

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA CONTRIBUCIÓN DE LA COMPONENTE HIPODÉRMICA DE LA ESCORRENTÍA EN EXPERIENCIAS DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA EN CUENCAS MEDITERRÁNEAS

E. Molina-Navarro, A. Sastre-Merlín, A. Sánchez Gómez y S. Martínez-Pérez

Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá. 28871, Alcalá de Henares (Madrid)
 david.zalacain@uah.es, antonio.sastre@uah.es, silvia.martinez@uah.es, raquelalvz@gmail.com

RESUMEN. El cambio climático se configura como una de las principales amenazas para la gestión sostenible de los recursos hídricos en un futuro próximo. En los últimos años, los modelos de simulación hidrológica se han convertido en una herramienta esencial para simular los posibles impactos de este fenómeno sobre la disponibilidad de recursos hídricos, siendo numerosos los estudios que evalúan la disponibilidad de agua futura.

La mayoría de estos estudios se centran, sin embargo, en el análisis los componentes globales del balance hidrológico (precipitación, evapotranspiración, escorrentía total), en el régimen de caudales o en la afección a la recarga de los acuíferos, siendo pocos los que analizan la influencia del cambio climático en los diferentes componentes de la escorrentía y, particularmente, en la escorrentía hipodérmica. Por otro lado, las características de la zona no saturada condicionan la magnitud y distribución espacio-temporal de la escorrentía hipodérmica.

En este trabajo se han recopilado los resultados de experiencias de simulación de escenarios de cambio climático realizadas con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) en tres cuencas de clima mediterráneo (las cuencas de los ríos Ompólveda y Salado, en la provincia de Guadalajara –España– y la cuenca del arroyo de Guadalupe –Baja California, México–) para evaluar el impacto de este fenómeno sobre la componente hipodérmica de la escorrentía.

En las cuencas españolas, donde en el escenario base la escorrentía hipodérmica representa en torno a un 30% de la total, las simulaciones predicen que su contribución disminuirá ligeramente en términos absolutos incluso en el escenario más pesimista (1.4 y 3.9 mm en las cuencas de los ríos Ompólveda y Salado, respectivamente). Sin embargo, debido a la notable disminución de la escorrentía subterránea, la hipodérmica pasará a ser la componente mayoritaria, llegando a suponer hasta un 62% de la escorrentía total a finales del presente siglo.

En la cuenca del arroyo Guadalupe, más árida y con una menor contribución de la escorrentía subterránea, la escorrentía hipodérmica ya representa en el escenario base un 52% de la total. En este caso, la disminución en términos absolutos en un futuro de cambio climático sería mucho más notable, de hasta 26 mm (un 49% menos que en el escenario base), reflejando cómo en aquellos lugares donde la componente subterránea ya es minoritaria, la escorrentía hipodérmica sufre un descenso notablemente más acusado.

ABSTRACT. Climate change is one of the main threats to the sustainable management of water resources in the near future. In recent years, hydrological simulation models have become an essential tool for simulating the possible impacts of this phenomenon on the availability of water resources, with numerous studies assessing future water availability.

Most of these studies focus, however, on the analysis of the global components of the hydrological balance (precipitation, evapotranspiration, total runoff), on the flow regime or on the effect on aquifer recharge, with few studies analysing the influence of climate change on the different streamflow components and, in particular, on subsurface lateral flow. Likewise, the characteristics of the unsaturated zone condition the magnitude and spatio-temporal distribution of this streamflow component.

In this work we have compiled the results of climate change simulation scenarios carried out with the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model in three Mediterranean climate basins (the Ompólveda and Salado river basins in the province of Guadalajara, Spain, and the Guadalupe stream basin in Baja California, Mexico), to assess the impact of this phenomenon on the subsurface lateral component of streamflow.

In the Spanish catchments, where in the baseline scenario the subsurface lateral flow represents about 30% of total streamflow, the simulations predict that its contribution will slightly decrease in absolute terms even in the most pessimistic scenario (1.4 and 3.9 mm in the catchments of the Ompólveda and Salado rivers, respectively). However, due to the significant decrease in groundwater flow, subsurface lateral flow would become the major component, accounting for up to 62% of total streamflow by the end of the present century.

In the Guadalupe stream basin, which is more arid and with a lower contribution from groundwater flow, subsurface lateral flow already represents 52% of the total in the base scenario. In this case, the decrease in absolute terms in a future climate change scenario would be much more noticeable, up to 26 mm (49% less than in the baseline scenario), reflecting how in those places where the groundwater component is already minor, subsurface lateral flow suffers a significantly more pronounced decrease.

1.- Introducción

Uno de los principales retos medioambientales a los que se enfrenta la sociedad es la capacidad de gestionar adecuadamente los recursos hídricos, asegurando la disponibilidad de agua para los diferentes usos antrópicos y para los requerimientos medioambientales. El aumento global de la población y de la actividad económica e industrial ha incrementado la demanda de agua (Eliasson, 2015), que en ocasiones supera la oferta en algunas regiones, generando estrés hídrico. En la actualidad, este problema afecta a dos tercios de la población mundial al menos una vez al año (Mekonnen et al., 2016), lo que resulta especialmente preocupante si se tiene en cuenta que el agua es un recurso necesario para los seres vivos. Las administraciones han tratado de mitigar esta situación. Un ejemplo es la Directiva Marco del Agua europea (European Parliament and Council, 2000), promulgada en 2000 y transpuesta al ordenamiento jurídico español en 2003 con el objetivo de garantizar el buen estado ecológico de las masas de agua continentales. Sin embargo, ninguno de los países miembros ha conseguido cumplir los objetivos fijados para 2015 en todas sus masas de agua, lo que indica que estos objetivos eran demasiado ambiciosos a corto plazo (Jager et al., 2016).

