

SIMULACIÓN MULTIESCALA DE LA HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE UN MODELO DE BALANCE DE AGUA EN LA CUENCA DEL DUERO

A. Gumuzzio¹, L. Brocca², J. Martínez-Fernández¹, T. Moramarco² y N. Sánchez¹.

¹Centro Hispano Luso de Investigaciones Agrarias. Universidad de Salamanca. c/ Duero, 12. 37185 Villamayor. e-mail: angela.gumuzzio@usal.es

²Research Institute for Geo-Hydrological Protection, National Research Council, Italia. Via della Madonna Alta, 126 Perugia I-06128.

RESUMEN. En este trabajo se aplica un modelo de balance de agua (SWBM-GA) para simular el comportamiento de la humedad del suelo en la cuenca del Duero. El modelo ha sido calibrado y validado sucesivamente a tres niveles de escala y a diferentes profundidades. Asimismo, con el objeto de evaluar su aplicación para grandes áreas, el modelo ha sido aplicado en dos versiones, una normal y otra reducida en cuanto a los parámetros de calibración. Los resultados obtenidos por el modelo son considerados satisfactorios en la estimación de la humedad del suelo en superficie y también, para los casos de estudio correspondientes a las capas más profundas analizadas. La aplicación del modelo extendido a otras escalas, en sus dos versiones, ofrece buenos resultados para la calibración en periodos cortos. Este aspecto es de especial interés en relación con una futura aplicación del modelo de forma distribuida a la cuenca del Duero.

ABSTRACT. In this work, a soil water balanced model (SWBM-GA) is applied for simulating the behavior of soil moisture in the Duero basin. A calibration and validation was carried out at three scale levels and at different depths of the soil profile. Also, the model has been implemented in two versions, one normal and one reduced in terms of the calibration parameters in order to encourage their application on large scales. The model results are considered satisfactory to estimate the soil moisture in the surface layers and in the analyzed deeper layers. The application of the model extended to large areas, both in its normal as reduced version, provides good results for calibration over short periods. This aspect is relevant to the future implementation of a distributed model of the Duero basin.

1.- Introducción

Actualmente es reconocida la importancia de la humedad del suelo para mejorar el conocimiento sobre el funcionamiento de los sistemas hidrológicos, en particular en cuencas que, como la del Duero, están sometidas a una incertidumbre hidrológica creciente y afectadas por una fuerte presión debida fundamentalmente a las actividades agrícolas y factores ambientales (Martínez-Fernández et al., 2001; Moran Tejeda et al., 2011).

Diversos estudios realizados sobre la humedad del suelo

(McMillan, 2012; Martínez-Fernández et al., 2003, 2005, 2007; Gómez-Plaza et al., 2001; Martínez et al., 2008; Martínez et al., 2013; Brocca et al., 2007, 2009, 2012) han demostrado que uno de los problemas más importantes para el conocimiento del comportamiento del sistema hidrológico y la gestión de las grandes cuencas reside en la variabilidad espacio-temporal que presenta la humedad del suelo, controlada por un amplio número de factores interrelacionados como el clima, la topografía, las propiedades del suelo (p.e., textura y materia orgánica), los usos del suelo y la vegetación.

El estudio de las variaciones de la humedad del suelo en grandes cuencas constituye un aspecto de especial dificultad que parece no estar totalmente resuelto (Döll et al., 2008). Este tipo de estudios generalmente conlleva un elevado gasto de tiempo y recursos asociado a las campañas de campo, constituyendo en sí mismo un reto (Brocca et al., 2012; Choi y Jacobs, 2011; Martínez et al., 2008). En consecuencia, son escasos los trabajos en los que se dispone de datos de la humedad del suelo obtenidos mediante experiencias de campo suficientemente prolongadas en el tiempo y extendidas en el espacio (Brocca et al., 2010, 2012; Martínez-Fernández et al., 2003, 2005).

En las últimas décadas, la utilización de técnicas de teledetección y la modelización se han mostrado como alternativas viables frente a la obtención intensiva de datos *in situ*, siempre que estén convenientemente soportadas por una buena base de datos recogidos en condiciones experimentales de campo, bien distribuidos espacialmente sobre un periodo de tiempo suficientemente largo (Chen et al., 2012).

En este trabajo, se explora la vía de la modelización con objeto de simular el comportamiento de la humedad del suelo en zonas representativas de la cuenca del Duero. Se pretende extraer información acerca de las variaciones de la humedad del suelo a nivel de grandes cuencas y, en determinados casos, en profundidades relacionadas con el sistema radicular.

2.- Modelo de Balance de Agua: Soil Water Balance Model (SWBM-GA)

En este estudio se aplica un modelo de balance de agua del suelo agrupado y parsimonioso (SWBM-GA), que ha sido ampliamente testado para estimar la humedad del suelo en diferentes zonas de estudio de Europa obteniendo

resultados satisfactorios (Brocca et al., 2013, 2010, 2011a, 2011b; Lacava et al., 2012). El modelo fue desarrollado por Brocca et al. (2008) y simula el contenido de humedad para una capa de suelo en la que la ecuación de balance del agua es:

$$\begin{cases} Z \frac{d\theta(t)}{dt} = f(t) - e(t) - g(t) & \theta(t) < \theta_s \\ \theta(t) = \theta_s & \theta(t) \geq \theta_s \end{cases} \quad (1)$$

Donde t es el tiempo, $\theta(t)$ es la cantidad de agua en términos volumétricos de la capa de suelo investigada con una profundidad Z , $f(t)$ es la fracción de precipitación que se infiltra en el suelo, $e(t)$ es la tasa de evapotranspiración, $g(t)$ es el drenaje debido al interflujo y/o la percolación en profundidad, and θ_s es el valor de la humedad del suelo en saturación.

