



Joaquín Melgarejo Moreno  
(Editor)



JOAQUÍN MELGAREJO MORENO (EDITOR)

# Congreso Nacional del Agua Orihuela

*Innovación y Sostenibilidad*



Coordinado por:  
Patricia Fernández Aracil



CAMPUSHABITAT5U



Instituto Estudios  
Económicos  
Provincia Alicante

© los autores, 2019  
© de esta edición: Universitat d'Alacant

ISBN: 978-84-1302-034-1

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado - electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

# LOS MODELOS HIDROLÓGICOS COMO SISTEMAS DE SOPORTE EN LA TOMA DE DECISIONES. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

**Antonio Jodar Abellan**

Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante

**Concepción Pla Bru**

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante

**Javier Valdés Abellán**

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante

## RESUMEN

Actualmente, las demandas hídricas se encuentran en continuo crecimiento lo que aumenta la presión, en cantidad y calidad, sobre los recursos hídricos disponibles a nivel global. Así mismo, la reducción proyectada de las aportaciones en régimen natural, consecuencia del cambio climático, supone un nuevo nivel de incertidumbre. Pese a errores todavía existentes, los modelos hidrológicos constituyen herramientas vitales para planificar y gestionar el recurso agua. Su correcta aplicación resulta esencial especialmente en áreas con elevado estrés hídrico (como las regiones áridas y semiáridas) en las que se identifican elevadas tasas de escasez y explotación intensiva de recursos hídricos. En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica exhaustiva de los principales modelos matemáticos aplicados a la hidrología a lo largo de las últimas décadas.

Así mismo, se analiza el conocido modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) ampliamente implementado, a nivel global, tanto en el ámbito científico como en el técnico (orientado éste último a la toma de decisiones relacionadas con la planificación hidrológica en numerosos países). Se trata por tanto de una utilización similar a la ocurrida en España con el modelo SIMPA (*Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación*) con el que se estiman variables hidrológico-ambientales en cada demarcación hidrográfica, las cuales son posteriormente recopiladas en los planes hidrológicos de cuenca de cada ciclo de planificación en particular (ciclo actual: 2015-2021). Por último, el trabajo concluye enunciando las principales problemáticas asociadas a la implementación de tales modelos en regiones áridas y semiáridas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel global, los cambios demográficos, el aumento en el nivel de vida, las políticas de ordenación del territorio y de uso y gestión del agua suponen los principales elementos que incrementan la presión sobre los suministros de agua locales, nacionales y regionales necesarios para el regadío, la producción energética, los usos industriales y domésticos, y el medio ambiente (Abbaspour *et al.* 2015). La cantidad y calidad de recursos hídricos, superficiales y subterráneos (agua azul), se encuentran considerablemente amenazadas en regiones con elevado estrés hídrico, a menudo, de origen agrícola (Wada *et al.* 2012; Custodio *et al.* 2016). En consecuencia, los reservorios de agua dulce han disminuido, lo que acarrea impactos ambientales negativos sobre los ecosistemas asociados. A su vez, la rapidez e incertidumbre con la que varía el suministro del agua dulce genera una importante indecisión política, caso por ejemplo de los trasvases en España (Molina y Melgarejo, 2015). Al mismo tiempo, el cambio climático aporta un nuevo nivel de incertidumbre en los suministros de agua dulce y en los principales sectores de uso del agua como la agricultura y la energía. Dicha problemática incrementará las incertidumbres sobre las futuras demandas del agua (Green *et al.* 2011; Valdes-Abellan *et al.* 2018), lo que, junto al continuo aumento en la frecuencia y duración de las sequías, provocará que las sociedades amplíen su vulnerabilidad ante un extenso elenco de riesgos asociados con el suministro inadecuado del agua en cantidad y/o calidad (Wanders y Van-Lanen, 2015).

Los modelos matemáticos aplicados a la Hidrología (modelos hidrológicos) constituyen herramientas vitales con las que planificar el uso y gestión sostenible de los recursos hídricos, permitiendo satisfacer, en la medida de lo posible, las diferentes demandas (agrícolas, urbanas, industriales, ambientales, etc. Praskievicz y Chang, 2009; Abbaspour *et al.* 2015). En las últimas décadas, debido en parte a los desfavorables escenarios de cambio global, sequías y escasez, la relación entre los citados modelos matemáticos y la Hidrología se ha incrementado dando lugar a dos disciplinas dentro de la misma: la Modelización Hidrológica y la Planificación Hidrológica (Neitsch *et al.* 2011; Cabezas, 2015). Hoy en día, el número y la tipología de modelos desarrollados son elevados. Por ello, resulta necesario que sean diferenciados y clasificados. Cabezas (2015) establece 16 tipologías de modelos hidrológicos: analógicos vs digitales, continuos vs discretos, dinámicos vs estáticos, determinísticos vs estocásticos, de parámetros agregados vs de parámetros distribuidos, descriptivos vs conceptuales, estructurados vs de caja negra, y de suceso vs de simulación continua. Existen además tipologías mixtas entre los anteriores, como los modelos semidistribuidos, intermedios entre agregados y distribuidos, o los híbridos descriptivos-conceptuales. Pese a la diversidad de tipologías enunciadas, tres son probablemente las características básicas a partir de las cuales se pueden clasificar los modelos hidrológicos: i) su finalidad u objetivo, es decir, las variables cuyo comportamiento se pretende modelar; ii) su escala, resolución o parametrización espacial (modelos agregados, semidistribuidos y distribuidos); iii) su escala o alcance temporal (modelos de episodio, y de simulación continua: Praskievicz y Chang, 2009; Cabezas, 2015).

