

## CALIBRACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO UNIDIMENSIONAL PARA LAS ESTACIONES DE DIAMANTE Y PARANÁ, ENTRE RÍOS

Gonzalo Díaz<sup>1,2</sup>, Moira Doyle<sup>1,2</sup> y Armando Brizuela<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA, UMI-IFAECI)

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN – UBA. Intendente Guiraldes 2160, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER – CICyTTP CONICET.

(Manuscrito recibido el 31 de marzo de 2013, en su versión final el 9 de octubre de 2013)

### RESUMEN

Dado el impacto que tiene el contenido de humedad en el suelo en meteorología y en distintas actividades como la agricultura y la ganadería, es de importancia desarrollar métodos que mejoren la estimación de la misma. Esta tarea puede llevarse a cabo mediante la ubicación de sensores de humedad en el terreno, a través del uso de información satelital o utilizando Modelos Hidrológicos. Este trabajo presenta los resultados de la calibración del modelo hidrológico CLASS U3M 1D para las estaciones de Diamante y Paraná, provincia de Entre Ríos. A partir de las cartas de suelo de Argentina y de las funciones de edafotransferencia, se estimaron algunos de los parámetros hidráulicos del modelo. Los resultados obtenidos fueron estadísticamente significativos al 99 %, con valores de correlación entre la serie observada y simulada, en general, del orden de 0.6 y 0.7 para Diamante y entre 0.3 y 1 para Paraná. El Error Cuadrático Medio se mantuvo aproximadamente en 0.06 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> para Diamante y entre 0.03 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> y 0.18 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> para Paraná según la simulación. Al correlacionar las simulaciones de la humedad del suelo obtenidas a partir de modificar el método de estimación de la evapotranspiración, usada como variable de entrada al modelo hidrológico, se obtuvieron valores cercanos a 1. Esto permite utilizar métodos más sencillos en la estimación de la evapotranspiración con resultados igualmente robustos.

*Palabras clave: Modelos Hidrológicos, humedad del suelo, Funciones de Edafotransferencia, evapotranspiración.*

## CALIBRATION OF AN UNIDIMENSIONAL HYDROLOGICAL MODEL FOR DIAMANTE AND PARANA STATIONS, ENTRE RIOS

### ABSTRACT

It is important to develop methods to improve the estimation of the soil moisture content, because of the impact in the weather and in various activities, such as agriculture and livestock. This task may be done by placing moisture instruments in the ground at different points and levels, through the use of remote sensing information, or running Hydrological Models. This work shows the results of the hydrological model CLASS U3M 1D calibration for Diamante and Parana

stations in the province of Entre Rios. The hydraulic parameters were estimated through the information obtained from Argentina Soil Maps and the Pedotransfer Functions. The results were statistically significant at 99 %, with correlation values between the observed series and the simulated series, in general, on the order of 0.6 and 0.7 for Diamante and between 0.3 y 1 for Parana. The root mean square error remained approximately in 0.06 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> for Diamante and between 0.03 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> and 0.18 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> for Parana depends on the simulation. After applying a variation in the evapotranspiration input variable, correlation values close to 1 were obtained when the models results were compared.

*Keywords: Hydrological Models, soil moisture, Pedotransfer Functions, evapotranspiration.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Se ha comprobado a través de los años la importancia de estimar el movimiento del agua dentro del suelo, tanto para la agricultura como para la prevención de eventos severos, como inundaciones o sequías. El monitoreo de la humedad del suelo es fundamental para estudiar estos eventos y existen diversas formas de obtener registros de esta variable, ya sea mediante sensores de humedad ubicados a diferentes profundidades en el suelo, a través del uso de información satelital o como el resultado de aplicar Modelos Hidrológicos (MH). Actualmente en la Argentina, el método que menos se utiliza es el de los sensores de humedad, hay muy pocas estaciones meteorológicas en el país que cuenten con sensores de este tipo que realicen mediciones en forma continua, esto se debe a su alto costo de instalación y de calibración. A diferencia de este método, el uso de imágenes satelitales es una técnica más usual en nuestro país, pero existe un problema de escala temporal, ya que los tiempos de revisita de los satélites suelen ser muy grandes y esto hace difícil llevar un registro continuo de la humedad del suelo con este procedimiento. Por lo tanto, la utilización de MH para obtener información de la humedad del suelo en todo momento, es una de las opciones que se podría utilizar.

En general los modelos de balance hidrológico se basan en la implementación de la ecuación

de Richards trabajando en la zona no saturada del suelo. Algunos de los modelos existentes han sido evaluados por Alexander y otros (1986) y Leij y otros (1997). Para el transporte de agua y de diferentes sustancias químicas y minerales dentro del suelo, es importante simular las propiedades hidráulicas del suelo cerca de la saturación (Borgesen et al. 2006); como la curva de retención de agua y la función de la conductividad hidráulica, por ello los MH generalmente vienen acoplados con modelos hidráulicos como los desarrollados por Van Genuchten (1980); Brooks y Corey (1966); Vogel y Cislserova (1988).

Asimismo, la cantidad de agua almacenada en el suelo depende de diversas variables. Las meteorológicas que influyen en gran medida en el contenido de agua del terreno son la precipitación y la evaporación. De estas, la evaporación y la evapotranspiración (ET) siempre han sido variables difíciles de calcular o estimar, por lo tanto se han ideado diferentes metodologías para estimarlas. Estos procedimientos se basan en calcular la evaporación o la ET en función de variables meteorológicas más usuales, como temperatura, humedad del aire, viento, radiación, etc.

Desde los años 70 se ha intentado mejorar el cálculo para la estimación de ET ya que, por ejemplo, el método de Penman producía con frecuencia sobreestimaciones del valor de ET. En este sentido, en los años 90, la FAO llevó a cabo una consulta a expertos

e investigadores, con la colaboración de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial, para revisar las metodologías de estimación. Esto dio como resultado la adopción del método combinado de Penman – Monteith como el nuevo procedimiento estándar para la estimación de la ET que utiliza para el cálculo las variables de temperatura, humedad, viento y radiación. Cuando no se cuenta con la mayoría de estas variables, se puede utilizar un método alternativo, como el propuesto por Hargreaves y Samani (1985), donde se reducen las variables necesarias a temperatura y radiación extraterrestre. En principio, esta ecuación es aplicable a una escala de tiempo diario, pero si es necesario, puede ser calibrada para utilizarse a escala mensual o anual. La FAO propone varios métodos que toman en cuenta la base temporal y los datos disponibles para las estimaciones de ETo (FAO, 2006).

La motivación de este trabajo se basa en la aplicación de un MH en la provincia de Entre Ríos. Se busca adaptar esta herramienta a la región y poder utilizarla para el análisis de eventos severos, como inundaciones. Asimismo, se aplica el modelo en regiones donde se cuenta con datos medidos de humedad del suelo, como es Entre Ríos, y luego extenderlo a regiones con perfiles de suelo sean similares a los de las estaciones de esta provincia donde no se cuentan con mediciones.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se indican los datos de las estaciones utilizadas y la metodología a seguir para llevar a cabo la calibración del MH, también se discuten los parámetros del modelo y los ajustes para obtener los mejores resultados. En la sección 3, se muestran los resultados de humedad del suelo obtenidos por el modelo, contrastados con los datos observados. Además, se expone un análisis de la influencia de la ET sobre los resultados del MH. Sobre esta base se realizaron diferentes simulaciones, una en la cual una de las variables de entrada se obtiene del método de Penman – Monteith y otra que

utiliza el método de Hargreaves. Por último, en la sección 4, se presentan las conclusiones.

## 2. DATOS Y MÉTODOS

Se utilizaron series de datos diarios de estaciones automáticas de Diamante y Paraná en Entre Ríos. La estación meteorológica de Diamante se encuentra ubicada en el Departamento de Diamante en la provincia de Entre Ríos siendo sus coordenadas geográficas 32° 03' S y 60° 39' O. La misma cuenta con sensores para medir temperatura, humedad, viento, precipitación, energía solar y humedad del suelo a distintas profundidades (7 cm, 20 cm. y 60 cm.) mientras que la evapotranspiración es estimada a partir de la ecuación de Penman - Monteith. La estación meteorológica de Paraná se encuentra ubicada en el Departamento de Paraná en la provincia de Entre Ríos con coordenadas geográficas 31° 43' S y 60° 31' O. La misma cuenta con sensores de temperatura y precipitación en superficie y humedad del suelo a distintas profundidades (5 cm, 10 cm, 20 cm. y 60 cm.) y la estimación de la evapotranspiración se realiza como en Diamante. Tanto el sensor de Diamante como el de Paraná son sensores de resistencia eléctrica (Watermark Soil Moisture Sensor). La serie de datos de Diamante se extiende desde el 01 de enero del 2008 hasta el 30 de abril del 2010, mientras que la serie de datos de Paraná, abarca el período desde el 01 de junio del 2009 hasta el 31 de marzo del 2010. La estación de Diamante pertenece al CICYTTP-CONICET y la de Paraná a la Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos.