El cambio climático supone un reto adicional a esta situación, ya que se prevé que tenga un impacto en la disponibilidad de los recursos hídricos de una dimensión difícil de estimar ya que las graves consecuencias de este fenómeno apenas están empezando a manifestarse. Una revisión bibliográfica, llevada a cabo por el Instituto de Potsdam para la Investigación del Impacto Climático, en la que se comparan los resultados de diferentes estudios sobre la influencia del cambio climático en la escasez de agua a nivel mundial utilizando 11 modelos hidrológicos diferentes y 5 modelos climáticos, concluyó que, en términos generales, el problema de la escasez de agua se agravaría, siendo el cambio climático la causa principal y, en menor medida, el crecimiento de la población humana (Parish et al, 2012).

Se espera que los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos sean más graves en determinadas regiones, especialmente en aquellas con un clima ya árido, como las regiones mediterráneas. El quinto informe del IPCC (Schewe et al, 2014) prevé 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. Se espera, por tanto, que regiones como la Península Ibérica vean afectado de forma significativa su régimen climático y, en consecuencia, su régimen hidrológico, con proyecciones que indican que, a finales de siglo a) la disponibilidad de recursos hídricos se reducirá entre un

10 y un 50%, con una importante disminución de la infiltración de agua y, en consecuencia, de la recarga de los acuíferos y de la escorrentía hipodérmica, b) la calidad del agua se verá afectada principalmente por un aumento de la temperatura del agua, y c) los riesgos relacionados con el agua se modificarán, aumentando la frecuencia de sequías e inundaciones (IPCC, 2014).

A pesar de este impacto potencial en las cuencas hidrográficas, los efectos del cambio climático no se consideraron adecuadamente en la primera versión de los planes de cuenca europeos (2009-2015) de los Estados miembros. Por ello, la UE ha instado a hacerlo en el actual ciclo de planificación (2016-2021) y en los siguientes, algo que, en el caso de España, ya se está aplicando, situándose el cambio climático como primer problema (Kovats et al., 2014).

La aplicación de la modelización hidrológica para la gestión de los recursos hídricos es cada vez más común debido a la capacidad de estas herramientas para simular diferentes escenarios y evaluar desde un enfoque holístico cómo afectan a los recursos hídricos MITECO, 2021). Ello tiene un gran potencial en el contexto actual del cambio global, ya que permite la adopción de medidas prediciendo de antemano sus posibles efectos. Numerosos estudios han utilizado estas herramientas para evaluar la amenaza del cambio climático sobre los recursos hídricos y, en países como España, se han utilizado como herramientas de gestión desde finales del siglo pasado (Fu et al, 2019). A pesar de las numerosas aplicaciones de la modelización hidrológica para evaluar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos, la mayoría se centran en la variabilidad de los componentes del balance hidrológico, como el caudal total o la recarga, sin evaluar cómo se verán afectados los distintos componentes del caudal (Monreal et al, 1996). Este análisis es especialmente importante en las regiones en las que las aguas subterráneas son el principal recurso hídrico, como es el caso de algunas regiones mediterráneas durante la temporada de verano.

En este trabajo se han recopilado los resultados de tres estudios previos en los que se ha utilizado la modelización hidrológica para evaluar el impacto del cambio climático en las cuencas mediterráneas, estimándose la variación de los diferentes componentes del caudal a medio y largo plazo en un escenario de bajas emisiones y otro de altas emisiones, para estudiar el impacto del cambio climático sobre la escorrentía hipodérmica. Los tres estudios fueron realizados en dos subcuencas de la cuenca hidrográfica del Tajo: la del río Ompólveda y la del río Salado; y en la cuenca del río Guadalupe (Baja California, México).

Los modelos hidrológicos a escala de cuenca permiten estimar tanto el balance hidrológico de éstas como sus componentes. Entre estos modelos, el Soil and Water Assessment Tool (SWAT), el modelo empleado en los

tres estudios, es el más utilizado (MITECO, 2021), debido a su eficiencia computacional y acceso abierto. SWAT es un modelo de base física, semidistribuido y continuo que simula el volumen y la calidad del agua a escala de cuenca hidrográfica y puede utilizarse para predecir los impactos ecohidrológicos producidos por los cambios del uso del suelo, las prácticas agrícolas o el clima (Praskievicz et al., 2009). SWAT desagrega las cuencas hidrográficas en dos niveles: en subcuencas, creando una nueva subcuenca cuando dos tramos se fusionan, y en unidades de respuesta hidrológica (HRU), porciones de cada subcuenca con pendiente, tipo de suelo y uso del suelo similares y, en consecuencia, con un comportamiento hidrológico común.

El objetivo de este trabajo es, por tanto, evaluar, mediante la recopilación de los resultados de tres trabajos anteriores publicados, cómo afectará el cambio climático a la distribución de las componentes de la escorrentía en las tres cuencas mediterráneas y, especialmente, cómo afectará a la escorrentía hipodérmica.

2.- Material y métodos

Para la elaboración de este trabajo se han utilizado cuatro publicaciones anteriores. Más información de cada publicación se puede encontrar en (Arnold et al, 1998; Molina-Navarro et al.; 2014a) para la cuenca del río Ompólveda (Molina-Navarro et al.; 2014b) para la cuenca del río Salado y Molina-Navarro et al.; 2021) para la cuenca del río Guadalupe.

2.1. Áreas de estudio

Cuenca del río Ompólveda

La cuenca del río Ompólveda (Fig. 1) tiene una superficie de 87,8 km². Está situada en el sur de la provincia de Guadalajara, en la cabecera de la cuenca del Tajo. El clima es mediterráneo continental, con una temperatura media anual de 12,5°C y una precipitación media anual de 600 mm, aunque presenta una alta variabilidad intra e interanual (Molina-Navarro et al.; 2016, Molina-Navarro et al.; 2010).

La descarga media anual en la estación de aforo de Pareja (AEMET, 2021) se sitúa en torno al 10% de las precipitaciones de la cuenca. En cuanto a los componentes de la escorrentía circulante por el río, se ha estimado que un 70% del caudal medio es escorrentía subterránea (Molina-Navarro et al.; 2016), poniendo de manifiesto la importancia del acuífero calcáreo en la escorrentía. En el 30% restante, se espera una alta contribución de la escorrentía hipodérmica (o flujo lateral), ya que más del 70% del área de la cuenca tiene pendientes superiores al 8%, aumentando aquélla con la pendiente (MITECO, 2019).

