

METODOLOGÍA DE AGREGACIÓN PARA ESTIMAR CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS EN SUELOS HETEROGÉNEOS INSATURADOS

• Erik Zimmermann* • Pedro Basile •
Universidad Nacional de Rosario, Argentina

*Autor de correspondencia

Resumen

Zimmermann, E., & Basile, P. (julio-agosto, 2014). Metodología de agregación para estimar conductividades hidráulicas en suelos heterogéneos insaturados. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(4), 39-55.

Se presenta la validación de una metodología de agregación, propuesta para obtener conductividades hidráulicas equivalentes de un medio homogéneo en suelos heterogéneos no saturados. Para ello se propone, en una primera etapa, una modelación numérica del flujo en la zona no saturada, en el dominio heterogéneo discretizado con alto grado de detalle y parametrizado mediante funciones de pedotransferencia adecuadas. En una segunda etapa se calibran los parámetros equivalentes del modelo de frente húmedo con los resultados alcanzados en la primera etapa, comparándolos con los propuestos en la metodología de agregación. El procedimiento se aplica a 68 perfiles típicos de suelos que caracterizan el sector meridional de la provincia de Santa Fe (Argentina). Los resultados alcanzados validan la metodología de agregación propuesta para un numeroso muestreo de composiciones texturales, propiedades hidráulicas y contenidos de humedad antecedente. Para las series de suelos analizadas, serían aceptables las estimaciones de conductividades hidráulicas saturadas mediante ponderación hasta saturaciones efectivas del orden del 50%, con un rango de errores acotados al 10%.

Palabras clave: suelos heterogéneos no saturados, conductividad hidráulica, metodología de agregación.

Introducción

Para predecir el movimiento de agua y solutos en la zona no saturada (ZNS) se emplean habitualmente modelos numéricos. Los resultados de sus aplicaciones sólo pueden ser confiables si las propiedades del medio poroso son conocidas. Esto representa la principal limitación a la tecnología actual de

Abstract

Zimmermann, E., & Basile, P. (July-August, 2014). Aggregation Methodology to Estimate Hydraulic Conductivity in Unsaturated Heterogeneous Soils. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(4), 39-55.

This study presents the validation of an aggregation methodology proposed to obtain hydraulic conductivity equivalents for a homogeneous porous media in unsaturated heterogeneous soils. The first step in this proposal is to numerically model flow in the unsaturated zone of a heterogeneous area, with a highly detailed discretization and parameterization based on suitable pedotransfer functions. The second stage involves calibrating the equivalent parameters from the wet front model based on the results from the first phase and comparing with those proposed by the aggregation methodology. The procedure was applied to 68 soil profiles characteristic of the southern province of Santa Fe (Argentina). The results obtained validate the aggregation methodology proposed for a large sampling of textural compositions, hydraulic properties and antecedent moisture contents. For the series of soils analyzed, estimates of saturated hydraulic conductivity would be acceptable with weighting up to effective saturations of 50%, with a margin of error limited to 10%.

Keywords: Heterogeneous unsaturated soils, hydraulic conductivity, aggregation methodology.

modelos complejos que se encuentra en un estado avanzado con respecto al conocimiento de los parámetros que engloban dichos modelos. En trabajos de calibración de modelos hidrológicos continuos se ha demostrado la alta sensibilidad que presentan los procesos subterráneos —observables en el sistema mediante los niveles freáticos— y los procesos hidrológicos superficiales —observables a

través de volúmenes de escurrimiento— frente a los parámetros hidráulicos que caracterizan la zona no saturada (Zimmermann, 2003). También estos parámetros inciden en la estimación de procesos de erosión y deposición de sedimentos a escala de cuenca (Basile, Riccardi, Zimmermann, & Stenta, 2010).

Para caracterizar el medio no saturado, se requiere del conocimiento de las curvas de conductividad $K(\theta)$, y retención $\psi(\theta)$ o bien, difusividad $D(\theta)$, siendo θ el contenido volumétrico de humedad, $K(\theta)$ la conductividad hidráulica no saturada, $\psi(\theta)$ el potencial mátrico del suelo y $D(\theta)$ el coeficiente de difusividad. Se ha diseñado un gran número de ensayos de laboratorio y métodos de campo para medir las funciones hidráulicas del suelo, pero la mayoría de los métodos son relativamente costosos y difíciles de llevar a cabo.

Existen métodos indirectos para estimar las propiedades hidráulicas de suelos, que varían en términos de la metodología y complejidad, pudiendo distinguirse tres grupos principales: los métodos basados en la distribución del tamaño de poros, los métodos inversos y las funciones de pedotransferencia.

Las funciones de pedotransferencia (FPT) ofrecen una metodología para aproximar las propiedades hidráulicas, empleando la composición textural del suelo, además de otra información disponible (p. ej., la distribución del tamaño de partículas, densidad aparente, contenido de materia orgánica, etc.). Existen numerosas funciones de pedotransferencia, explicitadas como ecuaciones y/o implementadas como códigos informáticos, que han sido ajustadas a diferentes bases de información edafológica. En trabajos previos se han utilizado FPT para estimar propiedades hidráulicas de suelos limosos representativos de un sector de la llanura argentina, partiendo de información granulométrica y de parámetros físico-químicos disponibles en las cartas de suelos elaborados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Se emplearon FPT incluidas en los códigos *SoilPar* y *Rosetta*,

junto con ecuaciones de regresión entre parámetros hidráulicos y parámetros físicos (Zimmermann & Basile, 2007).

A partir de comparaciones entre parámetros obtenidos mediante aplicaciones de FPT y los ajustados en modelos matemáticos hidrológicos, pudo concluirse que de los códigos empleados, el programa *Rosetta* (Schaap, Leij, & Van Genuchten, 1999), fue el que mejor se aproximó para la zona de estudio (Zimmermann & Basile, 2011).

