

SEGURIDAD HÍDRICA



JOAQUÍN MELGAREJO MORENO
M^a INMACULADA LÓPEZ ORTIZ
PATRICIA FERNÁNDEZ ARACIL

SEGURIDAD HÍDRICA

© los autores, 2023
© de esta edición: Universitat d'Alacant
ISBN: 978-84-1302-234-5

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 - PLANIFICACIÓN

Consideraciones ambientales con relación a la aprobación del Plan Hidrológico del Tajo de Tercer Ciclo 2022-2027 y el Traspase Tajo-Segura José Navarro Pedreño.....	19
Planificación Hidrológica: información, participación y evaluación ambiental estratégica Ángel Ruiz de Apodaca Espinosa	39
Representación espacio-temporal del riesgo de inundación a partir de las indemnizaciones del seguro de riesgos extraordinarios Francisco Espejo Gil, Urko Elozegi Gurmendi.....	59
La desalación en la estrategia de seguridad hídrica. Implicaciones económicas y ambientales Alberto del Villar García.....	73
La desalación en la provincia de Almería: garantía para el abastecimiento y el regadío Francisco Javier Alcántara Pérez	93
Mejorar la resiliencia ante las inundaciones en la Vega Baja (España). Propuesta didáctica en bachillerato Ángela del Carmen Zaragoza, Álvaro-Francisco Morote, María Hernández Hernández.....	105
Resignificando la ciudad como biotopo humano Javier Eduardo Parada Rodríguez, Liliana Romero Guzmán, Jesús Enrique De Hoyos Martínez	117
Gestión del agua y saneamiento básico en una reserva de desarrollo sostenible: comunidad de Nossa Senhora do Livramento do Tupé, Brasil Antonio Jorge Barbosa da Silva Maria Claudia da Silva Antunes de Souza	133
Proposición de una metodología para estimar la erosión del suelo en viticultura mediante ISUM (Improved Stock Unearthing Method). Un caso en el viñedo leonés Antonio Jódar-Abellán, Marta García-Fernández, Susana García-Pisabarro, Jesús Rodrigo-Comino	141
Estimación de la disponibilidad y seguridad hídrica bajo escenarios de cambio climático en una cuenca hidrológica agro-forestal del sureste de España Antonio Jódar-Abellán, Dámaris Núñez-Gómez, Efraín Carrillo-López, Ryan T. Bailey, Pablo Melgarejo	151
Determinación del umbral de escorrentía y disponibilidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Jubones, Ecuador Paolo Brazales Cervantes, Seyed Babak Haji Seyed Asadollah, Antonio Jódar-Abellán.....	163
Análisis del umbral de escorrentía de la cuenca del río Obispo, en la provincia del Carchi (Ecuador) Pablo David Viera Ríos, Derdour Abdessamed, Antonio Jódar-Abellán.....	175
El acuífero del Peñón (Alicante): un pequeño acuífero kárstico Víctor Sala Sala, José Miguel Andreu Rodes, Miguel Fernández Mejuto, Ernesto García Sánchez.....	185

¿Se observan cambios en la precipitación que afecten al Acuífero del Ventós (provincia de Alicante)?

José Miguel Andreu Rodes, Igor Gómez Domenech, Miguel Fernández-Mejuto, Juan Bellot Abad197

Revisión de las políticas de modernización de regadíos en la Comunidad Valenciana. La estrategia valenciana de regadíos 2020-2040

David Sancho-Vila, Marta García-Mollá207

El impacto del proyecto europeo ARSINOE en la gestión del acuífero de la isla de El Hierro (Canarias)

Juan C. Santamarta, Noelia Cruz-Pérez, Joselin S. Rodríguez-Alcántara, Alejandro García-Gil, Miguel Á. Marazuela, Carlos Baquedano, Jesica Rodríguez Martín, Luis Fernando Martín Rodríguez 219

BLOQUE II - INFRAESTRUCTURAS

Reutilización de aguas regeneradas en la cuenca del segura. Adaptación al reglamento (UE) 2020/741: retos y oportunidades

Sonia M. Hernández López, José Carlos González Martínez231

Caracterización hidrológica de los caudales ecológicos mínimos en España

Luis Garrote de Marcos 249

Sobrevvertido en presas de hormigón. Evaluación de las acciones hidrodinámicas

Luis G. Castillo Elsitdié, José M. Carrillo Sánchez, Juan T. García Bermejo 269

Consideraciones sobre la estimación de hidrogramas de rotura de presas

Luis Altarejos García 295

La seguridad de las infraestructuras hidráulicas

Francisco Javier Flores Montoya315

La ordenación del territorio y la planificación hidrológica al servicio de la seguridad hidráulica y energética

Francisco Javier Flores Montoya325

La evolución de los servicios urbanos del agua en Madrid: un servicio de alta calidad

Ignacio Lozano Colmenarejo345

BALTEN: el agua regenerada como garantía de suministro de agua de riego en Tenerife

Ana Sánchez Espadas, Jesús Rodríguez Martí363

El sector del agua urbana frente a las nuevas exigencias legislativas para mantener la seguridad hídrica

Carmen Hernández de Vega, Alicia Ayuso Solís381

El abastecimiento de la ciudad de Ávila: retos y soluciones científico-técnicas

José Luis Molina González, Jorge Mongil Manso 399

El Consorcio de Aguas de la Marina Baja: un ejemplo de economía circular en la garantía del abastecimiento urbano ante el reto continuo de las sequías

Jaime Berenguer Ponsoda409

Gestión activa de sistemas de abastecimiento mediante el empleo de sistemas multiagente (MAS) para la sostenibilidad

Carlos Calatayud Asensi, José Vicente Berná Martínez, Vicente Javier Macián Cervera, Lucía Arnau Muñoz439

La gestión municipal del ciclo urbano del agua digitalizado

Rosa Rozas Torrente, M^a José Moya Llamas, Arturo Trapote Jaume451

Microsectorización dinámica redes de distribución de agua	
Arturo Albaladejo Ruiz.....	463
Uso de compuertas en redes de drenaje para reducir inundaciones	
Leonardo Bayas-Jiménez	477
Detección y monitoreo de aguas superficiales en la región semiárida brasileña a partir de datos orbitales de sensores remotos	
Izaias de Souza Silva.....	487