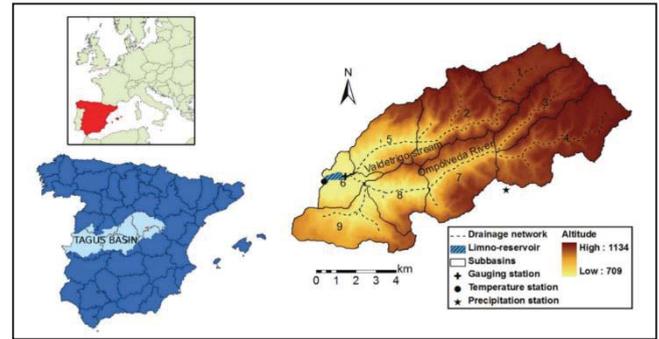


Fig. 1. Localización de la cuenca del río Ompólveda y Modelo Digital de Elevaciones.

La altitud de la cuenca oscila entre 709 y 1134 m.s.n.m. La cuenca alta está dominada por una meseta caliza del Mioceno medio que es permeable y actúa como un importante acuífero libre. La litología sedimentaria más antigua (Cretácico Superior) aflora en las laderas del río Ompólveda y sus afluentes, y está compuesta principalmente por arcillas, con intercalaciones de margas, limo, arena, caliza y yeso. Los sedimentos cuaternarios se localizan exclusivamente en los fondos de los valles de los arroyos principales.

La cuenca se ubica en su totalidad en el medio rural y la vegetación natural es la principal cobertura del terreno. Así, el 37% de la cuenca está cubierta por bosques (pinos y encinas) y el 36% por matorrales, ocasionalmente combinados con pastos. El 25% de la cuenca está cultivada, principalmente con cereales de secano (17%) y olivares (7%, muchos de ellos abandonados). El uso urbano es minoritario, con unos 300 habitantes en la cuenca.

Cuenca del río Salado

La cuenca del río Salado se localiza en el norte de la provincia de Guadalajara, en la cabecera de la cuenca del río Tajo (Fig. 2). Tiene una superficie de 485 km², con altitudes que oscilan entre los 838 y los 1404 m.s.n.m. Presenta un clima típico mediterráneo-continental. Los valores medios anuales de temperatura y precipitación son de 11,6°C y 526 mm, respectivamente (Molina-Navarro et al.; 2010), y las precipitaciones más intensas se producen a finales de otoño y principios de invierno.

La escorrentía superficial está regulada por el embalse de El Atance (Fig. 3), construido en 1997 y con una capacidad máxima de 37 hm³. La cuenca está dotada de una estación de aforo, operativa desde 1972, lo que permite calibrar el modelo SWAT con los caudales observados. El caudal medio anual registrado en esta estación es de 20,8 hm³, aunque existe una gran variabilidad interanual, con valores que van desde apenas 4 hm³ hasta más de 73 hm³, y con un pronunciado estiaje en los meses de verano (MITECO, 2021).

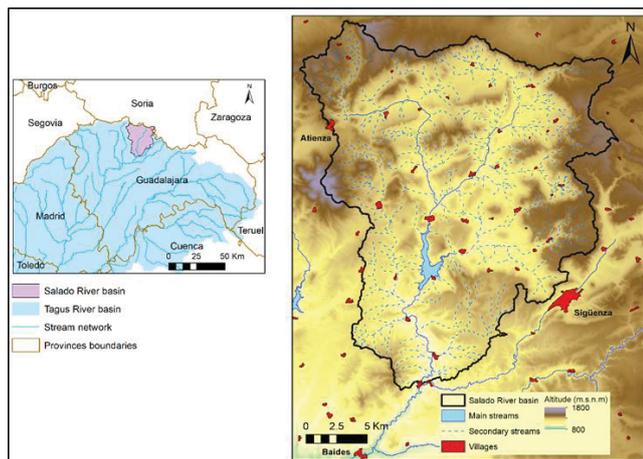


Fig. 2. Localización de la cuenca del río Salado y Modelo Digital de Elevaciones.

Geológicamente, esta cuenca fluvial presenta una superposición de estructuras de plegamiento. El encajamiento paulatino del río ha provocado el afloramiento de rocas de muy diversa edad y litología. La cuenca se asienta sobre materiales de edad precámbrica, paleozoica, mesozoica y cenozoica, así como formaciones aluviales y coluviales de edad cuaternaria. Los materiales triásicos están ampliamente representados, especialmente en la mitad norte de la cuenca. Los materiales de la facies Keuper están constituidos por las clásicas arcillas versicolores, con niveles de yeso intercalado, responsables del alto contenido de sales disueltas en las aguas del río Salado. Las rocas jurásicas afloran en el tramo superior de la cuenca en forma de dolomías tableadas, sobre las que se asienta un conjunto de calizas y dolomías de más de cien metros de espesor, dando lugar a formaciones acuíferas de relevancia local. Por último, en la mitad sur de la cuenca afloran sedimentos cretácicos (Samper et al, 2011; IGME, 1982).

En cuanto al uso del suelo, gran parte del territorio no es apto 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. La cobertura predominante en la cuenca es la forestal, ocupando el 32% de la superficie. Le siguen el uso agrícola (22%), los pastizales (18%), la combinación de pastizales y matorrales (10%), la combinación de cultivos y pastizales (9%) y los matorrales (6%). Los demás usos del suelo son minoritarios. Por último, cabe destacar la escasa población del territorio, con apenas 1100 habitantes en toda la cuenca. Sin embargo, el número de habitantes se multiplica en verano, como suele ocurrir en la España rural.

