las inundaciones y sequías asociadas al cambio global (Camarasa-Belmonte, 2016; Derdour y Bouanami, 2019), provocará que las sociedades amplíen su vulnerabilidad ante un extenso elenco de riesgos asociados con el suministro inadecuado del agua en cantidad y/o calidad (Aznar-Crespo et al. 2020; Kastridis et al. 2020).

2. ÁREA DE ESTUDIO

Este trabajo se centra en la cuenca del Guadalest, una cuenca kárstica mediterránea de 62 km² situada en el Sistema de Explotación de la Marina Baja (provincia de Alicante, SE de España, Figura 1). Esta región pertenece a la parte oriental de la cordillera bética, Sistema Prebético (DPA-IGME, 2015; Valdes-Abellan et al., 2018). La cuenca se encuentra a 13,7 km de la línea de costa (Figura 1) y presenta una altitud media de 864 metros sobre el nivel del mar (msnm), teniendo la elevación máxima 1556 msnm y la mínima 363 msnm. Según DPA-IGME (2015) y el modelo digital de elevación (MDE), disponible en el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG, 2020), se identifican pendientes pronunciadas (alrededor del 30-40%), así como barrancos y arroyos efímeros en la mayor parte de la cuenca (Figura 1).

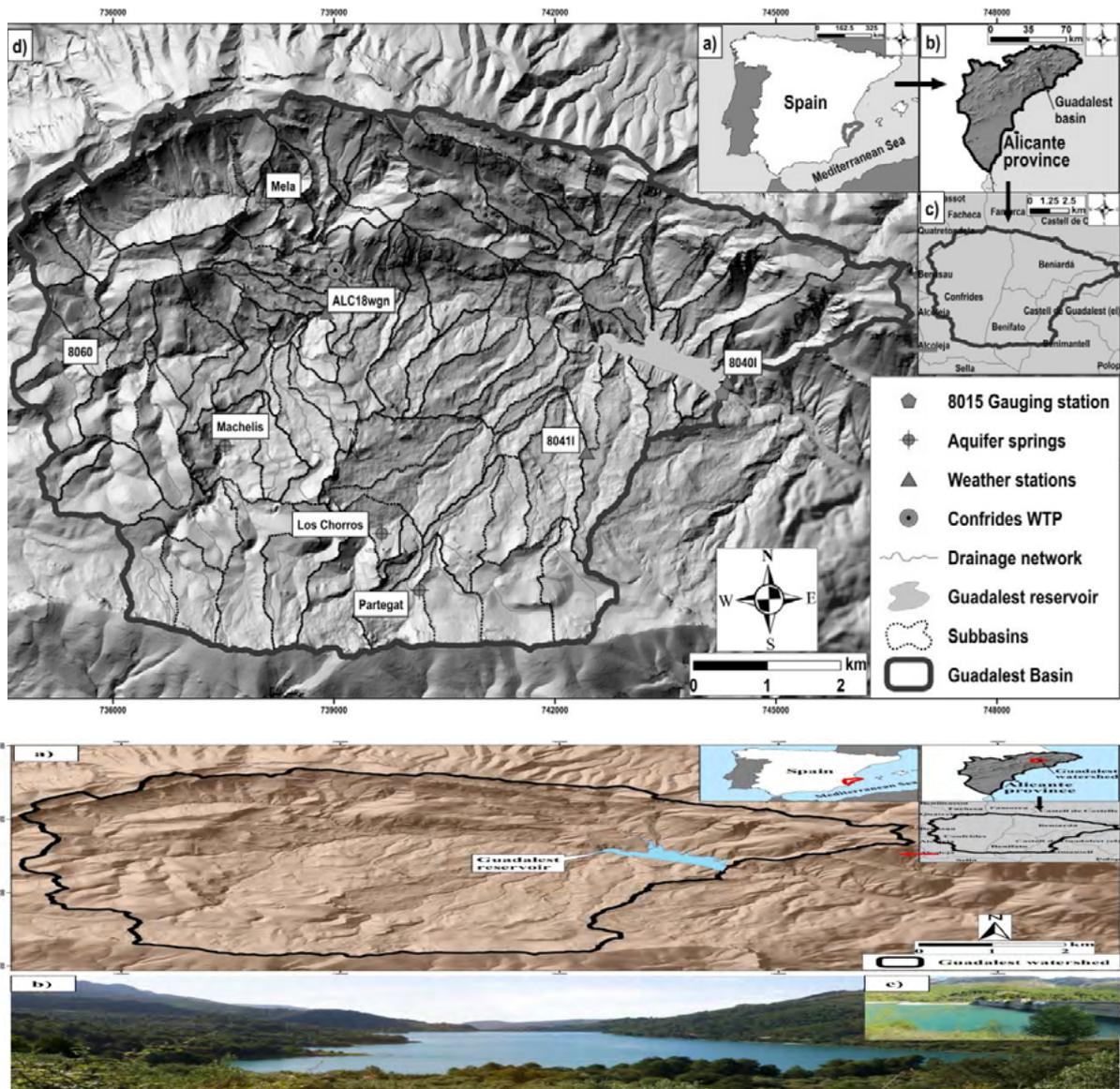


Figura 1. Imagen superior: localización de la cuenca del Guadalest en el contexto del sureste de España y de la provincia de Alicante. Imagen inferior: vista panorámica de la cuenca y detalle de la cerrada del embalse.

Como se puede observar en la Figura 2, el embalse del Guadalest, y por ende los recursos superficiales y subterráneos que éste recoge, constituyen una parte fundamental de las “aportaciones de referencia” del sistema de la Marina Baja, siendo también de relevancia los recursos almacenados por el embalse Amadorio. Dichos recursos son utilizados para garantizar el suministro de numerosas demandas agrarias y urbanas, destacando especialmente el núcleo urbano de Benidorm (DGTP, 2009; Jodar-Abellan y Prats-Rico, 2019).

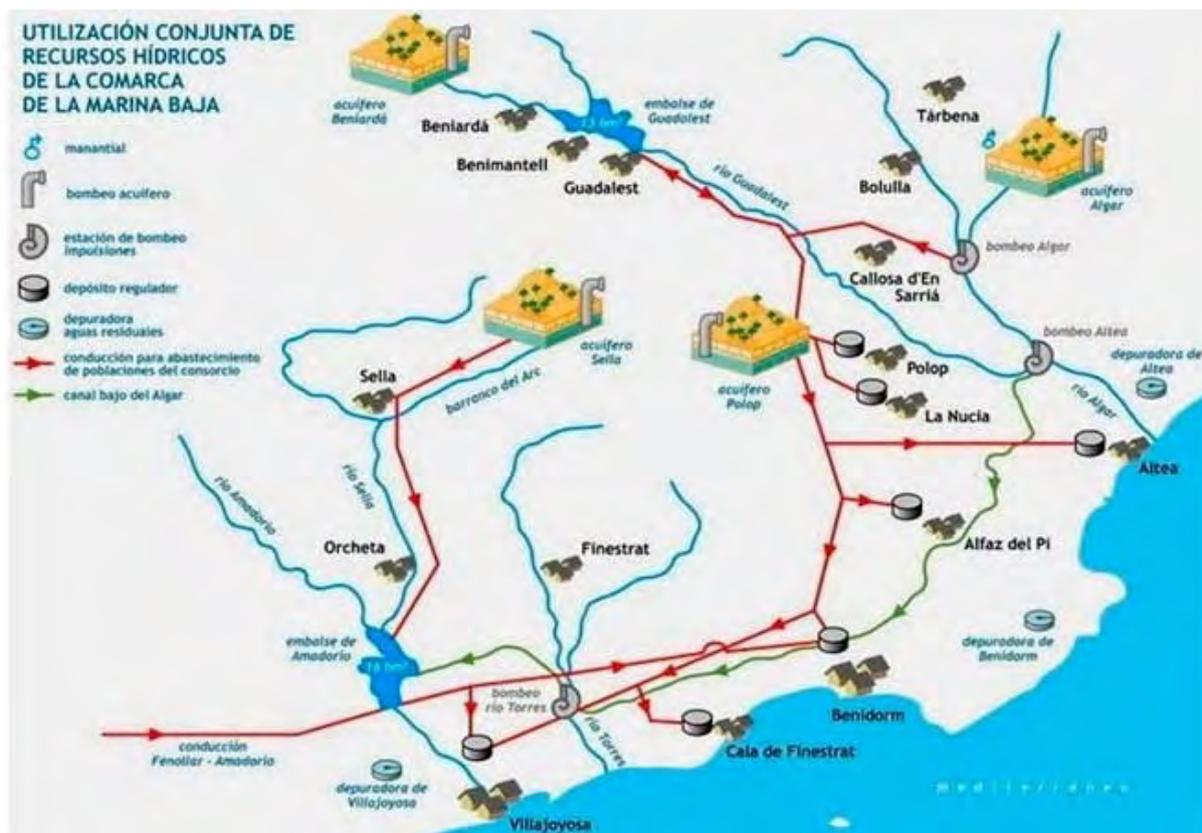


Figura 2. Esquema tipo del Sistema de Explotación de la Marina Baja: oferta y demanda de recursos hídricos. Fuente: IUA-CA (2017).

