

## EFECTO DE LA SUBDIVISIÓN DE CUENCAS Y LA ESTIMACIÓN DE VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON EL MODELO SWAT EN CUENCAS SEMIÁRIDAS MEDITERRÁNEAS

*Francisco Gomariz-Castillo<sup>1,2</sup> y Francisco Alonso-Sarría<sup>2</sup>*  
Universidad de Murcia

### RESUMEN

Los resultados de cualquier modelización hidrológica dependen de la calidad y discretización de los datos de entrada. En este trabajo se evalúa cómo la estimación de las variables climáticas de entrada (precipitación y  $ET_P$ ) a partir de diferentes métodos y diferentes esquemas de discretización de la cuenca influyen en los resultados de un contrastado modelo hidrológico (SWAT). En concreto se prueban 4 conjuntos de variables de entrada y de discretización. Los estadísticos utilizados para evaluar la exactitud obtenida con estos conjuntos son RMSE, PBIAS, NSE y  $r^2$ . Los resultados muestran que el uso de modelos para obtener series de  $ET_P$  más próximas a la realidad (Penman Monteith FAO o Hargreaves calibrado) mejora considerablemente la exactitud del modelo respecto a las series obtenidas con el modelo de Hargreaves sin calibrar (opción por defecto en SWAT). Sin embargo, no se aprecian diferencias entre los resultados obtenidos con Penman Monteith FAO y Hargreaves calibrado. Por otro lado, el uso de información climática distribuida mejora notablemente los resultados obtenidos con información agregada. Se observa también la necesidad de calibrar los parámetros de SWAT ya que los valores por defecto están optimizados para climas templados presentes en EEUU.

**Palabras clave:** Modelo SWAT; modelización hidrológica; subdivisión de cuencas; interpolación espacial; cuencas semiáridas.

### EFFECT OF WATERSHED SUBDIVISION AND ESTIMATION OF CLIMATIC VARIABLES ON HYDROLOGICAL SIMULATION WITH THE SWAT MODEL IN SEMI-ARID MEDITERRANEAN BASINS

### ABSTRACT

The results of hydrological modelling depend on the quality and spatial resolution of the input data. This paper evaluates how the use of different estimations of climatic variables input layers (precipitation and  $ET_P$ ) and different basin discretization schemes influence affect the results of a contrasted hydrological model (SWAT). Specifically, 4 sets of input and discretization variables are tested. The statistics used to evaluate the accuracy obtained with these sets are RMSE, PBIAS, NSE and  $r^2$ . The results show that the use of better models to obtain  $ET_P$  series (Penman Monteith FAO or calibrated Hargreaves) considerably improves the accuracy of the model compared to the series obtained with the uncalibrated Hargreaves model (default option in SWAT). However, there is no difference between the results obtained with Penman Monteith FAO and calibrated Hargreaves. On the other hand, the use of distributed climate information significantly improves the results obtained with aggregated information. There is also a need to calibrate SWAT parameters as the default values are optimized for temperate environments in the USA.

**Key words:** SWAT model; Hydrologic modeling; Watershed subdivision; Spatial interpolation; Semi-arid catchments.

<sup>1</sup> Instituto Euromediterráneo del Agua. E-mail: [fjgomariz@um.es](mailto:fjgomariz@um.es)

<sup>2</sup> Instituto Universitario del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Murcia. E-mail: [alonsarp@um.es](mailto:alonsarp@um.es)

## 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos hidrológicos de estimación de caudales se pueden clasificar según su estructura de datos en modelos agregados o distribuidos. Los modelos agregados requieren menos información al concentrar el valor de las variables en un único punto de la cuenca simulada, mientras que los distribuidos recrean los procesos hidrológicos en un número mayor de puntos. Simplemente por este hecho, los modelos distribuidos cuentan con ventajas inherentes sobre los agregados, ya que consideran la heterogeneidad espacial de las cuencas y resuelven los procesos de retroalimentación entre las variables de estado (KUMAR *et al.*, 2009).

La discretización espacial de las cuencas a la hora de realizar un modelo hidrológico es uno de los efectos más estudiados, ya que el tamaño de las subcuencas o píxeles en los que se divide la cuenca afecta a los resultados obtenidos. De este modo, grandes subcuencas tienen más probabilidades de contener condiciones espacialmente variables. Por ejemplo, JHA *et al.* (2004) demuestran los efectos negativos de agregaciones inadecuadas y la conveniencia de generar subcuencas homogéneas o con una misma respuesta hidrológica. En este mismo sentido, los estudios realizados por CHIANG *et al.* (2015), GONG *et al.* (2010), KUMAR *et al.* (2009) o TRIPATHI *et al.* (2006) llegaron a conclusiones similares.

Un criterio ampliamente extendido a la hora de distribuir los parámetros espacialmente es el de Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs). Los modelos creados con este criterio se encuentran entre los agregados y distribuidos, por lo que se denominan habitualmente como modelos semi-distribuidos. Su aplicación consiste en dividir la cuenca de estudio en zonas de similar comportamiento hidrológico, lo que permite asignar los parámetros y variables espacialmente distribuidos de forma eficiente. Su principal ventaja es que disminuye la complejidad de los modelos distribuidos sin perder la heterogeneidad espacial en la simulación.

A pesar del aumento de la eficiencia a la hora de asignar parámetros espacialmente, los resultados finales van a depender de la discretización llevada a cabo para cada cuenca de estudio. Generalmente se cumple la norma que, cuanto más detallada sea la definición de las subcuencas y las URHs, menor será la pérdida de información y más exacta será la predicción final (CHIANG *et al.*, 2015). En este sentido se han realizado algunos estudios que analizan el efecto de la agregación del uso y tipo del suelo, y por tanto el tamaño y número de URHs. GITHUI *et al.* (2011) identifican una elevada sensibilidad de la evapotranspiración potencial ( $ET_p$ ) a los usos del suelo; mientras que los tipos de suelo no parecen influir significativamente en los resultados finales. MUKUNDAN *et al.* (2010) evalúan el efecto de la resolución espacial de los datos del suelo en las predicciones de caudales superficiales; en este estudio indican que se pueden utilizar datos de suelo con menor detalle espacial, obteniendo resultados similares a modelos con información más precisa.

Entre los modelos semi-distribuidos destaca el Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (ARNOLD *et al.*, 1993), debido a la gran cantidad de componentes que simula y a su capacidad para reproducir eficazmente el sistema hídrico. Está diseñado para predecir impactos a largo plazo del uso y prácticas de manejo del suelo sobre los recursos hídricos, sedimentos y rendimiento agrícola a diferentes escalas temporales y espaciales (ARNOLD *et al.*, 1998). SWAT ha sido utilizado en gran variedad de investigaciones de gran impacto internacional. GASSMAN *et al.* (2007) identifican 250 trabajos en los que se utiliza este modelo y DOUGLAS-MANKIN *et al.* (2010) definen otros 20 de especial relevancia.

Una de las desventajas de SWAT es que asigna de forma directa las variables climáticas a las subcuencas a partir de las estaciones más cercanas a los centroides de cada una de ellas. Este proceso puede conducir a una representación incorrecta de las variables de entrada (GRUSSON *et al.*, 2017), especialmente en cuencas de topografía compleja y gran heterogeneidad espacial de la precipitación, como las existentes en zonas semiáridas. TEGENGE *et al.* (2017) comparan dos modelos hidrológicos simples frente a SWAT, y comprueban cómo el aumento de subcuencas en cuencas de tamaño medio o grande mejora sensiblemente los resultados al representar mejor su heterogeneidad física. Este es uno de los motivos por los que TUO *et al.* (2016) evalúan en cuencas alpinas de Italia el comportamiento de SWAT en función del tipo de fuente de

información y método de discretización espacial para aproximar la precipitación. Sin embargo, conociendo adecuadamente las capacidades de SWAT, capaz de contemplar la heterogeneidad espacial y un gran número de procesos hidrológicos) hacen de él una herramienta idónea para su uso en zonas áridas y semiáridas, siempre y cuando existan datos de calidad para su implementación.

En las zonas áridas y semiáridas la escasez de agua hace que este recurso sea un bien con un elevado coste de oportunidad, por lo que conocer su disponibilidad espacial y temporal es básico para su adecuada planificación y gestión. En estas zonas, además es difícil realizar mediciones de campo de caudales, por lo que la modelización hidrológica cobra una relevancia especial. Así, la única forma de conocer los recursos hídricos es mediante modelización, lo que posibilita la simulación del comportamiento del sistema hídrico para diferentes escenarios a pesar de no tener mediciones reales, permitiendo incluso planificar para diferentes escenarios de cambio.

Un caso paradigmático del clima semiárido es la región mediterránea del sureste peninsular, ya que sus características singulares suponen un desafío único en modelización hidrológica. Por un lado, la elevada heterogeneidad y fragmentación en el paisaje, como consecuencia de la elevada presión antrópica, pueden repercutir significativamente en los resultados finales. Por otro lado, aspectos como el flujo dominante, que depende en gran medida de los eventos de lluvia estacional, de corta duración y alta intensidad, repercuten negativamente en el ajuste de los modelos. En este sentido, YUAN *et al.* (2014) analizan las repercusiones de este tipo de eventos en cuencas de Arizona, con características similares a las del sureste peninsular, identificando sesgos con rangos del  $\pm 25\%$  en modelizaciones sin calibrar.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la dependencia de los resultados de SWAT respecto a los conjuntos de datos de entrada utilizados y su discretización espacial. Se definen 4 conjuntos de datos: el primero espacialmente agregado, utilizando una aproximación simple en la obtención de las variables climáticas; el resto utilizan un esquema distribuido y diferentes aproximaciones para la obtención de la  $ET_p$ . El estudio se ha realizado sobre las dos cuencas más importantes del Sistema de Explotación Vinalopó-Alacantí (SEV), área muy representativa del sureste español, caracterizada por una fuerte presión antrópica transformadora del territorio, y un clima propio de zonas semiáridas.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

Este estudio trata de analizar el comportamiento de los modelos en función de dos aspectos: a) su discretización espacial y b) el método de estimación de las variables de entrada. Para ello se han tenido en cuenta 3 factores a la hora de definir los conjuntos de datos de entrada utilizados:

- *Discretización espacial*: (a) modelo espacialmente agregado (una única cuenca) y (b) modelo espacialmente distribuido (múltiples subcuencas de tamaño próximo a la resolución espacial de las variables espaciales, asegurando la condición de homogeneidad en las subcuencas).
- *Distribución espacial de las variables climáticas (precipitación y  $ET_p$ )*: (a) modelo sencillo obtenido a partir de polígonos de Thiessen para asociar al modelo espacialmente agregado y (b) series obtenidas mediante interpolación espacial.
- *Estimación de la  $ET_p$* : (a) ecuación de Hargreaves, (b) series obtenidas a partir de la parametrización y corrección espacial del modelo de Hargreaves (Hparam) y (c) series diarias obtenidas con la ecuación de Penman-Monteith FAO (PMFAO56).

