

CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Impacto del cambio climático en la España rural:

Modelizando la afección a los recursos
hídricos en una cuenca del centro
peninsular



IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ESPAÑA RURAL: MODELIZANDO LA
AFECCIÓN A LOS RECURSOS HÍDRICOS EN UNA CUENCA DEL CENTRO PENINSULAR



IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ESPAÑA RURAL: MODELIZANDO LA AFECCIÓN A LOS RECURSOS HÍDRICOS EN UNA CUENCA DEL CENTRO PENINSULAR

Autor Principal: Eugenio Molina Navarro

Otros autores: Antonio Sastre Merlín, Miguel Martín-Loeches Garrido, Rosa Vicente, Alejandro Sánchez Gómez y Silvia Martínez Pérez.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ESPAÑA RURAL: MODELIZANDO LA AFECCIÓN A LOS RECURSOS HÍDRICOS EN UNA CUENCA DEL CENTRO PENINSULAR

RESUMEN

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta nuestro país es la adecuada gestión del agua. Esta situación se ve agravada por el contexto de cambio climático actual, cuyos efectos deben tenerse en cuenta en la inminente actualización de los planes de cuenca. Los últimos informes del IPCC predicen un calentamiento global que será especialmente relevante durante el verano en el sur de Europa, siendo la reducción de los recursos hídricos disponibles uno de sus efectos desfavorables más preocupantes.

Los municipios de la cuenca del río Salado, al norte de la provincia de Guadalajara e inmediatamente al pie de las últimas estribaciones del Sistema Central, se abastecen únicamente de aguas subterráneas, como tantos otros entornos rurales. Los efectos del cambio climático ya son apreciables, generando preocupación la escasez de agua suministrada por los manantiales de abastecimiento durante el verano.

Con el objetivo de evaluar la disponibilidad de agua en la cuenca a medio y largo plazo y poder orientar las decisiones a tomar por las administraciones competentes, se ha implementado un modelo hidrológico con SWAT (Soil and Water Assessment Tool), simulando posteriormente escenarios de cambio climático. La calibración del modelo, realizada de manera semi-automática, resultó satisfactoria según los estándares habituales.

Posteriormente, se han simulado cuatro escenarios de cambio climático -utilizando las últimas proyecciones de la AEMET para la provincia de Guadalajara-, combinando dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5, emisiones bajas y altas, respectivamente) y dos horizontes temporales (2046-2065 y 2081-2100).

Los resultados obtenidos sugieren que a finales del presente siglo el caudal en el río Salado podría disminuir entre un 34% y un 57% para los escenarios de bajas y altas emisiones, respectivamente. Del mismo modo, el modelo prevé que la recarga de los acuíferos se vería reducida entre un 31% y un 55%. Así pues, los resultados revelan un panorama complejo en lo que a la gestión futura del agua en la cuenca se refiere, pudiendo este trabajo ayudar a una toma de decisiones acorde con las circunstancias que, previsiblemente, acontecerán.

Palabras clave: Agua subterránea, cambio climático, escorrentía, modelización hidrológica, SWAT.

1. INTRODUCCIÓN

Garantizar la disponibilidad de agua es uno de los mayores retos ambientales a nivel mundial. Particularmente, la Unión Europea ha tomado medidas para abordar esta problemática, destacando la promulgación de la Directiva Marco del Agua [1]. El reto es mayor si cabe en el sur del continente, donde los recursos hídricos son más escasos, siendo además España el país de la Europa mediterránea con la mayor tasa de uso de recursos de agua renovables [2].

A pesar de que el foco sobre la presión del recurso hídrico se centra en las grandes aglomeraciones urbanas, esta problemática no es ajena al entorno rural. Un buen ejemplo de ello es la cuenca del río Salado, ubicada en el norte de la provincia de Guadalajara. Los municipios de este territorio, como en tantos otros entornos rurales, se abastecen únicamente de agua subterránea. La baja pluviosidad del entorno, asociada a otras circunstancias desfavorables como la presencia de aguas de elevada salinidad, ha dado lugar a la pertinente preocupación de las instituciones competentes por asegurar la demanda de agua para el abastecimiento urbano merced del recurso subterráneo.

Además, el cambio climático se configura como una amenaza adicional en esta tarea, siendo la reducción de los recursos hídricos disponibles uno de sus efectos desfavorables más preocupantes. Ello podría actuar de manera sinérgica con las presiones actuales, por lo que las administraciones competentes deben tener en cuenta los posibles impactos de un calentamiento global en la gestión de las cuencas hidrográficas [3]. A pesar de ello, los efectos potenciales del cambio climático no han sido adecuadamente considerados en la primera versión de los planes hidrográficos europeos (2009-2015), si bien la UE ha instado a hacerlo en el ciclo de planificación actual (2016-2021) y en los venideros. No en vano, la consideración de los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos ha sido listado como el primero de los temas en el Esquema Provisional de Temas Importantes para el actual ciclo de planificación en la Confederación Hidrográfica del Tajo [4].

Particularmente, en el centro peninsular, diversos estudios han estimado que el cambio climático podría traer consigo una disminución de la disponibilidad de recursos hídricos a finales del s. XXI en torno al 50% [5, 6], que será particularmente acusada en el componente subterráneo de la escorrentía [7]. Estos efectos ya se han hecho notar en los municipios de la cuenca del río Salado, generando preocupación la escasez de agua suministrada por los manantiales de abastecimiento durante el verano.

Los modelos hidrológicos se han convertido en herramientas esenciales para abordar este tipo de problemática gracias a su capacidad para simular el ciclo hidrológico desde una perspectiva holística y multidisciplinar. En especial, los modelos a escala de cuenca se configuran como herramientas de soporte a la toma de decisiones, facilitando incluso el desarrollo de planes de cuenca [8]. Entre estos modelos destaca el Soil and Water Assessment Tool (SWAT). SWAT es un modelo de base física, semi-distribuido y de dominio público [9], capaz de simular cantidad y calidad de agua a escala de cuenca. Puede utilizarse para predecir los impactos eco-hidrológicos de cambios en los usos del suelo, en las prácticas agrícolas o en el clima [10]. SWAT es ampliamente utilizado a nivel mundial y su uso ha crecido exponencialmente en los últimos años (más de 3600 artículos científicos revisados por pares describen aplicaciones del modelo, más

de 2300 de ellos publicados desde 2014; para más información, consúltese https://www.card.iastate.edu/swat_articles/).

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos de la cuenca del río Salado. Para ello, se ha implementado un modelo hidrológico con SWAT, simulando después diversos escenarios de acuerdo a las últimas proyecciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Finalmente, se ha evaluado la disponibilidad de agua en la cuenca a medio y largo plazo y el impacto del cambio climático sobre los distintos componentes del balance hidrológico de la cuenca. Los resultados de este trabajo pueden servir como pautas para orientar las decisiones a tomar por las administraciones competentes en aras de garantizar la disponibilidad de recursos hídricos en la zona de estudio.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

La cuenca del río Salado se ubica en el norte de la provincia de Guadalajara, en el sector de cabecera de la cuenca del río Tajo (figura 1). El sector norte, delimitado por los Altos de Barahona, configura de hecho una divisoria de primer orden entre las cuencas del Tajo y del Duero. La cuenca tiene una superficie de 485 km², con altitudes que oscilan entre los 838 y los 1404 m.s.n.m. El río tiene su origen en la denominada Laguna de Paredes y recorre 44 km de norte a sur hasta desembocar en el río Henares en la localidad de Baides.