La tasa de infiltración $f(t)$ es estimada mediante la ecuación de Green-Ampt (1911);

$$\begin{cases} f(t) = K_s \left[1 - \frac{\psi_b(\theta_s - \theta_i)}{F} \right] & f(t) < r(t) \\ f(t) = r(t) & f(t) \geq r(t) \end{cases} \quad (2)$$

Donde K_s es la conductividad hidráulica saturada, ψ_b es el potencial matricial en el frente de humectación, θ_i es la humedad del suelo al comienzo del evento de precipitación, F es la profundidad de la infiltración acumulada desde el inicio de la precipitación y $r(t)$ es la intensidad de la lluvia.

La tasa de drenaje $g(t)$ está representada mediante la siguiente ecuación (Famiglietti y Wood, 1994):

$$g(t) = K_s \left[\frac{\theta(t) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{3+2/\lambda} \quad (3)$$

Donde λ es el índice de distribución de tamaño de poro y θ_r es la humedad residual del agua en el suelo.

La ecuación de la evapotranspiración potencial adoptada por el modelo es la de Blaney y Criddle modificada por Doorenbos y Pruitt (1977):

$$ET_p(t) = K_c \{-2 + 1,6[\xi(0,46T_a(t) + 8,13)]\} \quad (4)$$

En esta ecuación $T_a(t)$ es la temperatura del aire en °C, ξ es el porcentaje del total de horas de luz diaria para el periodo usado (diario o mensual) respecto al periodo de horas de luz anuales y K_c es un factor de corrección que tiene en cuenta la naturaleza empírica de la ecuación; la evapotranspiración $e(t)$ es una fracción de la evapotranspiración potencial de acuerdo con el grado de saturación de la capa de suelo:

$$e(t) = ET_p(t) \left[\frac{\theta(t) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right] \quad (5)$$

El modelo emplea como variables de entrada la precipitación y la temperatura, variables muy comunes y de las que generalmente se dispone de largas series de datos.

La aplicación del modelo requiere la estimación de siete parámetros θ_s , θ_r , Z , K_c , K_s , ψ_b y λ . Los parámetros θ_s y θ_r son obtenidos de los valores máximo y mínimo de la serie completa de datos de humedad del suelo y, la profundidad Z se determina considerando la profundidad de los sensores de medición de la humedad. Los cuatro parámetros restantes (K_c , K_s , ψ_b y λ) son calibrados a partir de los datos de precipitación y temperatura y los correspondientes valores de la humedad del suelo.

En determinadas estaciones de medición de la humedad del suelo de la cuenca del Duero ha sido aplicado un procedimiento (Brocca et al., 2013) para reducir el número de parámetros que han de ser calibrados en el modelo SWBM-GA. De esta forma, se pretende reducir la incertidumbre del modelo y favorecer su aplicación al estudio de la variabilidad de la humedad del suelo en grandes cuencas (Beven, 2008). Este procedimiento, que hemos denominado versión reducida del modelo (SWBM-GA_{red}), consiste en optimizar la conductividad hidráulica saturada K_s y obtener los parámetros ψ_b y λ en función de K_s mediante las siguientes relaciones empíricas de ajuste, extraídas a partir de valores experimentales obtenidos en diferentes suelos por Rawls et al. (1982):

$$\psi_b = 54,727 \log(K_s) - 323,9 \quad (6)$$

$$\lambda = 0,085 \log(K_s) + 0,1574 \quad (7)$$

El factor de corrección K_c es fijado *a priori* a partir de las simulaciones obtenidas mediante la versión no reducida del modelo. Los parámetros del modelo θ_s , θ_r y Z se estiman del mismo modo que en la versión no reducida.

3.- Área de estudio y adquisición de datos

El modelo ha sido calibrado y validado, en su caso, para diversas estaciones de medición de la humedad del suelo de la cuenca del Duero (Fig. 1), evaluando su funcionamiento a tres niveles de detalle espacial.

3.1.- Cuenca experimental de Villamor

En esta pequeña cuenca (1 km²) localizada al sureste de Zamora, se procedió a probar y evaluar el modelo SWBM-GA durante el periodo de enero de 2009 a diciembre de 2011 con datos representativos de las condiciones medioambientales características del área de estudio. Para esto, se utilizaron como variables de entrada datos de precipitación y temperatura procedentes de una estación meteorológica automática, con una resolución temporal de 10 minutos, y datos de humedad del suelo con resolución temporal horaria, medidos, en la misma estación, con una sonda de capacitancia (Stevens Water, HydraProbe) situada a 5 cm de profundidad.