A partir de estos factores se han generado cuatro escenarios:

- *S1*: SWAT espacialmente agregado, con la  $ET_p$  estimada con el modelo de Hargreaves y las variables climáticas estimadas como la media ponderada mediante polígonos de Thiessen de las estaciones climáticas disponibles; corresponde al modelo más sencillo de SWAT.
- *S2*: SWAT espacialmente distribuido en múltiples subcuencas y con la  $ET_p$  estimada con el modelo de Hargreaves.
- *S3*: SWAT espacialmente distribuido y  $ET_p$  estimada con Hparam.
- *S4*: SWAT espacialmente distribuido y con la  $ET_p$  estimada con la ecuación PMFAO56.

## 2.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO SWAT

SWAT (ARNOLD *et al.*, 1993) es un modelo semi-distribuido de base física para datos continuos de cuenca, desarrollado para cuantificar el impacto de la gestión agrícola en cuencas de gran tamaño con resolución temporal diaria. Se basa en la ecuación de balance hídrico en el perfil del suelo y simula la precipitación, infiltración, escorrentía superficial, evapotranspiración, flujos laterales y percolación, además de otros componentes relacionados con la calidad y transporte del agua y el crecimiento vegetativo.

El proceso de trabajo de SWAT puede dividirse desde el punto de vista de la simulación hidrológica en tres fases: a) fase de obtención de la precipitación neta, b) fase de generación de caudales y c) fase de tránsito, que engloba los movimientos de agua, sedimentos, etc. a través de la red hasta la salida de la subcuenca.

La precipitación neta se calcula a partir de la ecuación de balance hídrico:

$$SW_t = SW_{t-1} + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E\alpha - \omega_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Siendo  $SW_t$  la cantidad de agua final en el suelo en el tiempo  $t$  (día),  $SW_{t-1}$  la cantidad inicial de agua en el suelo en dicho día,  $R_{day}$  la cantidad de precipitación,  $Q_{surf}$  la escorrentía,  $E\alpha$  la evapotranspiración,  $\omega_{seep}$  la percolación y  $Q_{gw}$  el flujo base, expresados en mm. SWAT resuelve cada uno de los componentes a partir de diferentes subrutinas definidas en NEITSCH *et al.* (2011). La escorrentía superficial se simula utilizando una modificación del Número de Curva (NC) del *Soil Conservation Service* (SCS) a partir de datos diarios de precipitación y valores de NC obtenidos en función de los usos y tipos de suelo y a sus condiciones de manejo, ajustándose éstos de acuerdo a las condiciones de humedad. La evaporación y transpiración se simulan de forma separada; en el primer caso se utilizan funciones exponenciales dependientes de la profundidad y contenido de agua en el suelo; en el segundo caso, a partir de funciones lineales dependientes de la  $ET_p$ . La interceptación de la vegetación se estima en función de su almacenamiento, dependiente a su vez del tipo de vegetación introducida en SWAT. La percolación se estima utilizando una combinación del modelo de *crack-flow* y translación de almacenamiento. El flujo lateral se modeliza simultáneamente con la percolación utilizando un modelo de almacenamiento cinemático. El flujo base en el cauce se simula a partir de la conductividad hidráulica del acuífero superficial, la distancia desde la subcuenca analizada al cauce principal y el nivel freático.

Una vez determinada la escorrentía, se modeliza el tránsito hasta la salida de la cuenca a través de la red de drenaje. Para aproximar el tránsito del flujo del agua, el modelo utiliza dos métodos: el de Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969), o el de almacenamiento variable (WILLIAMS, 1969), que es el utilizado en este trabajo.

## 2.2. PROGRAMAS UTILIZADOS Y REQUERIMIENTOS DE LOS MODELOS

El trabajo se ha implementado sobre los programas SIG QGIS y GRASS, utilizando el programa R para el análisis de la información, calibración y validación de SWAT. QGIS dispone de la extensión QSWAT (DILE *et al.*, 2016), entorno de trabajo de SWAT que permite la gestión y pre-procesamiento de la información espacial para ser introducida en el modelo SWAT.

### 2.2.1. Discretización espacial de los modelos

La definición de la cuenca, subcuencas, red de drenaje y características morfológicas se han obtenido a partir de los módulos de GRASS y el Modelo Digital del Terreno (MDT) siguiendo el siguiente proceso:

- Corrección de las zonas llanas para asegurar que cualquier punto dentro de la cuenca vierte a su desembocadura.
- Cálculo de la dirección del flujo mediante el algoritmo D8 (O'CALLAGHAN *et al.*, 1984). D8 considera ocho posibles direcciones de salida del flujo en torno a una celda, de forma que el drenaje se dirigirá hacia una de las ocho celdas adyacentes (la de mayor pendiente).

- Cálculo del flujo acumulado. A partir de esta capa y de un valor mínimo de acumulación de flujo se obtiene la red de drenaje. Como valor umbral.
- Delineación de las cuencas de drenaje a partir del área drenada por el punto considerado de salida.
- Revisión de los resultados, principalmente la red de drenaje, a partir de ortofotografía.

Para el caso agregado se utilizan las cuencas completas. Mientras que para la discretización espacial se ha seguido un esquema de trabajo caracterizado por pequeñas subcuencas, de tamaño suficiente para reproducir el patrón espacial de las interpolaciones espaciales de las variables climáticas (1000 m de resolución).

### 2.2.2. Variables climáticas

La mínima información que necesita SWAT para realizar la simulación son series de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima diarias (estas últimas variables para estimar la  $ET_p$  y el modelo nival). El procedimiento de entrada las series es mediante archivos individuales de texto, que almacenan los datos de cada una de las variables y estaciones climáticas. La asociación espacial de la información al esquema la realiza identificando la estación más cercana al centroide de cada subcuenca, siendo este procedimiento una de las grandes debilidades del modelo.

Para la aplicación de SWAT en este trabajo las variables climáticas de entrada se han estimado considerando los dos esquemas de agregación espacial definidos previamente:

- Esquema sencillo de estimación para el modelo agregado: serie agregada obtenida a partir de la media ponderada de las estaciones más próximas al centroide de la cuenca y polígonos de Thiessen.
- Esquema de datos espacialmente distribuidos: series generadas mediante interpolación espacial de los datos diarios. En este caso se generan archivos de texto por cada celdilla de los archivos raster, emulando cada una de ellas a una estación climática.

Las interpolaciones se han obtenido siguiendo el esquema de desarrollado en GOMARIZ-CASTILLO *et al.* (2013); este proceso se basa en la selección del método de interpolación que minimiza el error obtenido mediante validación cruzada uno a uno (*Leave-one-out cross-validation-LOOCV*); para ello se compara para cada día todas las superficies generadas por el método global de regresión lineal, krigado de los residuos (RK, mediante regresión lineal y krigado ordinario), y cinco métodos de interpolación local (krigado ordinario y universal, el inverso de la distancia al cuadrado y las técnicas basadas en Splines *Thin Plate Splines* y éste último modelo considerando la elevación).

Siguiendo éstos dos esquemas se han generado las series de temperatura máxima y mínima diaria, precipitación total diaria y  $ET_p$  diaria. En el caso de la  $ET_p$ , se han utilizado tres tipos de estimación en función de su complejidad, con el objetivo de evaluar el efecto de dichos métodos en los resultados finales:

- Estimación mediante la ecuación de Hargreaves (HARGREAVES *et al.*, 1985; HARGREAVES *et al.*, 2003). Es el método utilizado por defecto por SWAT y en la mayoría de estudios, debido a que solamente necesita para su cálculo temperaturas máximas y mínimas.
- Series diarias obtenidas con la ecuación de ecuación de Penman-Monteith FAO (PMFAO56) (ALLEN, 1986; MONTEITH, 1993; ALLEN *et al.*, 1998). Esta serie es la recomendada por las Naciones Unidas como equivalente a la  $ET_p$  real (ALLEN *et al.*, 1994). Su principal problema es que necesita un gran número de variables para su cálculo, disponibles en un número reducido de estaciones climáticas.
- Series diarias obtenidas a partir de la parametrización y corrección espacial del modelo de Hargreaves a partir de los parámetros obtenidos en GOMARIZ-CASTILLO *et al.* (2017a). La corrección propuesta en este trabajo se basa en la estimación de dos parámetros que definen el ajuste lineal entre los valores observados (PMFAO56) y los estimados (Hargreaves). Estos parámetros, obtenidos para la red de estaciones con valores de la  $ET_p$  estimada con el modelo PMFAO56, se interpolan mediante RK utilizando el modelo no

lineal *Random Forest*, incorporando de esta forma el efecto de las variables ambientales locales en la predicción final.

### 2.2.3. Definición de los parámetros característicos de las URHs

En SWAT, las URHs, unidad mínima de trabajo del modelo, se definen a partir de tres capas de información espacial: (a) usos del suelo, (b) tipos y características físicas de los suelos y (c) pendientes. Para ello, el modelo posee una base de datos con los parámetros característicos de las principales coberturas del suelo y diferentes tipologías de suelo clasificadas según el *US Geological Survey* (USGS).

El problema de estas bases de datos es que se desarrollaron en Estados Unidos, por lo que dichos valores no tienen por qué coincidir en otros territorios. En estos casos, suele reclasificarse la información espacial existente conforme a las categorías disponibles en la base de datos. En el caso de los usos del suelo la reasignación entre clases es casi directa. Sin embargo, las clasificaciones de los tipos de suelo no son las mismas y no hay concordancia entre el sistema de clasificación que utiliza SWAT (*Soil Taxonomy* del *U.S. Department of Agriculture*) y la clasificación taxonómica FAO90/UNESCO utilizada en la mayor parte de la cartografía en España.

Para solventar este problema en este trabajo se va a generar la base de datos de suelos a partir de la base de datos mundial HWSO (*Harmonized World Soil Database*, FAO *et al.*, 2012), utilizada en la Península Ibérica con resultados coherentes en trabajos como el realizado por MALAGÒ *et al.* (2015); en España, la información asignada a HWSO procede del mapa a escala 1:1.000.000. Esta base de datos posee información de los tipos dominantes y asociados, divididos en dos capas: capa superior (los primeros 30 cm) e inferior (entre 30 y 100 cm). A partir de la información disponible se han derivado el resto de parámetros, a partir de la propuesta metodológica de DONG (2013) y el programa *Soil Water Characteristics* (SWC) (SAXTON *et al.*, 2006).