El modelo hidrológico utilizado en este trabajo es el CLASS U3M 1D (Unsaturated Moisture Movement Model). Fue desarrollado en Australia por el Departamento de Infraestructura, Planeamiento y Recursos Naturales (Tuteja et al. 2004) para resolver la ecuación de Richards en una dimensión, trabajando en la zona no saturada del suelo y con un modelo hidráulico acoplado.

Para cada punto donde se desea ejecutar el modelo es necesario disponer, para el período de tiempo a analizar, no solamente de las condiciones meteorológicas que afectan directamente el balance de agua en el suelo, es decir precipitación y evapotranspiración diaria, sino también de información sobre la cubierta vegetal del lugar y las propiedades del suelo. El modelo permite establecer valores de espesores para el perfil del suelo, pudiendo discriminarse hasta 4 niveles, con sus correspondientes características texturales. En base al tipo de suelo, se deben ajustar los parámetros hidráulicos, entre ellos el potencial matricial de los puntos de Capacidad de Campo (CC) y de Punto de Marchitez Permanente (PMP) y otros que dependerán del modelo hidráulico escogido. CLASS U3M 1D incluye 3 tipos de modelos hidráulicos, ampliamente utilizados, elaborados por Van Genuchten, Brooks - Corey y Vogel - Cislérova. En cuanto al uso del suelo, es necesario determinar el correspondiente Índice de Área Foliar (IAF) según el tipo de cobertura vegetal (pasto, cultivo o bosque). Con esta información, el modelo devolverá resultados sobre las condiciones de humedad de suelo en los distintos niveles, como así también los excesos de agua producidos en cada paso de tiempo.

En el proceso de obtener el mejor ajuste entre la humedad del suelo observada y la estimada por el modelo, se analizaron por separado los impactos sobre los resultados al modificar las 3 principales componentes del modelo: el modelo hidráulico y sus parámetros, el uso del suelo y las variables meteorológicas.

Los valores de los parámetros hidráulicos de los suelos utilizados en el modelo para las estaciones de Diamante y Paraná fueron estimados a partir de relaciones empíricas. Estas relaciones se definen como Funciones de Edafotransferencia o Pedotransferencia. (FET o FPT), ideadas inicialmente por Briggs y McLane (1907). La ventaja de estas funciones se encuentra en utilizar variables de suelo mayormente conocidas (como la textura del suelo, densidad aparente y materia orgánica, las

cuales fueron obtenidas a partir de las Cartas de Suelo de los Departamentos de Diamante y Paraná elaboradas por INTA) para lograr obtener variables más complejas (en este caso, para obtener los parámetros hidráulicos).

Se utilizaron diversas FET, entre ellas las de Rawls y Brakensiek (1989), Vereecken (1989) y luego reformulada en Weynants et al. (2009), Tomasella et al. (2000) y por último, Wösten (1997) y Wösten et al. (1999), de ahora en más indicadas como Wösten 1 y Wösten 2 respectivamente. También, se utilizaron los valores propuestos por Carsel y Parish (1988), definidos para cada textura de suelo particular. Para definir algunas de estas funciones, se contó con información de las determinaciones de CC, PMP y densidad aparente de las estaciones analizadas, utilizadas por Passadore y Wendler (2011), las mismas fueron realizadas en la Estación Experimental Agropecuaria Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Los ajustes obtenidos para Diamante, fueron utilizando las funciones de Rawls y Brankensiek y Wösten et al. (1999), mediante el modelo hidráulico de Van Genuchten; mientras que para Paraná se consiguieron al utilizar los parámetros definidos por Carsel y Parish (1988), y el modelo hidráulico de Brooks - Corey. Los perfiles de suelo utilizados por el modelo tanto para Paraná como para Diamante se presentan en la Tabla 1 mientras que las FET utilizadas para las mejores estimaciones de cada estación y para cada parámetro hidráulico se resumen en la Tabla 2. En la Tabla 3 se indican los valores numéricos de los parámetros obtenidos según el nivel considerado, vale destacar que el cambio de los parámetros entre un nivel y otro es debido a la diferencia en los porcentajes de textura de suelo, materia orgánica y densidad aparente que existe entre las distintas profundidades del modelo.

El modelo incluye valores de IAF por defecto para pasto, cultivo o bosque, pero en este caso se optó por utilizar el módulo CLASS PGM

Estación	Nivel	Textura de Suelo	Espesor (cm)
Diamante	Superior	Franco limoso	5
		Franco limoso	10
		Franco limoso	20
	Inferior	Franco limoso	20
Paraná	Superior	Franco arcillo limoso	13
		Franco arcillo limoso	10
		Arcillo limoso	34
	Inferior	Arcillo limoso	6

*Tabla I:* Perfiles de suelo para la simulación del modelo CLASS U3M 1D. Se definieron cuatro niveles distintos. La textura de suelo de Diamante se definió a través de un análisis del perfil sobre la estación (es decir, que se contó con la información sobre el porcentaje de arena, limo y arcilla). La textura de suelo de Paraná se definió mediante la Carta de Suelo de Entre Ríos, en particular, del Departamento de Paraná.

(Pasture Growth Model) para el modelado de diferentes cultivos, por cuanto las estaciones se encontraban en áreas principalmente con cobertura de pasto. Además, los ajustes obtenidos se lograron al ajustar el IAF anual de Diamante con un mínimo en los meses fríos (con un mínimo absoluto en junio) y un máximo en los meses cálidos (con un máximo absoluto en enero). En el caso de Paraná, fue al utilizar el IAF anual que el modelo usaba por defecto, con un máximo en invierno y un mínimo en verano. De todas maneras, se encontró que las simulaciones realizadas no eran fuertemente dependientes del IAF, a diferencia de los parámetros hidráulicos, los cuales influyen fuertemente en los resultados obtenidos.

Con el objetivo de encontrar el mejor ajuste del modelo a los datos de humedad del suelo, se realizaron una serie de simulaciones con el modelo CLASS U3M 1D para cada una de las estaciones, de las cuales se presentarán 3 (definidas como simulación 1, 2 y 3 a lo largo del trabajo, Tabla 2). En las mismas se modificaron

Estación	Simulación	Modelo	alpha	n	Ksat	l
Diamante	1	VG	R & B y DEFAULT	R & B y DEFAULT	DEFAULT	DEFAULT
	2	VG	WOSTEN 2	WOSTEN 2	WOSTEN 2	DEFAULT
	3	VG	R & B	WOSTEN 2	WOSTEN 2	DEFAULT
Paraná	1	VG	DEFAULT	DEFAULT	DEFAULT	DEFAULT
	2	BC	DEFAULT	DEFAULT	DEFAULT	DEFAULT
	3	BC	C & P (*)	C & P (*)	C & P (*)	DEFAULT

*Tabla II:* Parámetros de las constantes hidráulicas estimadas mediante FET y mediante la clasificación de suelos de Carsel y Parish (1988). La primera columna indica la estación en la cual se produjo la calibración. La segunda columna indica el número de simulación en cuestión. La tercera columna indica el modelo hidráulico utilizado (VG: Van Genuchten, BC: Brooks – Corey). La cuarta y quinta columna indican parámetros específicos de los modelos hidráulicos (alpha y n), R & B indica que se utilizó la FET de Rawls y Brakensiek, C & P indica que se utilizó la clasificación de Carsel y Parish y Wösten 2 que se utilizó la FET de Wösten de 1999. La sexta columna indica las FET que se utilizaron para estimar la conductividad hidráulica. La última columna muestra que se usaron los valores por default de la constante l de los modelos.

(\*) En estos casos los parámetros que se utilizaron fueron tomados textualmente de la bibliografía.

los parámetros del modelo relacionados con las variables hidráulicas del suelo y en algunos casos el modelo hidráulico acoplado.