3.2.- Área experimental de REMEDHUS

La Red de Estaciones de Medición de la Humedad del Suelo (REMEDHUS), localizada en el sector central de la cuenca del Duero con una superficie de 1285 km², dispone de 23 estaciones de medición horaria de la humedad del suelo con sondas de capacitancia que obtienen datos a 5 cm de profundidad (Stevens Water, HydraProbe), 15 de las cuales disponen de sondas (Sentek Technologies, EnviroSMART) que miden la humedad del suelo a 25 y 50 cm de profundidad, (Martínez-Fernández y Ceballos, 2005). Adicionalmente, la zona tiene cuatro estaciones meteorológicas automáticas que recogen datos cada diez minutos de las principales variables climáticas (Fig. 1).

En REMEDHUS se pretendió extender la aplicación del modelo a una superficie mayor y evaluar los resultados de la calibración y validación en un periodo de tiempo más largo (desde enero del 2008 a junio del 2012) en diferentes profundidades del perfil, relacionadas con el enraizamiento de los principales cultivos de la región, fundamentalmente de uso cerealístico.

De las 23 estaciones de REMEDHUS se seleccionaron aquellas que disponían de mediciones de la humedad a varias profundidades con suficiente calidad de los datos disponibles. Posteriormente, fueron agrupadas en función de las principales características de los suelos y de los principales usos del área de estudio. Finalmente, se seleccionaron para el estudio estaciones representativas de cada grupo (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación en grupos de las estaciones REMEDHUS y estación representativa de cada grupo

Grupos	Clases de textura	Materia Orgánica (%)	Uso del suelo	Estaciones
1	Gruesa	Muy baja (< 0,5)	Viñedo	L03
2	Moderadam. gruesa	Baja (0,5-1,0)	Secano	N09
3	De franca a moderadam. fina	Moderada (1-2)	Secano	M09 y Villamor
4	Moderadam. fina	Moderadam. alta (>2)	Pasto	H09

3.3.- Extensión del modelo a la cuenca del Duero

En el tercer nivel de detalle, el estudio se extendió a otras estaciones de medición de la humedad del suelo representativas de la cuenca del Duero. Para esto, el modelo fue calibrado utilizando como variables de entrada datos de precipitación y temperatura recogidos cada 30 minutos procedentes de estaciones meteorológicas automáticas de la red de Inforiego (Instituto Tecnológico Agrario de la Junta de Castilla y León). Los datos horarios de la humedad del suelo fueron obtenidos mediante la instalación de 17 nuevas estaciones de medición de la humedad, asociadas a las correspondientes estaciones de Inforiego, y equipadas con sondas Hydra a 5 cm de profundidad, a lo largo de un periodo de entre 2 y 4 meses (entre julio y diciembre del 2012).

Los criterios considerados para la selección de las 17 nuevas estaciones de medición de la humedad del suelo en la cuenca del Duero fueron: la distribución y localización en las principales sub-cuencas de la cuenca del Duero; la calidad de los datos y su representatividad con respecto a características ambientales de la cuenca del Duero (tipos de suelo, uso, permeabilidad y características hidrogeológicas).

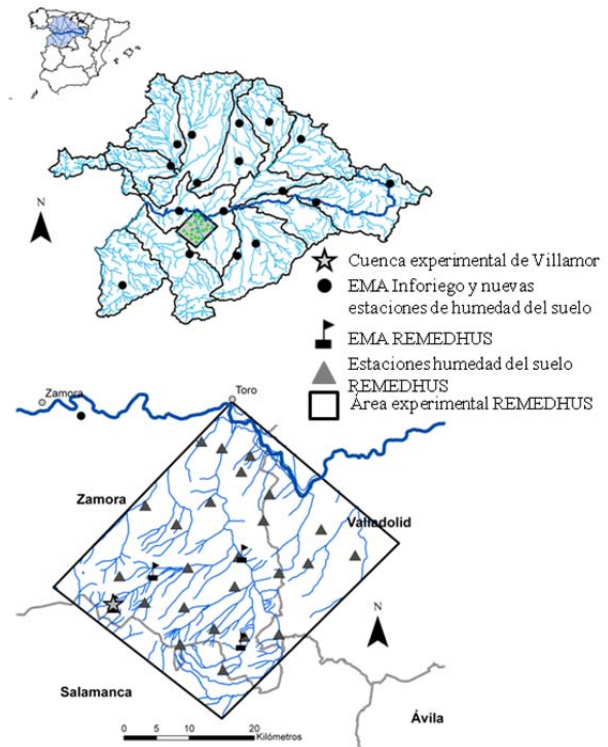


Fig.1. Localización de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) y de medición de humedad del suelo del área de REMEDHUS y de la cuenca del Duero

Para la aplicación del modelo se procedió a la selección de parámetros no involucrados en la calibración. Los valores de humedad del suelo saturada y residual se obtuvieron por identificación del máximo y el mínimo del valor observado de la humedad del suelo. La profundidad de la capa de suelo Z ha sido evaluada considerando el volumen de suelo monitorizado por los sensores. En el caso de las estaciones de REMEDHUS, para evaluar la humedad del suelo a profundidades de 30 y 60 cm se ponderaron las medidas de humedad del suelo según las siguientes funciones:

$$\bar{\theta}_{30} = \frac{1}{3} \theta_5 + \frac{2}{3} \theta_{25} \quad (8)$$

$$\bar{\theta}_{60} = \frac{1}{6} \theta_5 + \frac{3}{6} \theta_{25} + \frac{2}{6} \theta_{50} \quad (9)$$

Donde $\bar{\theta}_{30}$ y $\bar{\theta}_{60}$ son los valores de humedad del suelo

ponderados a 30 y 60 cm respectivamente y θ_5 , θ_{25} y θ_{50} son los valores medidos por las sondas a profundidades de 5, 25 y 50 cm.