El área de estudio goza de un clima típico mediterráneo-continental. Los valores de temperatura y precipitación medios anuales registrados en las estaciones termo-pluviométricas del entorno (figura 2) son de 11,6°C y 526 mm, respectivamente (periodo 1972-73 / 2003-04), registrándose las mayores precipitaciones a finales del otoño y principios del invierno.

La escorrentía superficial está regulada por el embalse de El Atance, construido en 1997 y con una capacidad máxima de 37 hm³ (figura 1). La cuenca está dotada con una estación de aforos (Estación nº 3158, “Río Salado en Huérmeces”), operativa desde el año 1972, haciendo así posible la calibración del modelo SWAT con caudales observados. El caudal medio registrado en esta estación es de 20,8 hm³/año, aunque apreciándose una gran variabilidad interanual, con valores que van desde los apenas 4 hm³/año hasta los más de 73 hm³/año, y con un pronunciado estiaje en los meses de verano, particularmente en el periodo previo a la construcción del embalse.

Geológicamente, la cuenca del río se encuadra en la mitad septentrional de la denominada “Rama Castellana de la Cordillera Ibérica”, en la conexión entre ésta y el Sistema Central. Presenta por ello una superposición de estructuras de plegamiento según dos direcciones principales, una aproximadamente ENE-OSO o “dirección Guadarrama” y otra NO-SE o “dirección Ibérica”. El progresivo encajamiento del río ha propiciado el afloramiento de rocas de muy diversa edad y litología. Así, la cuenca se desarrolla sobre materiales de edad precámbrica,

paleozoica, mesozoica y cenozoica además de formaciones aluviales y coluviales de edad cuaternaria [11, 12, 13, 14].

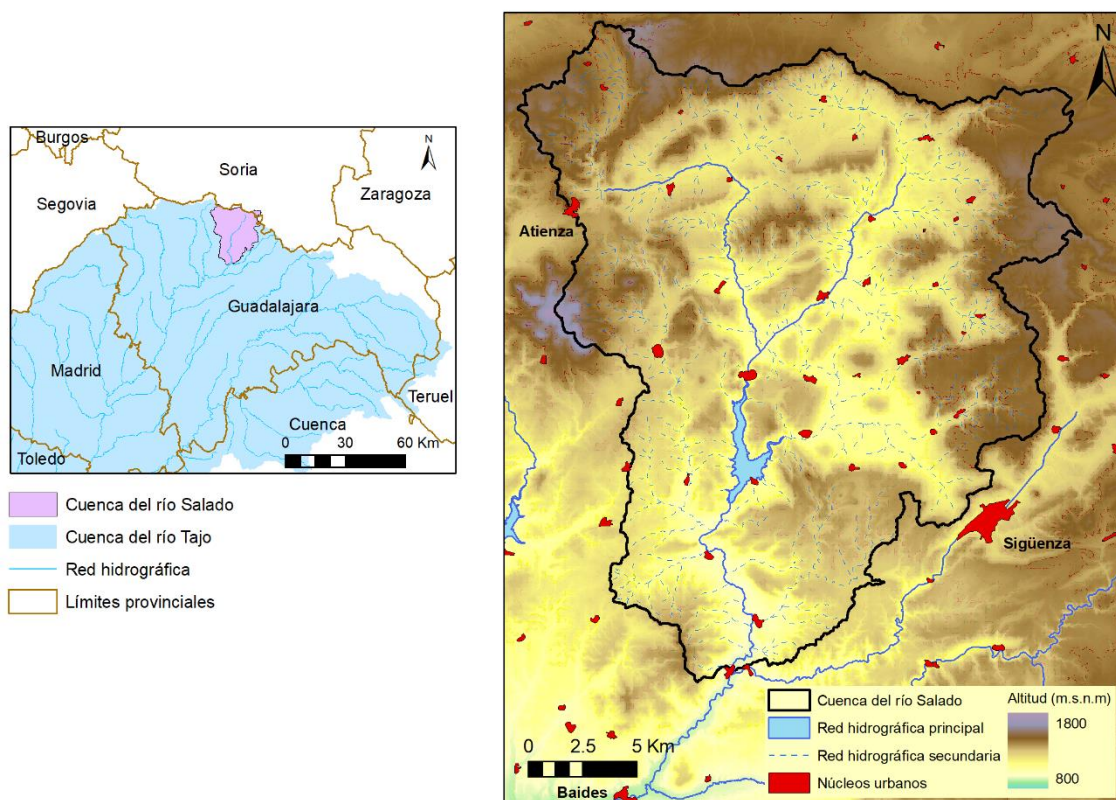


Figura 1. Localización de la cuenca del río Salado y mapa de la misma, incluyendo el modelo digital de elevaciones.

Entre ellos, merecen ser destacados los materiales del mesozoico. Los materiales triásicos se encuentran ampliamente representados, sobre todo en la mitad norte de la cuenca. Afloran los tres tramos característicos de la denominada facies “germánica”. El más antiguo de ellos está integrado por los materiales detríticos del Buntsandstein; por encima de esta serie detrítica se disponen los materiales margosos y dolomíticos del Muschelkalk; y por último, los materiales de facies Keuper están integrados por las clásicas arcillas versicolores, con niveles de yesos intercalados, responsables del alto contenido en sales disueltas que presentan las aguas del río Salado [11, 12, 13, 14].

Más allá de la inutilización de las aguas subterráneas aflorantes para abastecimiento urbano, la presencia de esas aguas ha posibilitado la explotación de ese recurso hídrico como fuente de sal desde tiempos ancestrales; así, los núcleos de población inmediatos al fondo del valle han construido “salinas de interior”, como concurre en los municipios de Olmeda de Jadraque e Imón. Además, estos parajes, junto a los rezumes de carácter salino presentes en la zona, han

sido protegidos ambientalmente e incluidos en la lista de microrreservas “Saladares de la cuenca del río Salado” por parte del Gobierno de Castilla-La Mancha.

El roquedo jurásico aflora con claridad en el tramo alto de la cuenca en forma de dolomías tableadas y carnioles, sobre las que descansa un conjunto de más de cien metros de espesor formado por calizas y dolomías, que dan lugar a formaciones acuíferas de relevancia local [11, 12, 13, 14].

Finalmente, los sedimentos cretácicos afloran en la mitad sur de la cuenca, apoyándose discordantemente bien directamente sobre los materiales triásicos, bien sobre los jurásicos, y caracterizándose por presentar una sucesión estratigráfica ampliamente representada en muchos sectores de la Cordillera Ibérica. Está formada en la base por una serie terrígena (formación Utrillas), sobre la que se apoya un tramo margocalcáreo fosilífero, calizas y calizas dolomíticas tableadas y un potente banco dolomítico masivo con gran presencia en el paisaje, conformando estas últimas también un sustrato de interés acuífero [11, 12, 13, 14].