La siguiente fase del trabajo consistió en la caracterización hidráulica de suelos de composición heterogénea. Los suelos no constituyen medios homogéneos, sino que los perfiles se presentan estratificados en horizontes y además se combinan formando asociaciones y consociaciones. Por ende, con el propósito de simplificar el abordaje del modelado, fue propuesta una metodología de ponderación para la estimación de parámetros representativos, desde un punto de vista hidráulico, equivalentes a un medio homogéneo (Zimmermann *et al.*, 2008). Esto se hizo con el propósito de utilizar dichos parámetros en modelos simplificados de infiltración, tales como el propuesto por Green y Ampt (frente húmedo).

En este trabajo se pretende validar esta metodología de ponderación, contrastando los resultados obtenidos con un modelo matemático basado en la resolución de la ecuación de Richards, en donde se contempla la heterogeneidad de cada perfil de suelo, el cual se describe a continuación.

Modelo numérico empleado para la simulación del flujo en la ZNS

El modelo de flujos empleado para las simulaciones, denominado *SOLUM*, está basado en la ecuación de Richards y se desarrolla específicamente para este trabajo, con el fin de estimar la redistribución de humedad en la zona no saturada (ZNS) y los volúmenes de agua intercambiados con la atmósfera y el acuífero. El mismo forma parte de un modelo

más general, desarrollado para simular el movimiento de flujos superficiales en la zona saturada y la no saturada, en áreas de llanura, denominado *SHALL* (Simulación Hidrológica de Áreas de Llanura) (Zimmermann & Riccardi, 2000). En el modelo, la resolución de la ecuación de flujo en la ZNS se realiza en términos del contenido volumétrico de humedad θ , para conocer una de las variables del balance hidrológico de manera directa. Solamente está contemplado el flujo en la dirección vertical. La ecuación de movimiento, en términos del contenido volumétrico de humedad y con una analogía a la ley de difusión de Fick, es:

$$q = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - k(\theta) + \int_0^{z_r} S(\theta) dz \quad (1)$$

donde q es la velocidad de Darcy del flujo no saturado; θ , el contenido volumétrico de humedad; z , la coordenada vertical; z_r , la profundidad radicular; $K(\theta)$, la conductividad hidráulica no saturada; $D(\theta)$, el coeficiente de difusividad del medio poroso, producto de la conductividad no saturada $K(\theta)$ por el gradiente de la curva de retención ($d\Psi/d\theta$), y $S(\theta)$ un término sumidero que, en el caso de suelos cultivados, representa la tasa de extracción de agua por las raíces de las plantas. El modelo prevé incluir la heterogeneidad del suelo, otorgando distintos parámetros que regulan las curvas de retención y conductividad hidráulica para los diferentes estratos del suelo. La aplicación que se le dio al modelo en este trabajo consistió en la simulación del proceso de infiltración en un evento lluvioso, por lo que el término sumidero no fue considerado. En la ecuación, un valor negativo de q denota flujo hacia abajo (dado que q es positivo cuando el flujo es en la dirección z positiva hacia arriba). La ecuación de continuidad establece para el flujo vertical que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (2)$$

El medio poroso no saturado se representa en forma discreta mediante un conjunto de

celdas que se extienden verticalmente desde la superficie hasta el nivel freático. Para la resolución de las ecuaciones (1) y (2) se ha propuesto un esquema numérico de tipo explícito en diferencias finitas. El esquema es centrado en el espacio y progresivo en el tiempo. En los bordes de celdas se evalúan los flujos de intercambio y en los centros de celdas se estima el contenido de humedad. Con este esquema de discretización (figura 1), la ecuación de *momentum* resulta:

$$q_j^n = -D(\theta_j^n) \frac{\theta_{j-1/2}^n - \theta_{j+1/2}^n}{\Delta z} - k(\theta_j^n) \quad (3)$$

$$\theta_j^n = \frac{\theta_{j+1/2}^n + \theta_{j-1/2}^n}{2}$$

La ecuación de continuidad resuelta para el término en el nivel $n+1$ es:

$$\theta_{j+1/2}^{n+1} = \theta_{j+1/2}^n - \frac{\Delta t}{\Delta z} (q_j^n - q_{j+1}^n) \quad (4)$$

donde j y n representan los índices de discretización espacial y temporal, respectivamente. La secuencia de cálculo es la siguiente: a) partir de una condición inicial de contenidos de humedad θ_{0j} en el perfil; b) resolver la ecuación de *momentum* (3) para el

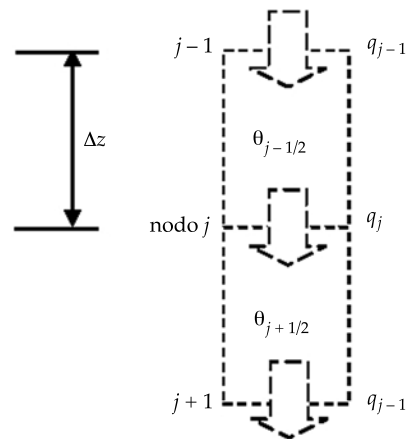


Figura 1. Discretización de la ZNS en celdas verticales.

espesor de la ZNS, determinando los flujos de intercambio entre celdas; c) resolver la ecuación de continuidad (4), determinando los contenidos de humedad del perfil en el siguiente paso de tiempo, y d) retomar el paso (b) hasta alcanzar el tiempo de finalización de la simulación. El código de resolución fue escrito enteramente en lenguaje FORTRAN. Para el esquema propuesto, se ha realizado un análisis de estabilidad y convergencia, contrastando sus resultados con problemas de solución analítica conocida y con otras técnicas y esquemas numéricos, validando su consistencia en todas las situaciones (Zimmermann, 1998). De manera complementaria, se ha realizado un análisis de estabilidad, observando el comportamiento de números adimensionales (Courant & Péclet) en situaciones críticas de humedad, programando alertas en el código fuente para situaciones donde los números escapan del entorno de estabilidad numérica. Como condiciones de contorno, se plantea la resolución de las ecuaciones anteriores, con algunas de las incógnitas conocidas. La imbibición como condición de borde superior fue resuelta utilizando el esquema numérico como un modelo de infiltración. En la celda que constituye el contorno superior se debe cumplir con la siguiente condición:

$$q_1^n = \max \left(-D \left(\theta_{1/2}^n \right) \frac{\theta_s - \theta_{1/2}^n}{\Delta z} - k \left(\theta_{1/2}^n \right); -i^n \right) \quad (5)$$

donde i^n es la intensidad de lluvia efectiva, estimada como la intensidad de precipitación que no es interceptada por la vegetación, en el intervalo n de discretización temporal y θ_s el contenido volumétrico de humedad de saturación. El primer término de (5) representa la capacidad de infiltración y el segundo la disponibilidad de agua para infiltrarse. Se tiene prevista la desecación como condición de borde superior, aunque en la aplicación para este trabajo no fue considerada. Como condición de borde inferior, se consideran las celdas incluidas en la capa acuífera con

humedad de saturación. El conjunto de celdas saturadas depende del nivel freático, y éste se actualiza dinámicamente en el modelo general.

Para completar la solución del problema deben conocerse parámetros del suelo tales como las curvas de conductividad hidráulica *versus* humedad $K(\theta)$, potencial mátrico *versus* humedad $\psi(\theta)$ y difusividad *versus* humedad $D(\theta)$. En el presente trabajo se han adoptado las relaciones de Brooks-Corey, representadas por las siguientes ecuaciones:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{\psi_c}{\psi} \right)^\lambda & \text{si } \rightarrow |\psi| \geq |\psi_c| \\ 1 & \text{si } \rightarrow |\psi| < |\psi_c| \end{cases} \quad (6)$$

donde θ_r es el contenido de humedad correspondiente a saturación residual; λ es un parámetro que depende de la distribución de los tamaños de poros; ψ_c es la succión crítica (presión de entrada de aire), y S_e es la saturación efectiva. Para la estimación de la conductividad hidráulica relativa, $K_r = K(\theta)/K_s$ siendo K_s la conductividad hidráulica saturada, se utiliza la ecuación propuesta por Corey (1977):

$$K_r = \frac{K}{K_s} = S_e^{\left(\frac{2}{\lambda} + 3 \right)} \quad (7)$$

Las ecuaciones (6) y (7) se parametrizan para cada una de las celdas en que se divide el dominio de la ZNS. De esta manera se permite la representación de medios estratificados heterogéneos como los que se pretende estudiar. Los lazos de histéresis entre secado y mojadura no se tuvieron en cuenta.

Funciones de pedotransferencia utilizadas

Para estimar las propiedades hidráulicas de cada estrato se aplicaron funciones de pedotransferencia (FPT), constituidas por un conjunto de ecuaciones que relacionan propiedades hidráulicas de suelos con parámetros

físicos y granulométricos de las muestras de suelos. Existen numerosas FPT que actualmente se han incluido en códigos informáticos, como el *SoilPar* (Acutis & Donatelli, 2003) y *Rosetta* (Schaap *et al.*, 1999). En trabajos previos (Zimmermann & Basile, 2011) se utilizaron diferentes procedimientos para estimar propiedades hidráulicas de suelos limosos, partiendo de información granulométrica y de parámetros físico-químicos disponibles en las cartas de suelos de INTA. Se emplearon funciones de pedotransferencia (FPT) incluidas en los códigos *SoilPar* y *Rosetta*, junto con ecuaciones de regresión entre parámetros hidráulicos y parámetros físicos, dadas por un conjunto de autores. Se estimaron los parámetros hidráulicos medios ponderados para cuencas de la región y los pronósticos se compararon con valores obtenidos mediante calibración del modelo matemático hidrológico *SHALL* (Zimmermann, 2003).

A partir de los resultados obtenidos, pudo concluirse que, entre los códigos empleados, el que mejor se aproximó a los parámetros hidráulicos calibrados para la zona de estudio fue el programa *Rosetta*, suministrándole como información la composición textural, densidad aparente y dos puntos de la curva de retención (punto de marchitez permanente y capacidad de campo). A la vista de los resultados, se empleó entonces el código mencionado para la evaluación de los parámetros hidráulicos de cada estrato de los suelos analizados, lo que permite obtener las curvas de retención y de conductividad hidráulica mencionadas antes.

Aplicación a suelos de la provincia de Santa Fe (pampa húmeda argentina)

El área meridional de la provincia de Santa Fe (Argentina), motivo de interés en este estudio (figura 2), presenta un módulo pluviométrico del orden de los 1 000 mm y la temperatura media anual del orden de los 17 °C. Los mapas de suelos disponibles en la provincia de Santa Fe, elaborados por el INTA, clasifican, desde un punto de vista textural, los suelos de la región

entre las fracciones franco limosa, franco arcillo limosa y arcillo limosa. De las cartas de suelos disponibles se extractó la información de 68 perfiles de series tipo de suelos, representativos de los suelos presentes en el sur santafecino. En cada perfil de las series, en función de su profundidad y estratigrafía, se detallan entre 3 y 8 horizontes, de los cuales se han publicado en dichas cartas la composición textural, junto con otros parámetros biofísicos, como contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, pH, etc. El conjunto de horizontes para todas las series estudiadas totalizan 434 muestras de suelo, considerando que, en promedio, cada serie de suelos está discretizada entre 6 y 7 horizontes.

Estimación de parámetros por serie de suelos

Con la información de las cartas pertenecientes a cada perfil típico o serie de suelos, se confeccionaron planillas de cálculo, volcando características texturales y físico-químicas de cada estrato de las series. Con esta información, utilizando funciones de pedotransferencia intrínsecas del programa *SoilPar*, se obtuvieron densidades aparentes, humedades para capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y otras tensiones matriciales. Luego, se aplicó las FPTs incluidas en el programa *Rosetta*, obteniendo así las siguientes propiedades hidráulicas por horizonte o estrato de cada serie: conductividad hidráulica saturada, K_s ; humedad de saturación, θ_s ; humedad residual, θ_r ; conectividad de poros, λ , y succión crítica, Ψ_c .