En todas las experiencias realizadas, los valores de la humedad del suelo asignados a 10 cm de profundidad se corresponden directamente con los obtenidos por las sondas a 5 cm.

Finalmente, para la aplicación del modelo SWBM-GA_{red} el parámetro K_c es fijado al valor de 1 a partir de las simulaciones obtenidas mediante la versión no reducida del modelo.

Para evaluar el funcionamiento del modelo han sido utilizados los siguientes coeficientes:

- La raíz del error cuadrático medio (RMSE) se empleó para cuantificar el error en las predicciones del modelo en términos de las unidades de la variable calculada.
- Como indicadores adimensionales de la bondad de ajuste se han utilizado el coeficiente de determinación de Pearson (R^2) y el coeficiente de eficiencia (NS) de Nash y Sutcliffe (1970).

4.- Resultados y discusión

4.1.- Cuenca experimental de Villamor

Los resultados obtenidos para la cuenca de Villamor (Tabla 2) muestran que el modelo simula correctamente la evolución del contenido de humedad de la capa superficial del suelo, a partir de los datos de precipitación y temperatura (Fig. 2). Para la calibración y la validación, los valores de los indicadores para cuantificar la bondad del ajuste son satisfactorios para los coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS) y de determinación (R^2) y muy buenos para RMSE.

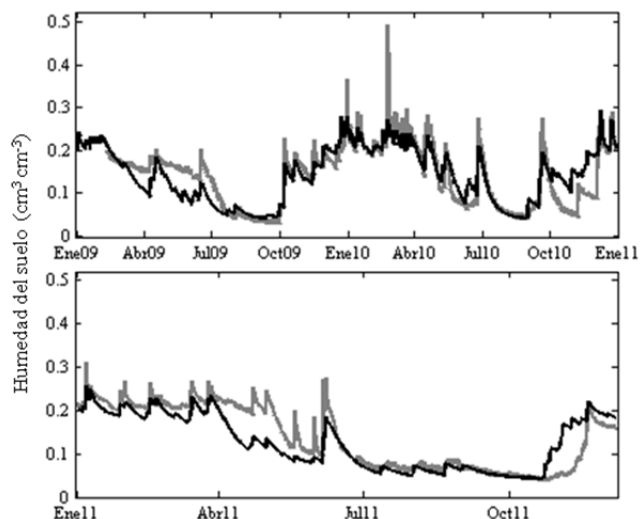


Fig. 2. Valores de humedad del suelo a 10 cm observados (gris) frente a los simulados (negro) para la calibración (p. sup.) y validación (p. inf.)

4.2.- Area experimental de REMEDHUS

En esta zona se realizaron 30 simulaciones de la humedad del suelo a varias profundidades (10, 30, 60 cm) en estaciones representativas (Tabla 1).

En términos de funcionamiento del modelo en el periodo de calibración, se observan unos valores satisfactorios en los indicadores para cuantificar la bondad del ajuste (Tabla 4). Estos valores se corresponden con los obtenidos en aplicaciones similares por el modelo SWBM-GA (Brocca et al., 2011a, 2013). En el caso de la validación, estos valores son generalmente satisfactorios para los grupos de las estaciones representativas 3 y 4, correspondientes a suelos de textura franca a moderadamente fina y contenidos de materia orgánica superiores al 1%, tanto en secano como en pasto (Tabla 2).

Tabla 2. Indicadores de la bondad de ajuste para la calibración y validación en REMEDHUS

ID/ Prof. (cm)	Periodo Cal/Val	Calibración			Validación		
		NS	R ²	RMSE	NS	R ²	RMSE
L3/10	08-09 /10-12	0,68	0,69	0,02	-0,13	0,46	0,03
L3/30	08-09 /10-12	0,71	0,73	0,02	0,49	0,58	0,02
L3/60	08-09/ 10-12	0,72	0,73	0,01	0,46	0,56	0,02
N9/10	08-09/ 10-12	0,73	0,80	0,04	0,43	0,69	0,06
N9/30	08-09/ 10-12	0,75	0,78	0,03	0,55	0,64	0,05
N9/60	08-09 /10-12	0,81	0,82	0,03	0,50	0,56	0,05
M9/10	08-09 /10-12	0,82	0,84	0,03	0,57	0,79	0,04
M9/30	08-09 /10-12	0,84	0,87	0,02	0,79	0,82	0,03
M9/60	08-09 /10-12	0,89	0,90	0,02	0,86	0,89	0,02
Vill./10	09- 10/11	0,73	0,74	0,03	0,72	0,73	0,04
Vill./30	09- 10/11	0,66	0,67	0,06	0,70	0,70	0,06
Vill./60	09- 10/11	0,69	0,69	0,06	0,75	0,75	0,05
H9/10	08-09 /10-12	0,71	0,72	0,10	0,67	0,69	0,10
H9/30	08-09 /10-12	0,9	0,9	0,03	0,81	0,81	0,05
H9/60	08-09 /10-12	0,82	0,84	0,04	0,81	0,81	0,04

NS, coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe; R^2 coeficiente de determinación; RMSE es del error cuadrático medio ($m^3 m^{-3}$)

En la Figura 3 se muestran series con resolución temporal de 30 minutos para las profundidades de simulación de 10, 30 y 60 cm en los periodos de calibración y validación correspondiente a la estación del grupo 3. Se puede observar que el modelo representa sumamente bien el ciclo anual de la humedad del suelo y que captura correctamente la mayoría de los picos y valles del patrón de la humedad del suelo.