Desde un punto de vista fisiográfico, el territorio abarcado por la cuenca aparece vertebrado por los amplios valles modelados por las aguas del río Salado y de sus afluentes, todos ellos con orientación general N-S (figura 1). El perfil transversal y longitudinal de los ríos de la cuenca es suave en la mayor parte de su trazado, pero cuando horadan roquedos resistentes desarrollan notables gargantas, especialmente cuando atraviesan los macizos carbonatados aflorantes en la cuenca. El encajamiento de la red fluvial ha dado lugar a una serie de “muelas” o “mesas” de techo plano y pendiente lateral elevada, que se encuentran alineadas en una dirección ENE-OSO, definiendo varios altos topográficos (figura 1).

En cuanto a los usos del territorio, buena parte del mismo no es propicio para las actividades agrícolas y ganaderas, tanto por las características del sustrato geológico y edáfico, como por la escasa disponibilidad de agua de buena calidad en determinados sectores de la cuenca. Aun así, la agricultura es la principal actividad económica, ocupando las tierras de labor un 22% de la superficie de la cuenca. En el subapartado 2.2.2 se ofrece más detalle sobre la distribución de los tipos de suelo y los usos del mismo, dado que se trata de información de entrada necesaria para construir el modelo SWAT.

Finalmente, debe destacarse la escasa población del territorio, con apenas 1100 habitantes en la totalidad de la cuenca, 405 de ellos en Atienza -el núcleo más poblado-, según los datos del padrón municipal del INE en 2019. No obstante, el número de habitantes se multiplica en verano, como habitualmente sucede en la España rural.

2.2. Creación del modelo hidrológico con SWAT

Para crear el modelo hidrológico de la cuenca del río Salado con SWAT se ha utilizado el complemento del modelo SWAT para QGIS, QSWAT, en su versión 1.8 [15]. Cabe destacar que, en primera estancia, se ha optado por simular la cuenca en régimen natural, es decir, en un periodo anterior a la construcción del embalse de El Atance. De este modo, el caudal circulante

por la estación de Huérmeces del Cerro refleja el comportamiento de la cuenca aguas arriba de la misma, pudiéndose estudiar así el efecto de la contribución subterránea en el caudal simulado.

2.2.1. Delineación de la red hidrográfica y delimitación de la cuenca

El primer paso en la construcción del modelo es la delineación de la red hidrográfica y la delimitación de la cuenca, para lo que el modelo precisa de un modelo digital de elevaciones (MDE). Se ha utilizado el MDE del Instituto Geográfico Nacional [16], con una resolución de 25 metros. Para delinear la red hidrográfica, se ha seleccionado un umbral de área mínima necesaria para la creación de un curso de agua de 5 km², puesto que da lugar a una red similar a la real (figura 2).

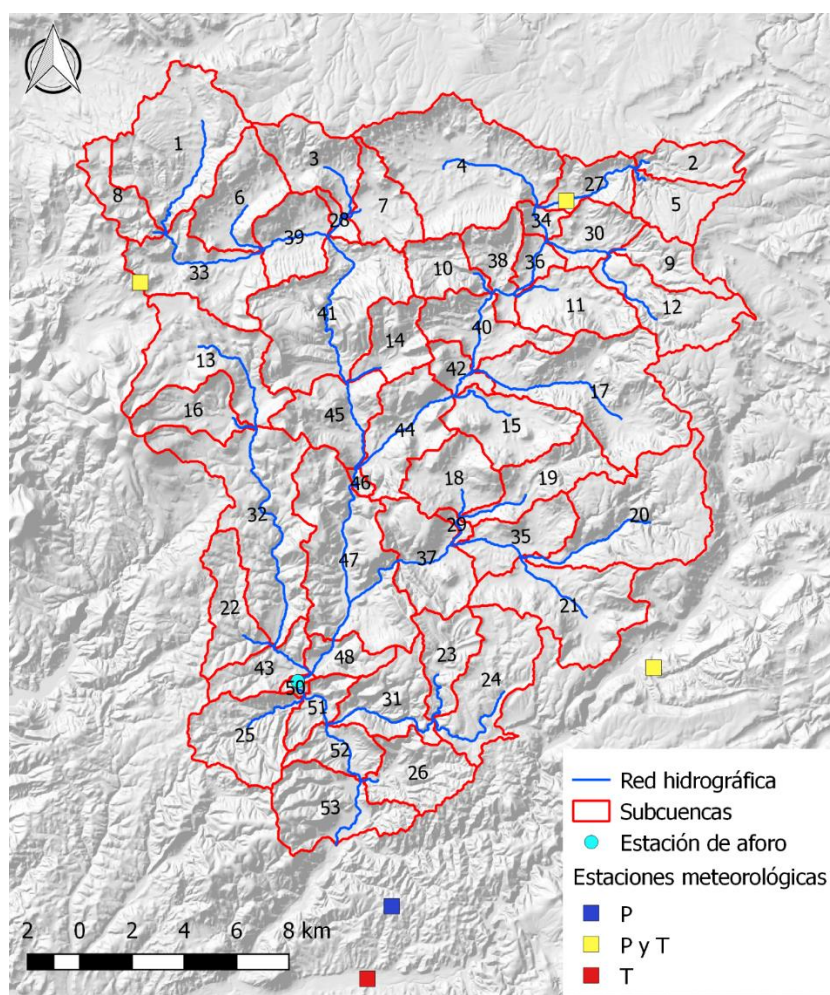


Figura 2. Delineación de la red hidrográfica, delimitación de la cuenca del río Salado y sus sub-cuencas con SWAT y ubicación de la estación de aforo y las estaciones meteorológicas seleccionadas (P: Precipitación, T: Temperatura).

Tras delinear la red hidrográfica, SWAT divide la cuenca en sub-cuencas, formándose una nueva en cada intersección de la red hidrográfica. Además, se ha forzado la creación adicional de sub-cuencas en el punto correspondiente a la estación de aforos de Huérmeces del Cerro - donde se calibrará el modelo (figura 2)- y en los puntos de entrada y salida de la red hidrográfica al Embalse de El Atance, para poder así dar un uso futuro al modelo considerando dicho embalse. Como resultado final, han quedado delineadas tanto la red hidrográfica como la cuenca del río Salado, dividida en 53 sub-cuencas.

2.2.2. Definición de las unidades de respuesta hidrológica.

El siguiente paso en el establecimiento del modelo hidrológico con SWAT es la definición de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs, por sus siglas en inglés). Las HRUs son porciones de territorio en cada sub-cuenca con igual uso de suelo, tipo de suelo y clase de pendiente. El modelo, por tanto, precisa de los mapas de usos y tipos de suelo, además de crear un mapa de pendientes a partir del modelo de elevaciones ya suministrado, las cuales deben dividirse en las clases que se estimen oportuno.