Se ha considerado para la modelación de la ZNS un intervalo de discretización espacial Δz de 0.05 m, lo cual da suficiente detalle para la estimación de perfiles de humedad en la región de análisis. Para la caracterización de las propiedades de cada celda se utilizó una rutina de interpolación lineal, que interpoló los parámetros ajustados para cada estrato. La zona que cubrió el dominio de modelación

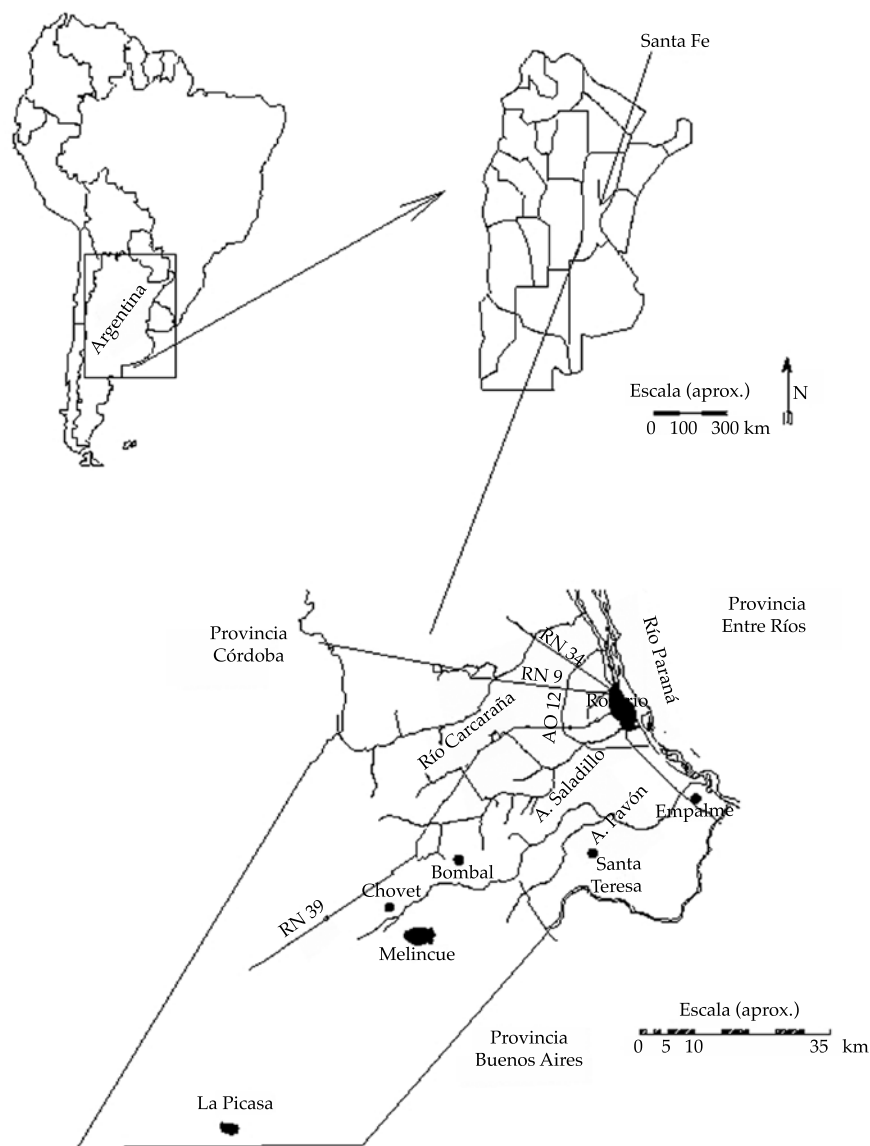


Figura 2. Área de estudio: sector meridional de Santa Fe.

alcanzó los 3.5 m de profundidad y, teniendo en cuenta el paso de discretización Δz , dio lugar a 70 celdas en sentido vertical, para cada una de las series de suelo estudiadas.

Condiciones iniciales y de borde simuladas

Las condiciones de borde e iniciales constituyen un factor importante en la simulación, porque los resultados obtenidos están influenciados

por ellas. Como condición de borde superior se tomó la descrita anteriormente, esto es, condición de flujo preestablecido asociado con la capacidad de infiltración. Como condición de borde inferior se consideró el nivel freático a 3.5 m de profundidad. Esta profundidad, por un lado, no alterará en gran medida los fenómenos que se estudiarán en superficie y, por el otro, reflejará una situación frecuente en los sistemas hidrológicos estudiados.

La condición inicial se estableció teniendo en cuenta los siguientes criterios: a) en las primeras capas superficiales, hasta una profundidad cercana a la extensión radicular de los cultivos presentes en los sistemas estudiados, la alteración del perfil de humedad se hace significativa y b) el perfil de humedad en profundidad se ve escasamente alterado por las condiciones ambientales externas. Como situación compatible con la de borde inferior fijada se estableció un perfil de humedad en equilibrio hasta el metro de profundidad (1 m aproximadamente representa la profundidad radicular). Por encima del metro de profundidad, la variación del perfil de humedad se estableció en forma lineal (arbitraria y simplificada) entre el perfil de equilibrio y las diferentes condiciones de humedad prefijadas para el análisis: entre un 40 y 90% de la saturación efectiva (de 0.4 a 0.9 de S_e). La figura 3 muestra las condiciones adoptadas.

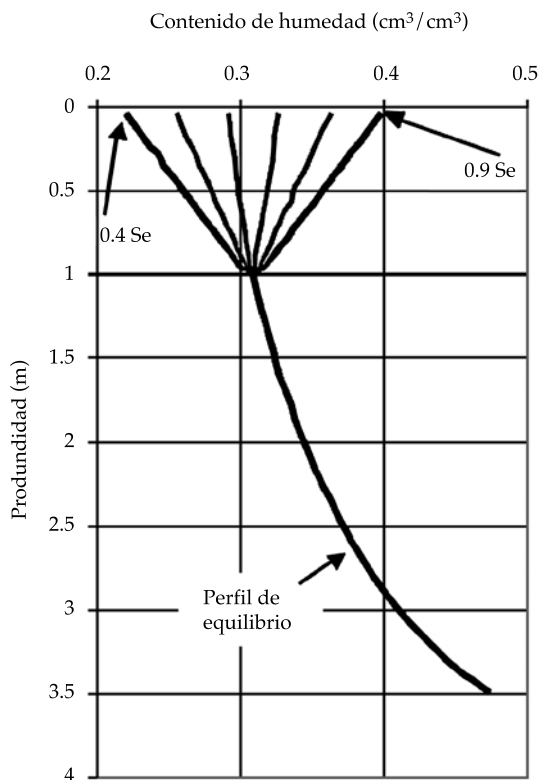


Figura 3. Perfiles de humedad para fijar las condiciones iniciales.