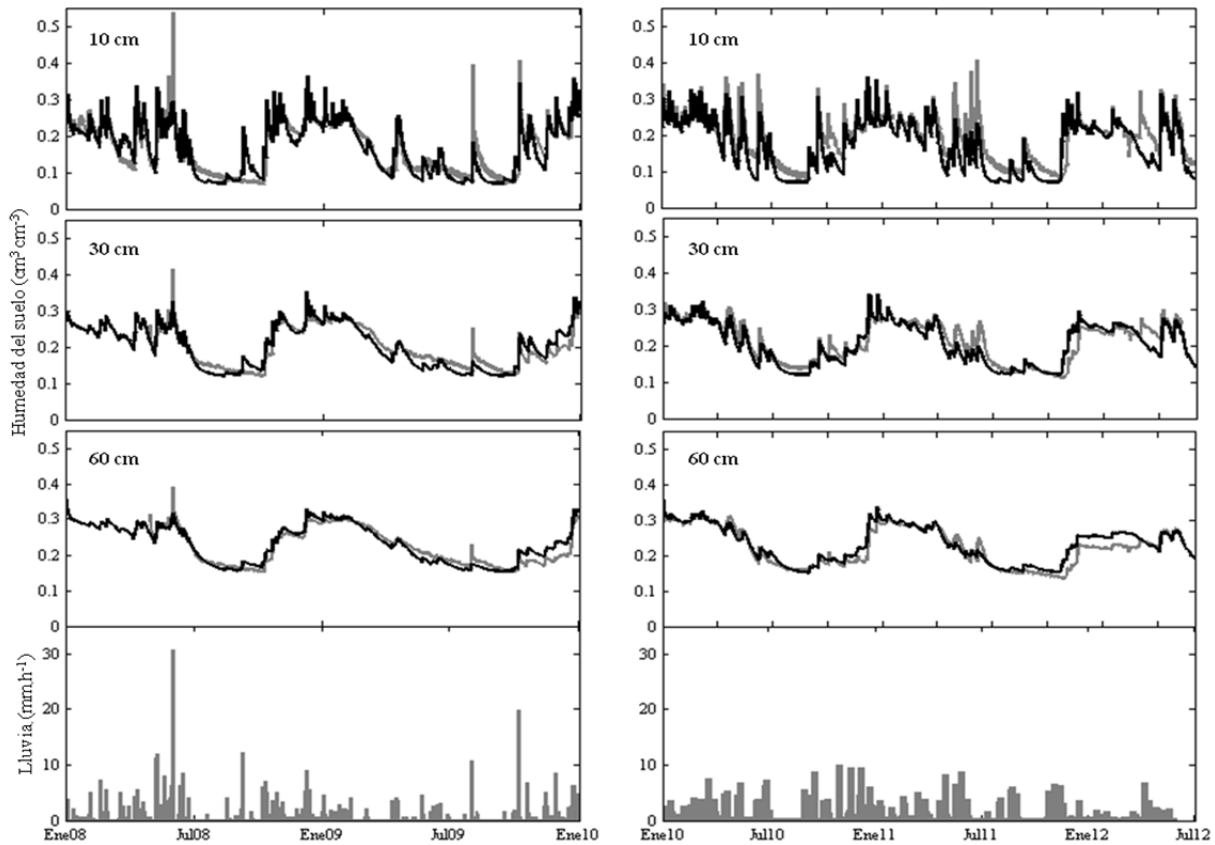


Fig. 3. Humedad volumétrica simulada (negro) frente a la observada (gris) para la calibración (izquierda) y la validación (derecha) a 3 profundidades de la capa de suelo (10, 30, 60 cm) para la estación M09 representativa del grupo 3

En el caso de la estación L03 (Fig. 4), representativa del grupo 1, caracterizada por suelos de textura gruesa y muy bajo contenido en materia orgánica, los valores de NS y R^2 son menos satisfactorios (Tabla 4), especialmente para la simulación a 10 cm de profundidad. Este resultado, probablemente, puede ser atribuido a una variabilidad temporal significativa de la humedad del suelo (Brocca et al., 2013). Esto, asociado a eventos intensos de precipitación, podría explicar los problemas de funcionamiento del modelo. Para la estación N9 representativa del grupo 2 asociado a suelos de textura moderadamente gruesa y materia orgánica baja, esta situación se aprecia de un modo más atenuado.