Por último, se llevó a cabo una comparación de los resultados obtenidos con el mejor modelo para la estación de Paraná al estimar la ET mediante dos métodos diferentes. Vale destacar que los datos de entrada ingresados al modelo son de evaporación y no de ET. Sin embargo, el CLASS U3M 1D cuenta con un parámetro de transformación, el cual relaciona la variable de evaporación con la variable de ET. Para la simulación del modelo se utilizaron los valores de

Estación	Simulación	Nivel de profundidad	alpha (1/cm)	n	Ksat (cm/día)	I
Diamante	1	Superior	0.004	2.073	10.800	0.5
			0.020	1.410	10.800	0.5
		Inferior	0.020	1.410	10.800	0.5
	2	Superior	0.026	1.145	27.930	0.5
			0.022	1.157	24.697	0.5
		Inferior	0.019	1.173	22.388	0.5
	3	Superior	0.004	1.145	27.930	0.5
			0.006	1.157	24.697	0.5
		Inferior	0.006	1.173	22.388	0.5
Paraná	1	Superior	0.068	1.322	62.16	0.5
			0.068	1.322	62.16	0.5
		Inferior	0.005	1.090	0.480	0.5
	2	Superior	0.068	1.322	62.16	0.5
			0.068	1.322	62.16	0.5
		Inferior	0.029	0.127	2.160	1
	3	Superior	0.030	0.151	3.600	0.5
			0.030	0.151	3.600	0.5
		Inferior	0.029	0.127	2.160	1

Tabla III: Los valores numéricos de los parámetros de las constantes hidráulicas utilizadas en cada una de las simulaciones y discriminadas por nivel de profundidad.

ET estimados en la estación y sus resultados se cotejaron con los resultados obtenidos al utilizar la ET calculada según Hargreaves (FAO, 2006).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Análisis del Modelo Hidráulico obtenido

Mediante las diferentes variantes de FET se estimaron los parámetros hidráulicos del modelo. Los resultados obtenidos de humedad del suelo para la estación de Diamante durante el periodo 1 de enero de 2008 al 30 de abril de 2010 se muestran en la Figura 1, Figura 2 y Figura 3. Las figuras superiores [a)] muestran la serie de humedad del suelo, en la estación Diamante, más cercana a la superficie que representa el contenido de agua en los primeros cm. De forma similar, se encuentra el segundo nivel de profundidad de 20 cm [b)] y por último, para el nivel de 60 cm [c)].

En la simulación 1, los resultados del nivel de 7 cm [Figura 1. a)], muestran que los máximos se encuentran totalmente sobreestimados por el modelo en todo los tiempos de simulación. En el caso del nivel de 20 cm [Figura 1. b)], los máximos son, en general, subestimados por

el modelo. Al final del segundo período de simulación, también se aprecia una importante subestimación de los valores mínimos de humedad del suelo. Por último, en el nivel de 60 cm [Figura 1. c)], se observa un comportamiento adecuado de la representación de humedad del suelo por parte del modelo, pero con picos máximos muy subestimados por CLASS.

En la simulación 2, los resultados obtenidos en el nivel de 7 cm [Figura 2 a)], muestran un mejor ajuste, sobre todo en el primer período de simulación. El modelo ajusta mejor los máximos en este período. Sin embargo, en el segundo nivel [Figura 2 b)], la serie modelada queda muy replegada hacia abajo. Tanto los picos máximos como mínimos se encuentran fuertemente subestimados por el modelo. Finalmente, el nivel de 60 cm [Figura 2 c)], muestra resultados poco satisfactorios. El modelo no llega a representar en ningún sentido, el comportamiento de la humedad del suelo.

En la simulación 3, los resultados correspondientes al nivel de 7 cm [Figura 3. a)], indican que el modelo tiende a sobreestimar tanto los valores mínimos como los máximos, fundamentalmente en el segundo período, pero se prevé un mejor ajuste con respecto al obtenido en la simulación 2. No obstante, se puede observar una importante correlación al final del primer período. En el segundo nivel de profundidad [Figura 3. b)], los resultados parecieran no mostrar un buen ajuste en el primer período. Si bien este no muestra una correspondencia óptima entre las observaciones y el modelo, en el segundo período se nota una mejoría. El ajuste obtenido al final de este período resulta ser mejor a los obtenidos en la simulación 1 y 2. Al final del segundo período, se puede observar una mayor discrepancia entre la serie modelada y las observaciones. Por último, en el nivel de 60 cm [Figura 3. c)], hay una leve tendencia del modelo a representar los máximos de humedad, pero con picos menos marcados. En este caso, el resultado obtenido en la segunda simulación fue más satisfactorio que este.

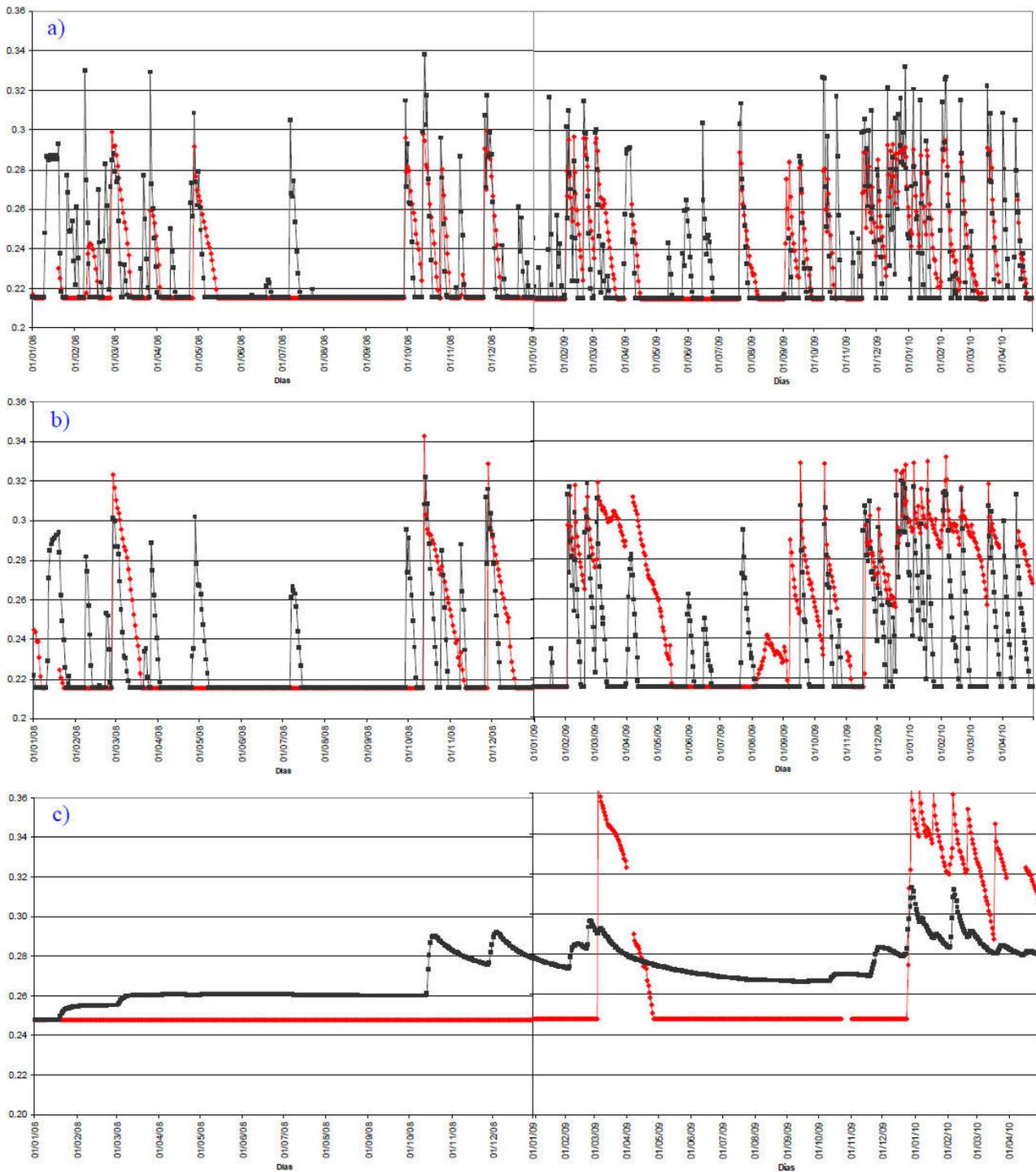


Figura 1: Valores observados (rojo) y simulación 1 de CLASS (negro). a) Profundidad de 7 cm. b) Profundidad de 20 cm. c) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico ( $m^3/m^3$ ). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