Cuenca del río Guadalupe

La cuenca del río Guadalupe (2380 km²) se encuentra en el noroeste de México, en el estado de Baja California (Fig. 3). En ella se localiza una de las zonas agrícolas más productivas de la región (uva y aceituna, principalmente) e incluye tres valles: Ojos Negros, Guadalupe y La Misión (Fig. 3). El área de estudio (1577 km²) se corresponde exclusivamente con la cuenca alta, ya que esta sección desemboca en la estación de aforo Agua Caliente, lo que permite su modelización hidrológica. Este sector de la cuenca se continúa con el denominado Valle de Guadalupe, donde las aguas del arroyo del mismo nombre se utilizan para el riego de viñedos.

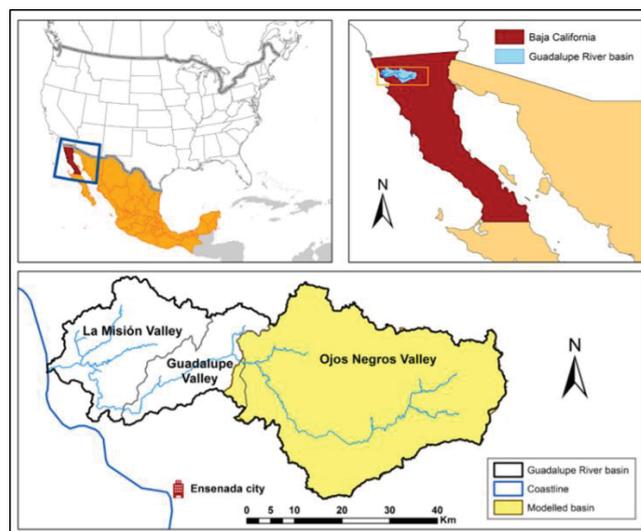


Fig. 3. Cuenca del río Guadalupe y localización esquemática de la cuenca alta del citado río.

En esta cuenca impera el clima mediterráneo con una gran variabilidad estacional y anual de la temperatura y la precipitación, así como períodos secos persistentes. Los eventos de lluvia son generalmente intensos y la precipitación media anual puede variar desde 12 mm hasta más de 750 mm, con un valor medio de 280 mm para toda la cuenca de Guadalupe (Sastre et al., 2003). Las temperaturas medias mensuales varían entre 0,6 °C y 30 °C. Como resultado, el flujo del arroyo es altamente estacional, con la mayor parte de la precipitación invernal, lo que se traduce caudales circulantes por el arroyo durante los meses de noviembre a marzo. De hecho, la estación de aforo de Agua Caliente (Fig. 3), ha registrado caudales medios anuales que van desde 0,008 m³ s⁻¹ (1971) hasta 9,17 m³ s⁻¹ en 1980 (Hallack-Alegria et al., 2012), con un pico máximo de 370,8 m³ s⁻¹ en febrero. Las precipitaciones en la zona son insuficientes para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos, aunque que la agricultura de regadío es esencial en la cuenca.

La altitud en la cuenca alta del Guadalupe oscila entre 388 y 1865 m.s.n.m. La cuenca está dominada por rocas ígneas intrusivas, principalmente granodiorita del Cretácico. También afloran en la cuenca algunas formaciones metamórficas del Triásico superior al Jurásico medio compuestas por gneis, esquistos y pizarras. Los sedimentos cuaternarios se encuentran principalmente en la llanura aluvial del valle de Ojos Negros, en el sur de la cuenca alta del río Guadalupe. Estos sedimentos configuran los acuíferos de Ojos Negros y Real del Castillo, que son importantes para la agricultura local. El acuífero principal se encuentra justo a la salida de la cuenca alta modelada. Tiene una recarga total anual de 26,4 hm³ (CONAGUA, 2014) de los cuales 12,6 hm³ se envían por transferencia entre cuencas a la ciudad de Ensenada (CONAGUA, 2013). Alrededor del 30% del suministro de agua de la ciudad proviene de este acuífero (Ramírez-Hernández et al., 2007).

2.2. Elaboración de los modelos

Los tres estudios se han realizado en diferentes años entre 2011 y 2021, utilizando en cada caso el software más reciente y los datos disponibles en cada caso. Por ello, la metodología no es estrictamente la misma. Así, el objetivo del estudio no es comparar las diferentes métricas obtenidas, las cuencas o los materiales o modelos utilizados, sino valorar los efectos obtenidos sobre las componentes del caudal, y, especialmente, sobre la escorrentía hipodérmica.

El criterio intervalos de pendiente es el mismo para las tres cuencas, según las recomendaciones de la FAO (CONABIO, 2015), con tres intervalos de pendiente (<8%, 8-30%, >30%). Para simplificar la generación de HRUs, en los modelos de Ompólveda y Guadalupe, se establecieron niveles de umbral para eliminar las pendientes, los usos del suelo y los tipos de suelos minoritarios en cada subcuenca (15% para el uso del suelo y 10% para los tipos de suelos y la pendiente en la cuenca del río Ompólveda; 10% para cada factor en la cuenca del río Guadalupe). Esta simplificación no se ha realizado en la cuenca del Río Salado, ya que se pretende adicionar un módulo específico de aguas subterráneas en estudios posteriores.

El modelo del río Ompólveda fue desarrollado con ArcSWAT, al igual que el modelo del río Guadalupe, en las versiones 2005 y 2009, respectivamente (Campos-Gaytan et al., 2014, Winchell et al., 2007). El modelo del río Salado fue construido con QSWAT (Winchell et al., 2010). La Tabla 1, presenta las características y fuentes de datos de entrada utilizados en cada caso, y los resultados de la delineación de cada modelo.

La información meteorológica (precipitación y temperatura máxima y mínima) se obtuvo de estaciones meteorológicas con datos suficientes en cada una de las cuencas. Para la cuenca del río Ompólveda, la precipitación se obtuvo de la estación de Escamilla, y la

temperatura máxima y mínima diaria de la estación de Guadalajara. Como la superficie de esta cuenca es pequeña, se considera suficiente una estación para cada variable para toda la cuenca.

Tabla 1. Datos de entrada y resultados de delineación de los modelos.

