

Aplicación del modelo hidrológico SWAT a la cuenca del río Meca (Huelva, España)

Application of SWAT hydrological model to the Meca river watershed (Huelva, Spain)

L. Galván ⁽¹⁾, M. Olías ⁽¹⁾, R. Fernández de Villarán ⁽²⁾ y J.M. Domingo-Santos ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Geodinámica y Paleontología. Universidad de Huelva. Campus «El Carmen» s/n. 21071-Huelva. laura.galvan@dgyp.uhu.es

⁽²⁾ Departamento de Ciencias Agroforestales. Universidad de Huelva. Campus de «La Rábida». Ctra Huelva – Palos de la Frontera, s/n. 21071 La Rábida Palos de las Frontera (Huelva).

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is the main pollutant source in the Odiel river basin (SW Spain). Stream-flow data constitute a tool to assess the pollutant load transported by the drainage network, as well as to evaluate the possible impact of restoration measurements along the river. Due to the malfunctioning of the available stream-gauges and in order to sham the Odiel river behavior, a water model is being elaborated using the tool SWAT (Soil and Water Assessment Tool), developed by the USDA Agricultural Research Service. For the first stage of the project we have selected the Meca river watershed, a tributary of the Odiel river, which is regulated by the Sancho reservoir and whose daily contributions have been used to both calibrate and validate the model. Obtained results show a well adjustment for wetter years while for the drier ones higher differences between simulated and measured flows have been observed.

Key words: Acid mine drainage, Odiel, Meca, river, hydrological model, SWAT

Geogaceta, 42 (2007), 63-66
ISSN: 0213683X

Introducción

El río Odiel nace en la Sierra de Aracena y desemboca, junto con el río Tinto, en la Ría de Huelva. La cuenca del río Odiel (2333 km² de superficie) está situada en gran parte sobre los materiales de la Faja Pirítica Ibérica (FPI), rica en yacimientos de sulfuros. Debido a la minería de estos depósitos se produce la oxidación de sulfuros y la formación de drenajes ácidos de mina, que contaminan la mayor parte de la red fluvial del río Odiel (Sarmiento *et al.*, 2005; Cánovas *et al.*, 2007). A pesar de tener condiciones menos extremas que el río Tinto, el Odiel es la principal fuente de aportes de contaminantes mineros a la ría de Huelva y el Golfo de Cádiz (Olías *et al.*, 2006).

Actualmente se están llevando a cabo una serie de estudios y proyectos de investigación con el objetivo de cuantificar la carga contaminante transportada por la red fluvial, pero este tipo de actuaciones se topa con la dificultad de la inexistencia de datos de caudales. Además las escasas estaciones de aforos presentan numerosos periodos sin datos y escasa fiabilidad.

El presente estudio tiene como objetivo solventar la falta de datos continuos

de caudal en el espacio y en el tiempo, mediante la realización de un modelo hidrológico de la cuenca del río Odiel. Como primera aproximación se ha elegido la subcuenca del río Meca (Fig.1) por: 1) se tiene un alto grado de conocimiento previo, hidrológico y edafológico, 2) está regulada por el embalse del Sancho del que disponemos de datos de aportes que servirán para calibrar y contrastar el modelo y 3) su limitada extensión, lo que facilita la implementación del modelo.

La cuenca del río Meca tiene una superficie de 315 km², con una altitud media de 149 m (Fig. 2). La cuenca presenta un clima de tipo mediterráneo con una precipitación media anual de 632 mm, con una gran variabilidad estacional e interanual, y una temperatura media de 19 °C.

El río Meca presenta valores de pH próximos a 3 la mayor parte del año debido a la contaminación por drenaje ácido de las minas de Tharsis. En el embalse del Sancho (de 58 hm³ de capacidad) se observa una cierta mejora respecto a los valores del río, presentando un pH entorno a 4.

Metodología

SWAT es el acrónimo de Soil and Water Assessment Tool. Es un programa de modelización hidrológica desarrolla-

do por el Servicio de Investigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Neiths *et al.*, 2002). Este modelo permite realizar una predicción del comportamiento de cuencas hidrográficas complejas a largo plazo.