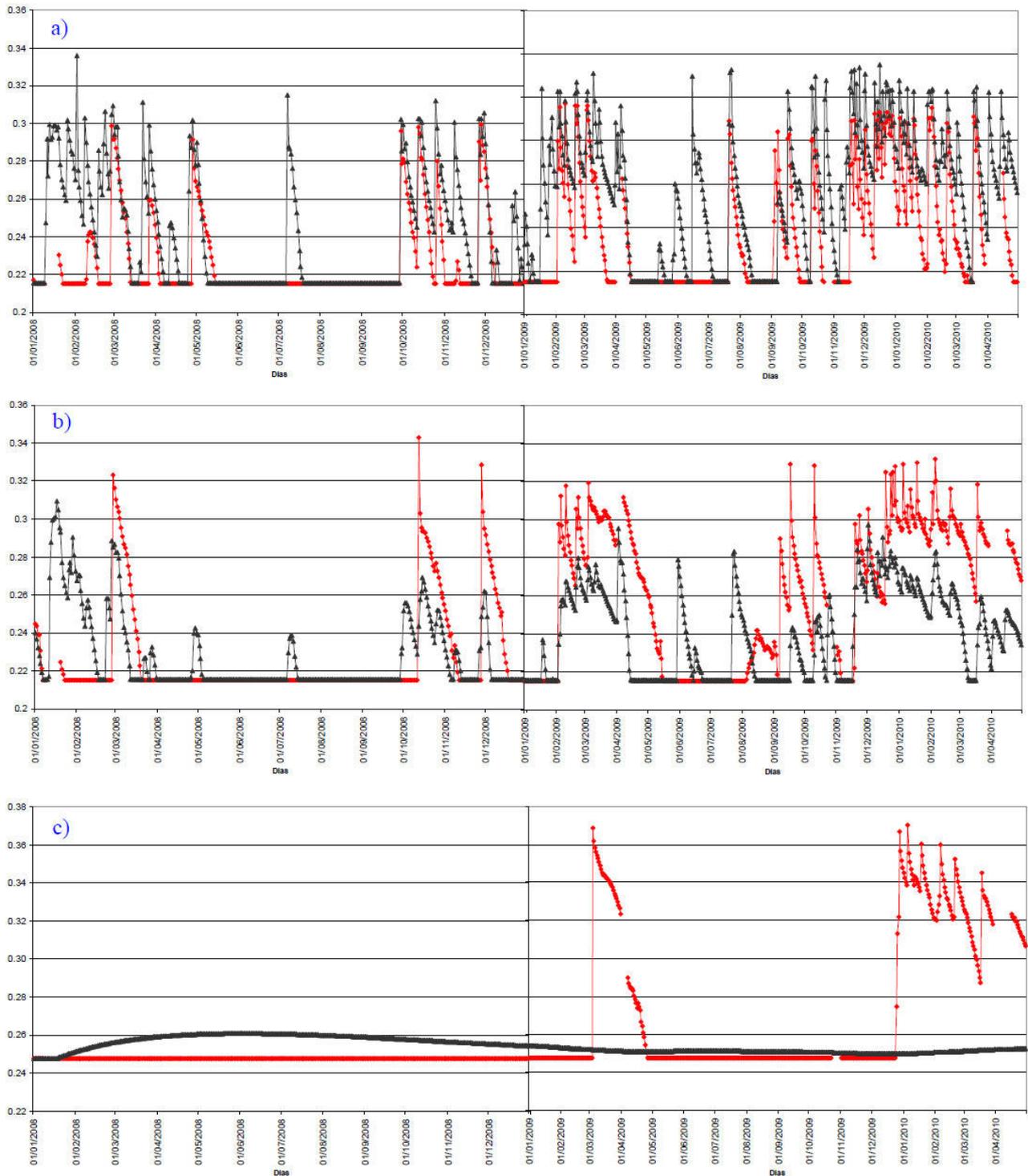


Figura 2: Valores observados (rojo) y simulación 2 de CLASS (negro). a) Profundidad de 7 cm. b) Profundidad de 20 cm. c) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

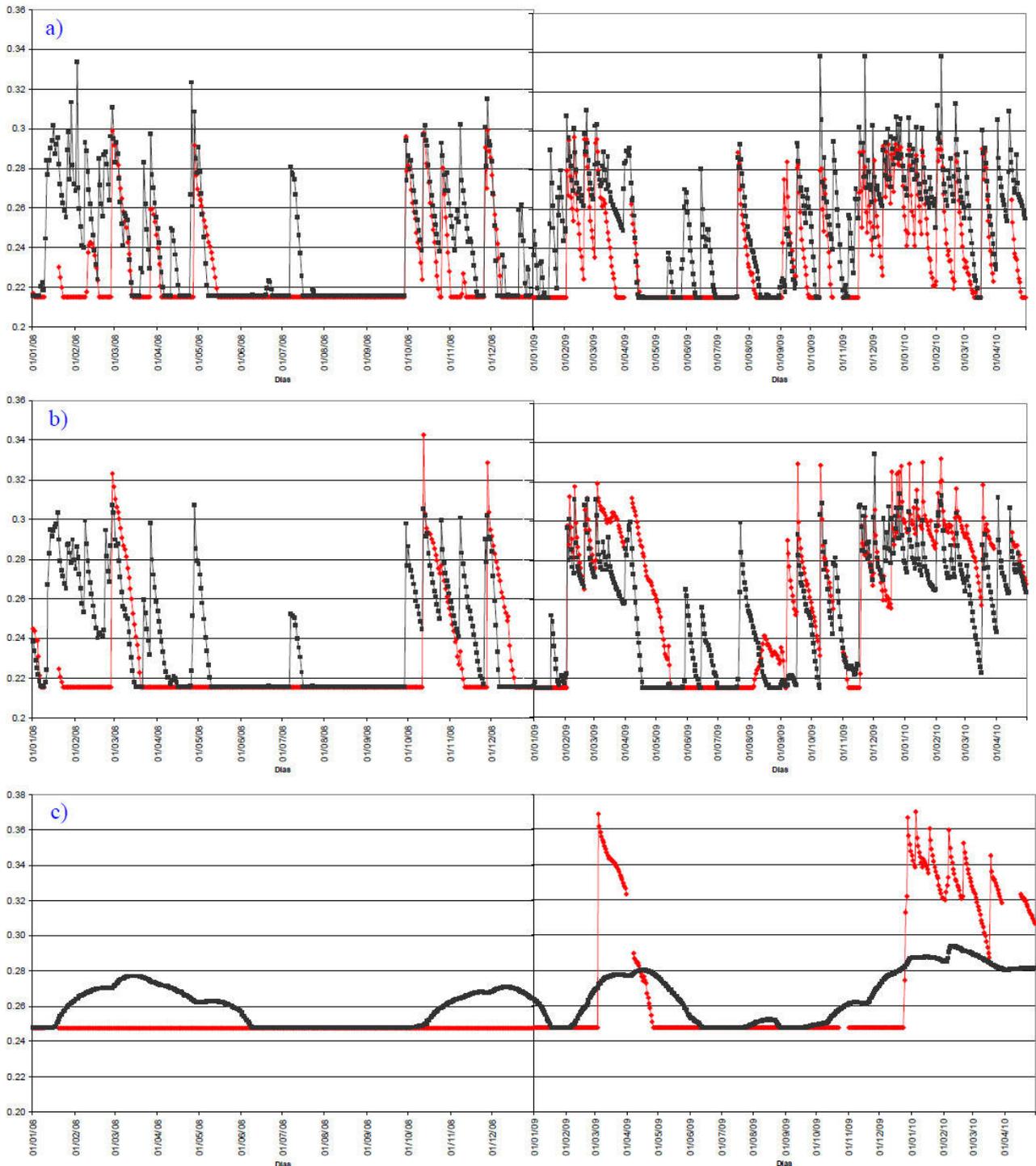


Figura 3: Valores observados (rojo) y simulación 3 de CLASS (negro). a) Profundidad de 7 cm. b) Profundidad de 20 cm. c) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico ( $m^3/m^3$ ). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

Para resumir la relación entre las observaciones y la humedad simulada por el modelo, presentadas en los gráficos de la Figura 1, Figura 2 y Figura 3, se muestran en la Tabla 4, los valores de correlación y de Error Cuadrático Medio (ECM) entre observaciones y simulaciones. El cálculo de ECM se llevó a cabo considerando la siguiente ecuación:

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y'_i - y_i)^2} \quad (1)$$

donde N representa el número de observaciones,  $y_i$  son los valores de las observaciones e  $y'_i$  representa los valores de humedad del suelo de la simulación. Valores de ECM cercanos a cero son indicativos de que hay un buen ajuste entre la serie observada y simulada.