Los usos de suelo en la cuenca se han obtenido del Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE) del Instituto Geográfico Nacional [17]. La cobertura predominante en la cuenca es el bosque, ocupando un 32% de la superficie de la cuenca. Le siguen el uso agrícola (22%), el pastizal (18%), la combinación de pastizal y matorral (10%), la combinación de cultivos con pastizal (9%) y el matorral (6%). Otros usos del suelo son minoritarios (figura 3).

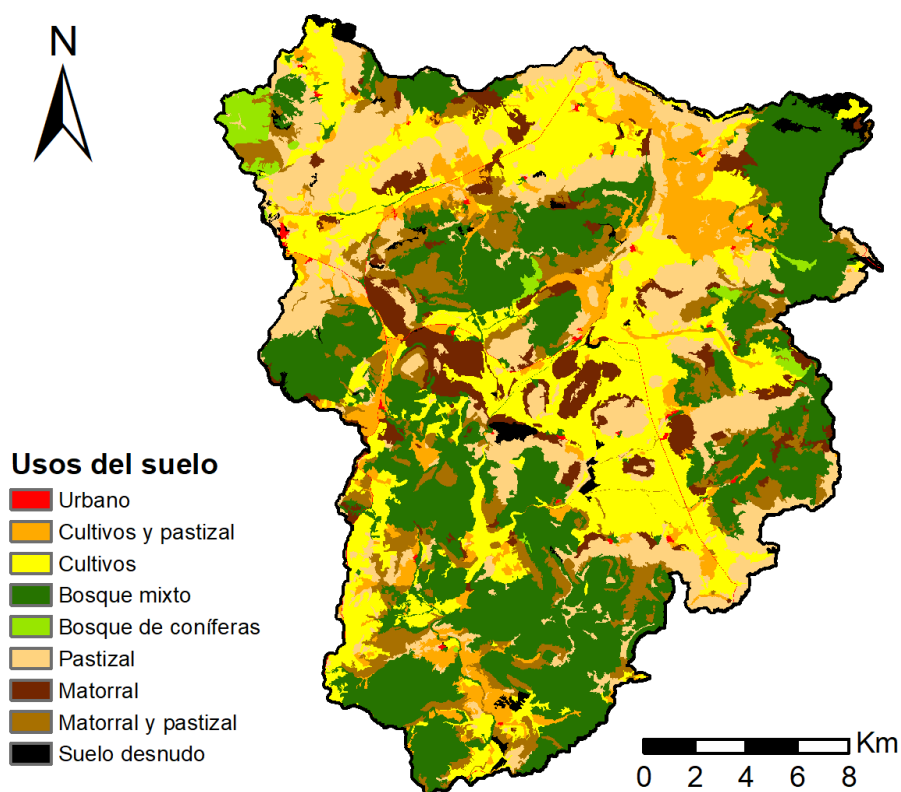


Figura 3. Distribución de los usos del suelo en la cuenca del río Salado.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ESPAÑA RURAL: MODELIZANDO LA AFECCIÓN A LOS RECURSOS HÍDRICOS EN UNA CUENCA DEL CENTRO PENINSULAR

La cartografía de suelos se ha obtenido de la Base de Datos Armonizada de Suelos (Harmonized World Soil Database, en adelante HWSD), elaborada por la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La cobertura tiene una resolución de 1 km y posee una tabla de propiedades del suelo asociada, necesaria para la introducción de la información de los mismos en SWAT. Más información sobre la HWSD puede encontrarse en [18]. Según esta base de datos, la cuenca del río Salado está dominada por cambisoles calcáreos (suelos 9705, 9706 y 9713), ocupando un 88% de la misma, y un 12% está cubierto por regosoles dísticos (9744) (figura 4).

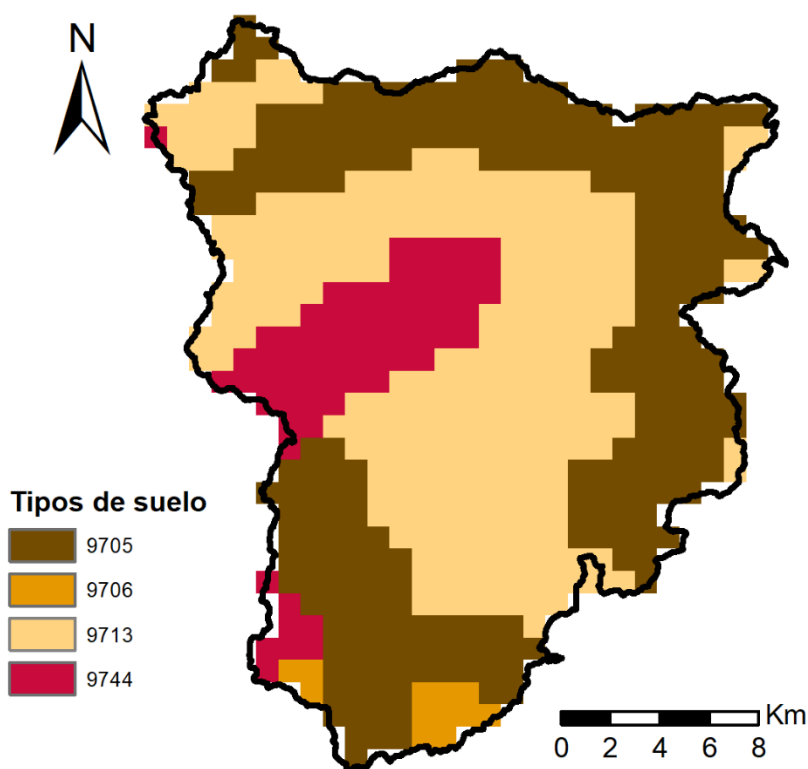


Figura 4. Tipos de suelo de la Harmonized World Soil Database en la cuenca del río Salado (suelos 9705, 9706 y 9713: cambisoles calcáreos; suelo 9744: regosol dístico).

El último elemento en la configuración de las HRUs es la delimitación de clases de pendientes. Siguiendo los criterios de [19], se han delimitado tres clases de pendiente: 0-8%, 8-30% y >30%, ocupando, respectivamente, el 36%, 49% y 15% de la cuenca (figura 5).

Como resultado, se han definido 1157 HRUs en la cuenca del río Salado.