3. METODOLOGÍA

3.1. El modelo SWAT

Las simulaciones hidrológicas se realizaron con SWAT (Arnold et al., 2012; Arnold et al., 1998), un modelo hidrológico semidistribuido y continuo en el tiempo que funciona a escala de cuenca. El estudio se realizó con la versión 2012.10.4.21 de SWAT, como extensión acoplada a la herramienta ArcGIS (ArcSWAT).

La cuenca hidrográfica de Guadalest y sus subcuencas se delinearon a partir de un MDE con una resolución espacial de 5 m x 5 m (CNIG, 2020). En consonancia con Tarboton et al. (1991) y Jodar-Abellan et al. (2019), el MDE fue prefiltrado mediante herramientas SIG para eliminar los sumideros y los picos con el fin de garantizar una correcta delineación de las cuencas, subcuencas y arroyos, y evitar la generación de un sistema de drenaje discontinuo. Para mejorar la mencionada delineación, se utilizó la capa de red de drenaje, a escala 1:25.000, del MAPAMA (2021), que modifica la clasificación fluvial de Pfafstetter. De este modo, se obtuvo una correcta transmisión de los caudales entre las diferentes subcuencas. La salida de la cuenca se fijó en la ubicación de la estación de aforo del embalse del Guadalest (Figura 1).

En la cuenca estudiada se consideraron un total de 95 subcuencas (Figura 1). Este gran número de subcuencas, en una cuenca con una superficie de 62 km², es consecuencia del reducido umbral fijado en el modelo dentro del proceso de dirección y acumulación de flujos a partir del MDE (Winchell et al., 2013). De acuerdo con los objetivos de este trabajo, es imprescindible obtener una elevada resolución espacial en la zona de estudio. Las subcuencas generadas se dividieron en unidades de respuesta hidrológica (HRU), la máxima precisión espacial alcanzada en el modelo SWAT (Abbaspour et al., 2015).

En cada subcuenca, estos polígonos se consiguen mediante la intersección de los datos de uso del suelo, pendiente y suelo/edafología (Arnold et al., 2012; Jodar-Abellan et al., 2018). La cobertura de uso del suelo se adquirió a partir de la base de datos CLC, con una escala 1:100.000 (CNIG, 2020), para el escenario más actual (el periodo 2018) y sus clases de uso del suelo se reclasificaron en clases de uso del suelo según la nomenclatura de SWAT. Asimismo, la cartografía de pendientes, creada a partir del MDE anterior a la cuenca del Guadalquivir, se dividió en dos clases (0%-3% y >3%) siguiendo la normativa española 5.2-IC (BOE, 2016).

3.2. El algoritmo SUFI-2

El análisis de sensibilidad y el posterior análisis de incertidumbre (calibración y validación) para corregir los valores iniciales de los parámetros hidrológicos, del modelo SWAT, a través de series de aforos (modelización inversa), se realizaron con el algoritmo SUFI-2 disponible en el software SWAT-CUP (versión 5.2.1.1: Abbaspour et al., 2015). En resumen, el algoritmo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting version-2*) realiza una calibración estocástica (optimización de parámetros) en la que las incertidumbres iniciales de los parámetros, expresadas como rangos o distribuciones uniformes, se reducen a través de un conjunto de iteraciones (normalmente 3 o 5 iteraciones con unas 500 a 2000 simulaciones en cada una). La evaluación de la bondad del ajuste con los datos observados (descargas de caudal), sedimentos, nitratos, fosfatos, etc. puede realizarse basándose en los resultados de la función objetivo y las estadísticas relacionadas (Abbaspour, 2019). Este método se ha aplicado con éxito en una amplia gama de casos en todo el mundo. Los resultados de la bondad del ajuste en la cuenca del Guadalquivir se muestran en las Figuras 3 y 4, en las que, como puede observarse, los estadísticos considerados se encuentran próximos a sus valores óptimos.