Simulación	Nivel 7 cm		Nivel 20 cm		Nivel 60 cm	
	R	ECM	R	ECM	R	ECM
1	0.7405	0.0606	0.5722	0.0648	0.6526	0.0659
2	0.7281	0.0668	0.6471	0.0640	-0.3534	0.0653
3	0.7415	0.0655	0.6843	0.0667	0.7020	0.0642

Tabla IV: Correlaciones y Error Cuadrático Medio para cada profundidad de la estación de Diamante entre datos observados y simulados por CLASS de cada una de las simulaciones.

Simulación	Nivel 5 cm		Nivel 10 cm		Nivel 20 cm		Nivel 60 cm	
	R	ECM	R	ECM	R	ECM	R	ECM
1	0,3996	0,0582	0,3074	0,0688	0,5648	0,0779	-1	0,1678
2	0,5912	0,0495	0,5436	0,0483	0,6867	0,0526	0	0,1872
3	0,7195	0,0329	0,7011	0,0419	0,7743	0,0543	0	0,1691

Tabla V: Correlaciones y Error Cuadrático Medio para cada profundidad de la estación de Paraná entre datos observados y simulados por CLASS de cada una de las simulaciones.

Todos los coeficientes de correlación de Tabla 4 son estadísticamente significativos al 99 %, en todos los casos la serie estimada con el modelo explica más del 50 % de la varianza de la serie observada para el primer nivel de profundidad y para todas las simulaciones y mayor al 40 % para el resto de los casos, con excepción de la profundidad de 20 cm para la simulación 1 (la varianza explicada es del orden del 30 %) y para la profundidad de 60 cm para la simulación

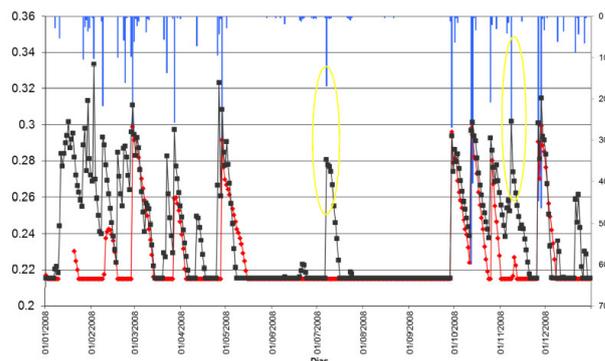


Figura 4: Humedad del suelo observada (rojo), humedad del suelo simulada (negro) y datos de precipitación (azul) para la profundidad de 7 cm en la estación de Diamante y para el primer período de la Figura 3. En el eje a la izquierda se indican los valores de humedad del suelo en contenido volumétrico ( $m^3/m^3$ ) y en el eje de la derecha los valores de precipitación (mm). Los círculos amarillos representan las zonas de alta sensibilidad del modelo.

2 (la cual es del orden del 10 %). Asimismo, los ECM en cada nivel y para cada simulación son pequeños y de magnitudes similares. En particular, se puede apreciar que los resultados obtenidos en el nivel de 7 cm son superiores a los obtenidos en los niveles inferiores, con respecto a la correlación.

Es interesante observar la respuesta en la estimación del contenido de agua en el suelo frente a episodios de precipitación, poniéndose de manifiesto de esta manera la sensibilidad del modelo respecto a la ocurrencia de precipitación. En la Figura 4, se muestran los datos observados y simulados de humedad del suelo para la simulación 3 de Diamante, junto con los datos observados de precipitación.

Los dos días en los que se puede notar claramente la sensibilidad del modelo a la precipitación, son el 07 de julio y 08 de noviembre, indicados con un círculo amarillo en la Figura 4. En estas ocasiones el suelo se mantiene casi inmutable a la precipitación,

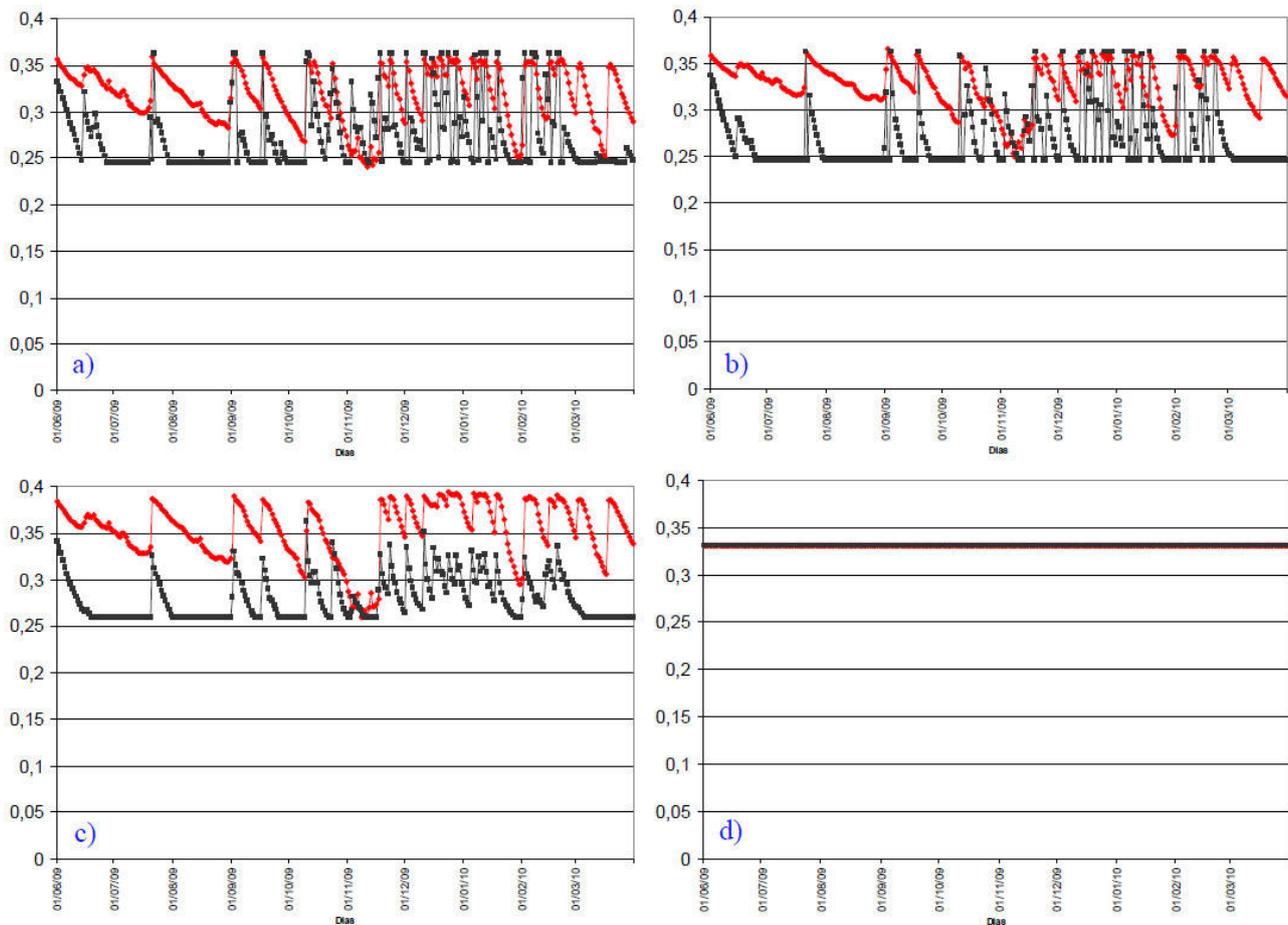


Figura 5: Valores observados (rojo) y simulación 1 de CLASS (negro). a) Profundidad de 5 cm. b) Profundidad de 10 cm. c) Profundidad de 20 cm. d) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