		Ompólveda	Salado	Guadalupe
Resolución MDE		5x5 m (Dile et al., 2019)	25x25 m (IDR, 2008)	15x15 m (Ministerio de Fomento, 2018a)
Usos de suelo	Escala	1:50.000 (INEGI, 2014)	1:25.000 (MAPA, 2009)	1:250.000 (Ministerio de Fomento, 2018b)
	Usos	10	10	8
Tipos de suelo	Escala	1:50.000 (INEGI, 2015, Arévalo et al., 2016)	1 km (Hernández et al., 1998)	1:1.000.000 (Nachtergaele et al., 2012)
	Tipos	5	4	5
Sub cuencas		9	53	17
HRUs		252	1157	136

Para la cuenca del río Salado se utilizaron seis estaciones meteorológicas, tres termo-pluviométricas, una termométrica y una pluviométrica. Para las dos cuencas españolas, los datos meteorológicos se obtuvieron de la Agencia Española de Meteorología (AEMET) (Molina-Navarro et al., 2010). Para la cuenca del río Guadalupe, los datos meteorológicos se extrajeron de 4 estaciones con datos suficientes y coincidentes en el tiempo del Estudio de Datos Meteorológicos (FAO, 1980).

2.3. Calibración de los modelos

Los tres modelos se calibraron utilizando el algoritmo Sequential Uncertainties Fitting Ver2 (SUFI2) del software SWAT Calibration and Uncertainty Programs (SWAT-CUP), con la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) como función objetivo. Para los modelos de los ríos Ompólveda y Guadalupe, se utilizó la versión de 2008 (Gobierno de México, 2021), mientras que para la cuenca del río Salado, la versión de 2015 (Abbaspour, 2015). Se realizaron tres iteraciones de 500 simulaciones para la calibración de los modelos de los ríos Ompólveda y Salado, y cinco iteraciones de 500 simulaciones para el río Guadalupe. Después de cada iteración, los rangos de los parámetros se actualizaron a los valores sugeridos por el programa excepto si excedían los rangos realistas inicialmente definidos. Para la selección de parámetros, en las cuencas de los ríos Ompólveda y Guadalupe se realizó un análisis de sensibilidad, mientras que para la cuenca del Salado los parámetros se seleccionaron según la experiencia del equipo investigador. Finalmente, se calibraron quince parámetros para la cuenca del Ompólveda, dieciocho para la del Salado y diez para la del Guadalupe.

Los períodos de tiempo fueron diferentes para cada

modelo. El modelo de la cuenca del río Ompólveda se calibró entre los años 1989 y 1996, tras un periodo de calentamiento de tres años (1986-1988) y se validó entre 1997 y 2003. El modelo del río Salado tuvo un periodo de calentamiento de cinco años, entre 1985 y 1990, y fue calibrado entre 1990 y 1993 y validado entre 1994 y 1996. El modelo del río Guadalupe tuvo un periodo de calibración de dos años (1973-1974), seguido de un periodo de calibración entre 1975 y 1981 y un periodo de validación entre 1982 y 1986. Todos los modelos obtuvieron resultados entre satisfactorios y buenos para las métricas evaluadas: Coeficiente de determinación (R^2), Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y ratio de desviación estándar de las observaciones del error medio cuadrático (RMSE). El uso simultáneo de estos tres índices estadísticos es conveniente, ya que pertenecen a diferentes categorías (regresión, adimensional y error) y conseguir 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) (Abbaspour, 2008). La tabla 2 es un resumen de las métricas obtenidas; los resultados ampliados se pueden encontrar en las respectivas publicaciones.

2.4. Escenarios de cambio climático

Las proyecciones de cambio climático tampoco fueron las mismas para los diferentes modelos, ya que se utilizaron los datos de los últimos informes del IPCC disponibles en cada caso. Sin embargo, los escenarios evaluados de los dos informes utilizados (AR4 y AR5) (Moriassi et al., 2015, IPCC, 2007) son comparables entre sí, pudiéndose definir un escenario de bajas emisiones para los escenarios SRES B1 y RCP 4.5, y un escenario de altas emisiones para los escenarios SRES A2 y RCP 8.5.

Tabla 2. Rendimiento obtenido en la calibración (C) y en la validación (V).

Parámetro	R^2		NSE		RSR	
	C	V	C	V	C	V
Ompólveda	0.78	0.77	0.67	0.70	0.57	0.55
Salado	0.69	0.64	0.69	0.64	0.56	0.60
Guadalupe	0.88	0.82	0.86	0.76	0.38	0.49

Para las cuencas españolas, los datos se extrajeron en ambos casos de la AEMET. En la cuenca del Ompólveda se utilizó la media de las proyecciones diarias predichas por un conjunto de 11 modelos para las estaciones de Escamilla y Guadalajara (para la precipitación y la temperatura máxima y mínima, respectivamente) (IPCC, 2014), extrayendo posteriormente las variaciones mensuales. Para la cuenca del Salado se utilizaron las proyecciones medias trimestrales predichas por 10 modelos para la provincia de Guadalajara (AEMET,

2021a). Para el largo plazo sólo 7 de estos 10 modelos tenían datos. En el caso de la cuenca del río Guadalupe, los datos de precipitaciones mensuales futuras se obtuvieron a partir de proyecciones regionales utilizando un conjunto de 12 realizaciones de seis modelos para los escenarios B1 y A2 (AEMET, 2021b). Sin embargo, las temperaturas máximas y mínimas, requeridas por SWAT no estaban disponibles en esta base de datos, por lo que las variaciones trimestrales de la temperatura futura se obtuvieron de una proyección local realizada para la ciudad de Ensenada con el modelo HadCM3 para los escenarios B2/A2 (PACC, 2012). Más información sobre los escenarios y periodos simulados en cada cuenca y sobre las fuentes utilizadas se puede encontrar en la Tabla 3.

Tabla 3. Periodos de tiempo simulados e información para escenarios de cambio climático utilizados (B: escenario base; MP: medio plazo; LP: largo plazo).