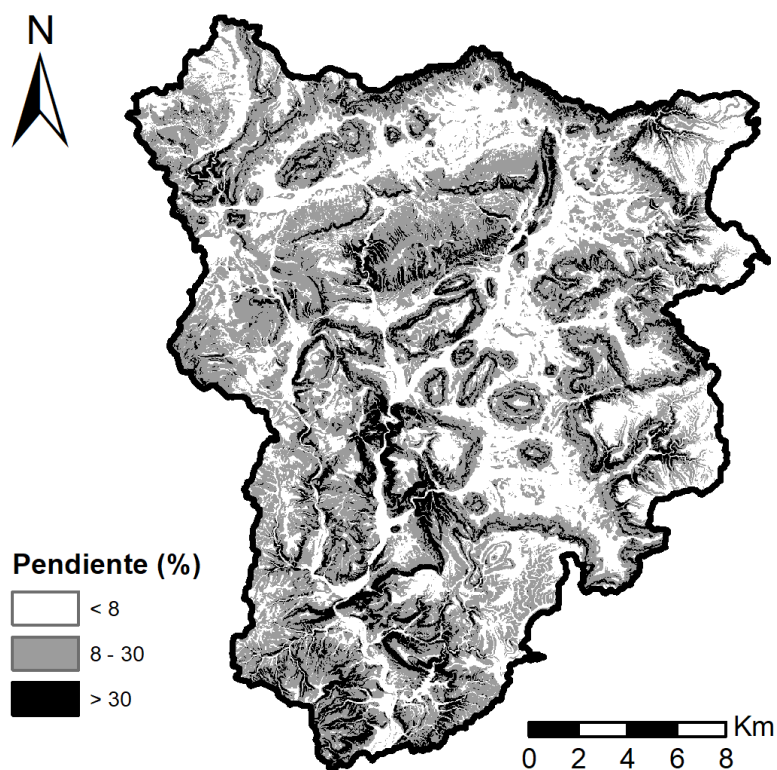


Figura 5. Clases de pendiente en la cuenca del río Salado, derivadas del modelo digital de elevaciones de 25 m.

2.2.3. Información meteorológica.

Paso previo a la incorporación de la información meteorológica en el modelo, se escrutó la disponibilidad de dichos datos en el entorno de la zona, elevando a la AEMET una petición de información en 18 estaciones meteorológicas del entorno. Entre todas ellas, considerando su disponibilidad de datos y la cercanía a la cuenca, se seleccionaron las estaciones detalladas en el cuadro 1, cuya posición se indica en la figura 2.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas seleccionadas para incorporar al modelo SWAT.

Código	Nombre	Variabes diarias
3130	Sigüenza (El Bosque)	Precipitación, temperatura máxima y mínima
3131	Valdelcubo	Precipitación, temperatura máxima y mínima
3140B	Mandayona (El Cerrillar)	Precipitación
3140C	Mandayona	Temperatura máxima y mínima
3142	Atienza	Precipitación, temperatura máxima y mínima

Para todas las estaciones y variables, se tuvo en consideración la serie de datos desde 1961 hasta 2004. Para restituir los datos faltantes en dicho periodo en cada una de las estaciones, se realizaron regresiones lineales entre los valores medios anuales de todas ellas, eligiendo siempre la que ofreciese el mejor coeficiente de correlación.

Una vez introducidos los datos en el modelo, para la estimación de la evapotranspiración potencial se seleccionó el método de Hargreaves [20], pues sólo precisa de las variables disponibles en este caso (precipitación, temperatura máxima y mínima).

2.3. Calibración, validación y evaluación del modelo

Para calibrar y validar el modelo, se hizo una selección de 18 parámetros basados en la experiencia previa del equipo investigador (cuadro 2). El modelo ha sido calibrado a escala diaria durante el periodo 1990-1993, evaluando los caudales simulados frente a los observados en la estación de aforo de Huérmeces del Cerro (figura 2). Previo a la calibración, el modelo se ejecutó sin producir resultados durante cinco años (periodo de calentamiento) para evitar la desviación inicial de los valores por defecto del modelo. Se ha realizado una calibración automática con el algoritmo SUF2 (Sequential Uncertainty Fitting, version 2) del programa SWATCUP [21]. En este caso, se realizaron 3 iteraciones de 500 simulaciones del modelo. Tras cada iteración, los rangos de los parámetros se ajustan de acuerdo a los resultados obtenidos, acotando sus valores máximos y mínimos a los obtenidos en aquellas simulaciones que han ofrecido resultados más óptimos, aunque siempre dentro de unos rangos realistas. Tras la última iteración, se realizó un ajuste manual final de los parámetros para obtener el mejor modelo posible.

Tras calibrar el modelo, se fijaron los valores de los parámetros y se realizó la validación del mismo, esto es, ejecutar el modelo en un periodo de datos independiente y volver a evaluar su desempeño. Para dicha validación se seleccionó el periodo 1994-1996, justo antes de la construcción de la presa de El Atance.

La evaluación del modelo se realizó tanto gráficamente como estadísticamente. La evaluación gráfica consiste en la comparación visual del hidrograma observado frente al simulado. Para evaluar estadísticamente el modelo, siguiendo las directrices de [22] se utilizaron tres métricas: el coeficiente de correlación (R^2), el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el porcentaje de desviación (PBIAS), calculándose a escala diaria y mensual. Es conveniente el uso de estos tres índices estadísticos pues pertenecen a categorías diferentes (regresión, adimensional y error) y alcanzar un buen valor en todos ellos garantiza la robustez del modelo, cubriendo todos los aspectos del hidrograma (patrón temporal, valores extremos y valor medio, respectivamente).

Cuadro 2. Parámetros seleccionados para la calibración del modelo SWAT, rango inicial en la calibración y valor final calibrado. VI: Valor Inicial (en aquellos parámetros que se calibran vía multiplicación al no tener un valor único en la cuenca). Para más información sobre los parámetros, consúltese la documentación de SWAT [23].

Parámetro	Descripción	Rango Inicial	Valor calibrado
SURLAG.bsn	Coeficiente de retardo del caudal superficial	1 - 10	5,58
ALPHA_BF.gw	Coeficiente de regresión del caudal de base para la sección superficial del acuífero (L d ⁻¹)	0 - 1	0,27
ALPHA_BF_D.gw	Coeficiente de regresión del caudal de base para la sección profunda del acuífero (L d ⁻¹)	0 - 1	0,24
ALPHA_BNK.rte	Coeficiente de regresión para el almacenamiento en la ribera (L d ⁻¹)	0 - 1	0,8
CH_K2.rte	Conductividad hidráulica en el aluvial (mm h ⁻¹)	0 - 150	115,8
CN2.mgt	Número de curva inicial	VI·0,7 - VI·1,3	VI·0,93
CH_N2.rte	Coeficiente de Manning para el cauce principal	0 - 0.15	0,06
EPCO.hru	Factor de compensación de absorción por las plantas	0 - 1	0,65
ESCO.hru	Factor de compensación de evaporación en el suelo	0 - 1	0,78
GWQMN.gw	Nivel de agua requerido en el acuífero para producirse flujo de retorno (mm)	0 - 5000	1350
GW_DELAY.gw	Periodo de retardo del agua subterránea (d)	0 - 500	91.0
GW_REVAP.gw	Coeficiente de re-evaporación del agua subterránea	0.002 - 0,2	0.02
OV_N.hru	Coeficiente de Manning para la escorrentía superficial	VI·0,8 - VI·1,2	VI·0,84
REVAPMN.gw	Nivel de agua requerido en el acuífero para la existencia de re-evaporación.	1000 - 2000	1250
SOL_AWC().sol	Capacidad de retención de agua del suelo (mm H ₂ O mm suelo ⁻¹)	VI·0,2 -VI·1,8	VI·1,44
SOL_BD().sol	Densidad aparente del suelo (g cm ⁻³)	VI·0.7 - VI·1,3	VI·1,03
SOL_K().sol	Conductividad hidráulica del suelo (mm h ⁻¹)	VI·0,2 - VI·3	VI·0,27
RCHRG_DP.gw	Fracción de agua que alcanza la sección profunda del acuífero	0 - 1	0,26

2.4. Diseño de escenarios de cambio climático

Una vez establecido el modelo hidrológico en la cuenca del río Salado con SWAT, se han simulado una serie de escenarios de cambio climático para evaluar el impacto del mismo en la disponibilidad de agua futura (cuadro 3).