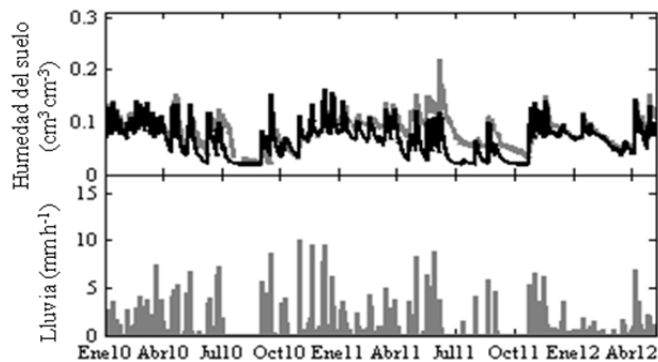


Fig. 4. Humedad volumétrica simulada (negro) frente a la observada (gris) a 10 cm de profundidad para la estación del grupo 1 (L03)

En el periodo de validación de abril a junio de 2011 el modelo parece sobreestimar las pérdidas de humedad del suelo (Fig. 2, 3 y 4). Este efecto es más acusado a 10 cm y puede deberse a una sobreestimación de la evapotranspiración obtenida por una ecuación empírica basada sólo en la temperatura del aire.

La aplicación del modelo en el área experimental REMEDHUS permite el estudio de la variación de la humedad del suelo con respecto a la profundidad. Los resultados obtenidos en la calibración y validación de los indicadores de bondad de ajuste NS y R^2 presentan una tendencia general a aumentar con la profundidad respecto a la capa superficial. En el caso del indicador RMSE, la tendencia general es a disminuir con la profundidad con respecto a la capa superficial. Se detectan dos excepciones correspondientes a la estación N9 para el indicador R^2 y para la estación de Villamor que no siguen una pauta significativa.

Esto parece demostrar que el funcionamiento del modelo es mejor a medida que aumenta la profundidad de la simulación, tal vez relacionado con una menor variabilidad de la humedad del suelo a estas profundidades y con la menor influencia de la evapotranspiración. Según Martínez et al. (2012), existe una menor relación entre la humedad del suelo de las capas próxima a la superficie y de la zona de enraizamiento debido a su diferente comportamiento frente a las precipitaciones y factores que controlan la

humedad del suelo a esas profundidades.

4.3.- Extensión del modelo a la cuenca del Duero

En la tabla 5 se observa que las estaciones seleccionadas recogen una amplia diversidad, tanto en lo que se refiere a usos del suelo, como a características edáficas, a lo largo de la cuenca del Duero.

Las simulaciones realizadas en estas estaciones han permitido observar el comportamiento de los modelos SWBM-GA y SWBM-GA_{red} sobre periodos cortos de calibración.

Los valores obtenidos para los indicadores cuantitativos de bondad del ajuste (Tabla 6) de ambos modelos son altamente satisfactorios ($> 0,80$ para NS y R^2 y $\leq 0,04$ para RMSE), con la excepción de dos casos ($\geq 0,59$ para NS y R^2 y $\leq 0,04$ para RMSE). Esto hace aconsejable, en principio, el empleo del modelo SWBM-GA reducido ya que tiene una fiabilidad similar al SWBM-GA, pero con la ventaja de ser menos exigente en cuanto a los parámetros de calibración (Brocca et al., 2013) y, en consecuencia, facilita la extensión del modelo a grandes cuencas.

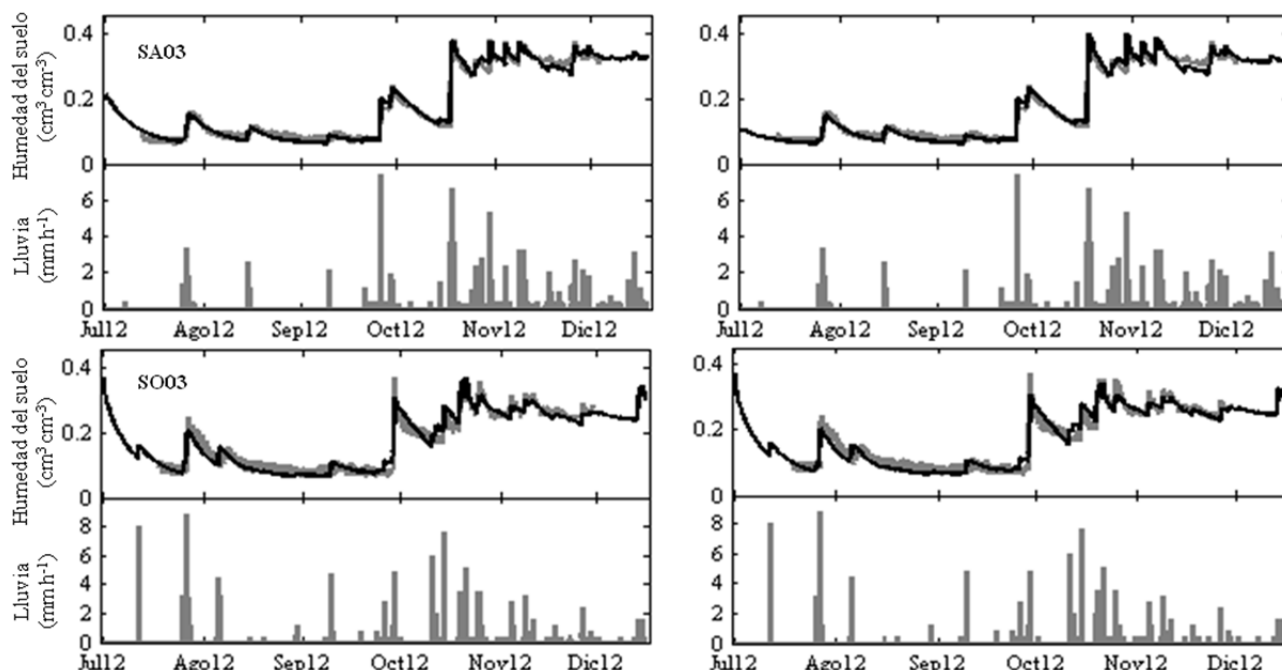


Fig.5. Calibración de la versión normal (izquierda) y reducida (derecha) del modelo en las estaciones SA03 (Salamanca) y SO3 (Soria)