Cuenca	Ompólveda	Salado	Guadalupe
Escenario	SRES B1/A2	RCP 4.5/8.5	SRES B1-B2/A2
IPCC	AR4	AR5	AR4
Fuente	AEMET	AEMET	PEACC
B	1989-2011	1961-1990	1961-1990
MP	2046-2065	2046-2065	2010-2040
LP	2081-2100	2081-2101	2070-2099

2.5. Interpretación de resultados

Se han obtenido las precipitaciones, caudales y componentes de los caudales de cada modelo para los escenarios base, de bajas emisiones y de altas emisiones para el medio y largo plazo, calculando también para los caudales y sus componentes la variación porcentual estimada en cada escenario respecto al escenario base. Particularmente, en este trabajo se expondrán los resultados relativos a la escorrentía hipodérmica.

3.- Resultados y discusión

3.1. Variación de la precipitación y de la escorrentía

En la Tabla 4 se muestran los valores absolutos de la precipitación y el caudal estimados para cada cuenca y para los diferentes escenarios, así como la variación porcentual de la escorrentía con respecto al escenario base.

Los resultados estimados para las dos cuencas españolas predicen una disminución de la precipitación más severa en los escenarios más pesimistas y en el largo plazo. La cuenca del Salado, en el peor escenario, experimentaría una disminución de unos de 100 mm respecto al escenario base, más del 18% de la precipitación. El impacto sobre la precipitación en la cuenca de Ompólveda no es tan severo, siendo la disminución del

12% en el peor escenario. Esta reducción de la precipitación lleva implícita una disminución aún más acusada del caudal, que podría ser debida a la previsible mayor tasa de evapotranspiración. A medio plazo, la disminución prevista del caudal del río Ompólveda es inferior al 10%, llegando a un 35% a largo plazo en el escenario de bajas emisiones y a un 49% en el escenario de altas emisiones. En la cuenca del Salado, los descensos estimados son similares, de entre el 28% y el 46% a medio plazo y de entre el 34% y el 57% a largo plazo. Estos resultados obligan a tomar medidas de cara al futuro ya que, si las previsiones de cambio climático se materializan, resultará altamente difícil garantizar la disponibilidad de agua en estas cuencas a finales de siglo.

Tabla 4. Variación de la precipitación (P) y del caudal (Q) para cada cuenca a medio (M) y largo (L) plazo para los escenarios de bajas emisiones (BE) y altas emisiones (AE).

Ompólveda				
Escenario	Periodo	P (mm)	Q (mm)	ΔQ (%)
	Base	589,4	50,26	-
BE	M	573,9	52,01	3,48
	L	538	32,87	-34,6
AE	M	569,7	45,96	-8,56
	L	523,3	25,8	-48,67
Salado				
Escenario	Periodo	P (mm)	Q (mm)	ΔQ (%)
	Base	542,9	49,4	-
BE	M	502	35,54	-28,06
	L	496,8	32,66	-33,89
AE	M	479,3	26,69	-45,97
	L	442	21,43	-56,62
Guadalupe				
Escenario	Periodo	P (mm)	Q (mm)	ΔQ (%)
	Base	462,4	76,24	-
BE	M	359,9	42,73	-43,95
	L	316,8	34,52	-54,72
AE	M	346,1	41,39	-45,71
	L	290,8	30,63	-59,82

En la cuenca del río Guadalupe, estos resultados predicen una pronunciada disminución de las precipitaciones, de entre un 24% y un 37% para los escenarios menos y más pesimistas, respectivamente. La disminución de la precipitación también tiene un impacto negativo en los caudales circulantes por el río, estimándose una reducción de entre el 43% y el 60% con respecto al escenario de base. La menor disponibilidad de recursos hídricos prevista incrementará, sin duda, la dificultad de gestionar los recursos hídricos en una cuenca en la que actualmente es ya un reto.

3.2. Variación estimada de la escorrentía hipodérmica

La Fig. 4 muestra los valores estimados para la escorrentía hipodérmica en las tres cuencas objeto de estudio, a medio y largo plazo para los escenarios de bajas e y altas emisiones.

En la cuenca del río Ompólveda la componente hipodérmica de la escorrentía no experimentaría cambios significativos a medio plazo, ni en un escenario de bajas emisiones ni en uno de altas. A largo plazo el modelo predice una disminución del 8% (Tabla 5) (apenas un mm), en la escorrentía hipodérmica, valor relativamente bajo con respecto a la disminución esperada para la escorrentía total, de casi un 50%.

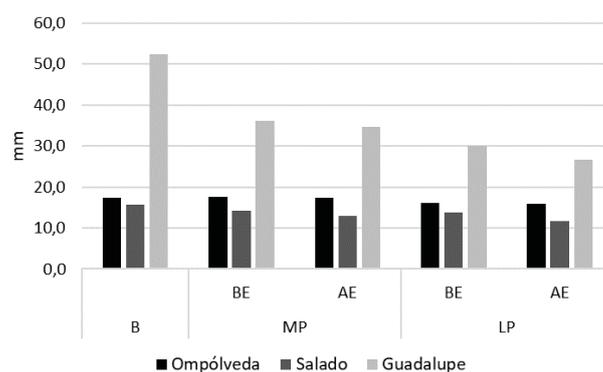


Fig. 4. Escorrentía hipodérmica en las cuencas estudiadas para los escenarios analizados.

Tabla 5. Variación estimada de la escorrentía hipodérmica (Q_h) (%) para los escenarios BE y AE a medio (M) y largo (L) plazo con respecto al escenario base.

Cuenca	Escenario	Plazo tiempo	Variación (%)
Ompólveda	Bajo	Medio	1
		Largo	-8
	Alto	Medio	0
		Largo	-8
Salado	Bajo	Medio	-10
		Largo	-12
	Alto	Medio	-17
		Largo	-25
Guadalupe	Bajo	M	-31
		L	-43
	Alto	M	-34
		L	-49

Los efectos del cambio climático en los escenarios barajados sobre la escorrentía hipodérmica previsiblemente serán algo más severos en la cuenca del Salado, prediciendo el modelo elaborado descensos de entre el 10 y el 17% a medio plazo en el escenario de

altas emisiones (Tabla 5). No obstante, ese descenso porcentual apenas representa cuatro mm en valores absolutos (Fig. 4).