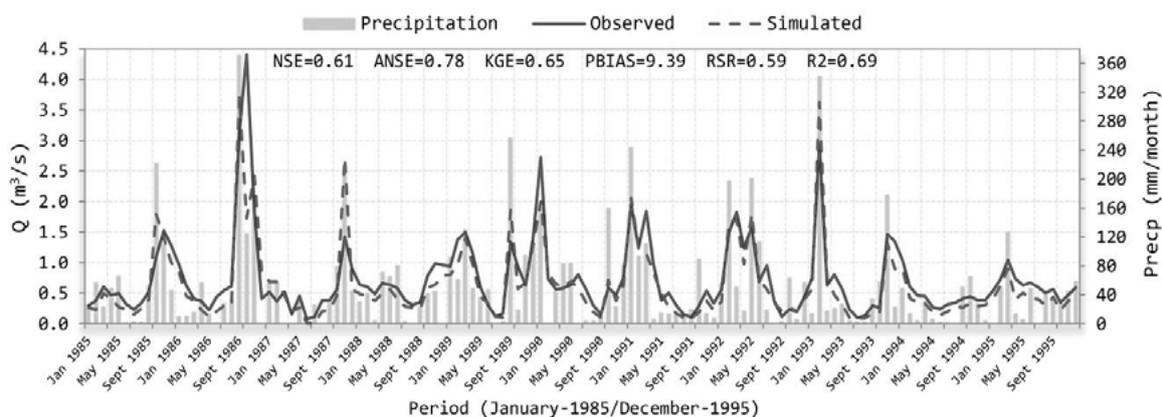


Figura 3. Ajuste en la validación con NSE como función objetivo.

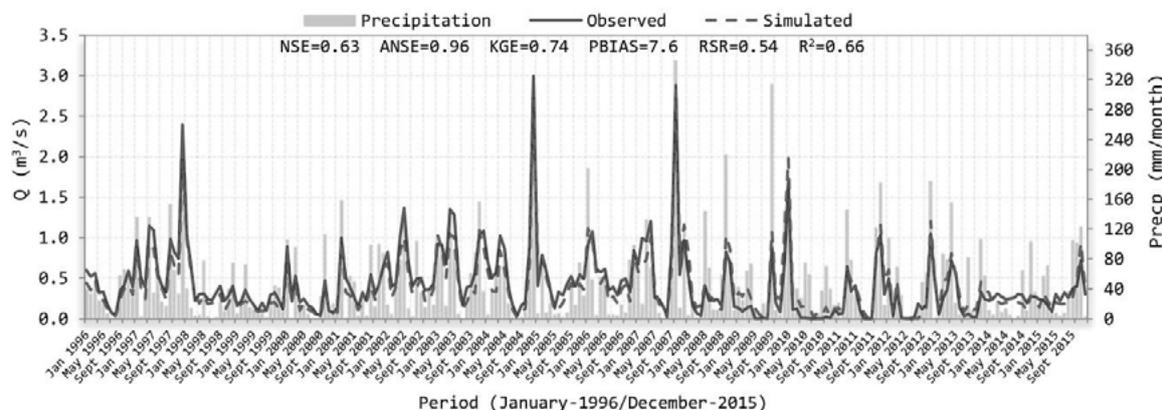


Figura 4. Ajuste en la calibración con NSE como función objetivo.

3.3. El modelo SIMPA

El Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación-Aportación (SIMPA) es un modelo distribuido lluvia-escorrentía con un paso temporal mensual y una resolución espacial de 1 km x 1 km (Estrela y Quintas, 1996). Este modelo conceptual resuelve las ecuaciones del balance hídrico en cada una de las celdas del territorio utilizando una base de datos espacial SIG, construida en el software GRASS, para calcular los parámetros del modelo hidrológico a partir de las características físicas de las cuencas (pendientes del terreno, geología, cobertura del suelo, tipos de suelo, etc.). En el modelo, el subsuelo se divide en dos zonas: la superior no saturada o de humedad del suelo; y la inferior o de acuífero, que está saturada y representa una reserva de agua subterránea que puede o no estar conectada al sistema de drenaje superficial. Asimismo, una parte de la entrada del modelo de precipitación, con escala mensual, permanece en la zona de humedad del suelo, dando suministro a los procesos de evapotranspiración junto con los registros de temperatura de las estaciones meteorológicas. El resto de la precipitación puede almacenarse como excedente, fluyendo en la superficie o recargando el acuífero. Por último, la escorrentía superficial fluye por la cuenca en el tiempo actual, mientras que el agua infiltrada se vierte posteriormente al sistema de drenaje. Además de estas salidas del modelo de agua, los desarrollos recientes de SIMPA se centran en la implementación de eventos de inundación y la evaluación de la calidad (Estrela et al., 2012; SIMPA, 2019).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, los valores medios anuales de la distribución espacial de la evapotranspiración real, la escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos, realizados con el modelo SWAT calibrado, fueron contrastados con los mismos resultados del modelo SIMPA para el periodo 1980-2016.

Los resultados de la evapotranspiración real en la cuenca de Guadalest son coherentes entre ambos modelos (Figura 5 a y b). Los resultados para esta variable oscilan entre 255 y 640 mm/año en el caso del modelo SIMPA y entre 114 y 617 mm/año con SWAT. Por lo tanto, se identifica una subestimación moderada de SWAT respecto a SIMPA en relación con estos valores extremos. Sin embargo, el análisis detallado denota que, por ejemplo, sólo una celda de la cuadrícula de SIMPA presenta el valor más alto (640 mm/año), que se localizó en la superficie del embalse de Guadalest (Figura 5a y Figura 1). En consecuencia, la mayoría de las celdas de la cuenca alcanzaron valores similares utilizando SWAT o SIMPA.