En este trabajo se realiza una revisión de la literatura existente en cuanto a Modelización Hidrológica y los principales *softwares* desarrollados hasta la fecha. Seguidamente, se enuncian los principales inconvenientes derivados de la implementación de tales modelos en regiones áridas y semiáridas.

## **2. EVOLUCIÓN DE LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA Y HERRAMIENTAS DESARROLLADAS**

La modelización hidrológica ha experimentado un desarrollo extraordinario en las últimas décadas. Desde los primeros modelos conceptuales, de los años 60 del siglo XX hasta la actualidad, no solo el número de modelos desarrollados resulta incontable, sino que sus tipologías se han incrementado, sus aplicaciones prácticas se han extendido, y la propia teoría subyacente a la modelación ha sufrido avances sustanciales (Cabezas, 2015). En la década de los 70, se publicaron los primeros estudios de modelización que estimaban la variación de los recursos hídricos a nivel mundial (Lvovitch, 1973; Baumgartner y Reichel, 1975; Korzoun *et al.* 1978, etc.). En términos generales, las estimaciones de recursos hídricos, tanto nacionales como mundiales, se han centrado en:

- La generalización de datos observados y su incorporación en la red hidrológica mundial (Shiklomanov, 2000).
- Los modelos de circulación general o modelos climáticos globales (GCMs). Destacan Oki *et al* (2001) donde estiman la disponibilidad mundial de recursos hídricos a partir de la escorrentía global anual. Para ello aplican modelos de la superficie terrestre utilizando la técnica de vías integradoras de escorrentía total (*total runoff integrating pathways* o *TRIP*) a una resolución espacial global de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Así mismo, Hanasaki *et al* (2013) presentan una evaluación mundial de la escasez y disponibilidad de agua, para el siglo XXI, bajo diferentes escenarios socioeconómicos compartidos (*shared socio-economic pathways* o *SSPs*). Para ello relacionan dichos escenarios con 3 modelos climáticos globales (MIROC, HadGEM2 y GFDL). Cada modelo es además aplicado en 3 de los 4 escenarios de cambio global establecidos por el CMIP5 (RCP2.6, 4.5 y 8.5). El periodo de estudio abarca las series 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. Estas proyecciones, climáticas y económicas, son a su vez incorporadas en el modelo hidrológico global, de parámetros distribuidos, denominado HO8. El modelo cuenta con una resolución temporal diaria y una malla espacial de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Se trata de un metamodelo integrado por 6 submodelos (Hanasaki *et al.* 2008a, b). Los autores utilizan también un índice con el que estimar la escasez de recursos hídricos en función de las aguas superficiales disponibles y la demanda ratio (*Cumulative Abstraction to Demand ratio* o *CAD*: Hanasaki *et al.* 2008b).
- Los modelos hidrológicos. Yates (1997) propone un modelo mensual para estimar la humedad del suelo testado en Europa y África. Advierte que las características

regionales de la escorrentía se pierden con una agregación espacial de los datos superior a  $1^\circ \times 1^\circ$ . Señala, además, la dificultad de incorporar las proyecciones de cambio global en modelos hidrológicos de recursos hídricos debido a: 1-La escasez de mediciones reales con las que corregir (calibrar) los resultados de estos, y 2-La variabilidad temporal y espacial de las aguas superficiales y subterráneas. Arnell (1999a) presenta el modelo hidrológico Macro-PDM (*Probability-Distributed Model*) diseñado a macro-escala para simular la escorrentía procedente de variables climáticas en un gran dominio geográfico, en este caso Europa. Se trata de un modelo distribuido que opera a escala diaria sobre las principales variables del balance hídrico. En el modelo, la capacidad de almacenamiento de la humedad del suelo recibe un papel primordial puesto que, a diferencia de las restantes variables, ésta varía estadísticamente (celda a celda) a lo largo de toda la cuenca modelada. El modelo fue inicialmente implementado con una resolución espacial de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (aproximadamente  $2000 \text{ km}^2$ ) debido a la resolución espacial entonces disponible para las variables climáticas de entrada (*inputs*). En Arnell (1999b), el autor acopla 2 GCMs (HadCM2 y HadCM3), bajo los escenarios del 2º informe del IPCC, al modelo Macro-PDM. Modeliza, en este caso, la variación de la escorrentía superficial, a nivel global, hasta 2050. Vörösmarty *et al* (2000) desarrollan y aplican el modelo hidrológico de escala global WBM (*Water Balance Model*) para estimar la variación de la escorrentía mundial, presente y futura, con una resolución espacial de  $30^\circ \times 30^\circ$ . Acoplan dicho modelo a 2 GCMs (CGCM1 y HadCM2). Establecen además numerosos índices con los que determinar la demanda hídrica mundial, la relación del crecimiento poblacional con ésta, etc. Junto con los anteriores, destaca el modelo hidrológico VIC (*Variable Infiltration Capacity*) originalmente desarrollado por Liang *et al* (1994). VIC es un modelo hidrológico macro-escalar, de parámetros semidistribuidos, capaz de resolver balances de agua y energía completos. Actualmente, opera a escala diaria y subdiaria con una resolución espacial mayor de  $1 \text{ km}^2$ . En las últimas décadas, el modelo ha sido ampliamente aplicado y desarrollado, habiéndose acoplado también con modelos de la superficie terrestre (LSMs) y con numerosos GCMs<sup>1</sup>.