En el caso de la cuenca del río Guadalupe, donde se han estimado las mayores disminuciones absolutas tanto de los caudales como de las precipitaciones, la escorrentía hipodérmica se verá notablemente afectada, con descensos porcentuales de entre un 30 y un 50%, aproximadamente, en función del escenario que se considere. En este caso, el valor absoluto de la escorrentía hipodérmica disminuirá casi a la mitad en el peor de los casos analizados, quedando reducida a tan solo 27 mm al final de este siglo frente a los más de 50 que supone en el escenario base.

Esta diferencia tan significativa entre la elevada disminución de la escorrentía hipodérmica predicha por el modelo para la cuenca del Guadalupe y la escasa –casi nula– variación que se prevé en las cuencas españolas para esta componente del caudal total circulante guarda estrecha relación con la contribución relativa a la escorrentía total que representa actualmente. Si en las cuencas españolas la componente mayoritaria es la subterránea, en la del Guadalupe, más árida que las cuencas españolas, lo es la hipodérmica, lo que podría estar condicionado por el carácter impermeable de los sustratos que afloran en la misa y el carácter mayormente torrencial de las precipitaciones, que favorecería la generación de escorrentía directa (superficial e hipodérmica) en detrimento de la subterránea.

En efecto, mientras que de los 76 mm de escorrentía media anual registrados en la cuenca del Guadalupe la escorrentía hipodérmica se estima en unos 52 mm –un 69% de aquella–, en las cuencas de los ríos Ompólveda y Salado se estima en apenas 17 mm y 15 mm de los 50 mm y 49 mm que supone la escorrentía total, respectivamente. Es decir, en ambas cuencas, actualmente la escorrentía hipodérmica representa tan sólo entre un 32% y un 34% (Ompólveda y Salado, respectivamente) de la escorrentía total.

Los modelos de cambio climático establecidos para estas tres cuencas predicen un marcado descenso de la escorrentía total que (un 50% en el escenario más pesimista, aproximadamente), en las dos cuencas españolas, se deberá específicamente a la disminución de la escorrentía subterránea –jugando un papel casi despreciable la variación en la hipodérmica–; Por el contrario, en la cuenca alta del río Guadalupe, la disminución de la escorrentía, que el modelo cifra en hasta un 60%, se deberá fundamentalmente el descenso de la escorrentía hipodérmica, por jugar un papel muy poco relevante la escorrentía subterránea ya en el escenario de base. Paradójicamente, en la cuenca del río Ompólveda, el modelo predice que la escorrentía superficial se verá ligeramente incrementada, previsiblemente merced a la mayor torrencialidad de las exiguas precipitaciones caídas.

4.- Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el impacto dos escenarios de cambio climático (bajas y altas emisiones) y en dos horizontes temporales (medio y largo plazo) sobre la distribución de las componentes de la escorrentía en tres cuencas de clima mediterráneo, dos cuencas españolas (ríos Ompólveda y Salado) y una cuenca mexicana (arroyo de Guadalupe).

Los resultados muestran que en las cuencas españolas, donde en el escenario base la escorrentía hipodérmica representa en torno a un 30% de la total, la contribución de esta componente disminuirá solo ligeramente incluso en el escenario más pesimista, aunque adquirirá un mayor peso porcentual en el cómputo de la escorrentía total debido a la notable disminución de la escorrentía subterránea.

En la cuenca del arroyo Guadalupe, más árida y con una menor contribución de la escorrentía subterránea, la escorrentía hipodérmica ya es la componente mayoritaria en el escenario base. En este caso, la acusada disminución del caudal esperada en un futuro de cambio climático se deberá fundamentalmente al descenso de esta componente, que será hasta un 49% inferior que en el escenario base.

Los resultados expuestos en este trabajo ponen de manifiesto la necesidad de tomar medidas de cara al futuro ya que, si las previsiones de cambio climático se materializan, resultará difícil garantizar la disponibilidad de agua en estas cuencas a finales de siglo, previéndose una situación particularmente grave en la cuenca del arroyo Guadalupe.

5.- Bibliografía

- Abbaspour, K.C. 2008. SWAT-CUP2: SWAT calibration and uncertainty programs: A user manual. Department of System Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland.
- Abbaspour, K.C. 2015. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Eawag, Dübendorf, Suiza. 100 pp.
- AEMET: Proyecciones climáticas para el siglo XXI. Datos diarios. Disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_dia_rios
- AEMET: Proyecciones climáticas para el siglo XXI. Resultados gráficos. Disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/result_graficos?opc4=0&opc6=0
- Arévalo Illana, D., Bienes Allas, R., Martínez Pérez, S.; Sastre Merlín, A. 2016. Nueva ampliación paramétrica de la USLE y aplicación a nivel de cuenca. Editorial Académica Española, Saarbrücken, Alemania. 75 pp.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 73-89.
- Campos-Gaytan, J.R., Kretzschmar, T., Herrera-Oliva, C.S., 2014. Future groundwater extraction scenarios for an aquifer in a semiarid