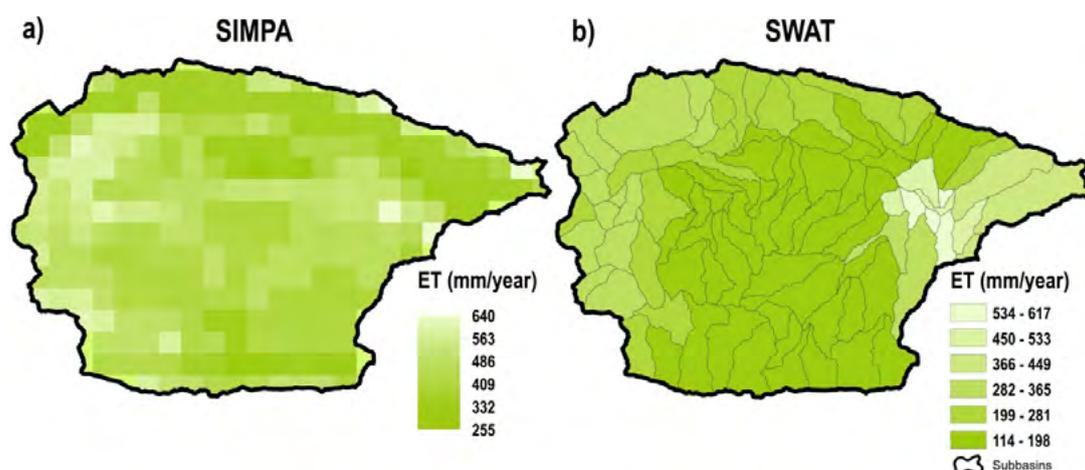


Figura 5. Tasas de evapotranspiración real anual en la cuenca del Guadalest a través de los modelos a) SIMPA y b) SWAT durante el periodo 1980-2016.

En la cuenca del Guadalest, la escorrentía superficial varió de 6 a 233 mm/año y de 13 a 262 mm/año en los modelos SIMPA y SWAT respectivamente (Figura 6 a y b). Por lo tanto, ambos modelos estima-

ron patrones similares de escorrentía superficial en la cuenca, aunque se identifica una sobreestimación moderada de SWAT con respecto a SIMPA teniendo en cuenta sus valores extremos inferior y superior (Figura 6 a y b). Como se indicó anteriormente en el análisis de la evapotranspiración real, las pequeñas diferencias entre los valores extremos de la escorrentía superficial se deben a un número reducido de celdas del territorio. Así, el valor más bajo de escorrentía superficial con el modelo SIMPA (6 mm/año) se identifica en una celda situada en la zona del embalse de Guadalest, mientras que la zona de este embalse recibió valores de escorrentía superficial entre 13 y 15 mm/año con el modelo SWAT (Figura 6 a y b). Además, se considera que el modelo SWAT estimó mejores valores superiores de escorrentía superficial que SIMPA, ya que SIMPA calculó patrones de escorrentía superficial bajos en la parte sur y suroeste de la cuenca (Figura 6a). En particular, estas áreas con grandes pendientes (Figura 1) y permeabilidad entre baja y muy baja deberían presentar altos valores de escorrentía superficial como los estimados por el modelo SWAT (Figura 6b).