El modelo está constituido por una serie de submodelos o módulos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. El programa se basa en la ecuación general del balance hídrico:

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

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo, SW_0 es el contenido inicial de agua en el suelo, t el tiempo, R_{day} la precipitación, Q_{surf} la escorrentía superficial, E_a la evapotranspiración, W_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada y Q_{gw} es la cantidad de agua que retorna hacia los ríos como flujo base.

SWAT permite la simulación de un gran número de procesos físicos. La cuenca se compartimenta en varias subcuencas a través de un valor de área umbral, que dependerá del objetivo y exactitud requerida. Las subcuencas se dividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) que conforman una

Código	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Profundidad (cm)	124	90	48	34	58	55	91	85	113	60	89	95
CAD (% vol.)	0.09	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.13	0.16	0.15	0.11	0.10
Mat. Fino (%)	99.4	57.0	56.3	61.0	60.7	64.4	63.2	62.2	80.7	63.9	76.6	95.9
Arcillas (%)	15.3	21.5	23.6	18.4	26.8	16.9	25.1	29.0	45.6	29.7	20.9	12.9
Limos (%)	13.1	42.9	41.7	40.2	41.3	48.3	45.2	30.3	39.9	40.4	22.0	20.1
Arenas (%)	71.7	35.5	34.7	41.4	31.9	34.8	29.7	40.7	14.5	29.9	57.0	67.0
Mat. Orgánica (%)	1.74	1.57	3.18	1.70	2.41	1.99	1.60	2.23	0.77	2.70	2.43	1.83
CHS 100 cm (cm/h)	18.6	2.88	1.43	1.64	1.53	1.82	1.17	1.88	0.22	2.16	8.49	3.87
CHS 50 cm (cm/h)	2.78	0.73	1.05	1.26	0.45	1.00	0.57	0.06	0.04	0.56	0.85	5.88
Dens. aparente (gr/cm ³)	1.51	1.33	1.25	1.33	1.32	1.25	1.29	1.40	1.32	1.30	1.45	-
Grupo hidrológico	B	C	B	B	C	C	C	D	D	C	C	B

Tabla I. Características de las unidades de suelos diferenciadas en la Figura 4 (CAD: capacidad de agua disponible, CHS: conductividad hidráulica saturada).

Table I. Characteristics of differentiated soil units of Figure 4 (CAD: available water capacity, CHS, saturated hydraulic conductivity).

combinación única de tipos de suelo, usos y cobertura, de forma que cada subcuenca posee al menos una HRU. La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en la evapotranspiración para varios tipos de suelos y coberturas. La escorrentía se predice separadamente para cada HRU y es canalizada en función del modelo digital del terreno para obtener el total en la cuenca. El cálculo de la escorrentía superficial es realizado por SWAT mediante el método del número de curva (Neitsch *et al.*, 2002).

La calibración de un modelo como SWAT consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los datos observados y simulados, mediante el cambio de los parámetros de mayor influencia. La validación consiste en medir la capacidad predictiva del modelo mediante la comparación de caudales calculados y observados para un periodo diferente al de la calibración (Wagener *et al.*, 2004).

Con el fin de evaluar la eficiencia de las distintas simulaciones realizadas en la calibración, los hidrogramas resultantes se han comparado visualmente con los observados y se ha obtenido el coeficiente de correlación de Pearson (r), el parámetro de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE), el error cuadrático medio (RMS) y la desviación de los volúmenes de escorrentía (DV):

$$NSE = \left(\frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}$$

$$DV = \frac{\sum_{t=1}^n Q_{sim}}{\sum_{t=1}^n Q_{obs}}$$

Datos de partida

El modelo requiere la introducción de información topográfica, de tipos y usos del suelo, datos meteorológicos y datos sobre los acuíferos de la cuenca. La información topográfica (Fig. 2) se ha obtenido a partir del modelo digital del terreno (MDT) de la Junta de Andalucía cuya precisión es de 10 x 10m. A partir del MDT el programa realiza el mapa de pendientes y define la red hidrológica.