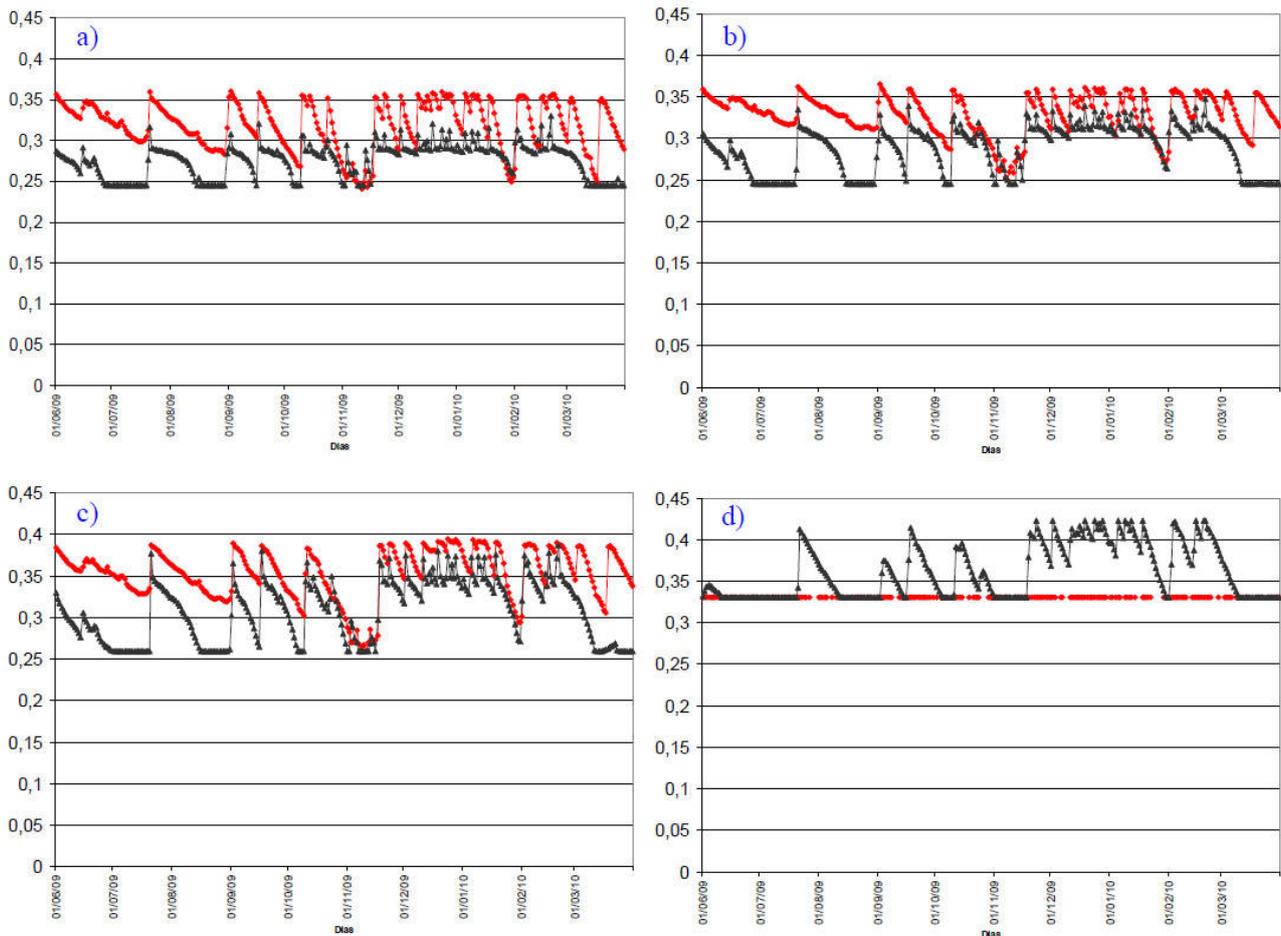
mientras que el modelo registra dos picos bien marcados de contenido de agua en el suelo.

En el caso de la estación de Paraná, los resultados de cada una de las simulaciones se muestran en las Figura 5, Figura 6 y Figura 7. Las figuras superiores izquierda [a)] muestran la serie de humedad del suelo más cercana a la superficie, que representa el contenido de agua en los primeros cm. De forma similar, se encuentra el segundo nivel de profundidad de 10 cm [b)], el tercer nivel de 20 cm [c)] y por último, para el nivel de 60 cm [d)].

El período de tiempo analizado para Paraná es desde el 01 de junio de 2009 hasta el 31 de

marzo de 2010. En general, la humedad de suelo simulada en las tres profundidades, tienen el mismo patrón temporal que las observaciones y se puede notar que al final del período, existe una tendencia del CLASS U3M 1D a homogeneizar el comportamiento y mantener constante el valor de humedad del suelo hasta el final.

En la simulación 1, los mínimos en el primer y segundo nivel [Figura 5. a) y b)] de profundidad se encuentran subestimados por el modelo. El mismo representa una fuerte variabilidad de la humedad del suelo entre máximos y mínimos. En el tercer nivel de profundidad de 20 cm [Figura 5. c)], tanto los valores mínimos como



*Figura 6:* Valores observados (rojo) y simulación 2 de CLASS (negro). a) Profundidad de 5 cm. b) Profundidad de 10 cm. c) Profundidad de 20 cm. d) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

los máximos se encuentran subestimados por el CLASS y nuevamente la variabilidad de la serie es muy grande. Por último, en la Figura 5. d), se muestra la serie observada y simulada para el nivel de 60 cm. La misma representa correctamente las características del suelo.

En la simulación 2, en términos generales, se aprecia una mejoría en los tres primeros niveles de profundidad [Figura 6. a), b) y c)]. Algunos mínimos se encuentran bien representados por el modelo y la variabilidad de la humedad del suelo representada por el modelo es menos intensa, es decir, tiene una variación más gradual. El último nivel de profundidad de 60 cm [Figura 6. d)], no se representa de forma adecuada,

las observaciones muestran que el suelo no tiene variabilidad y el modelo representa una importante variación, diferente a lo que se aprecia en las observaciones.

En la simulación 3, en términos generales, las condiciones de humedad del suelo en el primer nivel se encuentran muy bien representadas por la simulación [Figura 7. a)], excepto por algunos picos que quedan minimizados o maximizados. Por otro lado, en el segundo nivel de profundidad [Figura 7. b)], se observa que los resultados son similares al primer nivel, pero con una menor cantidad de picos óptimamente representados. En el tercer nivel de profundidad [Figura 7. c)], se representa de

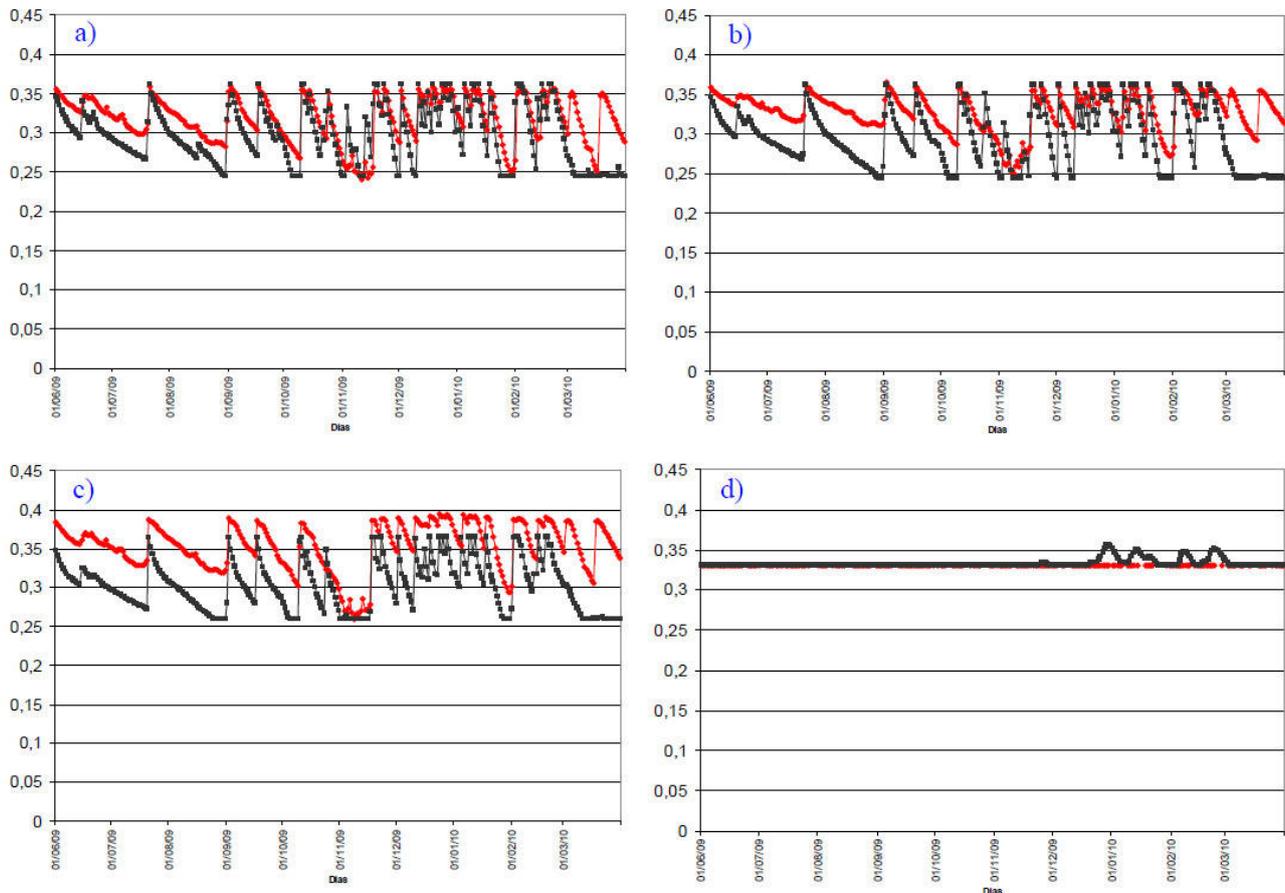


Figura 7: Valores observados (rojo) y simulación 3 de CLASS (negro). a) Profundidad de 5 cm. b) Profundidad de 10 cm. c) Profundidad de 20 cm. d) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