Alcamo *et al* (2003) desarrollan y aplican a escala global el modelo WaterGAP-2 (*Water-Global Assessment and Prognosis*). Se trata de un modelo distribuido que opera a escala diaria y con una resolución espacial de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . El modelo presenta dos componentes principales: 1-un modelo global de uso del agua y 2-un modelo hidrológico global. Inicialmente fue testado en 10.000 ríos de primer orden, incluidos en 3.565 cuencas con áreas de drenaje mayores de  $2500 \text{ km}^2$ . Así mismo, fue calibrado con descargas (caudales) anuales medidas en 724 estaciones de aforo. Gerten *et al* (2004) presentan el modelo LPJ (*Lund-Potsdam-Jena model*). Este modelo “biogeográfico-biogeoquímico” estima la influencia directa de la vegetación, y de los cambios en la cubierta vegetal, sobre el balance hídrico a escala global. En el modelo recibe especial atención el ciclo del carbono tanto en la componente atmosférica como terrestre. Opera a escala mensual y diaria y a una resolución espacial de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Widén-Nilsson *et al*

---

<sup>1</sup>Fuente: <http://vic.readthedocs.io/en/master/>.

(2007) muestran el modelo global WASMOD-M (*Water and Snow Balance Modeling System for macro-scale*). El modelo, de parámetros distribuidos, cuenta con una resolución espacial de 0.5° x 0.5° y variables climáticas a nivel mensual (precipitación, temperatura, presión del vapor de agua, etc.). La relevancia del modelo, con respecto a los anteriores, radica en que proporciona una estimación mundial del balance hídrico, con simulaciones robustas de la escorrentía, tanto en cuencas hidrológicas calibradas como en las no calibradas. En éstas últimas, la estimación de los parámetros hidrológicos propios de las cuencas, se realizó a partir de la regionalización estadística (“traslación”) de los valores obtenidos para los mismos en cuencas hidrológicas contiguas. Pese a los óptimos resultados obtenidos, los autores indican que el progreso de la modelación hidrológica dependerá, en las próximas décadas, de la mejora en las bases de datos globales de precipitación, temperatura, escorrentía, etc. dado que el avance computacional en los citados modelos ya se ha producido. Van Beek *et al* (2011) desarrollan el modelo global PCR-GLOBWB (*PCRaster Global Water Balance model*). El modelo calcula para cada celda del territorio, y para la escala temporal seleccionada, el almacenamiento de agua en dos columnas verticales de suelo, con unas profundidades máximas de 0.3 y 1.2 m, y en un depósito de aguas subterráneas situado bajo éstas. Los autores estiman, entre otras variables, la disponibilidad mundial de agua azul y agua verde para el periodo 1958-2001. La calibración de las descargas (caudales) del modelo se realiza a partir de mediciones reales. En cambio, la evapotranspiración potencial (ETP) simulada es contrastada con la obtenida a nivel mundial en el “reanálisis ERA-40” considerada como ETP de referencia. Actualmente, este modelo distribuido presenta una malla espacial de 10 x 10 km y una resolución temporal diaria<sup>2</sup>.

Los modelos anteriores presentan características comunes. En general, se trata de modelos lluvia-escorrentía que estiman el balance hídrico a nivel global (modelos macro-escalares), de parámetros semidistribuidos o distribuidos, con una resolución temporal mensual y espacial de 0.5° x 0.5° (alrededor de 55.7 km en los modelos ráster). Las estimaciones de la escorrentía global realizadas con diversos GCMs, por ejemplo Oki *et al* (2001), suelen mostrar escasa precisión debido a su baja resolución espacial, una representación insuficiente de los procesos hídricos del suelo, y en algunos casos falta de calibración frente a mediciones reales. Estimaciones de mayor precisión, en términos de procesos hidrológicos, se consiguieron gracias a la aplicación de los modelos hidrológicos macro-escalares mencionados anteriormente. No obstante, dichos modelos presentan carencias debido a: 1-La simplificación, por otro lado necesaria, de los procesos del ciclo hidrológico; 2-La calibración y validación realizadas con mediciones reales a escala anual (recomendable escalas mensuales y diarias); 3-La aplicación de factores correctores a las descargas modeladas que conducen a un balance hídrico inconsistente; y 4-La escasa cuantificación de la incertidumbre existente en las simulaciones de los modelos (análisis de sensibilidad), a menudo considerable en los modelos distribuidos. Por estas razones, la filosofía de la modelización actual exige que los modelos sean descritos por completo, y que los procesos de calibración, validación y

---

<sup>2</sup>Fuente: <http://www.globalhydrology.nl/models/pcr-globwb-2-0/>.



análisis de sensibilidad sean incluidos en la modelación (Abbaspour *et al.* 2015; Cabezas, 2015).

En virtud de lo enunciado, probablemente de los anteriores modelos, el más sofisticado sea WaterGAP-2 (Alcamo *et al.* 2003). El modelo combina un modelo global de uso del agua y un modelo hidrológico global, con los que estima la escorrentía superficial y la recarga de acuíferos basándose en un balance hídrico diario del suelo y de la cubierta forestal. El modelo fue calibrado en 724 estaciones, distribuidas por el globo, ajustando el coeficiente de escorrentía y, en caso necesario, aplicando dos factores de corrección especialmente en regiones de clima nival, semiárido y árido (Abbaspour *et al.* 2015).