BLOQUE III - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA Y JURÍDICA

La inseguridad hídrica del informe del Consejo Nacional del Agua sobre el recorte del travase Tajo-Segura	
Miguel Ángel Blanes Climent.....	499
El necesario impulso a las centrales hidroeléctricas reversibles como contribución a la seguridad energética nacional: algunas cuestiones jurídicas	
Estanislao Arana García	511
Políticas públicas para la mitigación del impacto del cambio climático sobre los aprovechamientos energéticos	
Jesús Conde Antequera	529
La legislación contra el cambio climático y la transición a una economía descarbonizada desde una doble perspectiva: ambiental y social	
José Esteve Pardo.....	549
Huella hídrica y financiación sostenible	
Domingo Zarzo Martínez, Mercedes Calzada Garzón, Patricia Terrero Rodríguez.....	559
¿Estamos sobreestimando los recursos de agua regenerada? Una ducha fría con la realidad hidro-económica	
Julio Berbel, Esther Díaz-Cano, Alfonso Expósito	577
Taxonomía de los instrumentos económicos aplicados para la gestión sostenible del agua	
Nazaret M ^a Montilla López, Esther Díaz-Cano y Julio Berbel.....	597
Seguridad hídrica y objetivos del PNIEC desde una perspectiva jurídica	
José Antonio Blanco Moa	613
SIAGES: un innovador sistema integrado de apoyo a la gestión del agua	
Alberto Esteban Barrera García, Álvaro Rodríguez García, Ramón Bella Piñeiro, Jose Pablo Ormaechea, Luis José Ruiz Aznar, Abel Solera Solera et al., Manuel Argamasilla Ruiz, Lupicino García Ortiz.....	631
Crisis energética y equilibrio económico financiero en la contratación pública	
Esteban Arimany Lamoglia	643
Garantía del abastecimiento en el Sureste español: la Mancomunidad de los Canales del Taibilla	
Patricia Fernández Aracil, M ^a Inmaculada López Ortiz, Joaquín Melgarejo Moreno.....	655
La evaluación de impacto ambiental de proyectos hidráulicos ¿lo estamos haciendo bien?	
Carlos Martín Cantarino.....	677

La seguridad energética y el autoconsumo fotovoltaico como herramienta para la seguridad hídrica	
Marcos García-López, Joaquín Melgarejo	695
Seguridad hídrica y equilibrio ecológico en el parque natural «El Hondo»: visión histórico-jurídica	
Francisco José Abellán Contreras	709
Los trasvases en tiempos de seguridad hídrica	
Paul Villegas Vega	723
Vulnerabilidad e incidencia de la pobreza hídrica en Alicante	
Ricardo Abad Coloma	735
Asequibilidad al agua urbana y pobreza hídrica en ciudades del Norte global: el caso de Alicante	
Luis E. Zapana Churata, Rubén A. Villar Navascués, María Hernández Hernández, Antonio M. Rico Amorós	745
Políticas públicas de ayudas para la mejora, modernización e innovación en el regadío de la Región de Murcia	
Ramón Martínez Medina, Encarnación Gil Meseguer, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín	759
O reflexo das <i>fake news</i> frente a crise ambiental: uma reflexão necessária nos dias atuais	
Aline Hoffmann, Liton Lanes Pilau Sobrinho	773
Apontamentos sobre o pagamento por serviços ambientais	
André Luiz Anrain Trentini	783
Constitucionalismo das águas – o “aguar” das constituições	
Luciana Pelisser Gottardi Trentini	795
Uso sustentável da água: uma definição a partir dos conceitos de segurança hídrica, de eficiência e de sustentabilidade	
Ana Luisa Schmidt Ramos, Alexandre Morais da Rosa	805
O regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil	
Jefferson Zanini, Luiz Antônio Zanini Fornerolli	815
Segurança hídrica e seu tratamento jurídico no o regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil e na Espanha	
Leandro Katscharowski Aguiar	827
Debatendo os ODS com base na sustentabilidade e no desenvolvimento sustentável.....	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Heloise Siqueira Garcia	837
A falta de efetividade no planejamento da segurança hídrica do Brasil	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Alexandre Waltrick Rates	851
Do constitucionalismo ao constitucionalismo global: por uma constituição mundial em defesa de bens fundamentais	
Vanessa Ramos Casagrande	863
A dessalinização da água como instrumento de segurança hídrica	
Anaxágora Alves Machado Rates	875
A canção dos oceanos	
Paola Fava Saikoski	885

Análise da lei de recursos hídricos à luz da responsabilidade do Brasil para com a sustentabilidade e a conscientização ambiental	
Adilor Danieli	895
Investigación sobre el río Amarillo en las dinastías Ming y Qing. Comentario sobre la Ley de protección del río Amarillo	
Yang Yang.....	907
Propuesta metodológica para la recolección del etnoconocimiento en la gestión del riesgo de desastre	
Isaleimi Quiguapumbo Valencia, Antonio Aledo Tur.....	919

BLOQUE IV - TECNOLOGÍAS

Nuevo sistema de riego con recuperación de agua y nutrientes	
Pablo Melgarejo, Dámaris Núñez-Gómez, Pilar Legua, Vicente Lidón, Agustín Conesa, Antonio Marhuenda, Juan José Martínez-Nicolás.....	933
Dinapsis: transformación digital para la gestión sostenible del agua y la salud ambiental	
María Tuesta San Miguel.....	953
Los contaminantes emergentes en la reforma de la directiva de aguas residuales	
Daniel Prats Rico.....	959
Fertirrigación y nuevas estrategias como garantía de seguridad hídrica en el regadío	
Alejandro Pérez Pastor y Elisa Pagán Rubio.....	985
La desalación y el hidrógeno	
Alejandro Zarzuela López.....	1005
Análisis regional de la reducción de boro en agua marina desalinizada para el riego agrícola en el sureste español	
Alberto Imbernón Mulero, José Francisco Maestre Valero, Saker Ben Abdallah, Victoriano Martínez Álvarez, Belén Gallego Elvira.....	1021
Impacto ambiental de la reducción del boro del agua de mar desalinizada para el riego en parcela	
Saker Ben Abdallah, Belén Gallego-Elvira, Alberto Imbernón-Mulero, Victoriano Martínez-Alvarez, José Francisco Maestre Valero.....	1031
Modelado cinético del consumo de CO₂ para la cepa Spirulina platensis	
Antonio F. Marcilla Gomis, Inmaculada Blasco López.....	1041
Empleo de filtro verde construido con residuos para reducir el contenido en fósforo en aguas de riego	
Teresa Rodríguez Espinosa, María Belén Almendro Candel, Ana Pérez Gimeno, Iliana Papamichael.....	1055
Tecnologías de oxidación avanzada para la degradación del fármaco carbamazepina: la ozonización	
María José Moya-Llamas, Marta Ferre Martínez, Elizabetha Domínguez Chabaliná, Arturo Trapote Jaime, Daniel Prats Rico.....	1067
Aprendizaje basado en proyectos colaborativos globales en formación profesional: banco de ensayos hidráulicos para la digitalización del agua	
Albert Canut Montalvã, Joaquín Martínez López, Maties Roma mayor, Antonio Oliva Sánchez.....	1079