forma eficaz a los datos observados, pero con un defasaje de la serie simulada con respecto a la observada. Por último, el nivel de 60 cm. [Figura 7. d)], muestra un suelo homogéneo con respecto a la humedad del suelo. Durante todo el período, el contenido de agua en el suelo no varía. El modelo representa de forma similar este comportamiento, excepto por algunos picos cerca del final del período. Tanto el primer nivel como el segundo y el tercero, presentan una gran mejoría con respecto a las simulaciones 1 y 2.

Al igual que Diamante, se muestra el resumen de los resultados hallados de correlación y de ECM en la estación de Paraná (Tabla 5). Se aprecia una importante mejoría de simulación en simulación, siendo la simulación 3 la que

mejor ajusta a la serie de Paraná. Existe una importante correlación en los tres niveles superiores de la simulación 3, con valores superiores a 0.7 en cada caso y estadísticamente significativos al 99%. Sin embargo, se observa un aumento de los valores de ECM con la profundidad, es decir, que la serie de menor diferencia entre los puntos observados y simulados, es la del nivel de 5 cm. Al comparar los valores de ECM entre simulaciones, se puede apreciar que los valores de ECM de la simulación 3 son los más pequeños con respecto a los de las simulaciones 1 y 2, excepto por el nivel de 20 cm, en el cual la simulación 2 tiene por poco un valor menor al de la simulación 3. El resto de los valores de R también son estadísticamente significativos al 99%, excepto por los valores del

nivel de 60 cm para las simulaciones 2 y 3, los cuales son aproximadamente 0.

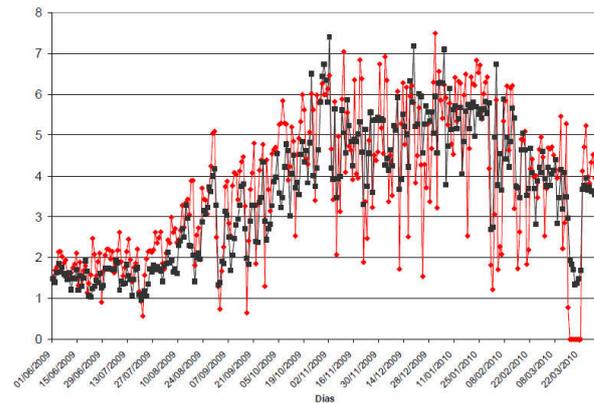
### 3.2. Análisis de ET

Por último, se llevó a cabo un análisis del impacto de la estimación de la ET en los resultados obtenidos para la estación de Paraná. La Figura 8 muestra la serie de evapotranspiración obtenida en la estación (mediante el método de Penman – Monteith) y la estimada por Hargreaves. Este análisis se llevó a cabo únicamente sobre la simulación 3 de la estación de Paraná.

Se observa que la onda principal de ET está presente tanto en los valores obtenidos a través de Penman – Monteith como en los valores estimados por Hargreaves. Sin embargo, hay una notoria tendencia en el cálculo de Hargreaves de subestimar los máximos y sobreestimar los mínimos. En principio, se podría esperar que los resultados obtenidos para la simulación 3 de Paraná variaran con respecto a los de la Figura 7, ya que las diferencias de ET son relativamente importantes. Pero, como se puede observar en la Figura 9, los resultados entre una simulación y otra no varían de forma significativa. Es decir, que en particular, para este tipo de suelo y con la calibración propuesta, la variación de ET no influye en los resultados del modelo para la variable de humedad del suelo. Los valores de correlación entre la simulación generada con la ET de la estación y la ET de Hargreaves para el nivel de 5cm, el de 10cm, el de 20cm y el de 60cm son 0.9728, 0.9675, 0.9867 y 0.9762 respectivamente.

## 4. CONCLUSIONES

El estudio de la humedad del suelo puede ser muy relevante a la hora de explicar o entender el comportamiento hidrológico de una región. En este trabajo se utilizó el modelo CLASS U3M 1D, que a pesar de sus limitaciones en su resolución espacial, es una herramienta clara y simple para llevar a cabo un estudio del balance de agua en el suelo.



*Figura 8:* ET obtenida en la estación (rojo) y ET estimada mediante la ecuación de Hargreaves (negro). Los valores de ET se encuentran expresados en unidades de mm. El período equivale al de los datos de la estación Paraná.

En términos generales, en el caso de la estación meteorológica de Diamante, la simulación que mejor representa el contenido de humedad en el suelo, en función del R, para los niveles de 7 cm, 20 cm y 60 cm es la simulación 3. Observando los estadísticos calculados para esta estación (Tabla 4), no se puede definir un patrón particular entre los resultados de ECM de las diferentes profundidades, todos los valores son aproximadamente del orden de 0.06 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. A partir de los valores de R, también se puede apreciar una importante mejoría en el nivel de 20 cm con respecto a las simulaciones. Esta mejoría es fuertemente visible al final del segundo período de simulación, en donde se aprecia que la simulación 3 es la que mejor representa el comportamiento del suelo. En función de esto, se puede afirmar que los mejores resultados obtenidos de calibración para la estación de Diamante son los de la simulación 3.

Luego, la calibración para la estación de Paraná produjo resultados más significativos que los obtenidos en Diamante, mayormente en los niveles de 10 y 20 cm. También se observa que el error, medido a través del ECM, crece a medida que aumenta el nivel de profundidad (Tabla 5). Esto se aprecia en todas