Para el mapa de usos del suelo (Fig. 3) se ha partido de la información facilitada por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, procedente de la fotointerpretación de un vuelo realizado en 1999. Los datos requeridos de cada uso del suelo son numerosos y complicados de obtener, por lo que se han escogido aquellos de la base de datos del modelo que más se parecen a las características de los que existen en la cuenca.

Los datos edafológicos han sido obtenidos de un exhaustivo reconocimiento previo de la zona (Domingo Santos, 2002; Domingo Santos *et al.*, 2006; Fernández de Villarán, 2006). Aunque se han diferenciado 35 unidades edafológicas en la cuenca, se han eliminado aquellas con superficies menores al 2% que no son tenidas en cuenca en el programa, agrupándolas en 12 (Fig. 4). De cada una de estas unidades se dispone de (Tabla I): profundidad del perfil, textura, porcentaje de materia orgánica, conductividad hidráulica saturada a 50 y 100 cm de profundidad, densidad aparente, grupo hidrológico del número de cur-

	Diario	Mensual
r	0.8	0.92
NSE	0.5	0.94
RMS (m ³ /s)	7.71	63.13
DV	1.21	1.2

Tabla II. Índices estadísticos obtenidos tras la calibración.

Table II. Statistical indices obtained after calibration.

va y capacidad de agua disponible, esta última calculada a partir de los datos de textura mediante la fórmula de Saxton *et al.* (1986).

La ETP se calcula mediante el método de Hargreaves, para lo cual sólo es necesario introducir datos diarios de temperatura. Estos datos se han obtenido de dos estaciones del Instituto Nacional de Meteorología así como de otra situada en la cerrada del embalse del Sancho facilitada por ENCE, empresa propietaria del embalse (Fig. 1). De estas estaciones también se han obtenido las precipitaciones diarias. Las series de datos, desde 1982 a 2002, han sido sometidas a un análisis de calidad, rechazando aquellos datos incoherentes y tratadas estadísticamente para rellenar los periodos sin datos, hasta disponer de series completas.

Para calibrar el modelo se han utilizado las aportaciones diarias al embalse de 1982 a 2000 y para la validación se reservaron los años 2000/01 y 2001/02.

Resultados

La aplicación del modelo en la primera simulación puso de manifiesto diferencias muy significativas entre caudales observados y simulados. Para solucionar este problema se realizó un análisis de sensibilidad de las variables más influyentes en los resultados.

Los principales parámetros que se modificaron en el proceso de calibración fueron los relativos a las aguas subterráneas. Aunque en la zona no existen acuíferos importantes y las rocas que afloran son mayoritariamente pizarras, la fracturación superficial de los materiales hace que funcionen como un acuífero somero de escasa entidad. En cuanto a las variables hidrogeológicas más importantes son el coeficiente de agotamiento (que se puede calcular a partir de la curva de decrecida tras fuertes precipitaciones) y aquellos que permiten que el agua del acuífero vuelva a la atmósfera por la evapotranspiración de la vegetación. La gran extensión de la cuenca cubierta por eucaliptos hace que sea necesario contemplar este efecto.

Otro problema que se nos planteó es la imprecisión en la medida del aporte diario al embalse en condiciones de aguas

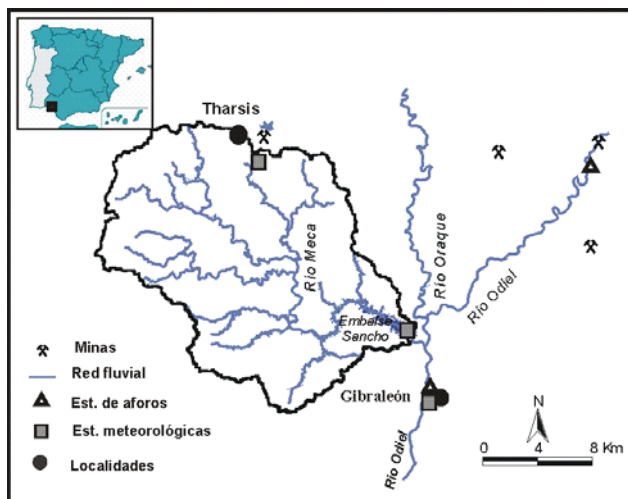


Fig. 1.- Mapa de localización.