Reutilización de agua para riego en la ciudad de Murcia. Proyecto LIFE CONQUER Eva Mena Gil, Simón Nevado Santos, Elena de Vicente Aguilar, Adriana Romero Lestido Benoît Fabien Claude Lefèvre.....	1091
Eliminación de microcontaminantes emergentes en lodos de depuradora mediante procesos de oxidación avanzada: peróxido de hidrógeno y ozono Clara Calvo Barahona, Adrián Rodríguez Montoya, María José Moya-Llamas, Arturo Trapote Jaume, Daniel Prats Rico.....	1103
Vigilancia y protección de las aguas superficiales mediante el proyecto WQeMS y los servicios del Copernicus Pablo Cascales de Paz, Eva Mena Gil, Isabel Hurtado Melgar, Laurent Pouget.....	1115
Tratamiento ecológico para la eutrofización y la anoxia en las masas de agua Ricardo Mateos-Aparicio Baixauli.....	1125
Modelado de descarga submarina de salmuera antes y después de la instalación de un difusor Silvano Porto Pereira, José Luís Sánchez-Lizaso, Paulo César Colonna Rosman. Ángel Loya, Iran Eduardo Lima Neto.....	1137
Las sequías en España en el siglo XXI: su influencia en la disminución y cierre de transferencias de agua del acueducto Tajo-Segura y de la conexión Negratín-Almanzora Encarnación Gil Meseguer, Ramón Martínez Medina, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín.....	1147

Estimación de la disponibilidad y seguridad hídrica bajo escenarios de cambio climático en una cuenca hidrológica agro-forestal del sureste de España

Antonio Jódar-Abellán

Departamento de Producción Vegetal y Microbiología,
Universidad Miguel Hernández de Elche, España
antonio.jodar@ua.es
<https://orcid.org/0000-0003-3373-8952>

Dámaris Núñez-Gómez

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

Efraín Carrillo-López

Grupo de Investigación en Conservación del Suelo y el Agua, Centro de
Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC), España
ecarrillo@cebas.csic.es
<https://orcid.org/0000-0001-8723-937X>

Ryan T. Bailey

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

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>

RESUMEN

La Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS), sureste de España, presenta una de las mayores tasas de escasez y explotación intensiva de recursos hídricos en el contexto europeo y mundial. Este trabajo estima los efectos del cambio climático sobre los principales componentes del balance hídrico en la cuenca alta del río Taibilla (cabecera de la DHS). Dicha cuenca ha sido escogida al encontrarse en régimen natural y ser actualmente primordial en el abastecimiento hídrico de numerosos municipios de la DHS y áreas contiguas. Para evaluar los mencionados efectos se ha implementado el modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) calibrado en SWAT-CUP utilizando el algoritmo de optimización SUFI-2. La calibración y validación se realizaron con dos funciones objetivo (NSE y KGE) en el periodo con caudales observados (1996-2018). Las proyecciones de precipitación y temperatura proceden del modelo climático global (GCM) bcc-csm1-1-m, regionalizado con la técnica de Análogos, bajo los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5. Los periodos de análisis son 2010-2020, 2021-2030 y 2041-2050. Los resultados del ajuste mejoran con NSE, con respecto a KGE, en las series de calibración y validación. En los periodos futuros, precipitación, escorrentía total, recarga de acuíferos, etc. muestran tendencias negativas mientras que la temperatura aumenta entre 1.5°C y 3°C. Pese a la gran incertidumbre existente, resulta evidente que las aportaciones de referencia disminuirán en las próximas décadas. Por tanto, la desalación de agua marina y los trasvases desde otras cuencas probablemente deberán poseer mayor relevancia en el suministro hídrico.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel global, los cambios demográficos, el aumento en el nivel de vida, las políticas 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). La cantidad y calidad de recursos hídricos, superficiales y subterráneos (agua azul), se encuentran considerablemente amenazadas en regiones con elevado estrés hídrico, a menudo, de origen agrícola (Wada et al., 2012; Custodio et al., 2016). En consecuencia, los reservorios de agua dulce han disminuido, lo que acarrea impactos ambientales negativos sobre los ecosistemas asociados (Senent-Alonso & García-Aróstegui, 2014). A su vez, la rapidez e incertidumbre con la que varía el suministro del agua dulce genera una importante indecisión política, caso por ejemplo de los trasvases en España (Melgarejo et al., 2019; Zarzo-Martínez & Prats-Rico, 2018). Al mismo tiempo, el cambio climático 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 (Pardo et al., 2021; Ricart & Rico, 2019). Dicha problemática incrementará las incertidumbres sobre las futuras demandas del agua (Jerez et al., 2018; Eekhout & de Vente, 2022; Nerantzaki et al., 2020), lo que, junto al continuo aumento en la frecuencia y duración de las sequías (Estrela et al., 2012), 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 (UN, 2012; Valdes-Abellan et al., 2020).

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio, la cuenca alta del río Taibilla (Figura 1), se localiza en la zona de cabecera de la Demarcación Hidrográfica del río Segura (Sur este de España). Se trata de una cuenca hidrológica actualmente próxima al régimen natural (CEDEX, 2014; Senent-Alonso & García-Aróstegui, 2014) con un área total de 315 km² (Quiñonero-Rubio et al., 2013). Desde los años 30 del siglo XX, la Mancomunidad de los Canales del Taibilla (MCT) gestiona los recursos de la citada cuenca. Hoy en día, la MCT se cataloga jurídicamente como un organismo público-estatal, de uso y suministro hídrico, adscrito al Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente. La MCT abastece “en alta” a numerosos municipios de las provincias de Murcia (44), Alicante (35) y Albacete (2). Las fuentes de suministro que utiliza proceden del Transvase Tajo-Segura y extraordinarios (57.4%), de la desalación de agua marina (3.4%) y de los aportes, de origen superficial y subterráneo, almacenados en el embalse del río Taibilla (39.2%). Los mencionados porcentajes varían en función del año hidrológico considerado (Melgarejo et al., 2019). De este modo, la variación modelizada, en el presente estudio, que experimentarán los recursos hídricos, en términos de balance hídrico en la cuenca alta del Taibilla, repercutirá considerablemente en el suministro hídrico de los municipios afectados durante las próximas décadas.