- environment: case study of Guadalupe Valley Aquifer, Baja California, Northwest Mexico. *Environ. Monit. Assess.* 186, 7961–7985.
- CONABIO, 2015. Portal de Geoinformación. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. En: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA, 2013. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Guadalupe (0207), Baja California, Comisión Nacional del Agua, México D.F.
- CONAGUA, 2014. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Available at: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- Dile, Y., Srinivasan, R., George, C. 2019. QGIS Interface for SWAT (QSWAT). Disponible en: https://swat.tamu.edu/media/116301/qswat-manual_v18.pdf.
- Eliasson, J., 2015. The rising pressure of global water shortages. *Nature*, 517(7532), 6–6.
- European Parliament and Council, 2000. Directive 2000/60/EC of 23/10/2000 establishing a framework for the Community action in the field of water policy. 327, Official Journal of the European Union.
- FAO, 1980. Land evaluation for development, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Fu, B., Merritt, W. S., Croke, B.F., Weber, T.R., & Jakeman, A.J. 2019. A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects. *Environmental modelling & software*, 114, 75–97.
- Gobierno de México: Servicio Meteorológico Nacional. Weather Stations Information. 2021. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Hallack-Alegria, M., Ramírez-Hernández, J., Watkins Jr., D.W., 2012. ENSO-conditioned rainfall drought frequency analysis in northwest Baja California, Mexico. *Int. J. Clim.* 32, 831–842.
- Hernaiz Huerta, P.P., Cabra Gil, P., Solé Pont, J., Portero, J. and del Olmo, P. 1998. Mapa Geológico de España Escala 1:50000 - Auñón. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid. 122 pp.
- IGME, 1982. Mapa Geológico de España E. 1:50.000 Madrid. Servicio de Publicaciones.
- INEGI, 2014. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geografia/default.aspx>
- INEGI, 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Banco de Información Económica; En: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/default.aspx>
- Instituto de Desarrollo Regional. 2008. Infraestructura de datos espaciales de Castilla-La Mancha- Zona de Descarga. <http://ide.jccm.es/descargapnoa/>
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report, in: Core Writing Team, Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland, 151 pp. Jager, N. W., Challies, E., Kochskämper, E., Newig, J., Benson, D., Blackstock, K., ... & Von Korff, Y. (2016). Transforming European water governance?
- Kovats, R.S., R. Valentini, L.M. Bouwer, E. Georgopoulou, D. Jacob, E. Martin, M. Rounsevell, and J.-F. Soussana, 2014: Europe. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1267–1326.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2009). Mapa de Cultivos y Aprovechamientos (1:50.000). Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/cartografia-y-sig/publicaciones/agricultura/mac_2000_2009.aspx
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). 2021: <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/inicio>
- Ministerio de Fomento. 2018a. 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>.
- Ministerio de Fomento. 2018b. Documento Técnico SIOSE 2014. Versión 1. Equipo Técnico Nacional SIOSE. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid. 16 pp.
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (MITECO). 2021. Síntesis de los borradores de planes hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias. Madrid, España. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/sintesisborradoresplanes_tcm30-528453.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2019. Anuario de Aforos. Dirección General del Agua. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX): <https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>
- Molina-Navarro, E., S. Martínez Pérez, and A. Sastre Merlín. 2010. El limnoembalse de Cola de Pareja (Guadalajara): Aspectos medioambientales e hidrológicos. *Bol. Geol. Min.* 121:69–80.
- Molina-Navarro, E., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A., & Bienes-Allas, R. (2014a). Hydrologic modeling in a small Mediterranean basin as a tool to assess the feasibility of a limno-reservoir. *Journal of environmental quality*, 43(1), 121–131.
- Molina-Navarro, E., Trolle, D., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A., & Jeppesen, E. (2014b). Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. *J. of Hydrology*, 509, 354–366.
- Molina-Navarro, E., Hallack-Alegria, 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. *Agric. Water Manag.*, 175, 29–42.
- Molina-Navarro, E.; Sastre-Merlín, A.; Martín-Loeches, M.; Vicente, R.; Sánchez-Gómez, A.; Martínez-Pérez, S. (2021). Impacto del cambio climático en la España rural: modelizando la afección a los recursos hídricos en una cuenca del centro peninsular. Recopilación de Publicaciones Científico Técnicas y de Difusión de Proyectos aceptadas en el Marco del Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Available at: <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2020/CT%202020/5247.pdf>
- Monreal, T. E., & Ripoll, L. Q. (1996). El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA. *Revista Digital del CEDEX*, (104), 43–43.
- 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.
- Nachtergaele, F., van Velthuizen, H., Verelst, L., Wiberg, D. 2012. Harmonized World Soil Database. Version 1.2. FAO, Roma, Italia. 50 pp.
- Parish, E. S., Kodra, E., Steinhäuser, K., & Ganguly, A. R. (2012). Estimating future global per capita water availability based on changes in climate and population. *Computers & Geosciences*, 42, 79–86.
- PEACC, 2012. Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California, Secretaría de Protección al Ambiente, Ensenada, Mexico.

- PEACC, 2015. Documentación de Escenarios Climáticos Regionales. Disponible en: <http://peac-bc.cicese.mx/escenariosdoc.htm>
- Praskievicz, S., & Chang, H. 2009. A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. *Progress in Physical Geography*, 33(5), 650-671.
- Ramírez-Hernández, J. et al. 2007. Informe Final. Plan de Manejo Integrado de las Aguas Subterráneas en el Acuífero de Guadalupe, Estado de Baja California. Tomo I, Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Península de Baja California, Dirección Técnica, Mexicali, México.
- Samper, J., B. Pisani, and J.E. Marques. 2011. Estudio del flujo hipodérmico en zonas de montaña. In: J. Martínez Fernández and N. Sánchez Martín, editors, *Estudios en la Zona No Saturada del Suelo* vol. X-ZNS'11. 19-21 Oct. 2011. Universidad de Salamanca, España. p. 365-370.
- Sastre Merlín, A., Moya, M.E., Acaso, E., Centeno, J.D. y Barea, J. 2003. Paisajes Geológicos de Guadalajara. En: *Nuche del Rivero*, R. (ed.): Patrimonio Geológico de Castilla-La Mancha, 258-333. ENRESA, Madrid.
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clark, D. B., ... & Gosling, S. N. 2014. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3245-3250.
- Winchell, M., R. Srinivasan, M. Di Luzio, and J.G. Arnold. 2007. ArcSWAT interface for SWAT. User's guide. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station and USDA Agricultural Research Service, Temple, TX.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., Arnold, J., 2010. ArcSWAT Interface For SWAT 2009: User's Guide. Texas Agricultural Experiment Station and USDA agricultural Research Service, Temple, Texas.