## 2.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Debido al gran número de parámetros y los pocos trabajos desarrollados en áreas similares, SWAT debe calibrarse para obtener resultados similares al comportamiento del sistema. Para ello, se ajustan los parámetros con el fin de que los resultados obtenidos se correspondan a los datos observados. El uso de la calibración semiautomática permite interpretar el comportamiento del modelo, la incertidumbre asociada a los resultados y a los parámetros calibrados, y su repercusión en los datos finales. En este sentido, JAJARMIZADEH *et al.* (2017) definen cuatro fuentes principales de incertidumbre: a) la atribuible a la medición y errores en la toma de datos y a la discretización temporal y espacial (procesamiento de la información), b) incertidumbre estructural debido a las simplificaciones o inadecuación del modelo para explicar la realidad, c) la relativa a la especificación del modelo (no convergencia a la mejor solución) derivada de los datos disponibles y d) y la asociada al estado inicial del sistema. El cuarto tipo se reduce al incluir en la calibración un periodo de calentamiento inicial en el modelo. Entre estas cuatro fuentes de incertidumbre, las hipótesis de partida de este estudio tratan de evaluar el comportamiento del modelo en función del primer tipo (a).

El ajuste de los modelos se ha realizado bajo el entorno de optimización *Calibration Uncertainty Procedures* (SWAT-CUP) (ABBASPOUR *et al.*, 2015), utilizando el algoritmo SUFI2 (ABBASPOUR *et al.*, 2007). SUFI2 se basa en un enfoque de calibración estocástico, representando la incertidumbre de los parámetros de entrada como distribuciones uniformes, y la incertidumbre de salida del modelo mediante el 95% de predicción (95PPU) de una distribución acumulada a través de un muestreo tipo hipercubo latino. El algoritmo comienza asumiendo una incertidumbre grande, disminuyéndola hasta cumplir dos reglas: (i) la banda 95PPU incluye a la mayoría de las observaciones y (ii) la distancia promedio entre las partes superior (al 97,5%) y la inferior (al nivel del 2,5%) de la 95PPU es pequeña. La ventaja de este algoritmo frente a GLUE o ParaSol es que requiere un menor número de simulaciones para lograr un nivel de rendimiento similar (YANG *et al.*, 2008). Además, SUFI2 permite un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo, utilizando para ello los resultados de la calibración y un contraste T-

Student para evaluar el efecto de los resultados en función del cambio de un parámetro dado sobre el resto del modelo.

Como función objetivo a maximizar se ha utilizado el índice de eficiencia de Nash (NSE) (NASH *et al.*, 1970), que evalúa el poder reproductivo del modelo determinando la magnitud relativa de la varianza residual. El índice varía entre  $-\infty$ , 1. NSE=1 indica un ajuste perfecto a la serie, mientras que NSE<0 indica que la media de los valores observados son un mejor predictor que el propio modelo. También se utiliza la raíz cuadrada del error cuadrático (RMSE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS) que estima la sub o sobre estimación del modelo.

### 3. CASO DE ESTUDIO: LAS CUENCAS DEL VINALOPÓ Y DEL MONNEGRE

Como caso de estudio se han seleccionado las cuencas del Vinalopó y Monnegre, áreas representativas del sureste español, caracterizadas por una fuerte presión antrópica y un clima propio de zonas semiáridas. Son las dos cuencas principales del Sistema de Explotación Vinalopó-Alacantí (SEV), ocupando el 75,26 % de éste (1.688,88 km<sup>2</sup> en el caso del río Vinalopó y 513,48 km<sup>2</sup> en el caso del Monnegre).

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El SEV se ubica en el sureste de la Península Ibérica, ocupando la zona sur de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), y limitando con la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) al suroeste. Tiene una superficie de unos 3.000 km<sup>2</sup>, casi en su totalidad en la provincia de Alicante, incluyendo a las 3 comarcas alicantinas del Alto, Medio y Bajo Vinalopó, más una pequeña porción de las provincias de Albacete en la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha, la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia y la provincia de Valencia (Figura 1). Se caracteriza por altos índices de aridez, la irregularidad estacional e inter-anual de los caudales y la fuerte presión antrópica.

El clima y la disponibilidad hídrica en el SEV están muy influidos por la presencia de relieves al norte-noreste del Sistema que actúan como pantalla ante los vientos húmedos del noreste. Los relieves montañosos de toda la provincia se disponen de forma paralela suroeste-noreste, influyendo en gran medida sobre la distribución espacio-temporal del régimen pluviométrico. Dentro del SEV, los relieves más importantes se localizan en las cabeceras de las cuencas, con cotas máximas de casi 1.600 metros; la parte baja y, en menor medida, la media, se caracterizan por ser las áreas más llanas de toda la provincia de Alicante; allí se localizan los mayores núcleos de población de la provincia, destacando Alicante y Elche.

La zona de estudio se encuentra dentro de la región climática mediterránea, quedando dos tercios del área dentro del piso mesomediterráneo, y el resto dentro del piso termomediterráneo (franja más próxima a la costa). Los datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) muestran una disminución de la temperatura media anual desde la desembocadura del Río Vinalopó y área costera, con valores que superan los 18 °C, hasta los relieves más elevados, con valores inferiores a 14,5 °C.

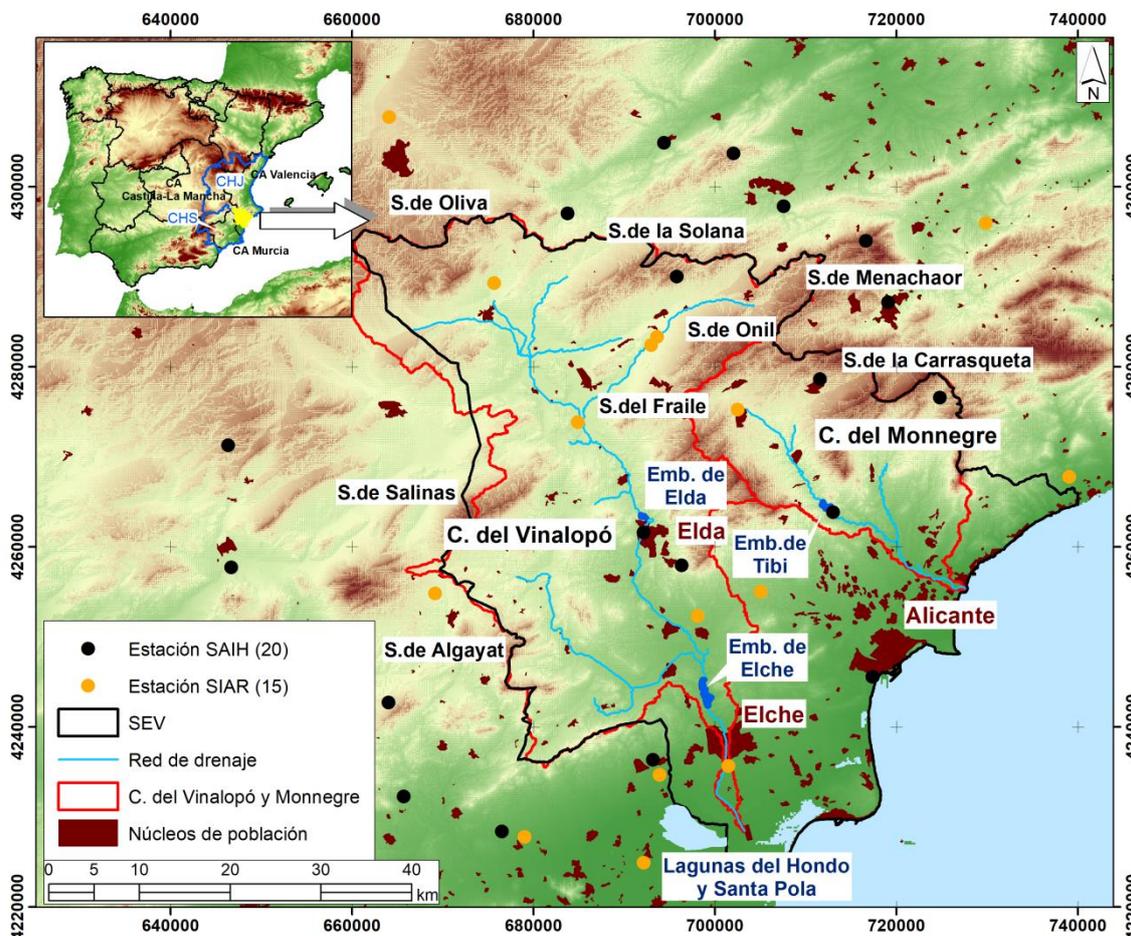
Las cuencas estudiadas se encuentran a sotavento de los vientos húmedos del noreste, por lo que sufren una clara sombra pluviométrica (BRU RONDA, 1993) derivada de los mayores relieves de la Comunidad Autónoma de Valencia, que actúan como barrera orográfica. En consecuencia, se produce un gradiente de precipitación total anual que disminuye en dirección noreste-suroeste, desde algo más de 800 mm/año a valores inferiores a los 300 mm/año al sur de la cuenca del Vinalopó. Junto a este patrón se observan valores elevados de ET<sub>P</sub> (1.211 mm/año en la cuenca del Río Vinalopó y 1201 mm/año en la cuenca del Río Monnegre), derivando en la escasez de los recursos hídricos en la zona de estudio. Casi el 80% del SEV se clasifica, según el índice de aridez de De Martonne, como árido (estepario), el 18% como semiárido (mediterráneo) y el 2% restante como sub-húmedo. A este comportamiento se suma la elevada variabilidad intranual, concentrándose las mayores precipitaciones en primavera y otoño, y la generación de tormentas de verano de corta duración y gran intensidad.

Sus cauces principales son efímeros con una respuesta hidrológica irregular, condicionada por los intensos aguaceros característicos del sureste peninsular. Debido a la escasez de recursos, el

SEV dispone de diversos elementos de regulación, destacando los embalses de Tibi en el río Monnegre y los embalses de Elda y de Elche en el río Vinalopó. La aportación media anual del SEV en el periodo 1981-2012 es de 68,6 hm<sup>3</sup>/año (C.H.J., 2015). En ambas cuencas se observa una disminución progresiva de los caudales, en concordancia con la tendencia a la reducción de las precipitaciones y al aumento de la ET<sub>p</sub>, derivadas del cambio climático. Asimismo, se identifican 22 masas de agua subterránea, que sufren una fuerte explotación ocasionada por el elevado déficit hídrico y la presión antrópica en el territorio: tan solo el 70% de la superficie regable del SEV procede de los recursos subterráneos y el 7% de recursos mixtos (C.H.J., 2015).