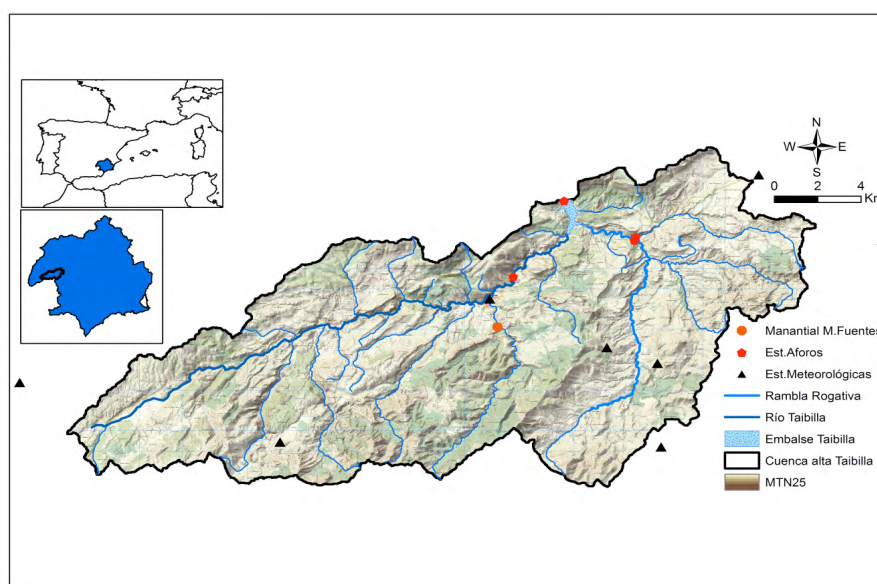


Figura 1. Localización de la cuenca alta del río Taibilla. Fuente: elaborado a partir de coberturas de la CHS, del Mapa Topográfico Nacional 1:25.000 (MTN25) del IGN, y de registros del CEDEX y AEMET.

3. METODOLOGÍA

3.1. El modelo SWAT

El software en código abierto *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) es un modelo lluvia-esorrentía, de parámetros semidistribuidos, capaz de simular numerosos procesos físicos a escala temporal continua (anual, mensual, diaria y subdiaria: Gassman et al., 2014). Su objetivo principal es predecir la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el impacto de prácticas de gestión agrícola sobre la calidad del agua (nutrientes y pesticidas). Presenta una precisión razonable en cuencas de gran tamaño, no aforadas (calibradas), con

variedad en el relieve, en tipos y usos del suelo, etc. Su elevada resolución espacial permite que sea implementado tanto a escala continental como de cuenca hidrológica (Neitsch et al., 2011). No obstante, como cualquier otro modelo, el uso de SWAT a gran escala requiere simplificaciones importantes. Gassman et al (2014) y Abbaspour et al (2015) muestran múltiples aplicaciones de SWAT a escala continental y de cuenca en Europa, África, Asia, EEUU, etc. La componente hidrológica de SWAT permite calcular explícitamente los diferentes elementos del balance hídrico y, en consecuencia, los recursos hídricos (agua azul, verde, etc.) a nivel incluso de subcuenca. La fase terrestre del ciclo hidrológico es simulada por SWAT en función de la siguiente ecuación del balance hídrico [Eq. (1)]:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Donde SW_t y SW_0 : contenido final e inicial de agua en el suelo, R_{day} : precipitación, Q_{surf} : escorrentía superficial, E_a : evapotranspiración, w_{seep} : agua que percola en la zona vadosa desde el perfil del suelo, y Q_{gw} : flujo de retorno. Las variables se expresan en mm de H₂O para el día i y el tiempo t en días (Neitsch et al., 2011). Así mismo, la Figura 2 muestra la división de la cuenca estudiada en 25 subcuencas mediante el uso del modelo SWAT.

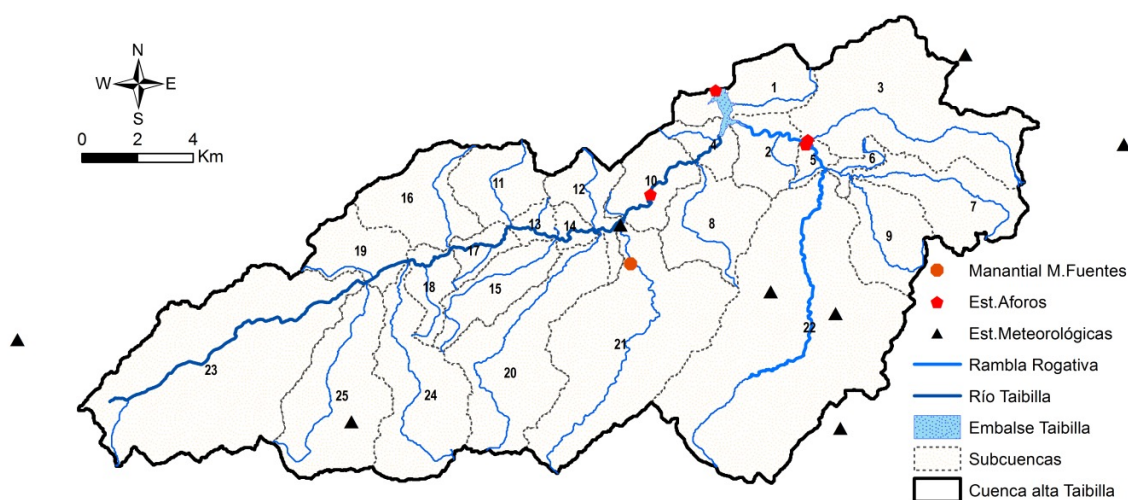


Figura 2. Delimitación con SWAT de la cuenca y subcuencas del río Taibilla.

3.2. El algoritmo SUFI-2

La calibración y el análisis de sensibilidad de SWAT han sido implementadas en el software SWAT-CUP2012 (SWAT Calibration and Uncertainty Programs), desarrollado por Abbaspour et al (2015). Dicho software contiene algoritmos (SUFI-2, PSO, GLUE, ParaSol y MCMC) con los que realizar la optimización (calibración) de SWAT, así como la validación y el análisis de sensibilidad (Abbaspour et al., 2015; Nerantzaki et al., 2020). En este trabajo, se ha seleccionado como algoritmo de optimización SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting versión-2) para llevar a cabo la calibración y el análisis de sensibilidad de SWAT, mientras que la validación del mismo se ha implementado en el software R4.3.0. En la Figura 3 se muestra la localización del

embalse del Taibilla, cuyos registros aforados de caudal (estación 7017 del CEDEX) han sido utilizados para calibrar y validar el modelo SWAT en este trabajo.