Simulaciones realizadas

Se realizaron simulaciones suponiendo cada perfil en condiciones de encharcamiento en superficie, logradas mediante una precipitación de elevada intensidad (70 mm/h) constante durante 12 horas de duración. Bajo estas condiciones se sometieron los 68 perfiles de suelos, analizando en cada caso la evolución de los perfiles de humedad en profundidad con el tiempo y, principalmente, la tasa de infiltración en el contorno superior. A manera de ejemplo, en las figuras 4 y 5 se presentan dos perfiles con características disímiles y comportamiento hidráulico consecuentemente diferenciado. Las características texturales de los mismos se presentan en el cuadro 1. Dichas figuras muestran los perfiles de humedad en diferentes tiempos de simulación, para las series "El Pedernal" y "Roldán" seleccionadas y para las condiciones extremas de humedad inicial. En conjunto se representan contenidos de humedad de saturación (θ_s) y conductividades hidráulicas saturadas (K_s) en función de la profundidad (mediante interpolación lineal entre los valores asignados a cada estrato).

La serie El Pedernal se encuentra en el sector sudoeste de la provincia, desarrollada a partir de sedimentos de textura franco limosa liviana, con importantes porcentajes de arena (cerca al 18%). Esto le confiere una conductividad hidráulica saturada relativamente elevada (cerca a 1 cm/h). En la simulación, a las 48 horas, el frente de humedad alcanza profundidades superiores a los 2 m y su patrón es prácticamente uniforme. Los primeros estratos tienen mayor contenido de arcilla y retardan el flujo en profundidad, como puede observarse en la figura 4. La serie Roldán, de drenaje deficiente, se encuentra presente en el sector sureste de la provincia, en las cercanías de la ciudad de Rosario. Presenta un contenido de arcilla semejante (cerca al 30%), distribuido en distintas profundidades. Las conductividades hidráulicas saturadas son del orden de 0.4 cm/h. En general, el alcance del frente de humedad a las 48 horas es del orden

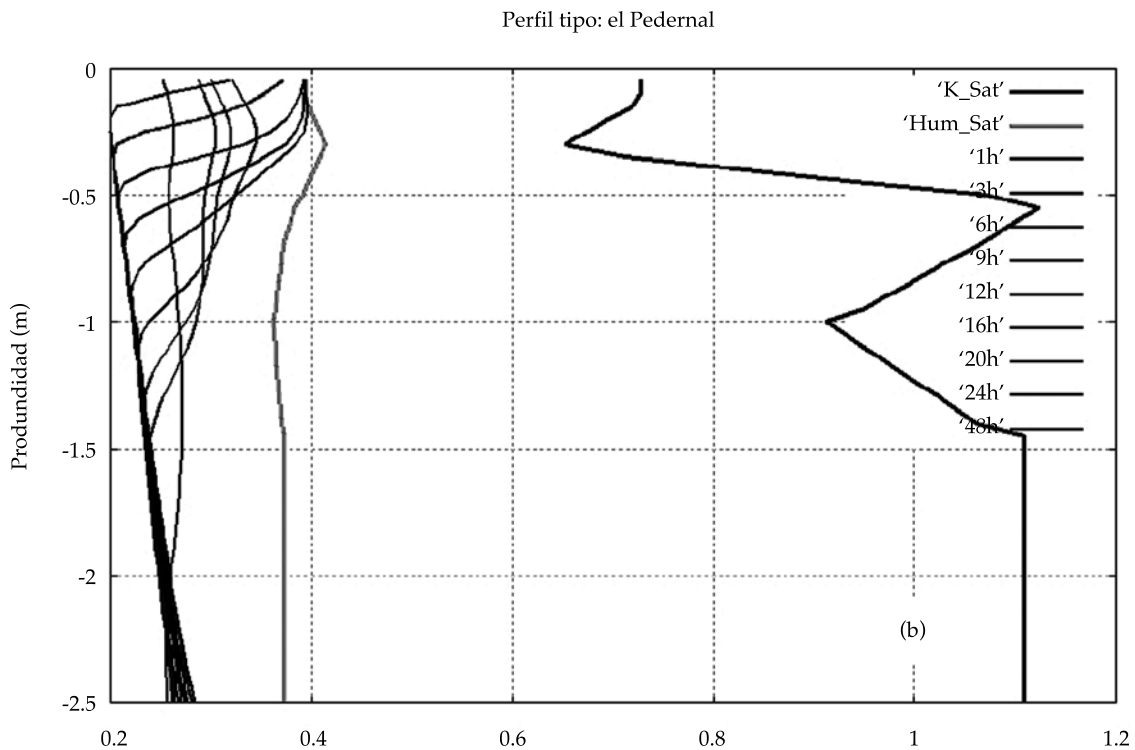
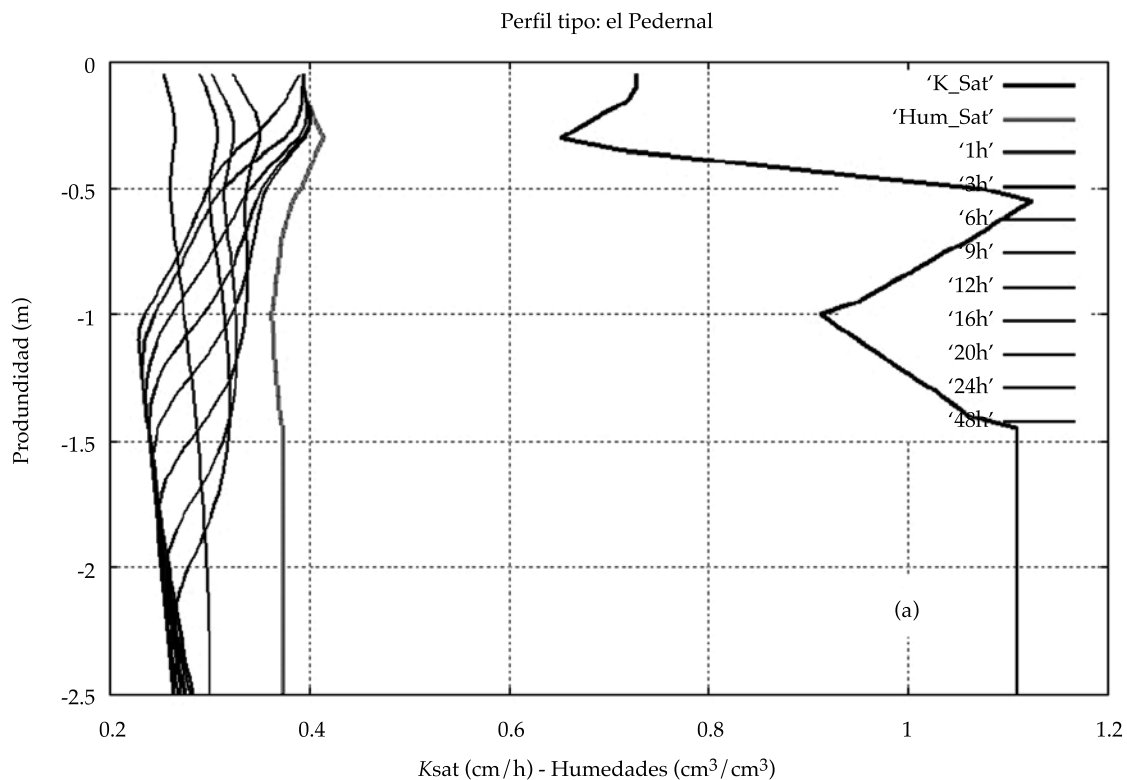