FIGURA 1

Ámbito territorial del Sistema de Explotación Vinalopó-Alacantí (SEV). Detalle de las dos cuencas analizadas y las estaciones climáticas utilizadas en el trabajo. SAIH: Sistema Automático de Información Hidrológica; SIAR: Servicio Integral de Asesoramiento al Regante. CA: Comunidad Autónoma.



Fuente: elaboración propia de la definición de las cuencas y red de drenaje sobre la base del Modelo Digital de Elevaciones 1:5.000 del Instituto Geográfico Nacional (MDT5) y el Mapa Topográfico Nacional 1:25.000 (MTN25).

En lo referente a la ocupación del territorio, ambas cuencas cuentan con una elevada densidad poblacional, siendo la población permanente de 1.017.640 habitantes según el INE de 2009 (C.H.J., 2015). Se concentra en las zonas costeras, con una alta presión turística, y en las cabeceras municipales de los valles entre los sistemas montañosos. Según los datos de Corine Land Cover de 2012, el 62% del SEV se encuentra ocupado por usos vinculados directamente a la actividad humana, con más del 7% de la superficie del SEV vinculada a zonas urbanas o de infraestructuras, además de un importante diseminado en las huertas. Predominan los cultivos en mosaico (huerta) que resultan en una alta heterogeneidad y fragmentación del territorio. La superficie ocupada por cultivos representa casi el 55% de su superficie, destacando los cultivos de regadío (22% del SEV)

y otros cultivos (13%). El secano ocupa casi un 32% de la superficie total, destacando los mosaicos de cultivos leñosos, vid y mosaicos de cereales. Las áreas naturales o seminaturales representan el 36% del total, en su mayoría matorral mediterráneo arbustivo poco denso (28% del total del SEV), localizándose el forestal arbóreo (principalmente pináceas) en zonas de montaña hacia el interior.

### 3.2. DATOS DE ENTRADA

El principal inconveniente en el proceso de modelización en la zona de estudio es la falta de datos para la calibración y análisis de sensibilidad de los parámetros. Existen 5 estaciones de aforo (tres en la cuenca del Vinalopó y dos en la cuenca del Monnegre); sin embargo, exceptuando la estación de aforo 8128 de Monnegre, con datos hasta 1995, la información disponible finaliza en 1971, con unos dos años de registros en la mayoría de los casos. El uso de datos tan alejados en el tiempo complica la especificación y evaluación de los modelos:

- Los hidrogramas observados son característicos de regímenes muy alterados con una elevada laminación debida a las infraestructuras de regulación y derivación del agua para regadío (en ambas cuencas existen numerosos azudes). La restitución a régimen natural en este tipo de situaciones es muy complicada a escala diaria.
- Se dispone de información de usos del suelo poco detallada.
- No existe una red densa de estaciones climáticas con información en el mismo rango temporal que los caudales observados (los registros del SIAR comienzan en el año 2000).

Como el objetivo principal de este trabajo es evaluar el comportamiento de los modelos hidrológicos en función de los conjuntos de información de entrada utilizados y su discretización espacial, finalmente se ha utilizado como serie de referencia (T1) para calibrar y validar los datos publicados por el Sistema Integrado de Información del Agua (SIA), obtenidos a partir del Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación Aportación (SIMPA) (ESTRELA *et al.*, 1996). La ventaja principal de estos datos, utilizados como serie de referencia oficial en el proceso de planificación hidrológica (BOE, 2007), es que estiman aportaciones en régimen natural utilizando variables y parámetros regionalizados e interpolados para toda España a partir de datos reales, como por ejemplo la  $ET_p$  estimada a partir del modelo de Thornthwaite regionalizado mediante coeficientes correctores obtenidos con las series obtenidas con la ecuación de PMFAO56.

En lo referente a las fuentes de información utilizadas, en la Tabla 1 se resumen los datos utilizados en este estudio. Las variables climáticas se han obtenido a partir de la interpolación de 35 estaciones climáticas (Figura 1): 20 pluviométricas pertenecientes al SAIH y 15 del SIAR, que contienen además información de temperatura y  $ET_p$  calculada con el modelo PMFAO56. La estimación de la serie agregada se ha obtenido a partir de las estaciones del SIAR ALC16, ALC19 y ALC101 (las más cercanas a los centroides de las dos cuencas agregadas y con una distribución espacial representativa). La serie temporal de datos empleada en la simulación corresponde a los años 200-2009. El primer año (2000) se ha utilizado como serie de calentamiento, el periodo 2001-2003 es el de validación, mientras que el tramo final (2004-2009) es el empleado para la calibración del modelo SWAT. Además, las calibraciones con el algoritmo SUFI2 se han llevado a cabo a partir de 3 iteraciones con 500 simulaciones en cada una. De los 22 parámetros disponibles se han utilizado los 15 identificados como relevantes según ZAMBRANO-BIGIARINI *et al.* (2013).

La caracterización morfométrica y la obtención de los datos derivados del terreno se han obtenido a partir del Modelo Digital del Terreno con resolución de 5 m (MDT05), siguiendo el proceso descrito en el subapartado 2.2.1. El punto de salida de la Rambla del Monnegre se ha definido a partir de su desembocadura en el mar en El Campello; en el caso del Vinalopó se ha seleccionado el punto en el que termina el cauce oficial y se une con el azarbe alto en Santa Fe.

TABLA 1

Tipos fuentes de información. SIAR; SAIH; SIA; PNOA (IGN): Plan Nacional de Ortofotografía; HWSD (FAO *et al.*, 2012), para España equivalente al Mapa de Suelos de España 1:1.000.000 (MAPAMA).

Tipología	Nº de estaciones	Disponibilidad	Fuente	Resolución	
				Espacial	Temporal
Precipitación	20	2000-2010	SIAR/SAIH	-	Día
Precip./Temp./ET <sub>P</sub>	15		SIAR	-	
Serie de calibración	1		SIA	-	Mes
MDT05	-	2009	PNOA (IGN)	5 m	Única
Usos del suelo	-	2010	LandSAT	30 m	Única
Tipos de suelo	-	-	HWSD	1000 m	Única

Fuente: elaboración propia

En la Figura 1 se presentan las dos cuencas finales y la red de drenaje asociada a éstas. En la Tabla 2 se resumen las principales características morfométricas de las dos cuencas y el número y la discretización espacial (subcuencas y URHs). Destaca la mayor pendiente media del Monnegre, indicando una mayor capacidad erosiva potencial. El coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc) y la relación de circularidad indican la mayor elongación de la cuenca del Vinalopó. La longitud del cauce principal (Lc), su eje (La) y el coeficiente de sinuosidad hidráulico (Sh) indican una mayor sinuosidad en el caso de la cuenca del Vinalopó. En lo referente al tiempo de concentración (Tc), en ambas cuencas es inferior a las veinticuatro horas, aunque en el caso del Monnegre, de menor extensión, mayor pendiente media y menor elongación, el tiempo es inferior.

TABLA 2

Parámetros morfométricos característicos, subcuencas y URHs de las cuencas del Vinalopó y Monnegre. Kc: Índice de compacidad de Gravelius; Lc: Longitud del cauce principal; La: Longitud del eje del cauce principal; Tc: Tiempo de concentración de Kirpich.

Parámetro	C. Vinalopó	C. Monnegre
Sup. (km <sup>2</sup> )	1.756,84	513,48
Elev. med. (m)	572	667
Pen. med. (°)	8,06	12,9
Kc	2,43	1,75
Lc (km)	106	54
La (km)	62	35
Tc (h)	16,01	6,69
Sh	1,72	1,54
Nº subcuencas (S2 a S4)	489	146
Nº URHs (S1)	227	109
Nº URHs (S2 a S4)	13.383	3.752

Fuente: elaboración propia

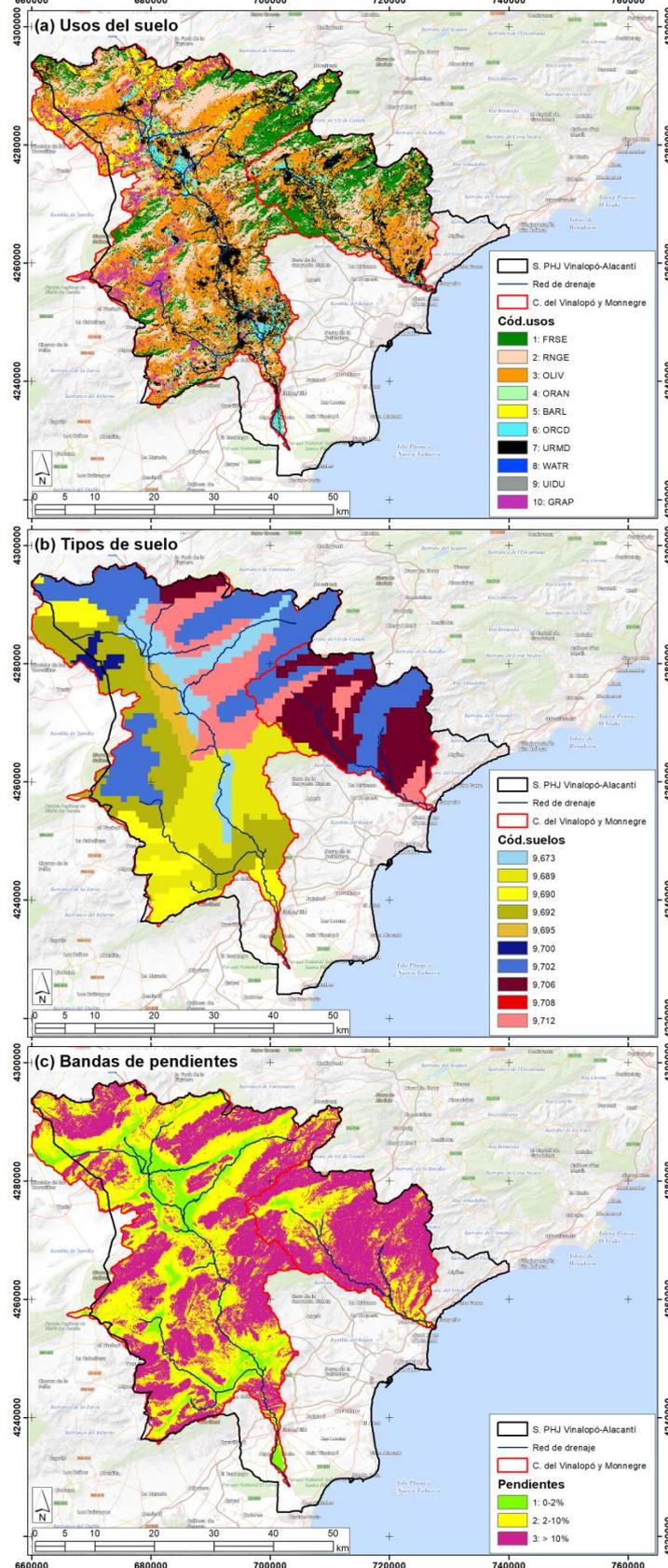
En lo referente a la obtención de los parámetros característicos de las URHs, el mapa de usos del suelo utilizado para su reasignación con las categorías de SWAT ha sido el generado para 2010 en GOMARIZ-CASTILLO *et al.* (2017b). La ventaja de esta clasificación es su resolución espacial (30 m), la elevada concordancia entre los datos de validación y el mapa clasificado (se clasificaron de forma correcta el 89,86 % de los píxeles, con un índice Kappa de 0,88) y el periodo de tiempo (2010, final del periodo de simulación y próximo a la fecha de MDT05). La Figura 2a y la Tabla 3 resumen la recodificación y la superficie ocupada en cada cuenca.