Tabla 5. Características de los suelos y usos de las estaciones de la cuenca del Duero

ID	Uso del suelo	Textura USDA	MO (%)
AV01	Cereal	Franca	7,2
BU04	Cereal	Franco arcillosa	8,0
BU05	Cereal	Franco arcillosa	3,2
LE03	Maíz y rastrojo	Franco arenosa	5,1
LE04	Rastrojo, chopos, maíz	Franca	5,3
P03	Carrizo, pastizal, cereal.	Franco arcillosa	2,9
P06	Girasol, cereal, chopos	Franco arenosa	3,3
P07	Maíz. cereal	Franca	7,8
SA01	Pastizal-erial	Franco arenosa	1,5
SA03	Maíz, chopos, regadío	Franco arenosa	3,9
SG02	Maíz y cereal	Arenosa	2,3
SO03	Barbecho	Franco arcillo limosa	2,2
VA05	Cereal	Arcillosa	6,5
VA06	Cultivo herbáceo	Franco arenosa	2,1
ZA01	Maíz	Franco arcillosa	2,4
ZA02	Maíz. cereal	Franco arenosa	2,1
ZA04	Cereal	Franco arcillo limosa	2,1

Tabla 6. Indicadores de la bondad de ajuste para la calibración en diferentes puntos de la cuenca del Duero

ID/Periodo (meses)	SWBM-reducido			SWBM-GA		
	NS	R ²	RMSE	NS	R ²	RMSE
AV1/2	0,59	0,66	0,03	0,78	0,78	0,02
BU4/4	0,96	0,96	0,02	0,95	0,96	0,02
BU5/4	0,94	0,94	0,02	0,93	0,93	0,02
LE3/4	0,97	0,98	0,01	0,98	0,98	0,01
LE4/4	0,92	0,93	0,03	0,93	0,94	0,02
P3/4	0,81	0,82	0,04	0,81	0,83	0,04
P6/4	0,92	0,95	0,03	0,97	0,97	0,02
P7/4	0,85	0,87	0,04	0,85	0,86	0,04
SA1/2	0,96	0,97	0,02	0,97	0,98	0,01
SA3/4	0,98	0,98	0,01	0,99	0,99	0,01
SG2/4	0,90	0,90	0,01	0,91	0,91	0,01
SO3/4	0,95	0,95	0,02	0,95	0,95	0,02
VA5/4	0,60	0,64	0,04	0,71	0,76	0,03
VA6/4	0,96	0,96	0,02	0,98	0,98	0,02
ZA1/4	0,94	0,95	0,02	0,96	0,96	0,02
ZA2/4	0,87	0,87	0,02	0,88	0,88	0,02
ZA4/4	0,94	0,97	0,02	0,94	0,96	0,02

5.- Conclusiones

En este estudio se aplica un modelo de balance de agua en el suelo en sus versiones normal (SWBM-GA) y reducida (SWBM-GA_{red}), a diferentes profundidades y en periodos comprendidos entre dos meses y cuatro años y medio de duración. El estudio realizado alcanza las siguientes conclusiones:

- Las pruebas realizadas en la cuenca experimental de Villamor demuestran la aplicabilidad del modelo a la zona de estudio.
- En términos de funcionamiento del modelo, los resultados obtenidos en el área experimental de REMHEDUS son satisfactorios. En esta zona, el modelo es sensible a variaciones significativas en las propiedades de los suelos de las estaciones representativas. Por otra parte, en las capas más profundas, los resultados de los indicadores cuantitativos de la bondad del modelo son generalmente mejores con respecto a los obtenidos en la capa superficial.
- La aplicación del modelo en la cuenca del Duero, tanto en su versión reducida como normal, ofrece buenos resultados para la calibración en periodos cortos. Se considera viable el empleo del modelo reducido, aspecto que es de especial interés en relación con la futura aplicación del modelo de forma distribuida a la Cuenca del Duero.

A la vista de los resultados obtenidos, la utilización de un modelo como el que se ha empleado en este estudio, abre una vía de aplicación esperanzadora para poder conseguir mapas de humedad del suelo a diferentes escalas espaciales. La obtención de dichos mapas puede resultar de gran ayuda para la gestión de los recursos hídricos y de los riesgos hidrológicos en la cuenca del Duero, y en cualquier otra donde se requieran.

Agradecimientos. Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad (proyectos AYA2010-22062-C05-02 y AYA2012-39356-C05-05) y al Instituto Tecnológico Agrario de la Junta de Castilla y León y, en especial al responsable de Inforiefio Francisco Javier Antolín Martínez.