Fig. 1.- Location map.

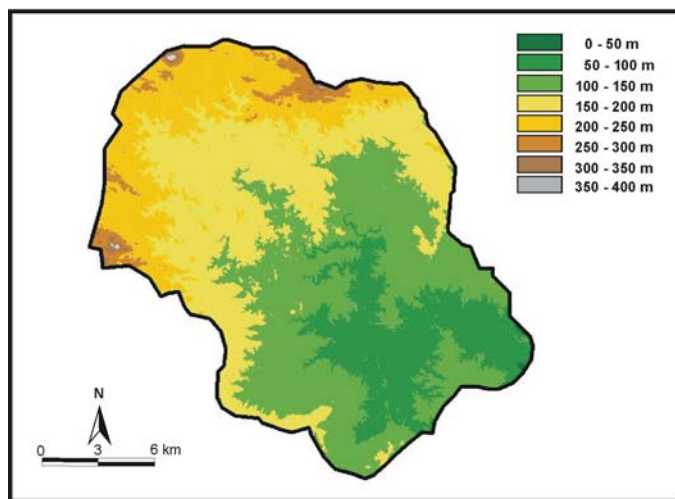


Fig. 2.-Distribución hipsométrica.

Fig. 2.- Altitude map.

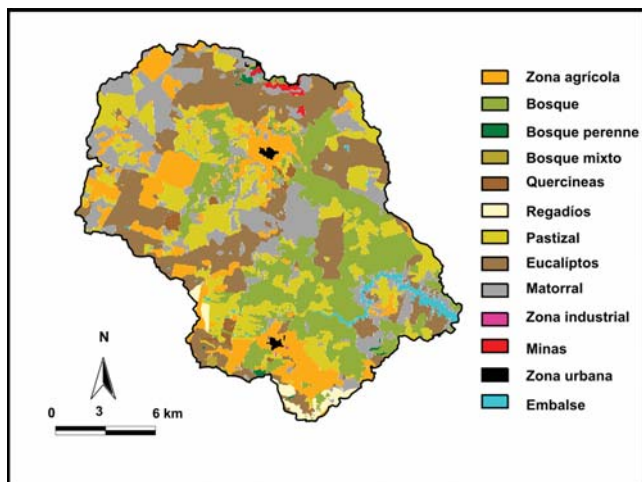


Fig. 3.- Usos del suelo.

Fig. 3.- Landuse map.

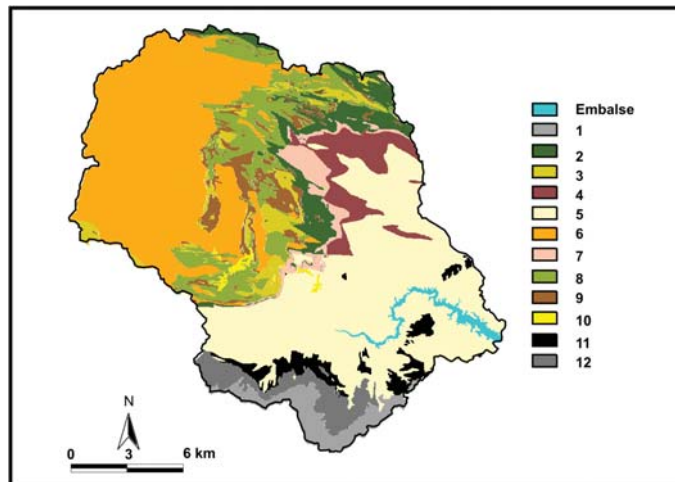


Fig. 4.- Tipos de suelos.

Fig. 4.- Soil map.

bajas. Los aportes diarios se calculan por las diferencias entre las variaciones del volumen almacenado y las salidas registradas (vertidos, derivaciones y evaporación). Cuando las entradas son bajas en relación a las variaciones del volumen almacenado, pequeñas imprecisiones en la medida de la cota del agua en el embalse (por ejemplo por la acción del viento) suponen un gran error en el cálculo del aporte. Ello dificulta la calibración del modelo durante estos periodos de aguas bajas.