Para definir las características edáficas se ha partido de las base de datos y cartografía del HWSD (FAO *et al.*, 2012), siguiendo el proceso descrito en el subapartado 2.2.3. En la Figura 2b se representan las unidades de tipos de suelos obtenidas en las cuencas estudiadas.

La definición de las bandas de pendiente se han obtenido a partir del MDT05 (Figura 2c),

utilizando tres intervalos de pendiente para representar pendiente nula o baja, media y elevada.

FIGURA 2  
Capas finales de (a) usos del suelo, (b) tipos de suelo y (c) bandas de pendiente.



Fuente: elaboración propia

TABLA 3

Cobertura de usos del suelo. Categoría obtenidas a partir de clasificación supervisada en 2010 y su recodificación a usos del suelo SWAT.

Código: Uso	Uso SWAT	C. Vinalopó		C. Monnegre	
		Sup.Ha	%	Sup.Ha	%
<b>1: Forestal</b>	<b>FRSE Forest-Evergreen</b>	19.999	11,84	11.975	23,32
<b>2: Matorral</b>	<b>RNGE Range-Grasses</b>	34.787	20,6	10.841	21,11
<b>3: Cult.arb.disperso</b>	<b>OLIV Olives</b>	56.236	33,3	14.312	27,88
<b>4: Cult.arb.denso</b>	<b>ORAN Orange</b>	3.768	2,23	570	1,11
<b>5: Herb.secano</b>	<b>BARL Spring Barley</b>	10.922	6,47	1.165	2,27
<b>6: Herb.regadío</b>	<b>ORCD Orchard</b>	6.930	4,1	1.832	3,57
<b>7: Sup.imp.</b>	<b>URMD Residential-Medium Density</b>	21.381	12,66	10.214	19,89
<b>8: Sup.agua</b>	<b>WATR Water</b>	109	0,06	28	0,05
<b>9: Suel.desnudo</b>	<b>UIDU Industrial</b>	163	0,1	72	0,14
<b>10: Vid</b>	<b>GRAP Vineyard</b>	14.593	8,64	339	0,66
<b>Total</b>		<b>168.888</b>	<b>100</b>	<b>51.348</b>	<b>100</b>

Fuente: elaboración propia

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 4 resume los parámetros calibrados en todos los escenarios y su sensibilidad (influencia relativa de cada parámetro en los resultados finales obtenidos con el modelo). En ella, el cambio relativo ( $R_{\_}$ ) se refiere al factor de cambio en la calibración asociado a parámetros distribuidos espacialmente y el cambio absoluto ( $V_{\_}$ ) a su valor absoluto, asociado a parámetros espacialmente agregados.

El parámetro más sensible en todos los escenarios es  $R_{CN2.mgt}$ , asociado al número de curva asignado a los usos del suelo, con un cambio relativo negativo en todos los casos para las dos cuencas. Este cambio relativo negativo se puede deber a la especificación incorrecta del número de curva asociado en la base de datos de SWAT a los usos del suelo; se debe tener en cuenta que estos valores se asignaron a partir de estudios empíricos en zonas diferentes a la analizada en este estudio. Como consecuencia, SWAT sobreestima el caudal simulado en todos los escenarios antes de su calibración. Un ejemplo de esta situación es el comportamiento en el escenario S4 respecto a T1, con un sesgo positivo del 77 % en la cuenca del Monnegre y del 57% en la cuenca del Vinalopó. Para tratar de solucionar este problema, la calibración reduce de forma generalizada el valor asignado de NC, tratando de reducir el escurrimiento resultante. Le sigue en importancia  $V_{CANMX.hru}$ , parámetro asociado también a los usos del suelo. Se observa cómo S1 en las dos cuencas el valor es bastante más elevado que en los escenarios discretizados espacialmente, con valores muy elevados de almacenamiento de la cobertura vegetal. En el caso de la cuenca del Vinalopó, el análisis de sensibilidad de los parámetros asociados al acuífero ( $V_{GWDELAY.gw}$ ,  $V_{GWQMN.gw}$  y  $V_{RCHRGDP.gw}$ ) indica que el modelo SWAT para dicha cuenca es especialmente sensible, lo que en principio da a entender una mayor relevancia de los procesos relacionados con el acuífero que en la cuenca del Monnegre.

La Tabla 5 muestra las medidas de error y ajuste de las series obtenidas con diferentes conjuntos de datos a la serie de referencia (T1). En general, las series espacialmente distribuidas obtienen un mejor resultado de NSE, aumentando en aquellas que utilizan PMFAO56 (S4), considerada equivalente a la  $ET_P$  real, y la serie Hparam a partir de la metodología propuesta en GOMARIZ-CASTILLO *et al.* (2017a). Ajustes tan similares en S3 y S4 indican que el uso de series calibradas a partir de dicha metodología puede considerarse equivalente al uso de PMFAO56. En la cuenca del Monnegre se observan índices de eficiencia elevados en todos los escenarios. En S1 se obtiene  $NSE=0,66$ , aunque en validación disminuye hasta  $NSE=0,25$ , mientras que en las series espacialmente distribuidas  $NSE>0,6$ , llegando a 0,7 en S4; este hecho puede deberse a su mayor capacidad de captar la heterogeneidad espacial de las variables estimadas. Estos resultados indican que para el modelo S1 puede haber un sobreajuste en la

calibración que se traduce en una peor capacidad de predicción, consecuencia probablemente de factores locales no captados en modelos agregados, como la distribución espacial de las variables climáticas.

TABLA 4

Parámetros calibrados. *mgt* se refiere a su aplicación en los archivos de manejo (parámetros asignados a los usos del suelo), *.gw* parámetros asignados al acuífero, *.sol* parámetros asignados a los tipos de suelo, *.hru* parámetros asignados a las URH y *.bsn* parámetros asignados al nivel de cuenca. Significación del contraste de sensibilidad: \*\*: p-valor < 0,01; \*: p-valor < 0,05; ‘: p-valor < 0,1.

Parámetro	Definición	Rango	Monnegre				Vinalopó			
			S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
R_CN2.mgt	Número de Curva del SCS para la condición II de humedad	-0,5 - 0,5	-0,34**	-0,30**	-0,19**	-0,05*	-0,47**	-0,34**	-0,34**	-0,34**
V_ALPHABF.gw	Factor alpha del flujo base (d)	0 - 1	0,39	0,25	0,19	0,37	0,27	0,54	0,42	0,42
V_GWDELAY.gw	Desfase agua subterránea (d)	0 - 500	279,99	202,37	300,85	147,55	305,45	566,16	488,57*	488,57*
V_GWQMN.gw	Nivel del umbral freático para iniciar flujo de retorno (mm)	0 - 5000	1451	2532	1412	2182	900**	982**	871**	871**
V_CANMX.hru	Almacenamiento máximo de la cubierta vegetal	0 - 100	77,75**	70,76**	48,77	54,77	97,23**	49,1*	48,77*	48,77*
R_CHN2.rte	N. de Manning del cauce principal	-0,4 - 0,4	-0,29	0,27	0,08	-0,03	-0,29	-0,24	-0,15	-0,15
V_ESCO.hru	Factor de compensación de ET del suelo	0 - 1	0,33	0,96	1,28	0,54	0,22	0,60	0,42*	0,42*
V_EPCO.hru	Factor de compensación de la captación de las plantas	0 - 1	0,78'	0,31'	0,18	0,86	0,43	0,86	0,49*	0,49*
V_GWREVAP.gw	Coefficiente de revalorización del agua subterránea	0 - 0,2	0,23	0,11	0,15	0,23	0,14**	0,23	0,17*	0,17*
R_OVN.hru	N. de Manning para el flujo superficial	-0,4 - 0,4	-0,09	-0,39	-0,36	0,14	-0,25	0,01	0,06	0,06
V_RCHRGDP.gw	Fración de percolación del acuífero profundo	0 - 1	0,33	0,27**	0,39	0,25**	0,13**	0,18**	0,31**	0,31**
V_REVAPMN.gw	Profundidad del acuífero sup. para producir revap. (mm)	0 - 500	205,27	433,76	351,11	387,99	481,97*	189,16	370,51	370,51
R_SOLAWC.sol	Disponibilidad de agua en el suelo (mm mm <sup>-1</sup> )	-0,45 - 0,45	-0,42'	0,52**	0,55**	0,07**	0,30**	-0,22	-0,13**	-0,13**
R_SOLK.sol	Conductividad hidráulica saturada (mm h <sup>-1</sup> )	-0,4 - 0,4	-0,07	0,77	0,53'	0,26	-0,31**	-0,22	-0,56**	-0,56**
V_CHN1.sub	N. de Manning de los cauces tributarios	0 - 1	0,32	0,34	0,19	0,11	0,56**	0,47	0,60	0,60

Fuente: elaboración propia

TABLA 5

Medidas de error y ajuste de los modelos de SWAT para los cuatro escenarios considerados.