Cuadro 3. Variaciones medias de la precipitación (%) y temperatura (°C) en Guadalajara para los periodos indicados, de acuerdo a los escenarios dinámicos regionalizados por la AEMET según el proyecto CORDEX, con respecto al periodo de referencia 1961-1990.

Estación*	Precipitación	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima
RCP 4.5 (2046-2065)			
Invierno	4,9	1,5	1,3
Primavera	-10,5	1,6	1,3
Verano	-17,9	2,9	2,5
Otoño	-10,6	2,3	1,9
RCP 8.5 (2046-2065)			
Invierno	0,7	2,3	1,8
Primavera	-17,3	2,4	1,8
Verano	-14,3	3,7	3,2
Otoño	-16,9	3,5	2,9
RCP 4.5 (2081-2100)**			
Invierno	5,2	2,1	1,7
Primavera	-15,4	2,2	1,7
Verano	-13,7	3,5	3,0
Otoño	-12,0	3,2	2,7
RCP 8.5 (2081-2100)**			
Invierno	1,9	4,1	3,3
Primavera	-21,3	4,3	3,3
Verano	-42,2	7,1	6,2
Otoño	-21,8	6,1	5,3

*Invierno: diciembre, enero y febrero; primavera: marzo, abril y mayo; verano: junio, julio y agosto; otoño: septiembre, octubre y noviembre.

**Medias de 10 modelos, excepto para el año 2100 (sólo 7 modelos disponibles)

Se han consultado, por tanto, las proyecciones que la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) realiza en base a los últimos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero elaborados por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático [24]. Concretamente y para este trabajo, se han seleccionado las proyecciones para la provincia de Guadalajara de los modelos dinámicos regionalizados por la AEMET según el proyecto CORDEX, correspondientes a dos escenarios de emisión, bajas emisiones (RCP 4.5) y altas emisiones (RCP 8.5). Puede consultarse información adicional sobre estos modelos en [25].

Basada en la información numérica de las proyecciones estacionales de la AEMET para los citados escenarios [26], se han calculado las variaciones estacionales medias de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima proyectadas por 10 modelos en la provincia de Guadalajara, con respecto al periodo de referencia (1961-1990). Esta operación se ha realizado para ambos escenarios de emisión y para dos horizontes temporales: 2046-2065 y 2081-2000, obteniendo cuatro escenarios futuros. Los resultados se muestran en el cuadro 3.

2.5. Simulación de los resultados en SWAT

Una vez calibrado el modelo SWAT y completadas las series meteorológicas para cubrir el periodo de referencia indicado por la AEMET (1961-1990), se realizó la simulación completa para dicho periodo.

Posteriormente, se utilizó el módulo “Weather Adjustments” (ajuste de condiciones climáticas) de QSWAT [15] para variar las condiciones climáticas del modelo de acuerdo a lo obtenido en el cuadro 3. Si bien el modelo requiere de temperatura máxima y mínima diaria para su funcionamiento, el módulo de ajuste climático sólo permite el ajuste de la temperatura media, por lo que se obtuvo el promedio de ambas medidas.

Una vez incorporados los ajustes para cada uno de los escenarios, se ejecutó nuevamente el modelo SWAT para evaluar los posibles cambios en los componentes del balance hidrológico en la cuenca del río Salado.

3. RESULTADOS

3.1. Calibración, validación y evaluación del modelo.

Los valores finales obtenidos por cada parámetro tras la calibración pueden observarse en el cuadro 2. La figura 6 muestra el hidrograma de caudales observados y simulados.

La simulación de los componentes del balance hidrológico en la cuenca a escala anual para todo el periodo de evaluación (1990-1996) arroja unos valores medios de precipitación, evapotranspiración y escorrentía de 519 mm, 450 mm y 40 mm, respectivamente. Esto supone una pérdida de agua en la cuenca por evapotranspiración en torno al 87% y un coeficiente de escorrentía de aproximadamente el 8% para el periodo simulado.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ESPAÑA RURAL: MODELIZANDO LA AFECCIÓN A LOS RECURSOS HÍDRICOS EN UNA CUENCA DEL CENTRO PENINSULAR

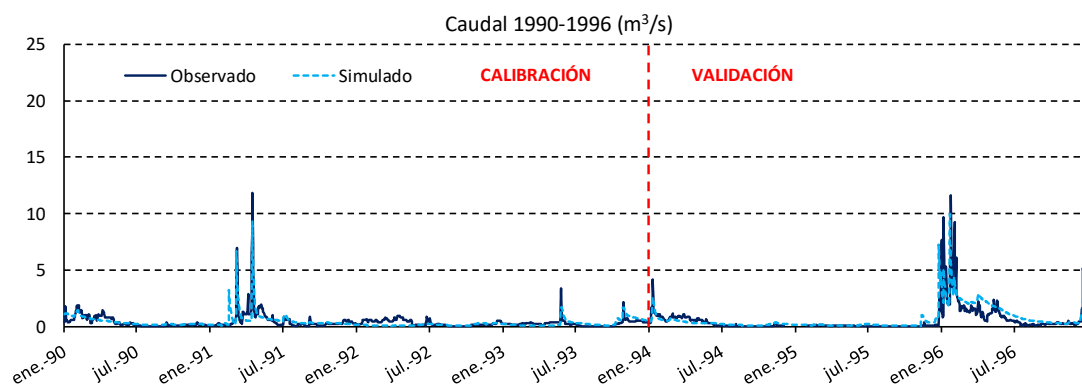


Figura 6. Caudales observados en la estación de aforo de Huérmeces del Cerro en el río Salado y caudales simulados por SWAT en el mismo punto durante los periodos de calibración y validación.

En cuanto a la validación estadística del modelo, el cuadro 4 muestra los valores de los índices estadísticos empleados.

Cuadro 4. Evaluación estadística del modelo SWAT en la cuenca del Salado.

Métrica	Calibración		Validación	
	Diaria	Mensual	Diaria	Mensual
R²	0,63	0,69	0,45	0,64
NSE	0,62	0,69	0,44	0,64
PBIAS	1,8	1,8	-8,0	-7,5

3.2. Impacto de los escenarios de cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del río Salado.

Los cuadros 5 y 6 muestran los resultados obtenidos para los principales componentes del balance hidrológico en la cuenca del río Salado en cada uno de los escenarios simulados, en valor absoluto y variación porcentual, respectivamente.