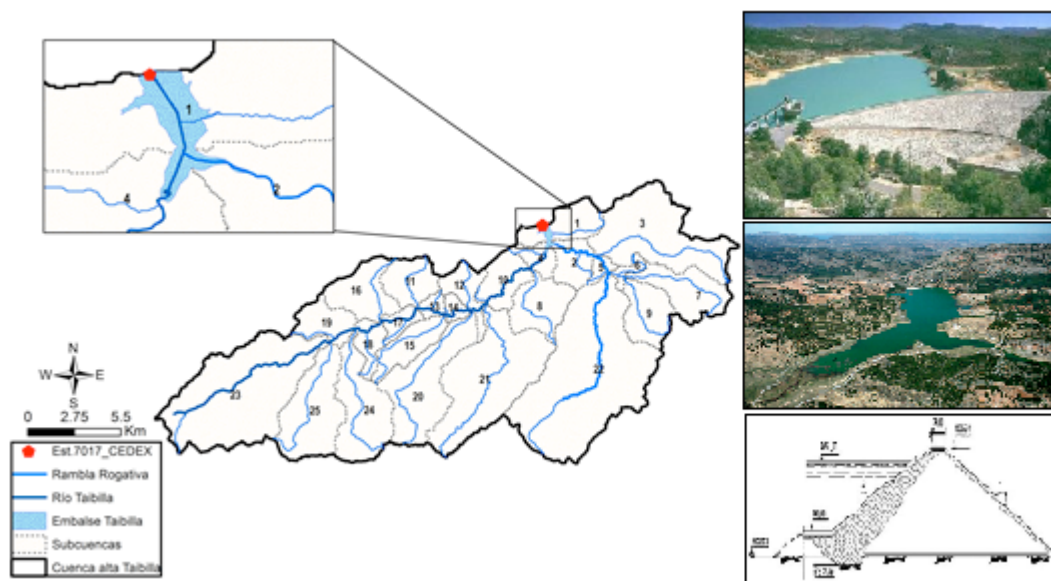


Figura 3. Situación de la estación 7017 y del embalse del Taibilla en el contexto de la cuenca alta del río Taibilla (subcuena 1). Fuente: elaborado a partir de MCT (<https://www.mct.es/web/mct/presa-de-embalse>).

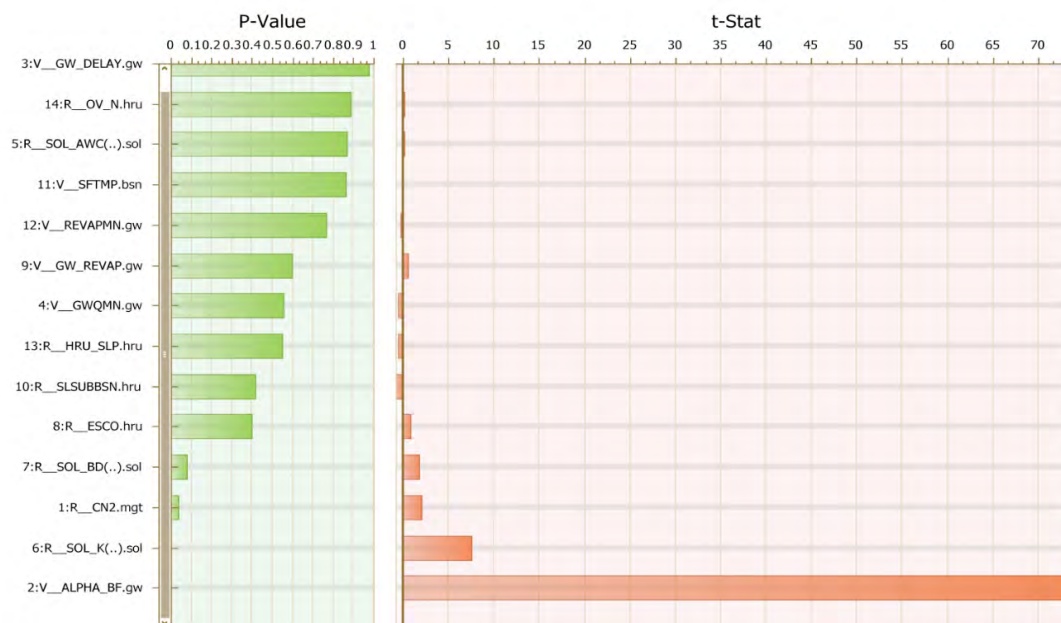


Figura 4. Análisis de sensibilidad de los parámetros hidrológicos durante la serie de calibración en la Iteración 5 con NSE como función objetivo. Resultados del P-valor y t-stat (t de Student).

Con respecto al análisis de sensibilidad destacar que, de los 14 parámetros hidrológicos seleccionados, los parámetros ALPHA_BF.gw, SOL_K (...).sol y CN2.mgt se muestran significativamente sensibles a la función objetivo seleccionada ($P\text{-valor} \leq 0.05$ y t-stat alto). Por ello, un cambio en dichos parámetros afectará en gran medida a los resultados del modelo (Figura 4 y Tabla 1).

NOMBRE DEL PARÁMETRO	T-STAT	P-VALOR
V__CW_DELAY.gw	0.031	0.975
R__OV_N.hru	0.148	0.883
R__SOL_AWC(..).sol	0.170	0.865
V__SFTMP.bsn	-0.177	0.860
V__REVAPMN.gw	-0.297	0.767
V__CW_REVAP.gw	0.528	0.598
V__CWQMN.gw	-0.591	0.555
R__HRU_SLP.hru	-0.600	0.548
R__SLSUBBSN.hru	-0.812	0.417
R__ESCO.hru	0.848	0.397
R__SOL_BD(..).sol	1.754	0.080
R__CN2.mgt	2.066	0.039
R__SOL_K(..).sol	7.588	0.000
V__ALPHA_BF.gw	74.203	0.000

Tabla 1. Análisis de sensibilidad de los parámetros hidrológicos durante la serie de calibración en la última iteración con NSE como función objetivo. Resultados del P-valor y t-stat (t de Student). Parámetros significativos con P-valor0.05.