6.- Referencias

- Beven KJ. 2008. On doing better hydrological science. *Hydrol. Process.* 22(17), 3549–3553.
- Brocca, L., R. Morbidelli, F. Melone, y Moramarco, T. 2007. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. *J. Hydrol.* 333(2–4), 356–373.
- Brocca, L., F. Melone, y T. Moramarco, 2008. On the estimation of antecedent wetness condition in rainfall-runoff modelling. *Hydrol. Process.* 22(5), 629–642.
- Brocca, L., F. Melone, T. Moramarco, y R. Morbidelli, 2009. Soil moisture temporal stability over experimental areas of Central Italy. *Geoderma*, 148(3–4), 364–374.
- Brocca, L., F. Melone, T. Moramarco, y R. Morbidelli, 2010. Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. *Water Resour. Res.* 46, W02516.
- Brocca, L., F. Melone, T. Moramarco, D. Penna, M. Borga, P. Matgen, y S. Heitz, 2011a. Investigation of the hydrologic response of three experimental basins across Europe. *Journal for Land Management, Food and Environment*, 62(1–4), 31–37.
- Brocca, L., S. Hasenauer, T. Lacava, F. Melone, T. Moramarco, W. Wagner, W. Dorigo, P. Matgen, J. Martínez-Fernández, P. Llorens, J. Latron, C. Martin, y M. Bittelli, 2011b. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe. *Remote Sens. Environ.*, 115, 3390–3408.
- Brocca, L., T. Tullio, F. Melone, T. Moramarco, y R. Morbidelli, 2012. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability. *J. Hydrol.* 422–42, 63–75.
- Brocca, L., C. Camici., F. Melone, T. Moramarco, J. Martínez-Fernández, F. Didon-Lescot, y R. Morbidelli, 2013. Improving the representation of soil moisture by using a semi-analytical infiltration model. *Hydrol. Process. En prensa.* DOI:10.1002/hyp.9766
- Chen, X., S. Chen, R. Zhong, Y. Su, J. Liao, D. Li, L. Han, Y. Li, y X. Li, 2012. A semi-empirical inversion model for assessing surface soil moisture using AMSR-E brightness temperatures. *J. Hydrol.* 456–457, 1–11.
- Choi, M y J.M. Jacobs, (2011). Spatial soil moisture scaling structure during Soil Moisture Experiment 2005. *Hydrol. Process.* 25, 926–932.
- Döll, P., K. Berkhoff, H. Bormann, N. Fohrer, D. Gerten, S. Hagemann, y M. Krol, 2008. Advances and visions in large-scale hydrological modelling: findings from the 11th Workshop on Large-Scale Hydrological Modelling. *Adgeo*. 18, 51–61.
- Doorenbos J y W.O. Pruitt, 1977. Background and development of methods to predict reference crop evapotranspiration (ET_o). In *FAO-ID-24, Appendix II*, 108–119.
- Famiglietti J.S., y E.F. Wood, 1994. Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes. *Water Resour. Res.* 11, 3061–3078.
- Gómez-Plaza, A., M. Martínez-Mena, J. Albaladejo, y V. Castillo, 2001. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *J. Hydrol.* 253, 211–226.
- Lacava, T., P. Matgen, L. Brocca, M. Bittelli, y T. Moramarco, 2012. A first assessment of the SMOS soil moisture product with in-situ and modelled data in Italy and Luxembourg. *IEEE TGARS*, 50(5), 1612–1622.
- Martinez, C., G.R. Hancock, J.D. Kalma, y T. Wells, 2008. Spatio-temporal distribution of near-surface and root zone soil moisture at the catchment scale. *Hydrol. Process.* 22, 2699–2714.
- Martínez, G., A. Yakov, Y.A. Pachepsky, y H. Vereecken, 2013. Temporal stability of soil water content as affected by climate and soil hydraulic properties: a simulation study. *Hydrol. Process.* DOI: 10.1002/hyp.9737
- Martínez-Fernández, J., A. Ceballos-Barbancho, y M.A. Luengo Ugidos, 2001. La sequía edáfica en la Cuenca del Duero. *Ecosistemas. AEET.* 10, 3–7.
- Martínez-Fernández, J., y A. Ceballos, 2003. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 1647–1656.
- Martínez-Fernández, J., y A. Ceballos, 2005. Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. *J. Hydrol.* 312, 28–38.
- Martínez-Fernández, J., A. Cano, V. Hernández-Santana, y C. Morán, 2007. Evolución de la humedad del suelo bajo diferentes tipos de cubierta vegetal de la cuenca del Duero. *Estudios de la Zona No-Saturada del Suelo Vol. VIII.* J.V. Giráldez Cervera y F.J. Jiménez Hornero, 275–280
- McMillan, H.K. 2012. Effect of spatial variability and seasonality in soil moisture on drainage thresholds and fluxes in a conceptual hydrological model. *Hydrol. Process.* 26, 2838–2844.
- Morán-Tejeda, E., J.I. López-Moreno, A. Ceballos-Barbancho, y S.M. Vicente-Serrano, 2011. River regimes and recent hydrological changes in the Duero basin (Spain). *J. Hydrol.* 404, 241–258.
- Nash, J.E., y J.V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models Part 1- A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10 (3), 282–290.
- Rawls W.J., D.L.Brakensiek, y K.E. Saxton, 1982. Estimation of soil water properties. *Transaction of the ASAE* 25(5), 1316–1320.