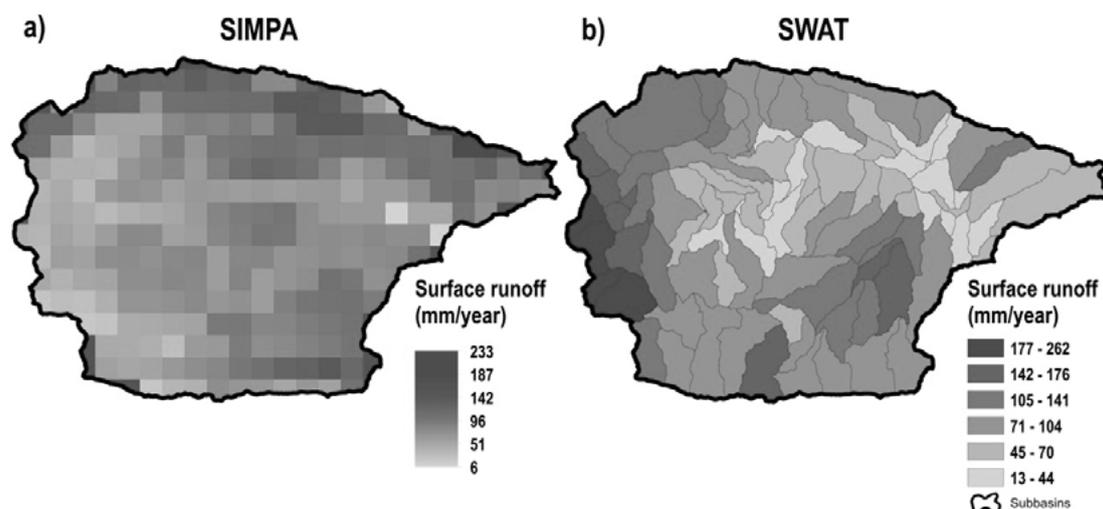


Figura 6. Tasas anuales de escorrentía superficial en la cuenca del Guadalest a través de los modelos a) SIMPA y b) SWAT durante el periodo 1980-2016.

La recarga de los acuíferos en la cuenca del Guadalest mostró un rango de 32 a 367 mm/año con el modelo SIMPA y de 67 a 399 mm/año con el modelo SWAT (Figura 7 a y b). Por lo tanto, los valores simulados por SWAT son 30-35 mm/año más altos que los valores de SIMPA. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, las diferencias en los valores extremos de las variables del balance hídrico evaluadas, normalmente, se deben a un grupo reducido de celdas del territorio.

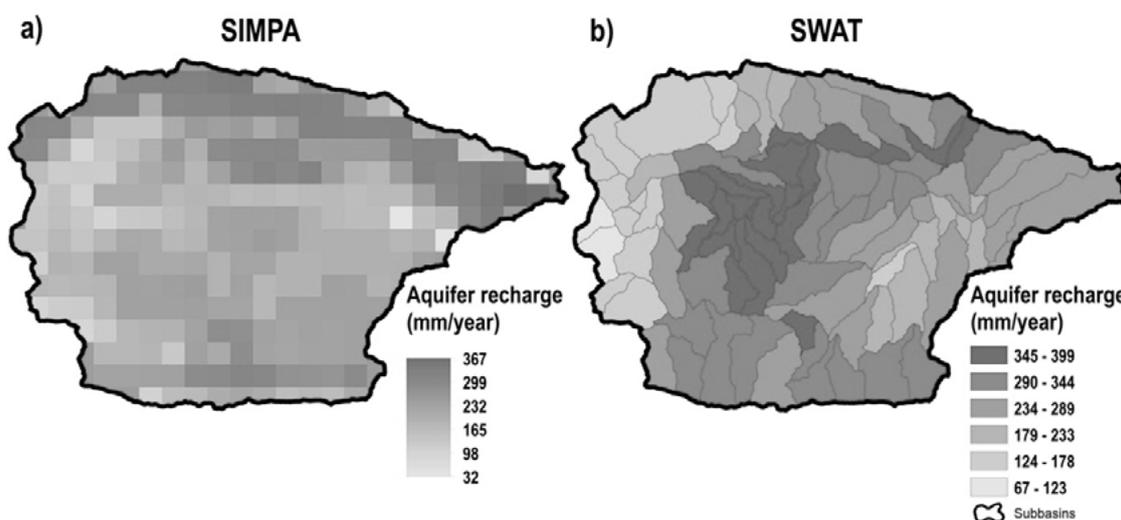


Figura 7. Tasas anuales de recarga de acuíferos en la cuenca de Guadalest a través de los modelos a) SIMPA y b) SWAT durante el periodo 1980-2016.

El análisis de la distribución espacial de la recarga de agua subterránea con SIMPA denota grandes valores de recarga en áreas de la cuenca con gran altitud y grandes pendientes, frecuentemente situadas alrededor del límite de la cuenca (Figura 7a). Sin embargo, SWAT calculó mayores tasas de recarga de agua subterránea en la porción central de la cuenca del Guadalest donde se identifican áreas con menor altitud y pendientes moderadas (Figura 7b). Por lo tanto, de acuerdo con el trabajo de campo realizado en DPA-IGME (2009) en la cuenca estudiada, y considerando los patrones de escorrentía superficial alcanzados a esta área de estudio (Figura 6 a y b), se estima que el modelo SWAT simuló la distribución de recarga de acuíferos con mayor precisión que SIMPA en esta cuenca. Además, se obtuvieron resultados similares de la recarga de agua subterránea por SWAT en Valdes-Abellan et al. (2018) y Valdes-Abellan et al. (2020), donde se desarrolló el modelo KAGIS y se aplicó en el acuífero Mela (Figura 1).