3.3. Escenarios regionalizados de cambio climático en SWAT poscalibrado

Tras la calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo, éste puede ser de nuevo lanzado (poscalibrado), tanto para escenarios pasados como futuros, dado que los valores optimizados en los parámetros hidrológicos de la cuenca no varían con el tiempo (Neitsch et al., 2011). En coherencia con los objetivos del estudio, se incorporan en SWAT los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 establecidos en IPCC (2013). Los periodos seleccionados corresponden al corto plazo (2021-2030) y medio plazo (2041-2050). El modelo de cambio global (GCM) escogido es el bcc-csm1-1-m puesto que se trata del GCM más próximo al promedio de todos los modelos. Con el fin de adecuar las predicciones del modelo a la zona de estudio, se han acoplado en SWAT las proyecciones de éste a partir de la regionalización estadística realizada por AEMET con el método de análogos (Jerez et al., 2018). Las mencionadas series futuras de precipitación, temperatura máxima y mínima han sido descargadas en su totalidad de la base de datos, de libre acceso, propiedad de AEMET (http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios?w=0).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El promedio anual de los elementos del balance hídrico en la cuenca es obtenido con el software SWAT-CHECK (Abbaspour et al., 2015; Neitsch et al., 2011) durante el periodo 2010-2020 (Figura 5).

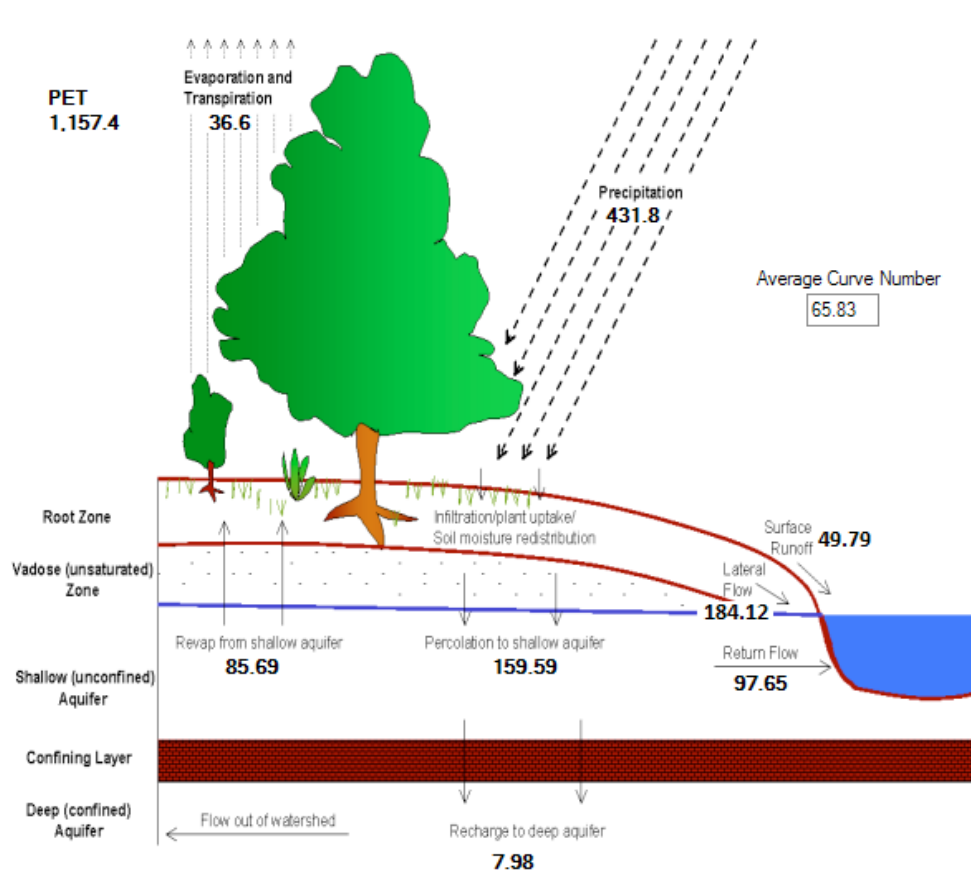


Figura 5. Balance hídrico en la cuenca alta del río Taibilla para el periodo 2010-2020. Variables en mm/año. Simulación ejecutada a nivel mensual en ArcSWAT con parámetros hidrológicos calibrados en SWAT-CUP (SUFI-2) a partir de la Iteración 5 con NSE como función objetivo.

La Figura 5 muestra, en términos genéricos, simulaciones coherentes con los registros reales conocidos en la cuenca (series de precipitación de AEMET, caudales del CEDEX, etc.). Se observa cómo la componente subterránea adquiere un papel esencial en el comportamiento hidrológico de la cuenca, dado que aproximadamente el 35% de la lluvia caída ($CN2=65.83\%$) es interceptada por las primeras capas de suelo infiltrándose con posterioridad en las formaciones acuíferas. Ello resulta lógico puesto que la zona de estudio se encuentra próxima al régimen natural y con un espesor elevado de la cobertura vegetal (Valdes-Abellan et al., 2018; Tohumi et al., 2013). En cambio, en el periodo 2021-2030, los resultados indican una disminución considerable de las precipitaciones totales anuales con respecto al periodo actual (2010-2020). Ello afecta de un modo coherente a los restantes elementos del balance exceptuando a la evapotranspiración potencial (ETP) y real (ETR). ETP muestra una reducción en su promedio anual y ETR un aumento (Figura 6). Tomando en consideración la localización de la cuenca del Taibilla (zona de cabecera de la DHS), el clima que presenta (mediterráneo subhúmedo en transición al semiárido), así como los resultados de CEDEX (2012) para la cabecera de la DHS, todo parece indicar un error en la modelización de SWAT para ambas variables. Además, en la DHS y para los próximos decenios, CEDEX (2012) proyecta reducciones en la ETR, debido a la menor disponibilidad de agua de lluvia, e incrementos en la Evapotranspiración de referencia (ET0) por el aumento previsto en la temperatura media. La magnitud de los cambios predichos en CEDEX (2012) varía evidentemente en función de los escenarios de cambio climático considerados.