En líneas anteriores se han mostrado modelos lluvia-escorrentía macro-escalares aplicados a nivel mundial. No obstante, se han desarrollado numerosas herramientas con mayor resolución espacial (menor tamaño de celda) aplicadas a dominios geográficos más restringidos como escalas continentales, nacionales o de cuenca hidrográfica. Es el caso de los conocidos modelos lluvia-escorrentía con resolución temporal mensual, diaria y subdiaria: SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*: Arnold *et al.* 1998)<sup>3</sup> y HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*: Charley *et al.* 1995)<sup>4</sup>. Ambos son modelos semidistribuidos donde la cuenca completa se desagrega en subcuencas o unidades hidrográficas, irregulares y de tamaños variables (Cabezas, 2015). Asimismo, especial mención merece el modelo mensual de Thornthwaite (1948), dado que ha supuesto el planteamiento del que parten numerosos modelos conceptuales de balance hídrico. Al igual que los anteriores, se trata de un modelo de balance, aunque construido con una base conceptual y agregada (no semidistribuida). Ha sido objeto de diversas modificaciones. Destaca la introducida en Thornthwaite y Mather (1957).

Por otro lado, al margen de los modelos lluvia-escorrentía, se han desarrollado infinidad de herramientas. Así por ejemplo, relacionado directamente con las aguas subterráneas destaca MODFLOW (*MODular three-dimensional finite-difference ground-water FLOW model*). Se trata de un modelo distribuido de flujo subterráneo en diferencias finitas y en tres dimensiones presentado inicialmente en McDonald y Harbaugh (1984). Hoy en día, propiedad del Servicio Geológico de los Estados Unidos<sup>5</sup>. En cuanto a la modelación de inundaciones originadas por las crecidas de los cursos fluviales, destaca HEC-RAS (*Hydrological Engineering Center-River Analysis System*: Brunner y Bonner, 1994) capaz de simular múltiples variables además de las inundaciones<sup>6</sup>. Con respecto a la Planificación Hidrológica destacan los modelos MODSIM, SIM-V, WEAP, HEC-PRM, etc. Una revisión de los mismos se encuentra en Cabezas (2015).

Por último, en España se han desarrollado numerosas herramientas al respecto. Entre los modelos de balance hídrico destaca Témez (1977). Se trata de un modelo agregado

---

<sup>3</sup>Fuente: <http://swat.tamu.edu/>.

<sup>4</sup>Fuente: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.

<sup>5</sup>Fuente: <https://water.usgs.gov/ogw/modflow/>.

<sup>6</sup>Fuente: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.

conceptual mensual, determinístico y de parámetros ajustados. Especialmente relevante resulta la versión distribuida del mismo denominada SIMPA (*Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación*: MIMAM, 2000) que simula Témez a través del sistema de información geográfica GRASS. Actualmente, las aportaciones de todas las cuencas hidrográficas en España, junto con las principales variables hidrológico-ambientales incluidas en los planes hidrológicos de cuenca (temperatura, precipitación, ETP, escorrentía superficial y subterránea, recarga de acuíferos, etc.), son modeladas con SIMPA. Samper *et al* (2007) presentan los modelos de balance VISUAL-BALAN (modelo agregado) y su sucesor GIS-BALAN. Éste último, semidistribuido y acoplado a un SIG, resuelve el balance hidrológico diario en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero. Posee una estructura modular y orientada a objetos. Así mismo, destaca la aplicación informática RENATA (*REcarga NATural a los Acuíferos*) que calcula la recarga de acuíferos a partir de procesos ocurridos en el suelo. Permite introducir dotaciones de riego discretizadas y distribuidas en el espacio y en el tiempo, o calibrar los resultados acoplando un modelo de flujo<sup>7</sup>. Con respecto al análisis y optimización técnico-económica de sistemas de recursos hídricos (Planificación Hidrológica) destaca el *software* AQUATOOL y los entornos de trabajo que éste incluye: OPTIGES y SIMGES (Andreu *et al.* 1995, 1996; Solera *et al.* 2007). Actualmente, SIMGES es utilizado para diseñar estrategias de gestión, garantías de suministro, etc. de todas las cuencas hidrológicas en España, cuyos resultados son incluidos en los planes de cuenca.

En la Tabla 1 se muestra una recopilación de los modelos presentados y su repercusión en términos de investigación científica.

---

<sup>7</sup>Fuente: [http://www.igme.es/productos\\_descargas/aplicaciones/renata.htm](http://www.igme.es/productos_descargas/aplicaciones/renata.htm).

Tabla 1. Resumen de las herramientas presentadas. Fecha de consulta en *Web of Science* (WOS): 12/09/2017.

<b>Autores (año)</b>	<b>Modelo hidrológico</b>	<b>Revista Científica y Otros (Cap.libro, C.Congreso...)</b>	<b>Cuartil en WOS (Ind.Impacto últimos 5 años)</b>	<b>Citado por</b>
Thornthwaite (1948)	Modelo hidrológico mensual	Geographical Review	Q1 (4,49)	40
Thornthwaite y Mather (1957)	Modelo hidrológico mensual	Cap.libro (Ed: Centerton)	-	-
Témez (1977)	Modelo hidrológico mensual	Informe (ASINEL)	-	-
McDonald y Harbaugh (1984)	MODular three-dimensional finite-difference groundwater FLOW model (MODFLOW)	Informe (U.S. Geological Survey)	-	-
Brunner y Bonner (1994)	Hydrological Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS)	C.Congreso (ASCE National Conference on Hydraulic Engineering)	-	-
Liang <i>et al</i> (1994)	Variable Infiltration Capacity (VIC)	Journal of Geophysical Research-Atmospheres	Q1 (3,65)	1.145
Charley <i>et al</i> (1995)	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)	C.Congreso (ASCE 2 <sup>nd</sup> Congress on Computing in Civil Engineering)	-	-
Andreu <i>et al</i> (1996)	AQUATOOL (Optiges y Simges)	Journal of Hydrology	Q1 (3,88)	162
Yates (1997)	Modelo hidrológico mensual	Journal of Hydrology	Q1 (3,88)	37
Arnold <i>et al</i> (1998)	Soil and Water Assessment Tool (SWAT)	Journal of the American Water Resources Association	Q2 (2,23)	2.391
Arnell (1999a)	Probability-Distributed Model (Macro-PDM)	Journal of Hydrology	Q1 (3,88)	140