Figura 4. Perfiles de humedad para distintos tiempos de simulación. Serie “El Pedernal”: a) S_e inicial = 0.9; b) S_e inicial = 0.4.

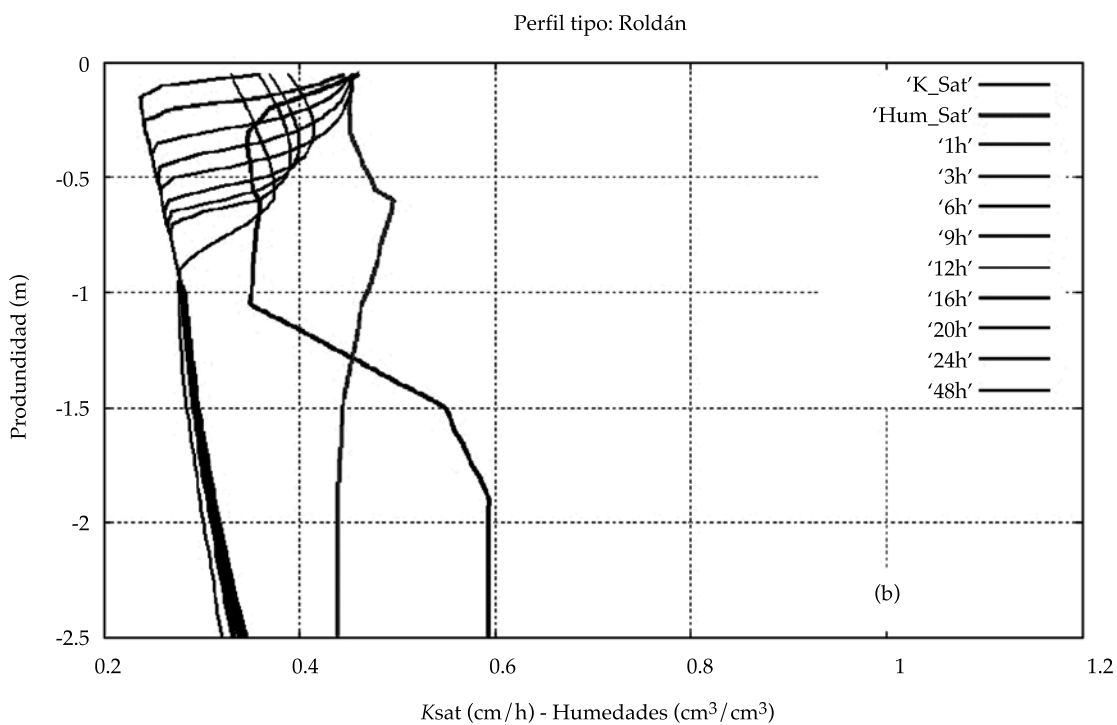
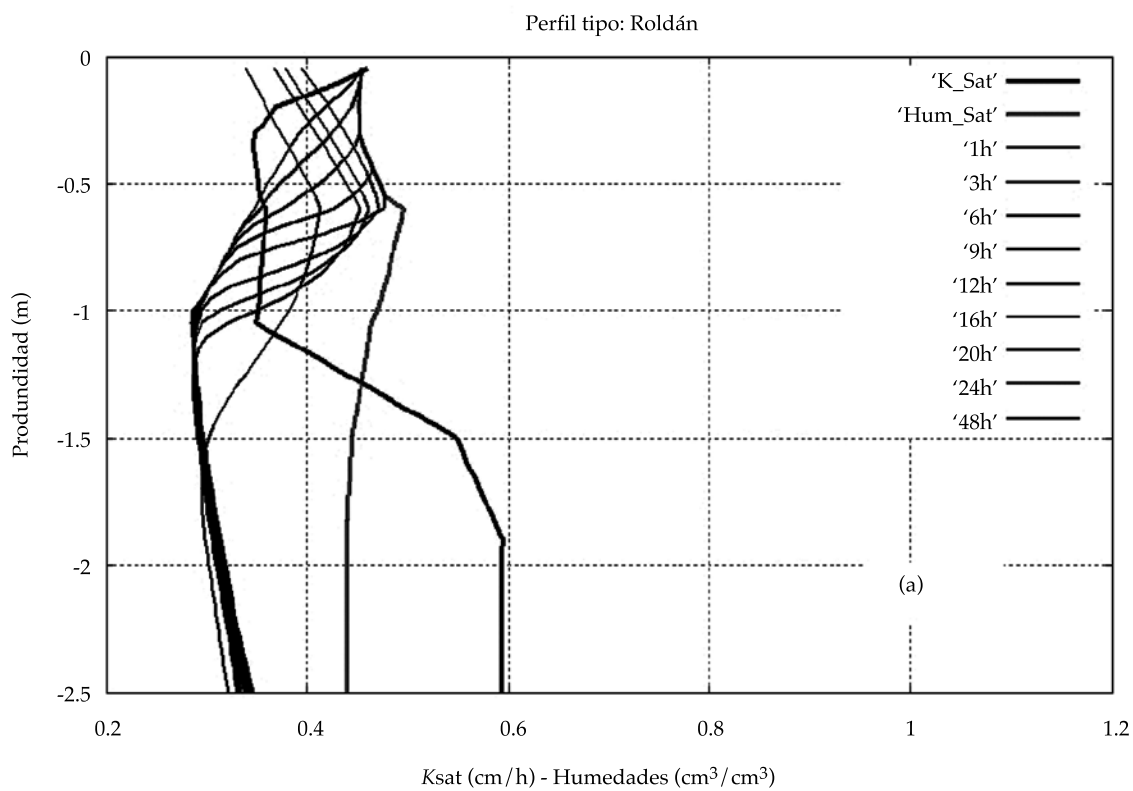