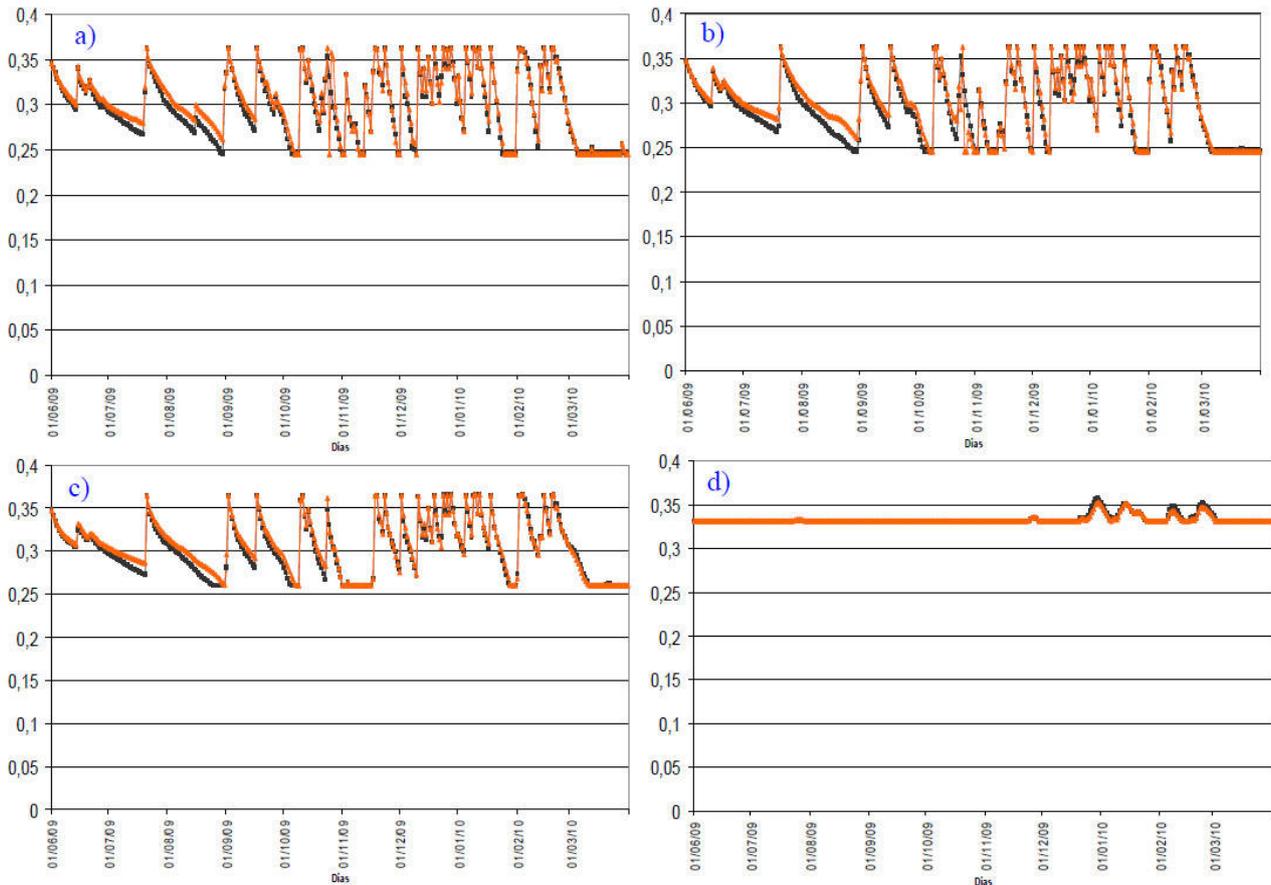


Figura 9: Humedad del suelo simulada de CLASS para la estación de Paraná. Utilizando la ET estimada en la estación (negro) y utilizando la ET propuesta por Hargreaves (naranja). a) Profundidad de 5cm. b) Profundidad de 10 cm. c) Profundidad de 20 cm. d) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ).

las simulaciones, excepto en la simulación 2, en la cual se observa una pequeña disminución del ECM entre el nivel de 5 cm y el de 10 cm. En función de los estadísticos obtenidos de R y ECM en la Tabla 5, se puede afirmar que los mejores resultados obtenidos de calibración para la estación de Paraná son los de la simulación 3. A pesar de no haber grandes diferencias entre los valores de correlación de la simulación 3 entre una estación y otra, podemos notar una clara disminución del ECM en Paraná con respecto a Diamante, que tiene un valor de ECM, para el primer nivel de profundidad, doble al valor obtenido en Paraná.

Vale destacar que en el caso de la simulación 1 y 2 para Diamante, las funciones de Edafotransferencia utilizadas fueron las de Rawls y Brakensiek y Wösten 2 respectivamente. Sin embargo, los mejores resultados obtenidos se consiguieron una vez que se utilizó una combinación entre ambas funciones, la de Rawls y Brakensiek para el parámetro alpha y la de Wösten 2 para n y Ksat. En el caso de Paraná, a diferencia de Diamante, el mejor resultado se obtuvo al modificar el modelo hidráulico utilizado, en este caso fue el de Brooks – Corey, pero considerando los parámetros hidráulicos propuestos por Carsel y Parish (Tabla 2).

Por último, se hizo un análisis de la influencia de la ET en los resultados obtenidos por el modelo. A pesar de que claramente se apreciaba una importante diferencia entre la ET obtenida de Penman – Monteith y Hargreaves (Figura 8), los resultados obtenidos de humedad del suelo para la estación de Paraná fueron muy similares. Se obtuvieron valores de correlación cercanos a 1 entre las simulaciones hechas con Penman – Monteith y las hechas por Hargreaves. Por lo tanto, se puede asegurar que para la zona de la estación de Paraná o para alguna estación con perfil de suelo similar a esta, el uso de la ecuación de Hargreaves puede ser útil si no se cuenta con información suficiente para estimar el valor de ET a través de la ecuación de Penman – Monteith.

Se concluye que el modelo representa adecuadamente las condiciones de humedad del suelo en las estaciones consideradas (más que nada en los niveles superiores) y que puede ayudar en el monitoreo y en el pronóstico del agua almacenada en el suelo. Asimismo, los resultados del análisis de la ET muestran que es posible obtener buenos resultados aun en ocasiones en las que no se cuenta con toda la información meteorológica necesaria para aplicar la ecuación de Penman - Monteith, permitiendo el uso de relaciones más simples con menor cantidad de información.

Es propósito para futuras investigaciones calibrar el modelo para otras estaciones de la provincia de Entre Ríos y si es posible, para otras estaciones de Argentina. Hay que tener en cuenta que la calibración del modelo fue exclusivamente para la variable de humedad del suelo, debido a esto, también se propone llevar a cabo la calibración del modelo para los excesos de humedad en el suelo, sumando una herramienta en el análisis de eventos severos significativos sobre la región de la Pampa Húmeda y el Litoral, como las inundaciones. Una vez logrado esto, se podrán considerar escenarios futuros de inundaciones. La aplicación de un MH puede ser de gran utilidad en estos escenarios, los que son

obtenidos a través de los Modelos de Circulación Global (MCG), y así obtener información del rol hidrológico de estos eventos.

**Agradecimientos:** El presente trabajo fue realizado como parte del proyecto CLARIS LPB del European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) financiado por el Grant Agreement N°212492. Los datos de las estaciones meteorológicas fueron brindados por el proyecto PICT 06/1221-PIDUNER 2128 (ANPCyT – UNER).

#### REFERENCIAS

- Alexander K.R. & Skaggs W.R., 1986. "Predicting unsaturated hydraulic conductivity from soil water characteristics". *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 29, pp 176 – 184.
- Borgesen C., Jacobsen O., Hansen S. & Schaap M., 2006. "Soil hydraulic properties near saturation, an improved conductivity model". *Journal of Hydrology*, 324, pp 40 – 50.
- Briggs L.J. & McLane J.W., 1907. "The moisture equivalent of soils". *USDA Bureau of Soils Bulletin* 45, pp 1 - 23.
- Brooks R.H. & Corey A.T., 1966. "Properties of porous media affecting fluid flow". *Journal of the Irrigation & Drainage Division* 2 (June), American Society of Civil Engineers, pp 61 – 88.
- Carsel R. & R. Parish., 1988. "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics". *Water Resour. Res.* 24: 755-769.
- FAO, 2006. *Estudio FAO Riego y Drenaje* 56, "Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", 323 pp.
- Hargreaves G.H. & Samani Z.A., 1985. "Reference crop evapotranspiration from temperature". *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.
- Leij F.L., Russel W.B. & Lesch S.M., 1997. "Closed form expression for water retention

- and conductivity data". *Ground Water*, 35, pp 848 – 858.
- Passadore L. & Wendler G., 2011. "Calibración de sensores de humedad del suelo y estimación de almacenaje diario de agua en el suelo en sitios con estaciones meteorológicas instaladas de la provincia de Entre Ríos". Trabajo final de graduación. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos.
- Rawls, W.J. & Brakensiek, D.L., 1989. "Estimation of soil water retention and hydraulic properties". Morel-Seytoux (ed.), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling—Theory and Practice*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, pp. 275–300.
- Tomasella J., Hodnett M.G. & Rossato L., 2000. "Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils". *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 64, pp 327 – 338.
- Tuteja N., Vaze J. & Teng J., 2004. "The CLASS Modelling Framework: A platform for distributed eco-hydrological modelling". NSW Department of Natural Resources, Queanbeyan, Australia.
- Van Genuchten M., 1980. "A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils". *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 48, pp 703 – 708.
- Vereecken H., Feyen, J., Maes, J. & Darius, P., 1989. "Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content". *Soil Sci.* 148, pp 389–403.
- Vogel T. & Cislerova M., 1988. "On the Reliability of Unsaturated Hydraulic Conductivity Calculated from the Moisture Retention Curve". *Transport in Porous Media*, 3, pp 1 – 15.
- Weynants M., Vereecken H. & Javaux M., 2009. "Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions: Introducing a Closed – Form Hydraulic Model". *Vadose Zone J.*, 8, pp 86 – 95.
- Wösten J.H.M., 1997. "Pedotransfer functions to evaluate soil quality". Gregorich, E.G., Carter, M.R. *Eds.*, *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. Developments in Soils Science, 25, Elsevier, Amsterdam, pp. 221 – 245.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A. & Le Bas C., 1999. "Development and use of a database of hydraulic properties of European soils". *Geoderma*, 90, pp 169 – 185.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.