<b>Autores (año)</b>	<b>Modelo hidrológico</b>	<b>Revista Científica y Otros (Cap.libro, C.Congreso...)</b>	<b>Cuartil en WOS (Ind.Impacto últimos 5 años)</b>	<b>Citado por</b>
MIMAM (2000)	Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación (SIMPA)	Libro (Ed: Ministerio de Medio Ambiente)	-	-
Vörösmarty <i>et al</i> (2000)	Water Balance Model (WBM)	Science	Q1 (34,92)	1.422
Oki <i>et al</i> (2001)	Total Runoff Integrating Pathways (TRIP)	Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques	Q1 (2,16)	99
Alcamo <i>et al</i> (2003)	Water-Global Assessment and Prognosis (WaterGAP-2)	Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques	Q1 (2,16)	310
Gerten <i>et al</i> (2004)	Lund-Potsdam-Jena model (LPJ)	Journal of Hydrology	Q1 (3,88)	425
Samper <i>et al</i> (2007)	VISUAL-BALAN y GIS-BALAN	Estudios de la Zona No Saturada del Suelo	-	-
Widén- Nilsson <i>et al</i> (2007)	Water and Snow Balance Modeling System for macro- scale (WASMOD-M)	Journal of Hydrology	Q1 (3,88)	75
Hanasaki <i>et al</i> (2008a, b)	HO8	Hydrology and Earth System Sciences	Q1 (4,54)	133
Van Beek <i>et al</i> (2011)	PCRaster Global Water Balance model (PCR-GLOBWB)	Water Resources Research	Q1 (4,42)	90

### **3. EL MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT)**

En este apartado se explica el modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) dado que en la actualidad se trata del modelo hidrológico implementado en mayor medida, no sólo desde un punto de vista científico (presenta un elevado número de citas en la literatura científica: Tabla 1), sino también desde una panorámica técnica puesto que numerosas autoridades encargadas de la gestión del recurso agua, en Estados Unidos entre otros países, aplican el citado modelo. Ello es debido a que SWAT, desde su

origen en 1998 y hasta la actualidad, ha sido desarrollado gracias a una estrecha colaboración científica (destacan las siguientes referencias: Arnold *et al.* 1998, Neitsch *et al.* 2011, Arnold *et al.* 2012, Winchell *et al.* 2013, Abbaspour *et al.* 2015, etc.) y administrativa (en la elaboración de SWAT han participado, entre otras, las siguientes agencias federales: *US Environmental Protection Agency, US Natural Resources Conservation Service, US National Oceanic and Atmospheric Administration, Bureau of Indian Affairs, Wisconsin Department of Natural Resources, Texas State Office*, etc.). Se trata por tanto de un modelo ampliamente utilizado en la toma de decisiones, relacionadas con la Planificación Hidrológica, al igual que sucede con SIMPA en España.

El *software* en código abierto SWAT es un modelo lluvia-escorrentía, de parámetros semidistribuidos, capaz de simular numerosos procesos físicos a escala temporal continua (anual, mensual, diaria y subdiaria). Su objetivo principal es predecir la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el impacto de prácticas de gestión agrícola sobre la calidad del agua (nutrientes y pesticidas). Presenta una precisión razonable en cuencas de gran tamaño, no aforadas (calibradas), con variedad en el relieve, en tipos y usos del suelo, etc. Su elevada resolución espacial permite que sea implementado tanto a escala continental como de cuenca hidrológica (Arnold *et al.* 1998, 2012). No obstante, como cualquier otro modelo, el uso de SWAT a gran escala requiere simplificaciones importantes. Gassman *et al.* (2007, 2010, 2014) y Abbaspour *et al.* (2015) muestran múltiples aplicaciones de SWAT a escala continental y de cuenca en Europa, África, Asia, EEUU, etc. La componente hidrológica de SWAT permite calcular explícitamente los diferentes elementos del balance hídrico y, en consecuencia, los recursos hídricos (agua azul, verde, etc.) a nivel incluso de subcuenca. Al margen de la componente hidrológica en sentido estricto, gracias al desarrollo actual del modelo, SWAT puede ser utilizado en: la toma de decisiones frente a diferentes alternativas de gestión de recursos hídricos; evaluación de la contaminación por fuentes no puntuales incluso en grandes cuencas fluviales; predecir el impacto de la agricultura sobre los sedimentos, compuestos químicos y recursos hídricos de una cuenca con diferentes condiciones de gestión, tipos y usos de suelo durante largos períodos de tiempo, etc. (Neitsch *et al.* 2011; Abbaspour *et al.* 2015).