Figura 5. Perfiles de humedad para distintos tiempos de simulación. Serie "Roldán": a) Se inicial = 0.9; b) Se inicial = 0.4.

Cuadro 1. Composición textural de los estratos para las series analizadas.

Profundidades (m)	Espesor (m)	Arena (%)	Arcilla (%)	
Serie El Pedernal				
	< 0.26	0.26	15.9	14.8
0.26	0.40	0.14	12.2	17.3
0.40	0.60	0.20	13.3	7.6
0.60	0.80	0.20	18.5	8.1
0.80	1.15	0.35	22.6	9.2
1.15	1.70	0.55	17.8	7.6
% ponderado por espesor			17.6	9.9
Serie Roldán				
-	0.12	0.12	2.2	23.7
0.12	0.25	0.13	2.4	26.3
0.25	0.38	0.13	3.0	28.6
0.38	0.80	0.42	2.2	50.7
0.80	1.30	0.5	3.3	33.1
1.30	1.75	0.45	3.3	19.8
1.75	2.10	0.35	4.0	18.4
% ponderado por espesor			3.1	30.1

de 1 a 1.5 m, dependiendo de las condiciones iniciales de humedad.

Abordaje simplificado para modelos de eventos

El modelo *SOLUM* puede describir con detalle la distribución de contenidos de humedad del perfil de suelo y los flujos de intercambio entre la superficie y el nivel freático. En contraposición, requiere de un volumen apreciable de información y tiempo para ejecutar las simulaciones. Con frecuencia, en el empleo de modelos de eventos de lluvia no es necesario tanto detalle de resultados, sino que sólo con el conocimiento de los flujos de intercambio en la superficie del terreno (infiltración) es suficiente. La disyuntiva a resolver consiste en encontrar “parámetros equivalentes y únicos” de un suelo estratificado, que permitan estimar de forma razonable las tasas de infiltración de la superficie del terreno. El término “únicos” hace referencia a un medio equivalente homogéneo. De esta manera, podría aplicarse una metodología simple

para evaluar la infiltración. En este trabajo, entonces, se ha propuesto el siguiente objetivo: sintetizar las heterogeneidades del suelo en valores representativos de las propiedades hidráulicas del conjunto. En particular, utilizando el modelo simplificado de frente húmedo (Green & Ampt), se trataría de obtener un valor de la conductividad hidráulica K_e y del potencial de succión del frente húmedo ψ_{fr} , ambos equivalentes a un suelo homogéneo, que produzcan el mismo volumen infiltrado que el suelo estratificado y heterogéneo.

Método de Green y Ampt como algoritmo de pérdidas

El método representa una simplificación del fenómeno real, que aproxima el avance de la humedad en el perfil de suelo mediante un frente húmedo, con condición de encharcamiento permanente en superficie. El suelo se considera homogéneo y profundo. Dicho frente es una frontera plana (flujo en forma de “pistón”) que divide el suelo con una humedad inicial, θ_i , del suelo saturado con un contenido de humedad

igual a la saturación, θ_s , y un potencial de succión ψ_f en el frente de avance.

Planteando para el movimiento vertical la ecuación de continuidad de masa y la ley de Darcy (generalizada para flujo no saturado) entre la superficie encharcada y el punto de avance del frente húmedo, se arriba a una formulación para la tasa de infiltración f y de la profundidad acumulada de agua infiltrada F en función del tiempo:

$$f(t) = K \left(\frac{\psi_f \Delta\theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (8)$$

$$F(t) = Kt + \psi_f \Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi_f \Delta\theta} \right) \quad (9)$$

donde K es la conductividad hidráulica vertical del suelo; ψ_f el potencial de succión en el frente húmedo; $\Delta\theta$, la diferencia entre contenidos de humedad de saturación e inicial $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$ y t es el tiempo. La aplicación de este método requiere la estimación de la conductividad hidráulica K y el potencial de succión ψ_f .