Como resultado de la simulación se obtiene un aporte medio anual de 63.5 hm³, alcanzando un mínimo en el año hidrológico 91/92 de 2.6 hm³ y un máximo para el 95/96 de 193.9 hm³. La media anual de la evapotranspiración real es de 469 mm (70% de las precipitaciones).

Las series mensuales y anuales se obtienen en SWAT de la agregación de los resultados diarios. El efecto de escalas de

tiempo mayores es el de camuflaje por promedio de los posibles errores (Herrero Lantarón *et al.*, 2004).

En la figura 5 se muestra la correlación obtenida a nivel mensual y en la tabla II los resultados de los índices obtenidos después de la calibración. El valor del coeficiente de correlación de Pearson a nivel mensual es de 0.92 reflejando un buen ajuste entre valores observados y simulados. A nivel diario el coeficiente de correlación descende a 0.80, lo que consideramos como un valor bastante aceptable. El parámetro de eficiencia de Nash y Sutcliffe a nivel mensual es próximo a 1, aunque a nivel diario descende a 0.5 fundamentalmente por la escasa exactitud en la medida de los aportes en aguas bajas. La desviación entre caudales simulados y observados muestra que con el modelo se sobreestiman un 20% la aportación, lo que puede ser debido a la frecuente

inexistencia de datos de aportes en periodos de aguas bajas. También se ha representado la evolución de las diferencias entre valores simulados y observados, no observándose ninguna tendencia.

No obstante, se observan algunas diferencias muy significativas entre datos

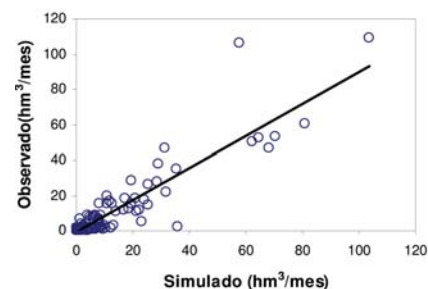


Fig. 5.- Relación entre las aportaciones mensuales simuladas y observadas.

Fig. 5.- Relationship between simulated and observed monthly discharges.

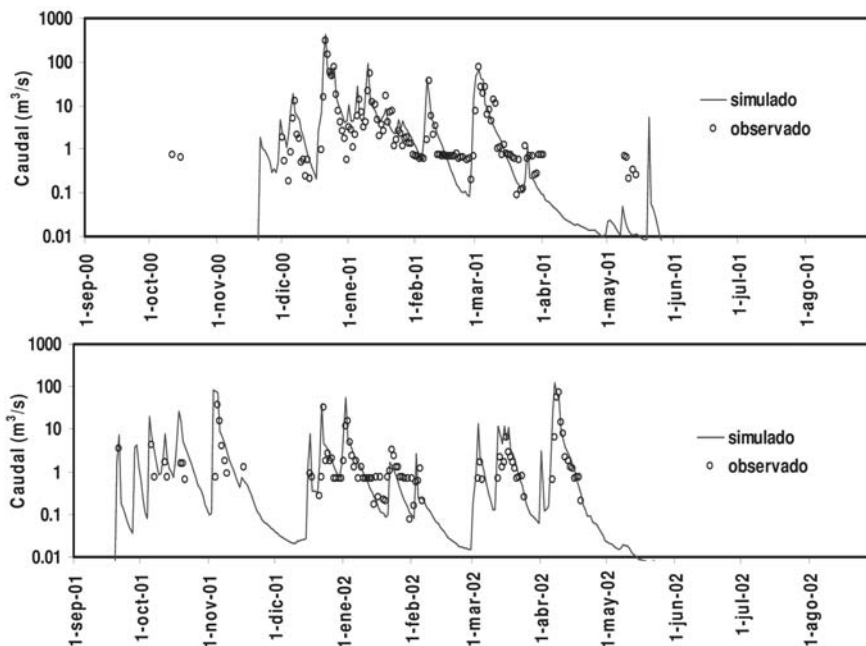


Fig. 6.- Evolución diaria de los caudales simulados y observado para el periodo de validación.