#### **4. PROBLEMAS DE LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA EN REGIONES ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS**

En el contexto global, las regiones áridas y semiáridas presentan elevadas tasas de escasez y explotación intensiva de recursos hídricos (Green *et al.* 2011; Wada *et al.* 2012; Custodio *et al.* 2016; Greve *et al.* 2018; Jodar-Abellan *et al.* 2017, 2018), por lo que su correcta cuantificación resulta esencial. Sin embargo, dichas áreas muestran una marcada variabilidad pluviométrica traducida, en los modelos de conversión lluvia-escorrentía, en una elevada fluctuación de los caudales aforados especialmente a escala diaria y subdiaria. Son frecuentes, por ello, los periodos de sequías donde las

formaciones acuíferos suponen la única fuente de suministro hídrico “de origen estrictamente natural”, al tiempo que aportan el caudal base en los cursos fluviales (Green *et al.* 2011; Custodio *et al.* 2016). Para representar correctamente la variabilidad natural intrínseca a dichas regiones, la escala temporal en los modelos hidrológicos de simulación continua ha de ser necesariamente diaria y/o subdiaria (Cabezas, 2015). No obstante, en dichas regiones los modelos hidrológicos son sometidos a análisis de sensibilidad e incertidumbre (calibración y validación) habitualmente con registros de caudal (aforos) a escala mensual con el fin de disminuir los “picos” en la serie de caudal observado y poder obtener en consecuencia una adecuada respuesta hidrológica (correcto ajuste estadístico en calibración y validación) por parte del modelo. De este modo, los parámetros hidrológicos cuyo comportamiento es corregido, por modelización hidrológica inversa gracias a los análisis de sensibilidad e incertidumbre, muestran un sesgo hacia condiciones hidrológicas estables. Dejan de proporcionar por tanto una respuesta hidrológica aceptable ante eventos de fuertes lluvias, escala subdiaria, muy habituales en regiones áridas y semiáridas (Rozalis *et al.* 2010; Nguyen *et al.* 2014; Jodar-Abellan *et al.* 2019).

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado una revisión bibliográfica exhaustiva de la literatura científica existente en cuanto a modelación hidrológica. Debido a su elevada aplicación científico-técnica a nivel global, probablemente destaca sobre los demás el conocido modelo SWAT (procedente de EEUU). Así mismo, dado que en términos genéricos los modelos hidrológicos presentan determinadas fuentes de incertidumbre (errores) en sus estimaciones (simulaciones), se considera necesario que tanto en trabajos científicos como técnicos se apliquen diversos modelos (evidentemente de la misma naturaleza) con el fin de reducir la incertidumbre o sesgo proporcionado por los resultados de un único modelo. En este sentido cabe destacar que, en España, la modelación lluvia-escorrentía con la que se estiman diversas variables hidrológico-ambientales como Evapotranspiración Potencial (ETP), escorrentía total, infiltración, recarga de acuíferos, etc. se realiza únicamente con el modelo SIMPA. Los resultados del citado modelo son recopilados en los planes hidrológicos de cuenca que son examinados con posterioridad por las instituciones “europeas” competentes en la materia. Por lo tanto, ¿no sería oportuno realizar la citada modelación con otras herramientas además de SIMPA?, ¿Acaso SIMPA no presenta errores e incertidumbres en sus resultados? Cabe destacar que en ciencias totalmente relacionadas con la hidrología, como la climatología, la elaboración de informes para responsables políticos se realiza con resultados aportados habitualmente por *ensembles* de modelos climáticos globales, regionales, etc.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se incluye en las actividades de difusión científica realizadas desde la Cátedra del Agua de la Universidad de Alicante (<https://catedradelaguaua.org/>). Así mismo, esta contribución se enmarca parcialmente en el proyecto GRE17-12 de dicha universidad. Adicionalmente, el primer autor agradece la financiación recibida del Programa Nacional de Formación de Profesorado Universitario (FPU) concedida por el Ministerio Español de Educación, Cultura y Deporte (MECD). Del mismo modo, los autores agradecen las sugerencias realizadas por los revisores anónimos, cuyos comentarios contribuyeron a mejorar el manuscrito.

## REFERENCIAS

- ABBASPOUR, K. C., ROUHOLAHNEJAD, E., VAGHEFI, S., SRINIVASAN, R., YANG, H., and KLOVE, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*. 524, 733-752. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027.
- ALCAMO, J., DÖLL, P., HENRICH, T., KASPAR, F., LEHNER, B., RÖSCH, T., and SIEBERT, S. (2003). Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 48 (3), 317-337. DOI: 10.1623/hysj.48.3.317.45290.
- ANDREU, J., CAPILLA, J., SANCHIS, E., and SANCHEZ, S. (1995). *AQUATOOL. Sistema Soporte de Decisión para la Planificación de Recursos hídricos*. Serv.Publs. Univ.Politécnica de Valencia. Disponible en: [https://www.upv.es/aquatool/es/historia\\_es.html](https://www.upv.es/aquatool/es/historia_es.html).
- ANDREU, J., CAPILLA, J., and SANCHIS, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*. 177 (3-4), 269-291. DOI: 10.1016/0022-1694(95)02963-X.
- ARNELL, N.W. (1999a). A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. *Journal of Hydrology*. 217 (3-4), 314-335. DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00023-2.
- ARNELL, N.W. (1999b). Climate change and global water resources. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 9, 31-49. DOI: 10.1016/S0959-3780(99)00017-5.
- ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., SRINIVASAN, R., WILLIAMS, J.R., HANEY, E.B., and NEITSCH, S.L. (2012). *Input/Output Documentation. Version 2012*. Texas Water Resources Institute. TR-439. 650 pp. Disponible en: <http://swat.tamu.edu/documentation/2012-io/>