5. CONCLUSIONES

La implementación del modelo SWAT y las herramientas basadas en SIG han demostrado ser correctas para llevar a cabo los objetivos del estudio en una cuenca mediterránea kárstica semiárida (la cuenca del Guadalest) con una importante falta de información sobre las aguas subterráneas. En este contexto, y dentro del código SWAT, el método del número de curva del Servicio de Conservación del Suelo para la condición de humedad II y el modelo de Muskingum fueron adecuados para simular, respectivamente, la conversión lluvia-escorrentía y las ecuaciones de propagación de la crecida. Así pues, las ecuaciones de *Manning* en los canales y en el territorio (*overland* en SWAT), relacionadas con la velocidad del flujo, junto con los diferentes coeficientes de rugosidad de *Manning* elegidos, fueron esenciales para trasladar las características reales de uso del suelo de la cuenca de estudio al modelo SWAT.

A través del análisis de sensibilidad e incertidumbre realizado con los registros de caudales mensuales (procesos de calibración y validación), el grupo de parámetros hidrológicos seleccionados junto con sus valores finales mejoraron en gran medida el rendimiento del modelo SWAT en comparación con los valores iniciales. Así, los valores de los estadísticos seleccionados que miden la bondad del ajuste (NSE, KGE, PBIAS, RSR, etc.) se clasificaron como satisfactorios, buenos y muy buenos. Los resultados fueron aún mejores en el caso del índice ANSE, que presentó un resultado final cercano a su valor óptimo (1) en el proceso de calibración.

Por último, ambos modelos, SWAT y SIMPA, mostraron resultados coherentes en los patrones de evapotranspiración real (con un rango central en torno a 200-600 mm/año en la cuenca), aunque SWAT estimó mejor que SIMPA variables como la escorrentía superficial (40-250 mm/año) y la recarga de acuíferos (100-350 mm/año).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Cátedra del Agua de la Universidad de Alicante y la Diputación Provincial de Alicante (<https://catedradelaguaua.org/>).

REFERENCIAS

- Abbaspour, K. C. (2019). *SWAT-CUP. SWAT Calibration and Uncertainty Programs. A User Manual*. <https://swat.tamu.edu/software/swat-cup/>
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Klove, B., (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). *Input/output documentation version 2012*. Texas Water Resources Institute.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34, 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Aznar-Crespo, P., Aledo, A., & Melgarejo-Moreno, J. (2020). Social vulnerability to natural hazards in tourist destinations of developed regions. *Science of the Total Environment*, 709, 135870. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135870>
- BOE. (2016). *Proyecto de Orden Ministerial por la que se aprueba la Norma 5.2-IC Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras*. Boletín Oficial del Estado (BOE). Ministerio de Fomento.
- Camarasa-Belmonte, A. M. (2016). Flash floods in Mediterranean ephemeral streams in Valencia Region (Spain). *Journal of Hydrology*, 541, 99-115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.019>
- CNIG (2020). *Centro Nacional de Información Geográfica*. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp#>
- Derdour, A., & Bouanami, A. (2019). Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in rainfall–runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain. SW of Algeria. *Environ. Earth Sci.*, 78, 586. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8604-6>
- DGTP. (2009). *Plan de Acción Territorial del Paisaje en La Vall de Guadalest*. Dirección General de Territorio y Paisaje (DGTP). Genetalitat Valenciana. http://politicaterritorial.gva.es/document/s/20551069/91101391/17842-61220-Documento_R_G/981baa56-21b4-43f5-8697-2aab6f6771f6?version=1.0
- DPA-IGME. (2015). *Atlas hidrogeológico de la provincia de Alicante*. Excelentísima Diputación Provincial de Alicante (DPA), Área de Ciclo Hídrico-Instituto Geológico y Minero de España (IGME). <https://ciclohidrico.com/download/atlas-hidrogeologico-provincia-de-alicante/>
- Estrela, T., Pérez-Martin, M. A., & Vargas, E. (2012). Impacts of climate change on water resources in Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 57, 1154-1167. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.702213>
- Estrela, T., & Quintas, L. (1996). El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA. *Journal of Civil Engineering*, 104, 43-52.
- Fernández-Mejuto, M., Andreu, J. M., García-Sánchez, E., & Palencia, R. (2021). An Assessment of Groundwater Recharge at a Regional Scale for Sustainable Resource Management: Province of Alicante (SE Spain). *Water*, 13, 862. <https://doi.org/10.3390/w13060862>

- Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales, IUACA. (2017). Desde un Benidorm abastecido con buques-tanque hasta un modelo único de gestión integral del agua. *iAgua*. <https://www.iagua.es/noticias/espana/iuaca/16/03/07/benidorm-abastecido-buques-tanque-modelo-unico-gestion-integral-agua>
- Jodar-Abellan, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Climate change impact assessment on a hydrologic basin under natural regime (SE, Spain) using a SWAT model. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 240-253. <http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564>
- Jodar-Abellan, A., Valdes-Abellan, J., Pla, C., & Gomariz-Castillo, F. (2019). Impact of land use changes on flash flood prediction using a sub-daily SWAT model in five Mediterranean ungauged watersheds (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 657, 1578-1591. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.034>
- Jodar-Abellan, A., & Prats-Rico, D. (2019). Reutilización de efluentes depurados: usos y perspectivas en la provincia de Alicante (sureste de España). *Canelobre*, 70, 84-93. <http://www.iacjuangilalbert.com/detalle-ficha-libro/?id=2864>
- Jodar-Abellan, A., Palacios, T., Bailey, R. T., Melgarejo, P., Legua, P., & Hussein, E. E. 2022. Evaluation of the water response in a Mediterranean karstic catchment (SE Spain) with the SIMPA and SWAT models. In: *EGU General Assembly*, May 2022. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-1390>
- Kastridis, A., Kirkenidis, C., & Sapountzis, M. (2020). An integrated approach of flash flood analysis in ungauged Mediterranean watersheds using post-flood surveys and unmanned aerial vehicles. *Hydrological Processes*, 34, 4920-4939. <https://doi.org/10.1002/hyp.13913>
- Klove, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kvaerner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Bertacchi-Uvo, C., Velasco, E., & Pulido-Velázquez, M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518, 250-266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037>
- MAPAMA. (2021). *Tramos de ríos de España clasificados según Pfafstetter modificado*. <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/red-hidrografica.aspx>
- Martínez, J. J., Galindo, A., Griñán, I., Rodríguez, P., Cruz, Z. N., Martínez, R., & Melgarejo, P. (2019). Irrigation water saving during pomegranate flowering and fruit set period do not affect Wonderful and Mollar de Elche cultivars yield and fruit composition. *Agricultural Water Management*, 226, 105781. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105781>
- Melgarejo-Moreno, J., López-Ortiz, M. I., & Fernández-Aracil, P. (2019). Water distribution management in South-East Spain: A guaranteed system in a context of scarce resources. *Science of the Total Environment*, 648, 1384-1393. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.263>
- Molina, A., & Melgarejo, J. (2015). Water policy in Spain: seeking a balance between transfers, desalination and wastewater reuse. *International Journal of Water Resources Development*, 32(5), 781-798. <https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1077103>
- Pardo, M. Á., Riquelme, A. J., Jodar-Abellan, A., & Melgarejo, J. (2020). Water and Energy Demand Management in Pressurized Irrigation Networks. *Water*, 12(7), 1878. <https://doi.org/10.3390/w12071878>
- Pla, C., Benavente, D., Valdes-Abellan, J., & Jodar-Abellan, A. (2021). Recovery of Polluted Urban Stormwater Containing Heavy Metals: Laboratory-Based Experiments with Arlita and Filtralite. *Water*, 13(6), 780. <https://doi.org/10.3390/w13060780>

- Rodrigo-Comino, J., Salvia, R., Quaranta, G., Cudlín, P., Salvati, L., & Gimenez-Morera, A. (2021). Climate Aridity and the Geographical Shift of Olive Trees in a Mediterranean Northern Region. *Climate*, 9, 64. <https://doi.org/10.3390/cli9040064>
- SIMPA. (2019). *Modelo SIMPA 2019. Periodo de simulación: 1940/41 a 2017/18*. Spanish Ministry. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/evaluacion-recursos-hidricos-regimen-natural/>
- Tarboton, D. G., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 5, 81-100. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>
- Valdes-Abellan, J., Pardo, M. A., Jodar-Abellan, A., Pla, C., & Fernandez-Mejuto, M. (2020). Climate change impact on karstic aquifer hydrodynamics in southern Europe semi-arid region using the KAGIS model. *Science of the Total Environment*, 723, 138110. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138110>
- Valdes-Abellan, J., Pla, C., Fernandez-Mejuto, M., & Andreu, J. M. (2018). Validating the KAGIS black-box GIS-based model in a Mediterranean karst aquifer: Case of study of Mela aquifer (SE Spain). *Hydrological Processes*, 32, 2584-2596. <https://doi.org/10.1002/hyp.13215>
- Wada, Y., Van Beek, L. P. H., Bierkens, & M. F. P. (2012). Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment. *Water Resources Research*, 48(6), 1-18. <https://doi.org/10.1029/2011WR010562>
- Winchell, M., Srinivasan, R. S., Di Luzio, M., Arnold, J. G. (2013). *ArcSWAT Interface for SWAT2012. User's Guide*. Texas Water Resources Institute. <http://swat.tamu.edu/documentation/>