Estos resultados reflejan una disminución general de todos los componentes del balance hidrológico en la cuenca del río Salado (cuadros 5 y 6), siempre mayor en el escenario de altas emisiones (RCP 8.5) y también más acusada en el segundo horizonte temporal (2081-2100).

Cuadro 5. Componentes del balance hidrológico (en mm) para el escenario base y los distintos escenarios de cambio climático.

	Base (1961-90)	RCP 4.5 (2046-65)	RCP 8.5 (2046-65)	RCP 4.5 (2081-00)	RCP 8.5 (2081-00)
Precipitación	543	502	479	497	442
Evapotranspiración	476	451	440	449	410
ET (como % de P)	88%	90%	92%	90%	93%
Escorrentía total	49	36	27	33	21
Escorrentía directa	24	20	17	19	15
Escorrentía subterránea	26	16	10	14	7
Recarga del acuífero	48	36	27	33	22

Cuadro 6. Variación porcentual de los componentes del balance hidrológico y del caudal con respecto al escenario base (1961-1990).

	RCP 4.5 (2046-65)	RCP 8.5 (2046-65)	RCP 4.5 (2081-00)	RCP 8.5 (2081-00)
Precipitación	-7,5	-11,7	-8,5	-18,6
Evapotranspiración	-5,3	-7,6	-5,7	-13,9
Escorrentía total	-28,1	-46,0	-33,9	-56,6
Escorrentía directa	-16,4	-29,0	-20,4	-38,0
Escorrentía subterránea	-38,8	-61,6	-46,3	-73,8
Recarga del acuífero	-25,1	-44,1	-30,6	-54,9

4. DISCUSIÓN

4.1. Calibración, validación y evaluación del modelo.

El hidrograma de caudales observados y simulados (figura 6) muestra que, de modo general, el modelo SWAT reproduce satisfactoriamente tanto el patrón temporal como la magnitud de los caudales. No obstante, se puede observar alguna imprecisión en los picos de crecida y en algunas curvas de recesión. Incluso el modelo simula una crecida en 1991 inexistente en el hidrograma observado, pudiendo deberse a precipitación registrada en alguna de las estaciones que quedan en el exterior de la cuenca (Mandayona y/o Sigüenza).

La simulación de los componentes principales del balance hidrológico también resulta acorde a lo esperado en la zona, pues es coherente con los valores de escorrentía y precipitación registrados en la estación de aforo de Huérmeces y en las estaciones pluviométricas de la

AEMET. Los valores simulados son también razonablemente similares a los descritos por Martín-Loeches y colaboradores [27] para el conjunto de la cuenca del Henares, aunque la cuenca del Salado muestra una mayor pérdida de agua por evapotranspiración y un menor porcentaje de escorrentía. Esto se justifica toda vez que en la cuenca del Salado la precipitación es menor y la evapotranspiración potencial es mayor que en el resto de subcuencas de la cabecera del río Henares [28].

Como suele ser habitual en este tipo de modelos, el desempeño estadístico a escala mensual supera al diario (cuadro 4). Moriasi y colaboradores [22] califican el desempeño en “no satisfactorio”, “satisfactorio”, “bueno” y “muy bueno” dependiendo de los valores obtenidos en estos parámetros. A escala diaria, R^2 resulta satisfactorio (0,60 – 0,75) en el periodo de calibración, al igual que NSE (0,50 – 0,70), mientras que PBIAS es muy bueno durante la calibración ($<\pm 5$) y bueno en la validación ($\pm 5 - \pm 10$). Sin embargo, a escala mensual y según los mismos autores, el modelo resulta satisfactorio para R^2 y NSE, y bueno o muy bueno para PBIAS en ambos periodos.

Considerando que el objetivo de este trabajo es evaluar globalmente los recursos hídricos a escala de cuenca, la bondad de ajuste del modelo resulta suficientemente satisfactoria para evaluar la variación de los mismos en escenarios futuros en el próximo apartado.

4.2. Impacto de los escenarios de cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del río Salado.

Los resultados obtenidos en la simulación de escenarios de cambio climático (cuadros 5 y 6) revelan una afección importante de éste a los recursos hídricos de la cuenca del río Salado. Una reducción de la precipitación entre el 7,5% y el 18,6% podría suponer una disminución en el caudal circulante a la salida de la cuenca de entre el 28,1% y el 56,6% (cuadro 5). La mayor disminución porcentual del caudal frente a la precipitación se explica por los cambios esperados en la evapotranspiración: a pesar de que su valor total disminuye, el porcentaje de precipitación que retorna a la atmósfera por evapotranspiración aumenta (cuadro 6), quedando menos agua disponible para pasar a formar parte del caudal [29].

La afección a los recursos hídricos es visiblemente más acusada en el escenario de altas emisiones (RCP 8.5) que en el de bajas emisiones (RCP 4.5), como cabría esperar. Además, la variación en los componentes del balance hidrológico entre el horizonte temporal más cercano (2046-65) y el más lejano (2081-00) es pequeña en un futuro de bajas emisiones, mientras que en el escenario de altas emisiones el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos de la cuenca se prevé mucho más severo (cuadros 5 y 6). Estos resultados están en línea con los obtenidos en otros estudios para diferentes cuencas del centro peninsular [5, 30].

Cabe destacar que los diferentes componentes de la escorrentía no se verán afectados por igual en un futuro de cambio climático. Se prevé una disminución mucho más acusada de la escorrentía subterránea: en el más pesimista de los escenarios, para finales de siglo, se prevé una disminución de la escorrentía subterránea de un 73,8%, frente a una reducción del 38,0%

en la escorrentía superficial (cuadro 6). Esto resulta especialmente relevante tomando en consideración que el caudal subterráneo es el principal aporte de agua a los ríos durante los meses de verano, cuando precisamente crece la demanda.

Del mismo modo, el modelo predice una disminución en la recarga de los acuíferos que varía entre un 25,1% en el escenario menos desfavorable (bajas emisiones, 2046-2065) y un 54,9% en el escenario más desfavorable (altas emisiones, 2081-2100) (cuadro 6). Dado que la práctica totalidad de municipios de la cuenca del río Salado se abastece de agua subterránea, estos resultados permiten prever que el abastecimiento de agua en la cuenca se podría ver seriamente amenazado en un futuro de inexorable cambio climático, especialmente durante los meses de verano, cuando la población rural se multiplica. De hecho, en diversas campañas de muestreo y actividades docentes realizadas en la zona por este grupo de investigación, ya se han podido constatar tales efectos, pues no pocos vecinos han reportado acusadas reducciones en los caudales de aquellos manantiales de los que se suelen abastecer, teniendo que buscar nuevas fuentes de agua en algunos casos. Las administraciones públicas responsables del abastecimiento de agua deberán, por tanto, emplear los esfuerzos necesarios para sobreponerse a la disminución de recursos hídricos esperada.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra la creación de un modelo hidrológico para la cuenca del río Salado con la herramienta SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Posteriormente, se ha realizado una calibración automática supervisada en régimen natural para el periodo 1990-1993, validándose en un periodo de tiempo posterior e independiente (1994-1996).