	bondad de ajuste	Monnegre				Vinalopó			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Serie completa	RMSE	0,97	0,74	0,68	0,68	1,89	1,01	0,77	0,77
	PBIAS	-4,8	-1,3	-9,3	-6,1	22,7	-9,9	0,9	-2,3
	NSE	0,64	0,79	0,82	0,82	-0,65	0,53	0,73	0,72
	r <sup>2</sup>	0,66	0,83	0,84	0,85	0,70	0,69	0,74	0,74
Calibración	RMSE	1,08	0,84	0,75	0,76	2,24	1,16	0,87	0,88
	PBIAS	-2,2	2,5	-6	-3,3	25,9	-9,6	1,5	4,2
	NSE	0,66	0,80	0,84	0,84	-0,70	0,54	0,74	0,74
	r <sup>2</sup>	0,67	0,85	0,86	0,86	0,7	0,7	0,74	0,75
Validación	RMSE	0,71	0,48	0,48	0,49	0,86	0,59	0,48	0,50
	PBIAS	-14,3	-11,2	-16,1	-12,1	12,7	-8,3	-0,7	0,3
	NSE	0,25	0,65	0,68	0,70	-1,91	-0,38	0,10	0,10
	r <sup>2</sup>	0,34	0,69	0,70	0,70	0,24	0,40	0,44	0,41

Fuente: elaboración propia

En la cuenca del Vinalopó se observa un comportamiento similar, aunque en esta cuenca la eficiencia de los modelos parece empeorar. Para el escenario S1 se obtiene un NSE=-0,65, valores que mejoran para los otros tres escenarios, en los que NSE=0,53 para S2 y superior a 0,7 para S3 y S4. Este comportamiento viene ratificado con los valores del sesgo, donde se obtiene un PBIAS=22,7 % en S1 frente a PBIAS<±10% en los otros tres escenarios. La menor calidad de ajuste en esta cuenca respecto a la del Monnegre puede deberse a dos características diferenciadoras entre ambas, una climática y otra morfológica: i) mayor precipitación y menor ET<sub>P</sub> y en la cuenca del Monnegre (P=364 mm año<sup>-1</sup> y ET<sub>P</sub>=1198 mm año<sup>-1</sup> frente a P=331 mm año<sup>-1</sup> y ET<sub>P</sub>=1.211 mm año<sup>-1</sup> en caso del Vinalopó según la serie interpolada y PMFAO56) y ii) su forma y extensión, un valor de compacidad de Gravelius Kc=1,75 en el Monnegre y Kc=2,43 en el Vinalopó (Tabla 2). Su forma y tamaño deriva en diferentes tiempos de concentración e influye en la forma del hidrograma final (Tc=6,69 h en el Monnegre frente a las 16,01 h en el Vinalopó).

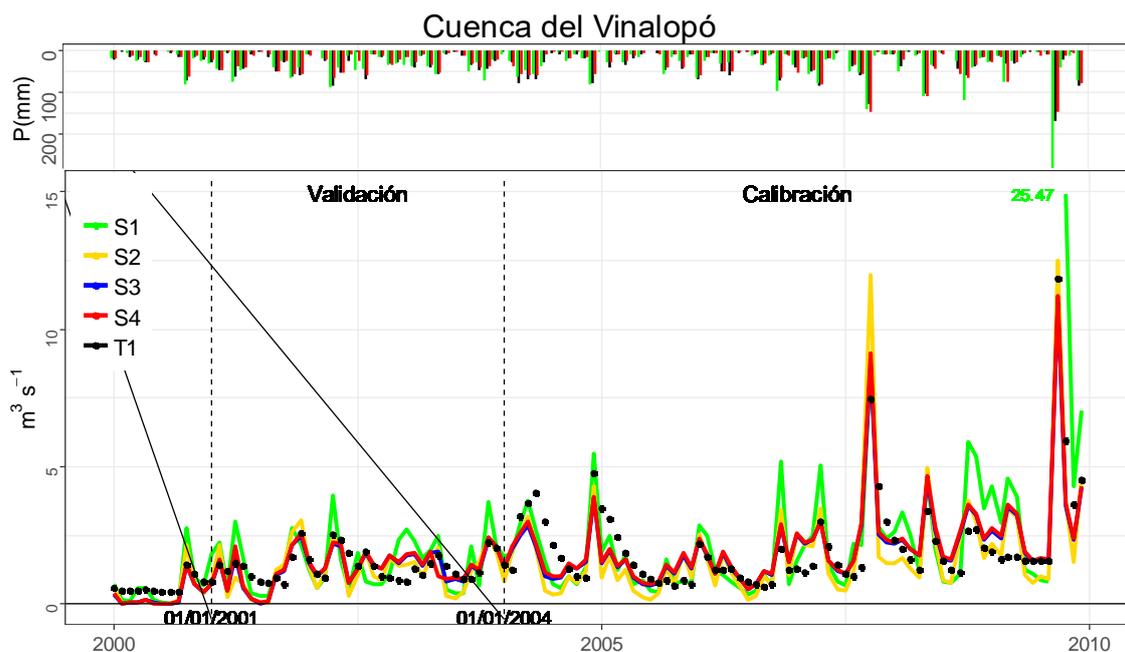
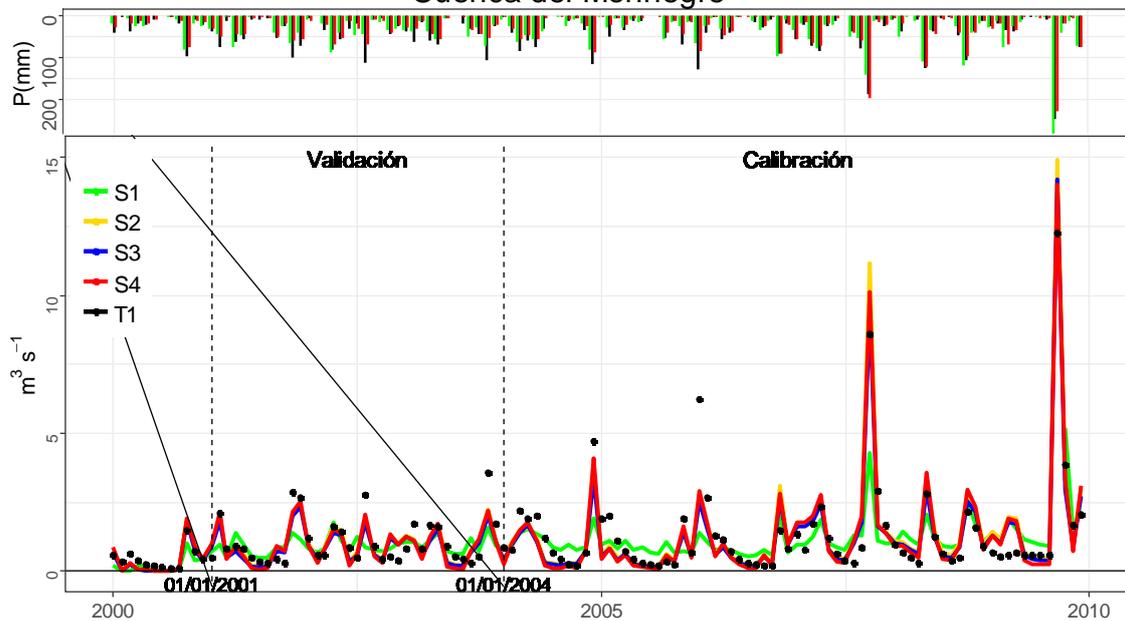
En conjunto, según el criterio propuesto por MORIASI *et al.* (2007) para valores de NSE y PBIAS, el ajuste en ambas cuencas en los escenarios S2 a S4 puede considerarse satisfactorio (NSE >0,5) y muy bueno en algunos casos (NSE>0,75 y PBIAS< ±10%). Aunque estudios como el realizado por GITHUI *et al.* (2011) sugieren que la discretización en detalle de la cuenca puede no proporcionar un mejor resultado, los resultados obtenidos indican una mayor eficiencia en los escenarios donde se ha realizado. Esta discrepancia puede deberse a que su trabajo se realizó en el sureste de Australia, de clima templado, mientras que el SEV se caracteriza por una elevada heterogeneidad espacial de las variables y parámetros de entrada.

Al analizar el comportamiento de los hidrogramas mensuales (Figura 3), los picos de éstos muestran diferencias entre el modelo con tres estaciones (S1) y los modelos con variables climáticas interpoladas (S2 a S4). S1 no aproxima bien el caudal base en la cuenca del Monnegre. En cambio, S2 a S3 reproducen mejor la serie de referencia T1 obteniendo series muy similares. Respecto a los caudales pico, los modelos con variables interpoladas (S2 a S4) se ajustan mejor a la serie de referencia.

La Figura 4a representa la relación entre la ET<sub>P</sub> mensual estimada mediante PMFAO56 y las obtenidas mediante Hargreaves en S1 (en rojo y triángulos), Hargreaves en S2 (verde y cuadrados) y Hparam (en azul y círculos). De los resultados obtenidos se deduce que el modelo de Hargreaves tiende a sobreestimar a la ET<sub>P</sub> obtenida mediante PMFAO56, que se supone más próxima a la realidad, como suele ocurrir en zonas semiáridas (GOMARIZ-CASTILLO *et al.*, 2017a).

Además, tiende a sobreestimar a la  $ET_p$  para valores elevados y a subestimarla para valores bajos. S1, que utiliza la ecuación original de Hargreaves, tiene un sesgo positivo o sobreestimación del 3,1%, mientras que al utilizar esta misma información de forma distribuida disminuye al 0,8%; el uso de Hparam disminuye el sesgo hasta el -0,3%, aumentando además  $r^2$  hasta el 0,99. Este comportamiento repercute en los escenarios disminuyendo el caudal final cuando se sobreestime la  $ET_p$ . Las series de precipitación distribuida utilizadas para los escenarios S2 a S4 se ajustan mejor a la precipitación de SIMPA de la serie de referencia (T1), obteniendo como resultado un mejor ajuste en los hidrogramas resultantes (Figura 4b). No obstante, se observa una mayor separación a la diagonal de la figura en los registros más elevados de los hietogramas utilizados en los escenarios respecto a los datos de SIMPA (T1), debido probablemente a diferencias en los métodos de estimación entre éstas.