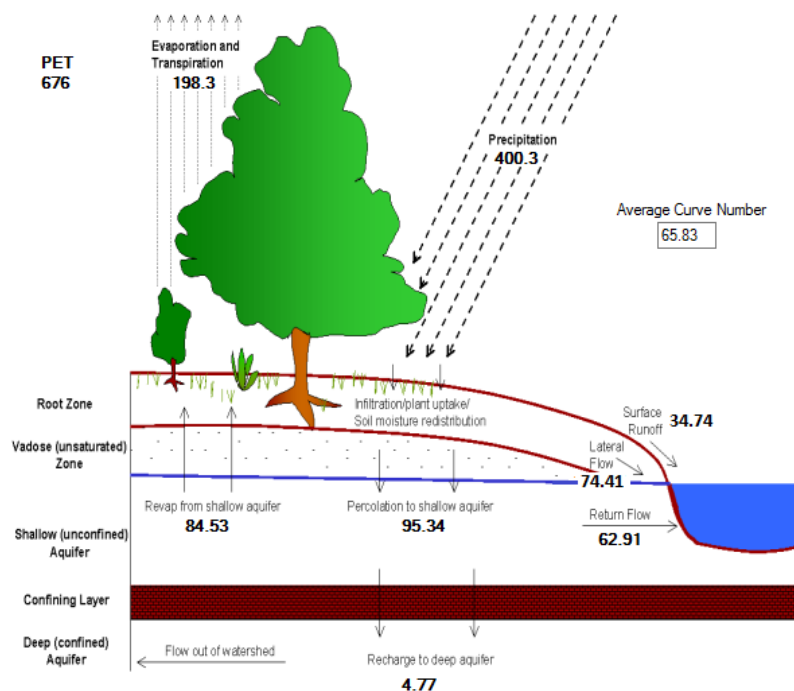
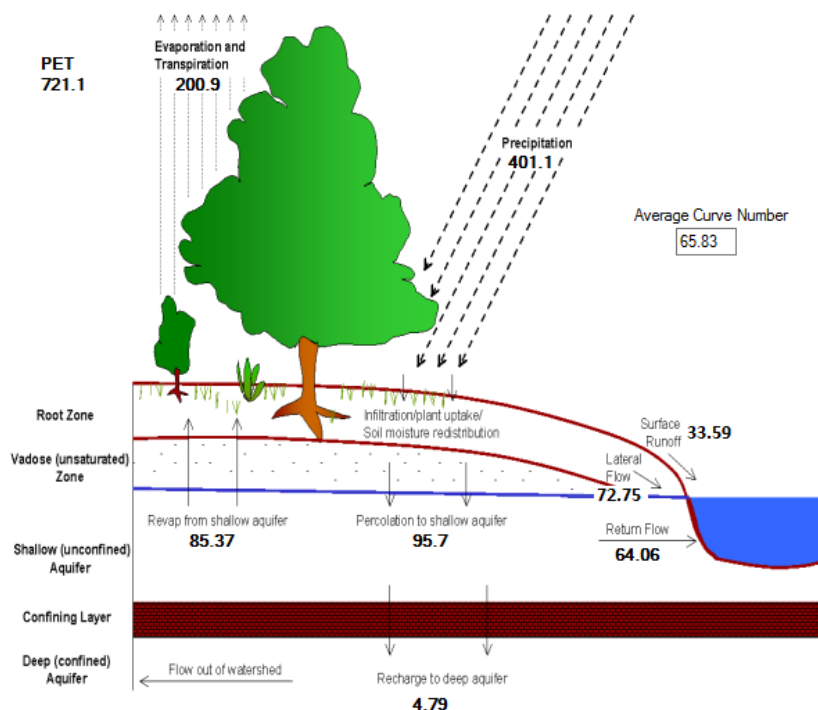


Figura 6. Balance hídrico en la cuenca alta del Taibilla durante el periodo 2021-2030. Variables en mm/año. Escenarios RCP4.5 (a) y RCP8.5 (b) ambos para el GCM bcc-csm1-1-m con regionalización estadística por Análogos. Escenarios incorporados a la simulación ejecutada a nivel mensual en ArcSWAT con parámetros calibrados en SWAT-CUP (SUF2) a partir de la iteración 5 con NSE como f.objetivo.

La Figura 7 representa la futura variación de los elementos del balance hídrico en el medio plazo (2041-2050). Se observa de nuevo una reducción de la precipitación con respecto al periodo actual (2010-2020). La lluvia disminuye en mayor medida en el escenario RCP8.5, lo cual resulta lógico dado que dicho escenario aporta mayor forzamiento radiativo al sistema climático (Estrela et al., 2012; Eekhout et al., 2021; Valdes-Abellan et al., 2020).

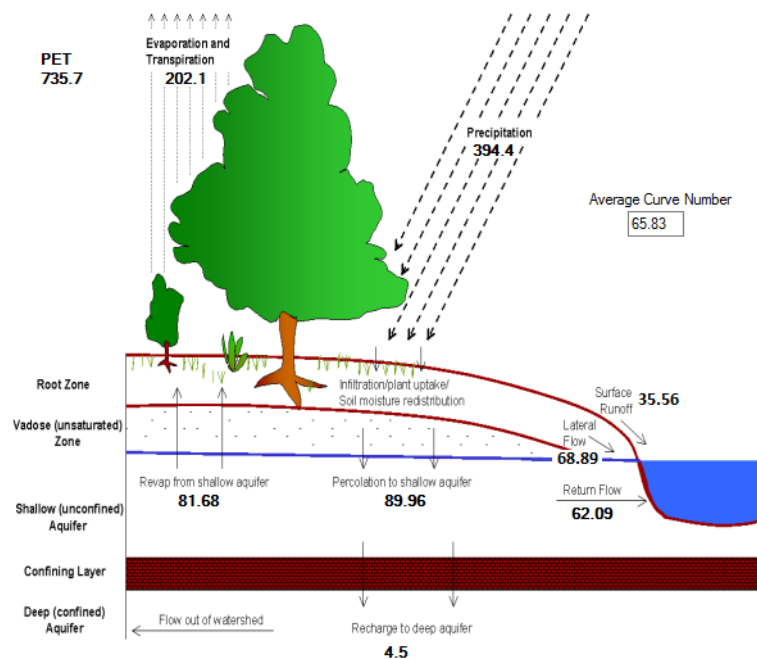
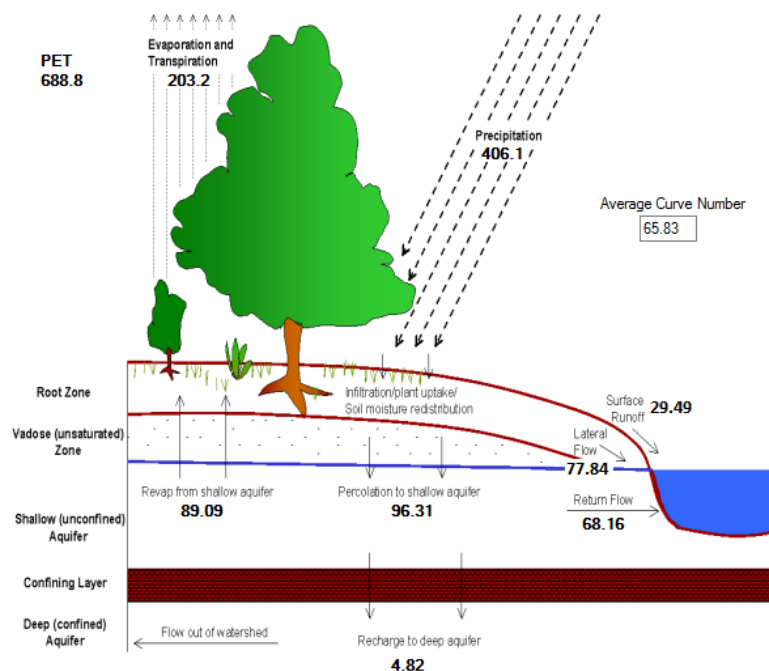