- ARNOLD, J.G., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R.S., and WILLIAMS, J.R. (1998). Large área hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (1), 73-89. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
- BAUMGARTNER, A. and REICHEL, E. (1975). *The World Water Balance: Mean Annual Global, Continental and Maritime Precipitation, Evaporation and Run-Off*. Ed: Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. The Netherlands. 179 pp. ISBN: 0-444-99858-6. Disponible en: <https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v1y1976i1p100-101.html>.
- BRUNNER, G.W. and BONNER, V.R. (1994). HEC River Analysis System (HEC-RAS). *ASCE National Conference on Hydraulic Engineering, Buffalo, New York*. 16 pp. US Army Corps of Engineers-Hydrologic Engineering Center. Disponible en: [http://www.hec.usace.army.mil/publications/\(TP-147\)](http://www.hec.usace.army.mil/publications/(TP-147)).
- CABEZAS, F. (2015). *Análisis Estructural de Modelos Hidrológicos y de Sistemas de Recursos Hídricos en Zonas Semiáridas*. Tesis Doctoral. Univ.Murcia. 290 pp. Disponible en: <https://digitum.um.es/xmlui/handle/10201/48218>.
- CHARLEY, W., PABST, A. and PETERS, J. (1995). The Hydrologic Modeling System (HEC-HMS): Design and Development Issues. *ASCE 2<sup>nd</sup> Congress on Computing in Civil Engineering, Atlanta, Georgia*. 16 pp. US Army Corps of Engineers-Hydrologic Engineering Center. Disponible en: [http://www.hec.usace.army.mil/publications/\(TP-149\)](http://www.hec.usace.army.mil/publications/(TP-149)).
- CUSTODIO, E., ANDREU-RODES, J.M., ARAGÓN, R., ESTRELA, T., FERRER, J., GARCÍA-ARÓSTEGUI, J.L., MANZANO, M., RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, L., SAHUQUILLO, A. and DEL VILLAR, A. (2016). Groundwater intensive use and mining in south-eastern peninsular Spain: Hydrogeological, economic and social aspects. *Science of the Total Environment*, 559 (1), 302-316. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.107.
- GASSMAN, P.W., REYES, M.R., GREEN, C.H., and ARNOLD, J.G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications and Future Research Directions. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*. 50 (4), 1211-1250. DOI: 10.13031/2013.23637.
- GASSMAN, P.W., SADEGHI, A.M., and SRINIVASAN, R. (2014). Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *Journal of Environmental Quality*, 43, 1-8. DOI: 10.2134/jeq2013.11.0466.
- GASSMAN, P.W., WILLIAMS, J.R., WANG, X., SALEH, A., OSEI, E., HAUCK, L.M., IZAURRALDE, R.C. and FLOWERS, J.D. (2010). The Agricultural Policy/Environmental Extender (APEX) Model: an Emerging Tool for Landscape and Watershed Environmental Analyses. *Transactions of the ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 53 (3), 711-740.



- GERTEN, D., SCHAPHOFF, S., HABERLANDT, U., LUCHT, W. and SITCH, S. (2004). Terrestrial vegetation and water balance-hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology*, 286 (1-4), 249-270. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.09.029.
- GREEN, T.R., TANIGUCHI, M., KOOI, H., GURDAK, J.J., ALLEN, D.M., HISCOCK, K.M., TREIDEL, H. and AURELI, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405 (3), 532-560. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.05.002.
- GREVE, P., KAHIL, T., MOCHIZUKI, J., SCHINKO, T., SATOH, Y., BUREK, P., FISCHER, G., TRAMBEREND, S., BURTSCHER, R., LANGAN, S., and WADA, Y. (2018). Global assessment of water challenges under uncertainty in water scarcity projections. *Nature Sustainability*, 1, 486-494. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0134-9>.
- HANASAKI, N., FUJIMORI, S., YAMAMOTO, T., YOSHIKAWA, S., MASAKI, Y., HIJIOKA, Y., KAINUMA, M., KANAMORI, Y., MASUI, T., TAKAHASHI, K., and KANAE, S. (2013). A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways—Part 2: Water availability and scarcity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (7), 2393-2413. DOI: 10.5194/hess-17-2375-2013.
- HANASAKI, N., KANAE, S., OKI, T., MASUDA, K., MOTOYA, K., SHIRAKAWA, N., SHEN, Y., and TANAKA, K. (2008a). An integrated model for the assessment of global water resources-Part 1: Model description and input meteorological forcing. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12 (4), 1007-1025. DOI: 10.5194/hess-12-1007-2008.
- HANASAKI, N., KANAE, S., OKI, T., MASUDA, K., MOTOYA, K., SHIRAKAWA, N., SHEN, Y., and TANAKA, K. (2008b). An integrated model for the assessment of global water resources-Part 2: Applications and assessments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12 (4), 1027-1037. DOI: 10.5194/hess-12-1027-2008.
- JÓDAR-ABELLÁN, A., ALBALADEJO-GARCÍA, J.A. and PRATS-RICO, D. (2017). Artificial groundwater recharge. Review of the current knowledge of the technique. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30 (1), 85-96. Disponible en: [http://www.sociedadgeologica.es/archivos/REV/30\(1\)/RSGE\\_30\(1\)\\_art7.pdf](http://www.sociedadgeologica.es/archivos/REV/30(1)/RSGE_30(1)_art7.pdf).
- JODAR-ABELLAN, A., RUIZ, M., and MELGAREJO, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35 (3), 240-253. <http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564>.
- JODAR-ABELLAN, A., VALDES-ABELLAN, J., PLA, C., and GOMARIZ-CASTILLO, F. (2019). Impact of land use changes on flash flood prediction using a sub-daily SWAT model in five Mediterranean ungauged watersheds (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 657, 1578-1591. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.034>.