El modelo reproduce satisfactoriamente el patrón temporal y la magnitud de los caudales del río Salado, así como los componentes principales del balance hidrológico en la cuenca. A nivel estadístico, el ajuste del modelo a escala mensual es siempre satisfactorio o superior, lo que garantiza una robustez suficiente para simular escenarios futuros.

Se han descargado las proyecciones climáticas estacionales de la AEMET según el proyecto CORDEX para la provincia de Guadalajara, contemplando cuatro escenarios de cambio climático: bajas emisiones (RCP 4.5) y altas emisiones (RCP 8.5) para los periodos 2046-2065 y 2081-2100. Se han incorporado estas proyecciones en el modelo SWAT para simular los impactos del cambio climático en la hidrología.

Una reducción de la precipitación entre el 7,5% y el 18,6% podría suponer una disminución en el caudal circulante a la salida de la cuenca de entre el 28,1% y el 56,6%, siendo la afección a los recursos hídricos visiblemente más acusada en el escenario de altas emisiones. El componente del caudal más afectado será la escorrentía subterránea, lo cual resulta especialmente relevante pues constituye el principal aporte de agua a los ríos durante los meses de verano, cuando crece la demanda. De igual modo, se prevé una disminución de la recarga de los acuíferos de hasta un 54,9% lo que podría amenazar seriamente el abastecimiento de agua en la cuenca.

BIBLIOGRAFIA

- [1] European Parliament and Council. 2000. Directive 2000/60/EC of 23 October 2000 establishing a framework for the Community action in the field of water policy. 327, Official Journal of the European Union.
- [2] AQUASTAT. 2015. AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture. Disponible en: <http://www.fao.org/aquastat/en/geospatial-information/maps>.
- [3] Kristensen, P. 2012. European Waters: Assessment of Status and Pressures. European Environmental Agency, Copenhagen.
- [4] Confederación Hidrográfica del Tajo. 2020. Esquema Provisional De Temas Importantes de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid. 279 pp.
- [5] Lobanova, A., Liersch, S., Tàbara, J.D., Koch, H., Hattermann, F.F., Krisianova, V. 2017. Harmonizing human-hydrological system under climate change: A scenario-based approach for the case of the headwaters of the Tagus River. *Journal of Hydrology* 548, 436-447.
- [6] Pellicer-Martínez, F., Martínez-Paz, J.M. 2018. Climate change effects on the hydrology of the headwaters of the Tagus River: implications for the management of the Tagus–Segura transfer. *Hydrological and Earth System Sciences* 22, 6473-6491.
- [7] Molina-Navarro, E., Trolle, D., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A., Jeppesen, E. 2014. Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. *Journal of Hydrology* 509, 354-366.
- [8] Francesconi, W., Srinivasan, R., Pérez-Miñana, E., Willcock, S.P., Quintero, M. 2016. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review. *Journal of Hydrology* 535, 625-636.
- [9] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34, 73-89.
- [10] Molina-Navarro, E., Andersen, H.E., Nielsen, A., Thodsen, H., Trolle, D. 2018. Quantifying the combined effects of land use and climate changes on stream flow and nutrient loads: A modelling approach in the Odense Fjord catchment (Denmark). *Science of the Total Environment* 621, 253-264.
- [11] IGME. 1981. Mapa Geológico de España E. 1:50.000 "Sigüenza" (461). Madrid. Servicio de Publicaciones.
- [12] IGME. 1982a. Mapa Geológico de España E. 1:50.000 "Atienza" (433). Madrid. Servicio de Publicaciones.

- [13] IGME. 1982b. Mapa Geológico de España E. 1:50.000 "Barahona" (434). Madrid. Servicio de Publicaciones.
- [14] Sastre Merlín, A., Moya, M.E., Acaso, E., Centeno, J.D. y Barea, J. 2003. Paisajes Geológicos de Guadalajara. En: Nucho del Rivero, R. (ed.): Patrimonio Geológico de Castilla-La Mancha, 258-333. ENRESA, Madrid.
- [15] Dile, Y., Srinivasan, R., George, C. 2019. QGIS Interface for SWAT (QSWAT). Disponible en: https://swat.tamu.edu/media/116301/qswat-manual_v18.pdf.
- [16] Ministerio de Fomento. 2018. Modelos Digitales de Elevaciones. Modelo Digital de Terreno – MDT25. Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=LIDAR>.
- [17] Ministerio de Fomento. 2018. Documento Técnico SIOSE 2014. Versión 1. Equipo Técnico Nacional SIOSE. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid. 16 pp.
- [18] Nachtergaele, F., van Velthuisen, H., Verelst, L., Wiberg, D. 2012. Harmonized World Soil Database. Version 1.2. FAO, Roma, Italia. 50 pp.
- [19] FAO, 1980. Land evaluation for development. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/U1980E/u1980e00.htm>
- [20] Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture 1, 96-99.
- [21] Abbaspour, K.C. 2015. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Eawag, Dübendorf, Suiza. 100 pp.
- [22] Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., Daggupati, P. 2015. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. Transactions of the ASABE 58(6), 1763-1785.
- [23] Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., Neitsch, S.L. 2014. Soil & Water Assessment Tool. Input/Output Documentation. Version 2012. TR-439. Texas Water Resources Institute, College Station, EE.UU. 650 pp.
- [24] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2016. Cambio Climático: Informe de síntesis. Guía Resumida del Quinto Informe de Evaluación del IPCC. Madrid. 49 pp.
- [25] Amblar Francés, P., Casado Calle, M.J., Pastor Saavedra, A., Ramos Calzado, P. y Rodríguez Camino, E. 2017. Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5. Agencia Estatal de Meteorología, Madrid. 96 pp.
- [26] Agencia Estatal de Meteorología. 2019. Proyecciones climáticas para el siglo XXI. Gráficos. Disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/result_graficos.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ESPAÑA RURAL: MODELIZANDO LA AFECCIÓN A LOS RECURSOS HÍDRICOS EN UNA CUENCA DEL CENTRO PENINSULAR

- [27] Martín-Loeches, M., Acaso, E., Moya, M.E. y Rebollo, L.F. 2005. Geología, Geomorfología e Hidrogeología. En: Camargo, J.A. Ecología y Conservación del Río Henares y sus Tributarios, 1-22. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.
- [28] Pérez Chavero, F.M. 2020. Modelización hidrológica de la cuenca del río Henares con QSWAT. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Alcalá. 30 pp.
- [29] Ficklin, D., Stewart, I., Maurer, E., 2013. Effects of projected climate change on the hydrology in the Mono Lake Basin, California. *Climatic Change* 116, 111–131.
- [30] Molina-Navarro, E., Hallack Alegría, M., Martínez-Pérez, S., Ramírez-Hernández, J., Mungaray-Moctezuma, A., Sastre-Merlín, A. 2016. Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. *Agricultural Water Management* 175, 29-42.