Figura 7. Balance hídrico en la cuenca alta del Taibilla durante el periodo 2041-2050. Variables en mm/año. Escenarios RCP4.5 (a) y RCP8.5 (b) ambos para el GCM bcc-csm1-1-m con regionalización estadística por Análogos. Escenarios incorporados a la simulación ejecutada a nivel mensual en ArcSWAT con parámetros calibrados en SWAT-CUP (SUFI-2) a partir de la Iteración 5 con NSE como f.objetivo.

5. CONCLUSIONES

En el presente estudio se ha mostrado la implementación del modelo ArcSWAT en una cuenca hidrológico-forestal próxima al régimen natural: la cuenca alta del río Taibilla, localizada en la Demarcación Hidrográfica del Segura, sur este de España. La disponibilidad hídrica en la citada cuenca ha sido evaluada en cinco escenarios (periodos 2010-2020, 2021-2030 y 2041-2050, éstas últimas para el RCP4.5 y 8.5). Los principales resultados de este trabajo indican, tras la

calibración y validación del modelo, que la cuenca percibirá una disminución de las aportaciones en régimen natural durante los periodos futuros, así como un incremento de la temperatura media de en torno a 2°C. Ello coincide, en términos genéricos, con los resultados obtenidos en infinidad de modelos hidrológicos lluvia-escurrentía aplicados, por todo el globo, sobre zonas de estudio en régimen natural y en los que se consideran escenarios y modelos de cambio climático. De este modo, los resultados presentados, aunque preliminares, apoyan la evidencia científica de las últimas décadas en cuanto a balance hídrico y cambio global. Análogamente la selección de la eficiencia de NSE, como función objetivo debido a la mejora que éste aporta en los resultados de la bondad del ajuste, coincide por completo con la literatura recopilada en relación a dicho estadístico.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se enmarca en el proyecto de investigación AGROALNEXT 2022/NAC/00086 y 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., 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>
- CEDEX (2012). *Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las Masas de Agua. Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/ImpactoCCSistemasExplotacion_tcm7-310164.pdf
- CEDEX (2014). *Ficha de caracterización del Embalse Taibilla y estación 7017*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). <http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/fichas/SEGURA/Embalses/7017.pdf>
- Custodio, E., Andreu-Rodes, J. M., Aragón, R., Estrela, T., Ferrer, J., García-Aróstegui, J. L., Manzano, M., Rodríguez-Hernández, L., Sahuquillo, and A. Del Villar, A. (2016). Groundwater intensive use and mining in south-eastern peninsular Spain: Hydrogeological, economic and social aspects. *Science of the Total Environment*, 559(1), 302-316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.107>
- Eekhout, J., and de Vente, J. (2022). Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. *Earth-Science Reviews*, 226, 103921.
- Eekhout, J., Millares, A., Martínez, A., García, R., Pérez, P., Conesa, C., and de Vente, J. (2021). A process-based soil erosion model ensemble to assess model uncertainty in climate change impact assessments. *Land Degradation & Development*, 32, 2409-2422.

- Estrela, T., Pérez-Martin, M. A., Vargas, E. (2012). Impacts of climate change on water resources in Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1154-1167. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.702213>
- Gassman, P. W., Sadeghi, A. M., and Srinivasan, R. (2014). Applications of the SWAT model special section: Overview and insights. *Journal of Environmental Quality*, 43, 1-8. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.11.0466>
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., y Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press. http://www.climate-change2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf
- Jerez, S., Lopez-Romero, J. M., Turco, M., Jimenez-Guerrero, P., Vautard, R., and Montávez, J. (2018). Impact of evolving greenhouse gas forcing on the warming signal in regional climate model experiments. *Nature communications*, 9(1), 1304. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03527-y>
- Melgarejo-Moreno, J., López-Ortiz, M. I., and 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>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2011). Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2009. Texas A&M University System. *Texas Water Resources Institute Technical Report*, 406. <http://swat.tamu.edu/documentation/>
- Nerantzaki, S. D., Hristopulos, D. T., Nikolaidis, N. P. (2020). Estimation of the uncertainty of hydrologic predictions in a karstic Mediterranean watershed. *Science of the Total Environment*, 717, 137131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137131>
- Pardo, M. A., Pérez-Montes, A., and Moya-Llamas, M. J. (2021). Using reclaimed water in dual pressurized water distribution networks. Cost analysis. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101766. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101766>
- Quiñonero-Rubio, J. M., Boix-Fayos, C. y De-Vente, J. (2013). Desarrollo y Aplicación de un Índice Multifactorial de Conectividad de Sedimentos a escala de Cuenca. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 39(2), 203-223. <https://doi.org/10.18172/cig.1988>
- Ricart, S., and Rico, A. M. (2019). Assessing technical and social driving factors of water reuse in agriculture: A review on risks, regulation and the yuck factor. *Agricultural Water Management*, 217, 426-439. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.017>
- Senent-Alonso, M. y García-Aróstegui, J. L. (2014). *Sobreexplotación de acuíferos en la cuenca del Segura. Evaluación y perspectivas*. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua.
- Tohuami, I., Andreu-Rodes, J. M., Chirino, E., Sánchez, J. R., Moutahir, H., and Pulido-Bosch, A. (2013). Recharge estimation of a small karstic aquifer in a semi-arid Mediterranean region (Southeastern Spain) using a hydrological model. *Hydrological Processes*, 27, 165-174. <https://doi.org/10.1002/hyp.9200>

- United Nations, UN. (2012). Managing Water Under Uncertainty and Risk. *The United Nations World Water Development Report 4*, vol. 1. UNESCO Publishing. <http://publishing.unesco.org/>
- Valdes-Abellan, J., Pardo, M. A., Jodar-Abellan, A., Pla, C., and 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., and 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., and 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>
- Zarzo-Martínez, D., and Prats-Rico, D. (2018). Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future? *Desalination*, 427, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.046>