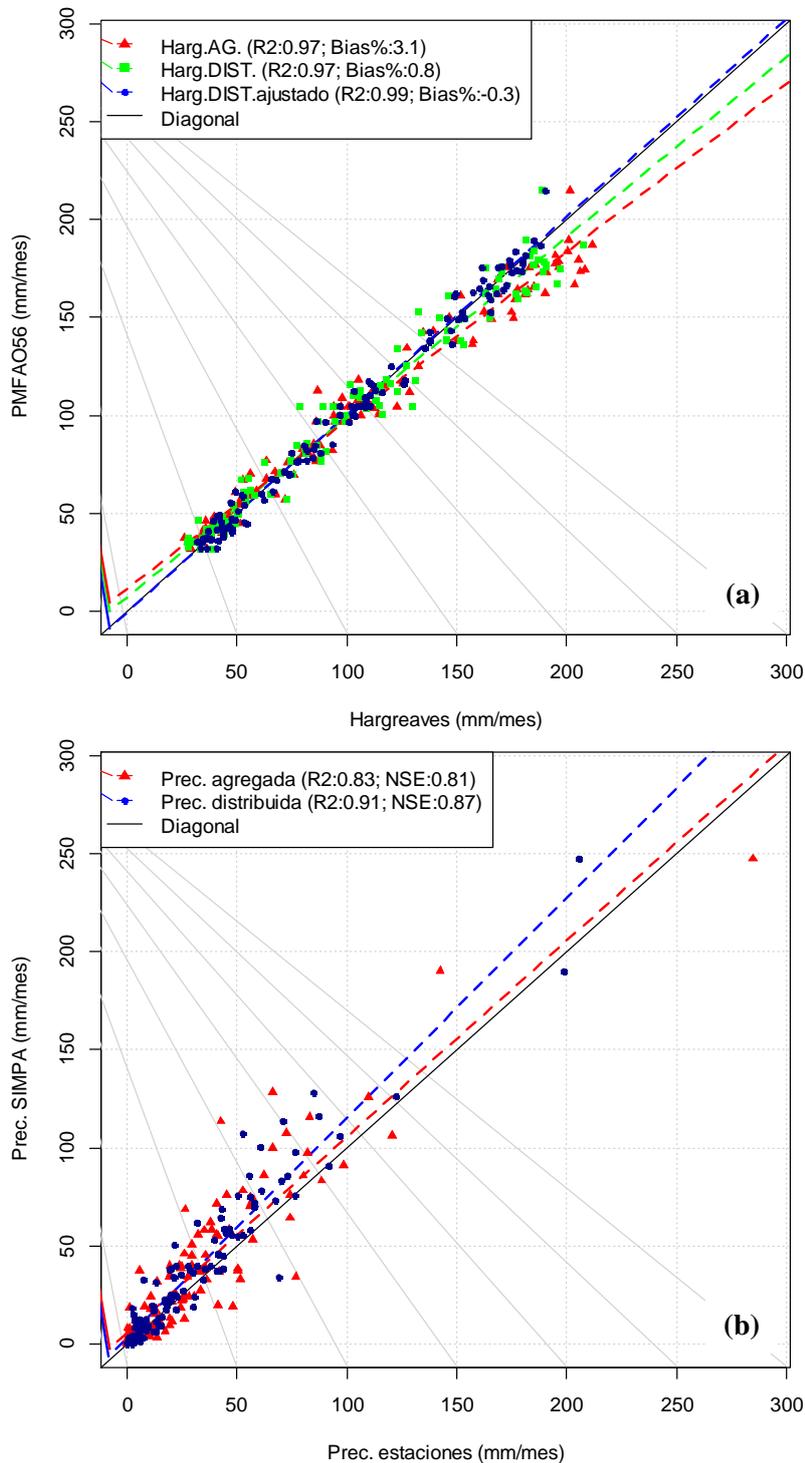
FIGURA 3  
Caudal mensual en los diferentes escenarios aproximados.  
Cuenca del Monnegre



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 4

Relación entre las series mensuales utilizadas en los escenarios. (a) Ajuste entre la  $ET_p$  PMFAO56 (referencia) y Hargreaves en el escenario agregado (rojo), distribuido (verde) y Hparam (azul). (b) Ajuste entre la precipitación agregada (rojo) y la distribuida (azul).



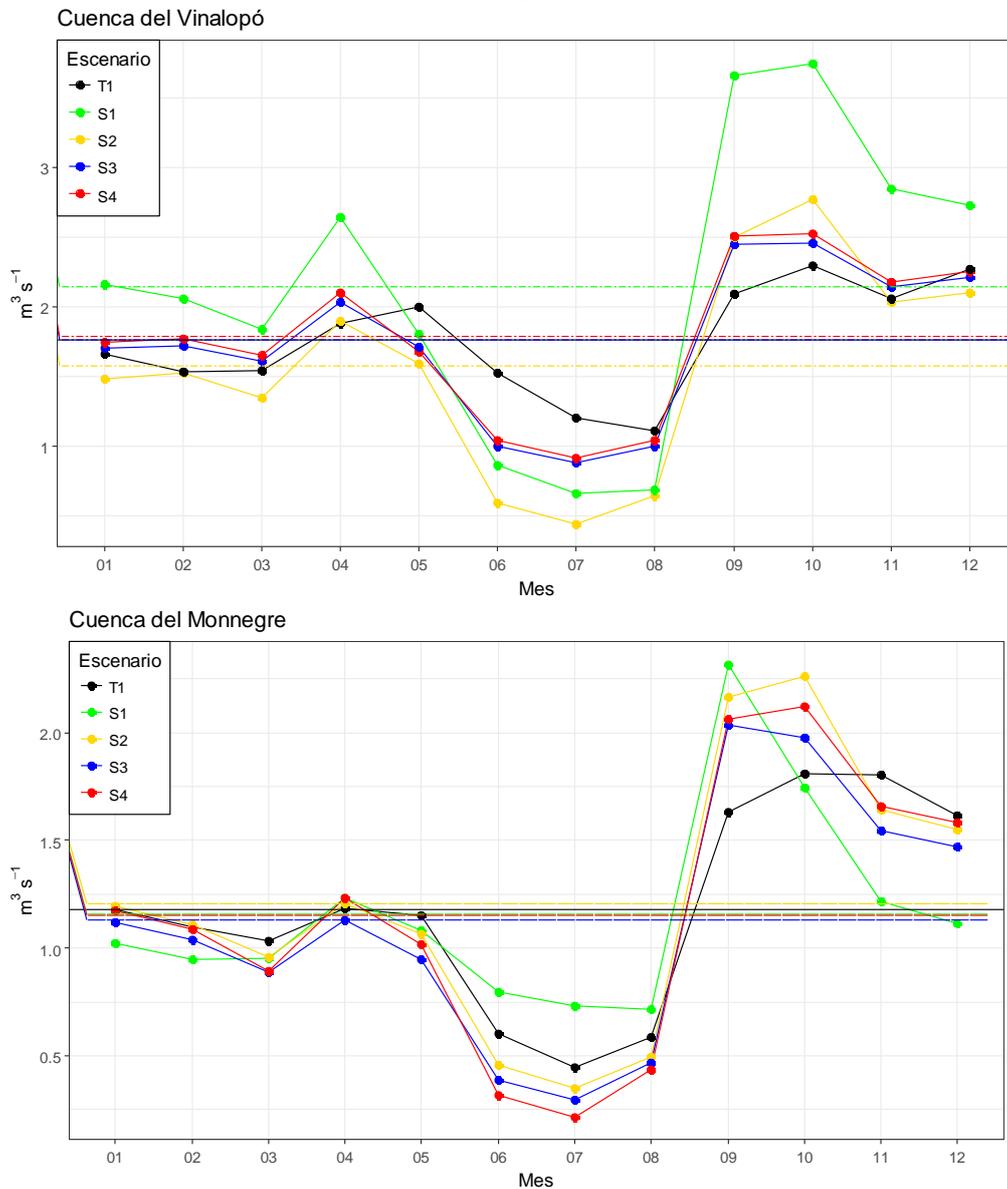
Fuente: elaboración propia

El comportamiento intranual (Figura 5), se caracteriza en general por un régimen con alta variabilidad temporal típica de zonas semiáridas. En el periodo de estiaje de los meses de verano (Julio-Agosto) los caudales son mínimos, siendo máximos en otoño (septiembre y Octubre). Si es con diferencia el escenario que peor reproduce este patrón intranual. En la cuenca del Vinalopó (Figura 5a), sobreestima los caudales en todos los meses del año excepto en los meses de verano.

Sin embargo, para la cuenca de Monnegre (Figura 5b) los caudales están subestimados, sobre todo en los meses de verano y de otoño-invierno (excepto septiembre, debido al evento particular de septiembre de 2009, donde los sobreestimaba).

FIGURA 5

Escorrentía media mensual de la serie de referencia (T1) y los cuatro escenarios simulados. Las líneas discontinuas representan la aportación media anual de los escenarios simulados y la continua en los escenarios simulados, representándose T1 como línea continua.



Fuente: elaboración propia

En ambas cuencas, las estructuras S2 a S4 tienen un comportamiento similar: subestiman los caudales en los meses de verano y los sobreestiman en otoño. El modelo trata de compensar estas diferencias lo que provoca que el caudal medio anual sea parecido a T1. Este comportamiento se debe al efecto de compensación del proceso de calibración; el algoritmo utiliza como función objetivo NSE, cuyo principal inconveniente es que tiende a dar mayor importancia (y por tanto sobreajustar) a valores más elevados, descuidando el ajuste en valores pequeños (LEGATES *et al.*, 1999). Este efecto provoca un mejor ajuste en meses húmedos en detrimento de las estaciones secas.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha investigado cómo afectan la discretización espacial y el origen y forma de definir las variables climáticas a la modelización hidrológica. Para ello se ha recurrido a la herramienta SWAT para definir un modelo en unas cuencas de ambientes semiáridos, ya que en estas zonas climáticas la variabilidad y heterogeneidad son unas de sus principales características. Las dos cuencas simuladas, representativas de este ambiente, se encuentran en el sureste de la Península Ibérica.

Los resultados indican que los escenarios en los que se introduce información distribuida proporcionan mejores resultados que los que emplean la información de forma agregada (las tres estaciones SIAR y los polígonos de Thiessen). El uso de series agregadas incide negativamente en los resultados, al no recrear correctamente la heterogeneidad espacial de las variables. Este fenómeno de pérdida de representatividad se acentúa en áreas que, como la seleccionada, presentan fuertes contrastes climáticos y un régimen pluviométrico irregular, con tormentas de verano que afectan a una pequeña parte de las cuencas. Esta circunstancia provoca sobreestimación de los caudales si no se utilizan capas de precipitación distribuida, tal y como pasa en este trabajo en septiembre de 2009. Este comportamiento indica que distribuir espacialmente la precipitación ayuda a mejorar los modelos, ya que la variable de entrada representa mejor a la realidad.