- KORZOUN, V.I., SOKOLOV, A.A., BUDYKO, M.I., VOSKRESENSKY, K.P., KALININ, G.P., KONOPLYANSTEV, A.A., KOROTKEVICH, E.S., KUZIN, P.S., and LVOVICH, M.I. (Eds.). (1978). *World Water Balance and Water Resources of the Earth*. UNESCO. Paris. 663 pp. Disponible en: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF7900588>.
- LIANG, X., LETTENMAIER, D.P., WOOD, E.F., and BURGESS, S.J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 99 (7), 14415-14428. DOI: 10.1029/94JD00483.
- LVOVITCH, M.I. (1973). The global water balance. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 54 (1), 28-53. DOI: 10.1029/EO054i001p00028
- MCDONALD, M.G., and HARBAUGH, A.W. (1984). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey. 539 pp. Disponible en: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr83875>.
- MIMAM. (2000). *Libro Blanco del Agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. ISBN: 84-8320-128-3. Disponible en: <http://hispagua.cedex.es/node/66958>.
- MOLINA, A., and MELGAREJO, J. (2015). Water policy in Spain: seeking a balance between transfers, desalination and wastewater reuse. *International Journal of Water Resources Development*, 32 (5), 781-798. DOI: 10.1080/07900627.2015.1077103.
- NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., and WILLIAMS, J.R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2009*. Texas A&M University System. Texas Water Resources Institute Technical Report (406). 647 pp. Disponible en: <http://swat.tamu.edu/documentation/>.
- NGUYEN, C.C., GAUME, E., and PAYRASTRE, O. (2014). Regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events at ungauged sites: further developments and validations. *Journal of Hydrology*, 508, 385-396. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.058>.
- OKI, T., AGATA, Y., KANAE, S., SARUHASHI, T., YANG, D., and MUSIAKE, K. (2001). Global assessment of current water resources using total runoff integrating pathways. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 46 (6), 983-995. DOI: 10.1080/02626660109492890.
- PRASKIEVICZ, S., and 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. DOI: 10.1177/0309133309348098.
- ROZALIS, S., MORIN, E., YAIR, Y., and PRICE, C. (2010). Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions. *Journal of Hydrology*, 394, 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.021>.

SAMPER, J., PISANI, B., ALVARES, D., and GARCÍA, M.A. (2007). GIS-BALAN: un Modelo Hidrológico Semidistribuido acoplado a un Sistema de Información Geográfica para la estimación de los Recursos Hídricos. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 8, 341-346. ISBN: 84-690-7893-8. Disponible en: <http://www.zonanosaturada.com/zns07/publications.html>.

SHIKLOMANOV, I.A. (2000). Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Water International*, 25 (1), 11-32. DOI: 10.1080/02508060008686794.

SOLERA, A., PAREDES-ARQUIOLA, J. and ÁLVAREZ-ANDREU, J. (2007). *AQUATOOLDMA SSD para planificación de Cuencas*. Univ. Politécnica de Valencia, 231 p. Disponible en: [https://www.upv.es/aquatool/es/historia\\_es.html](https://www.upv.es/aquatool/es/historia_es.html).

TÉMEZ, J.R. (1977). *Modelo matemático de transformación precipitación-escorrentía*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL). Madrid. 39 pp.

THORNTHWAITE, C.W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38 (1), 55-94. DOI: 10.2307/210739.

THORNTHWAITE, C.W., and MATHER, J.R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Ed: Centerton, N.J.: Drexel Institute of Technology*, 10 (3), 185-311. Disponible en: <http://www.worldcat.org/title/instructions-and-tables-for-computing-potential-evapotranspiration-and-the-water-balance/oclc/70371630>.

VALDES-ABELLAN, J., PLA, C., FERNANDEZ-MEJUTO, M., and ANDREU, J.M. (2018). Validating the KAGIS black-box GIS-based model in a Mediterranean karst aquifer: Case of study of Mela aquifer (SE Spain). *Hydrological Processes*, 32, 2584-2596. <https://doi.org/10.1002/hyp.13215>.

VAN BEEK, L.P.H., WADA, Y., and BIERKENS, M.F.P. (2011). Global monthly water stress: 1. Water balance and water availability. *Water Resources Research*, 47 (W07517), 1-25. DOI: 10.1029/2010WR009791.

VÖRÖSMARTY, C.J., GREEN, P., SALISBURY, J., and LAMMERS, R.B. (2000). Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, 289 (5477), 284-288. DOI: 10.1126/science.289.5477.284.

WADA, Y., VAN BEEK, L.P.H. and BIERKENS, M.F.P. (2012). Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment. *Water Resources Research*, 48 (6), 1-18. DOI: 10.1029/2011WR010562.

WANDERS, N., and VAN-LANEN, H.A.J. (2015). Future discharge drought across climate regions around the world modelled with a synthetic hydrological modelling approach forced by three general circulation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 487-504. DOI: 10.5194/nhess-15-487-2015.

WIDÉN-NILSSON, E., HALLDIN, S., and XU, C.Y. (2007). Global water-balance modelling with WASMOD-M: parameter estimation and regionalisation. *Journal of Hydrology*, 340 (1-2), 105-118. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.04.002.

WINCHELL, M., SRINIVASAN, R.S., DI LUZIO, M., and ARNOLD, J.G. (2013). *ArcSWAT Interface for SWAT2012. User's Guide*. 464 pp. Disponible en: <http://swat.tamu.edu/documentation/>.

YATES, D.N. (1997). Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *Journal of Hydrology*, 201 (1-4), 289-310. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00044-9.