Fig. 6.- Daily evolution of simulated and observed flow rates during the validation period.

observados y simulados (Fig. 5). Así se puede comprobar un aporte simulado de 61 hm³ frente al observado de 107 hm³, correspondiente al mes de diciembre de 1999. Otro valor anómalo es el de octubre de 1993, con un valor simulado de 41 hm³ frente a sólo 2 hm³ medidos en el embalse. Estos valores extraños pueden deberse probablemente a que las lluvias en las estaciones pluviométricas no sean representativas de la precipitación media sobre la cuenca.

Una vez calibrado el modelo se procedió a la validación del mismo con los datos diarios de aportes al embalse del Sancho para los años hidrológicos 00/01 y 01/02. Los resultados obtenidos a nivel diario se muestran en la figura 6, se comprueba un buen ajuste entre datos simulados y observados excepto para los caudales bajos (menores a 1 m³/s). El coeficiente de correlación de Pearson para el periodo de validación es de 0.83.

Discusión y conclusiones

El modelo SWAT constituye una buena herramienta para reproducir registros históricos de caudal y simular resultados allí donde no se disponga de datos de aforo, aunque lógicamente la exactitud dependerá de la calidad de la información de partida. Por ello la calibración con da-

tos reales en algunos puntos de la cuenca, o en cuencas con similares características, es fundamental para conseguir unos resultados fiables.

Los ajustes obtenidos en esta primera etapa son prometedores gracias a la exhaustiva información con que se cuenta de la cuenca del Meca. Estos datos pueden ser extrapolados a mayor escala y ser aplicados a la cuenca del río Odiel.

Para contrastar los resultados simulados se han utilizado los datos de aportes diarios obtenidos de un embalse. La escasa precisión en la medida de los aportes al embalse en periodos de aguas bajas, hace difícil la calibración del modelo en estas condiciones. Por ello se consiguen muy buenos ajustes durante los años húmedos mientras que en los años secos las diferencias entre caudales simulados y observados son mucho mayores.

En algunas ocasiones existen grandes diferencias que se atribuyen a una desigual distribución de las precipitaciones en la cuenca, sería conveniente disponer de una mayor densidad de estaciones pluviométricas en la zona.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Convenio firmado entre la Univer-

sidad de Huelva y la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía titulado «Caracterización de la contaminación minera, tratamiento de efluentes ácidos de mina, modelización hidrológica de la cuenca del río Odiel y estudio de aportes a la Ría de Huelva». También agradecemos a ENCE su cooperación por el suministro de los datos diarios del embalse del Sancho.

Referencias

- Cánovas, C.R., Olías, M., Nieto, J.M., Sarmiento, A.M. y Cerón, J.C. (2007). *Science of the Total Environment*, 373, 363-382.
- Domingo Santos, J.M. (2002). *Caracterización de suelos forestales de la provincia de Huelva*. Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Madrid, 395 p.
- Domingo Santos, J.M., Fernández de Villarán, R., Corral Pazos, E. y Rapp Arrarás, I. (2006). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 15, 14-23.
- Fernández de Villarán, R. (2006). *Mejora de los parámetros de cálculo del modelo de número de curva su validación mediante un modelo hidrológico distribuido*. Tesis Doctoral, Univ. de Huelva, 303 p.
- Herrero Lantarón, J., Rodríguez Rojas, M.I. y Avilés Benítez, A. (2004). En: *IV Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del agua*, Tortosa., http://alojamientos.us.es/ciberico/archivos_word/132b.doc
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. y King, K.W. (2002). *Soil and water assessment tool. Theoretical documentation. Version 2000*. Texas Water Resources Institute Report TR-191, Texas, USA, 458 p.
- Olías, M., Cánovas, C.R., Nieto, J.M. y Sarmiento, A.M. (2006). *Applied Geochemistry*, 21, 1733-1749.
- Sarmiento, A.M., Olías, M., Nieto, J.M. y Cánovas, C.R. (2005). En: *VI Simposio del Agua en Andalucía*, Sevilla, 1343-1351.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. y Papendich, R.I., (1986). *Soil Science Society of American Journal*, 50, 1031-1036.
- Wagner, T., Wheaton, H.S. y Gupta, H.V. (2004). *Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchment*, Imperial College Press, Londres, 306 p.