Respecto a los datos de entrada, el modelo de Hargreaves, utilizado por defecto en SWAT, subestima las series de  $ET_p$ , aumentando consecuentemente los aportes modelizados. En cambio, las series obtenidas al calibrar el modelo de Hargreaves producen hidrogramas en SWAT prácticamente iguales que al utilizar PMFAO56, al ser ésta considerada como variable de referencia.

Asimismo, también se ha demostrado la necesidad de calibrar el resto de parámetros de SWAT, ya que sus valores por defecto están optimizados para climas templados presentes en Estados Unidos. En las cuencas estudiadas, el uso del modelo con estos parámetros sobreestima enormemente los caudales respecto a la serie de referencia, llegando a ser un 90% mayores en la cuenca del Vinalopó. Por lo que los resultados que proporciona el modelo SWAT con los parámetros propuestos por defecto en dicho modelo pueden discrepar sustancialmente con la realidad, debiendo tomar esos resultados con cierta prudencia. Por este motivo, la calibración es necesaria, siempre que se pueda. De hecho, la calibración en cada escenario estudiado de este trabajo ha proporcionado valores de ajustes diferentes en función de la especificación empleada.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ABBASPOUR, K.C., ROUHOLAHNEJAD, E., VAGHEFI, S., SRINIVASAN, R., YANG, H. y KLØVE, B. (2015): "A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model". *Journal of Hydrology*, vol. 524, p. 733–752.
- ABBASPOUR, K.C., YANG, J., MAXIMOV, I., SIBER, R., BOGNER, K., MIELEITNER, J., ZOBRIK, J. y SRINIVASAN, R. (2007): "Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT". *Journal of Hydrology*, vol. 333, p. 413–430.
- ALLEN, R.G. (1986): "A Penman for all seasons". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 112, p. 348–368.
- ALLEN, R.G., SMITH, M., PERRIE, M. y PEREIRA, L.S. (1994): "An update for the calculation of reference evapotranspiration". *ICID Bulletin*, vol. 43, n° 2, p. 35–92.
- ALLEN R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. Y MARTIN S. (1998). "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements". FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome.
- ARNOLD, J.G., ENGEL, B.A. y SRINIVASAN, R. (1993): *Application of Advanced Information Technologies for Management of Natural Resources*. "A continuous time, grid cell watershed model". En ASAE (Ed.) , Spokane, Washington, pp. 17–19.
- ARNOLD, J.G., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R.S. y WILLIAMS, J.R. (1993): "Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development". *JAWRA Journal of the*

- American Water Resources Association*, vol. 34, p. 73–89.
- Boletín Oficial del Estado (2007): “Acuerdo para encomienda de gestión por el MAAMA (Dirección General del Agua) al CEDEX, del Ministerio de Fomento, para la realización de asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materias competencia de la Dirección General del Agua”. Boletín Oficial del Estado, Gobierno de España. Madrid.
- BRU RONDA, C. (1993): “La sobreexplotación de acuíferos y los planes de ordenación hidráulica en la cuenca del río Vinalopó, Alicante”. *Investigaciones Geográficas*, vol. 11, p. 93–107.
- Confederación Hidrográfica del Júcar (2015): *Plan Hidrológico de La Demarcación Hidrográfica Del Júcar. Memoria. Ciclo de Planificación Hidrológica 2015-2021*. Confederación Hidrográfica del Júcar, Gobierno de España. Madrid, 896 pp.
- CHIANG, L.C. y YUAN, Y. (2015): “The NHDPlus dataset, watershed subdivision and SWAT model performance”. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 60, p. 1690–1708.
- CUNGE, J.A. (1969). “On the subject of a flood propagation method (Muskingum method)”. *Journal of Hydraulics Research*, vol. 7, p. 205–230.
- DILE, Y.T., DAGGUPATI, P., GEORGE, C., SRINIVASAN, R. y ARNOLD, J. (2016): “Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model”. *Environmental Modelling and Software*, vol. 85, p. 129–138.
- DONG, X. (2013): *Conference Proceedings of SWAT 2013*. “Moulding SWAT model for Chines Qingjiang river for rainfall-runoff simulations”. Texas Water Resources Institute Technical Report.
- DOUGLAS-MANKIN, K.R., SRINIVASAN, R. y ARNOLD, J.G. (2010): “Soil and water assessment tool (SWAT) model: Current developments and applications”. *Transactions of the ASABE*, vol. 53, nº 5, p. 1423–1431.
- ESTRELA, T. y QUINTAS, L. (1996): “El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA”. *Ingeniería Civil*, vol. 104, p. 43–52.
- FAO, IIASA, ISRIC, ISSCAS y JRC. (2012): *Harmonized World Soil Database (vs 1.2)*, FAO, Rome, Italy and IIASA. Laxenburg, Austria.
- GASSMAN, P.W., REYES, M.R., GREEN, C.H. y ARNOLD, J.G. (2007): “The Soil and Water Assesment Tool: historical development, applications and future research directions”. *Transactions of the ASAE*, vol. 50, p. 1221–1250.
- GITHUI, F. y THAYALAKUMARAN, T. (2011): *1The 19th International Congress on Modelling and Simulation*. “The effect of discretization of hydrologic response units on the performance of SWAT model in simulating flow and evapotranspiration”. En Wongsosaputro, J., Pauwels, L.L. y Chan, F. (Ed.). Perth, Australia, pp. 3412–3418.
- GOMARIZ-CASTILLO, F. y ALONSO-SARRÍA, F. (2013): *The 9th International R User Conference*. “An R script to model monthly climatic variables with GLM to be used in hydrological modeling in River Segura basin”. University of Castilla-La Mancha, Albacete, Castilla-La Mancha.
- GOMARIZ-CASTILLO, F., ALONSO-SARRÍA, F. y CABEZAS, F. (2017a): “Calibration and spatial modelling of daily ET<sub>0</sub> in semiarid areas using Hargreaves equation”. *Earth Science Information*, En prensa, p. 1–16.
- GOMARIZ-CASTILLO, F., ALONSO-SARRÍA, F. y CÁNOVAS-GARCÍA, F. (2017b): “Improving Classification Accuracy of Multi-Temporal Landsat Images by Assessing the Use of Different Algorithms, Textural and Ancillary Information for a Mediterranean Semiarid Area from 2000 to 2015”. *Remote Sensing*, vol. 9, nº 10, p. 1–23.
- GONG, Y., SHEN, Z., LIU, R., WANG, X. y CHEN, T. (2010): “Effect of Watershed Subdivision on SWAT Modeling with Consideration of Parameter Uncertainty”. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 15, p. 1070–1074.
- GRUSSON, Y., ANCTIL, F., SUVAGE, S., SÁNCHEZ PÉREZ, J.M. (2017): “Testing the SWAT Model with Gridded Weather Data of Different Spatial Resolutions”. *Water*, vol. 9, nº de artículo 54.
- HARGREAVES, G.H. y ALLEN, R.G. (2003): “History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce*, vol. 129, p. 53–63.

- HARGREAVES, G.H. y SAMANI, Z.A. (1985): "Reference crop evapotranspiration from temperature". *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 1, p. 96–99.
- JAJARMIZADEH, M., SIDEK, L.M., HARUN, S. y SALARPOUR, M. (2017): "Optimal Calibration and Uncertainty Analysis of SWAT for an Arid Climate". *Air, Soil and Water Research*, vol 10, p. 1–14.
- JHA, M., GASSMAN, P.W., SECCHI, S., GU, R. y ARNOLD, J. (2004): "Effect of watershed subdivision on swat flow, sediment, y nutrient predictions". *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 40, p. 811–825.
- KUMAR, M., BHATT, G. y DUFFY, C.J. (2009): "An efficient domain decomposition framework for accurate representation of geodata in distributed hydrologic models". *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 23, p. 1569–1596.
- LEGATES, D.R. y MCCABE, G.J. (1999): "Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation". *Water Resources*, vol. 35, p. 233–241.
- MALAGÒ, A., PAGLIERO, L., BOURAOUI, F. y FRANCHINI, M. (2015): "Comparing calibrated parameter sets of the SWAT model for the Scandinavian and Iberian peninsulas". *Hydrological Sciences Journal*, vol. 60, p. 949–967.
- MONTEITH, J.L. (1993): *The State and Movement of Water in Living Organisms. 19 Symposia of the Society for Experimental Biology*. "Evaporation and the environment". Cambridge Univ. Press. London, U.K., pp. 205–234.
- MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., VAN-LIEW, M.W., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D. y VEITH, T.L. (2007): "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations". *Transactions of the ASAE*, vol. 50, p. 885–900.
- MUKUNDAN, R., RADCLIFFE, D.E. y RISSE, L.M. (2010): "Spatial resolution of soil data and channel erosion effects on SWAT model predictions of flow and sediment". *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 65, p. 92–104.
- NASH, J.E. y SUTCLIFFE, J. V. (1970): "River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles". *Journal of Hydrology*, vol. 10, p. 282–290.
- NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R. y WILLIAMS, J.R. (2011): *Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2009*, Texas Water Resources Institute. Temple, Texas, pp. 618.
- O'CALLAGHAN, J.F. y MARK, D.M. (1984): "The extraction of drainage networks from digital elevation data". *Comp. Vision, Graphics and Image Processing*, vol. 28, p. 328–344.
- SAXTON, K. E. y RAWLS, W.J. (2006): "Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions". *Soil Science Society of America Journal*, vol. 70, p. 1569–1578.
- TEGEGNE, G., PARK, D.K y KIM, Y-O. (2017): "Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the Upper Blue Nile River Basin". *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 14, p. 49–66.
- TRIPATHI, M.P., RAGHUWANSHI, N.S. y RAO, G.P. (2006): "Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components". *Hydrological Processes*, vol. 20, p. 1137–1156.
- TUO, Y., DUAN, Z., DISSE, M. y CHIOGNA, G. (2016): "Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy)". *Science of The Total Environment*, vol. 573, p. 66–82.
- WILLIAMS, J.R. (1969): "Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients". *Transactions of ASAE*, vol. 12, p. 100–103.
- YANG, J., REICHERT, P., ABBASPOUR, K.C., XIA, J. y YANG, H. (2008): "Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China". *Journal of Hydrology*, vol. 358, p. 1–23.
- YUAN, Y., NIE, W. y SANDERS, E. (2014): *SEDHYD 2014 Joint Conference*. "Problems and Prospects of SWAT Model Application on an Arid/Semi-arid Watershed in Arizona". Reno, NV (US).
- ZAMBRANO-BIGIARINI, M. y ROJAS, R. (2013): "A model-independent Particle Swarm Optimisation software for model calibration". *Environmental Modelling & Software*, vol. 43, p. 5–25.