Obtención de los parámetros K_e y ψ_{fe} equivalentes

En principio, se propuso utilizar el modelo *SOLUM* para evaluar la tasa de infiltración en los estratos superficiales frente a una precipitación con intensidad y duración suficiente como para superar la capacidad de infiltración del conjunto. Si bien el modelo permite conocer la distribución de humedad en cada momento y a lo largo del perfil del suelo, la información de interés primordial que sintetiza el movimiento de humedad en el perfil es la curva de infiltración del primer estrato. Con la distribución temporal de la infiltración de la celda superficial $f_1(t)$ se ajustan los parámetros K_e y ψ_{fe} equivalentes para que la función $f(t)$ evaluada con la expresión (8) y la $f_1(t)$ se aproximen de manera apropiada, utilizando un algoritmo de calibración propuesto en específico en este trabajo.

Algoritmo de calibración

Para la estimación de los parámetros K_e y ψ_{fe} equivalentes, fue necesario diseñar un algoritmo de ajuste, el cual fue incluido en el código computacional del programa *SOLUM*. Se propuso un algoritmo híbrido de calibración, que combina un "ajuste grueso" en el dominio restringido de los parámetros, junto con un algoritmo de "ajuste fino", basado en el método del gradiente.

La investigación preliminar se realiza mediante la evaluación de la función objetivo en una grilla trazada sobre la región de validez paramétrica subdividida en intervalos de cien partes.

El algoritmo del gradiente para la búsqueda detallada de los óptimos parte de la definición de una Función Objetivo (FO) multidimensional (FO = $y(\mathbf{x})$, donde \mathbf{x} es el vector de parámetros). Básicamente, el algoritmo parte de un punto base posible $\mathbf{x}^0(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sobre el cual se evalúa la FO = $y(\mathbf{x}^0)$, y el gradiente de la FO, ∇y . Para construir el gradiente, se estiman las derivadas parciales mediante cocientes incrementales del tipo:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} \approx \frac{y(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) - y(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\Delta x_i} \quad (10)$$

para $i = 1, 2, \dots, n$, donde Δx_i es un valor pequeño respecto al valor de x_i . El gradiente proporciona un vector que determina la dirección del óptimo de la FO. Se selecciona un nuevo punto en el espacio multidimensional cuya FO $y(\mathbf{x}^1)$ se acerca al óptimo buscado. En forma genérica puede expresarse que:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k \pm \nabla y \Delta h \quad (11)$$

El signo del segundo miembro se adopta positivo si la búsqueda es hacia un máximo y viceversa. El paso de búsqueda Δh , que representa la distancia al punto \mathbf{x}^k , debe cumplir

con las restricciones impuestas a los parámetros. El proceso de búsqueda finaliza cuando en dos iteraciones sucesivas, la diferencia entre las FO calculadas es inferior a una tolerancia preestablecida y/o es superada una cantidad máxima de iteraciones fijada de antemano. En el caso particular de este estudio, los parámetros son dos ($x_1 = K_v$; $x_2 = \psi_{fc}$) y como función objetivo se consideró el error cuadrático medio (RSME) de las diferencias entre la tasa de infiltración en la celda superficial, $f_1(t)$, y la $f(t)$ evaluada con la ecuación (8). Para la implementación del algoritmo se desarrolló con una subrutina en lenguaje FORTRAN, incorporada en el cuerpo principal del modelo SOLUM.

Metodología de ponderación

Paralelamente, se propuso una metodología de agregación para obtener parámetros equivalentes por serie de suelos, partiendo de los parámetros calculados para cada horizonte (Zimmermann *et al.*, 2008). Dicha metodología es la que se pretende validar en este trabajo. Los criterios fueron los siguientes: a) para la conductividad hidráulica saturada vertical ponderada, K_p , se calculó la media armónica de las conductividades de cada estrato (ecuación (12)) y b) para el potencial de succión del frente húmedo ponderado ψ_p se adoptó el promedio ponderado por el espesor de cada estrato (ecuación (13)):

$$K_p = \frac{L}{\sum_{i=1}^N \frac{e_i}{K_i}} \quad (12)$$

$$\psi_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \psi_i e_i \quad (13)$$

donde K_i y ψ_i son los parámetros para los espesores e_i , N es el total de horizontes de la serie, y L es el espesor total, los cuales fueron obtenidos como se describió anteriormente. Para cada estrato, la conductividad hidráulica K_i se consideró igual a la saturada y el potencial

de succión para el frente húmedo, ψ_f , se estimó de la siguiente forma (Muñoz-Carpena & Gowdich, 2005):

$$\psi_i = \frac{2\lambda + 3}{2\lambda + 2} \frac{\psi_c}{2} \quad (14)$$

donde la succión crítica de cada estrato ψ_c , la conectividad de poros λ y la conductividad saturada K_s se obtuvieron utilizando las FPT incluidas en el programa *Rosetta*, como se había mencionado.

Comparativa entre ambas metodologías

Los parámetros obtenidos mediante la metodología de ponderación propuesta (K_p y ψ_p) se compararon con los derivados de la calibración (K_e y ψ_{fc} equivalentes), previa modelación a través del programa SOLUM.

Se presentó como alternativa en las comparaciones integraciones de la ponderación, considerando distintas profundidades (L , en las ecuaciones (12) y (13)). En principio, se adoptó una profundidad de 2.5 m, conforme a la integración de la casi totalidad del perfil (considerado que la profundidad de la freática se propuso en 3.5 m en las simulaciones).

Los valores de K_p (en abscisas) y K_e (en ordenadas) se grafican en la figura 6, para el conjunto de las series analizadas (68) y las distintas humedades iniciales consideradas e integradas hasta los 2.5 m de profundidad. Como se puede apreciar, los coeficientes de determinación obtenidos (e impresos en el ángulo superior izquierdo de cada figura) son relativamente bajos.

En una segunda instancia fueron considerados los primeros estratos en las integraciones para la ponderación, aproximadamente los horizontes "A" y "B", hasta una profundidad de 0.50 m.

Los valores de K_p (estimados) y K_e (ajustados) se grafican en la figura 7, para las distintas series y humedades iniciales consideradas. Los coeficientes de determinación obtenidos

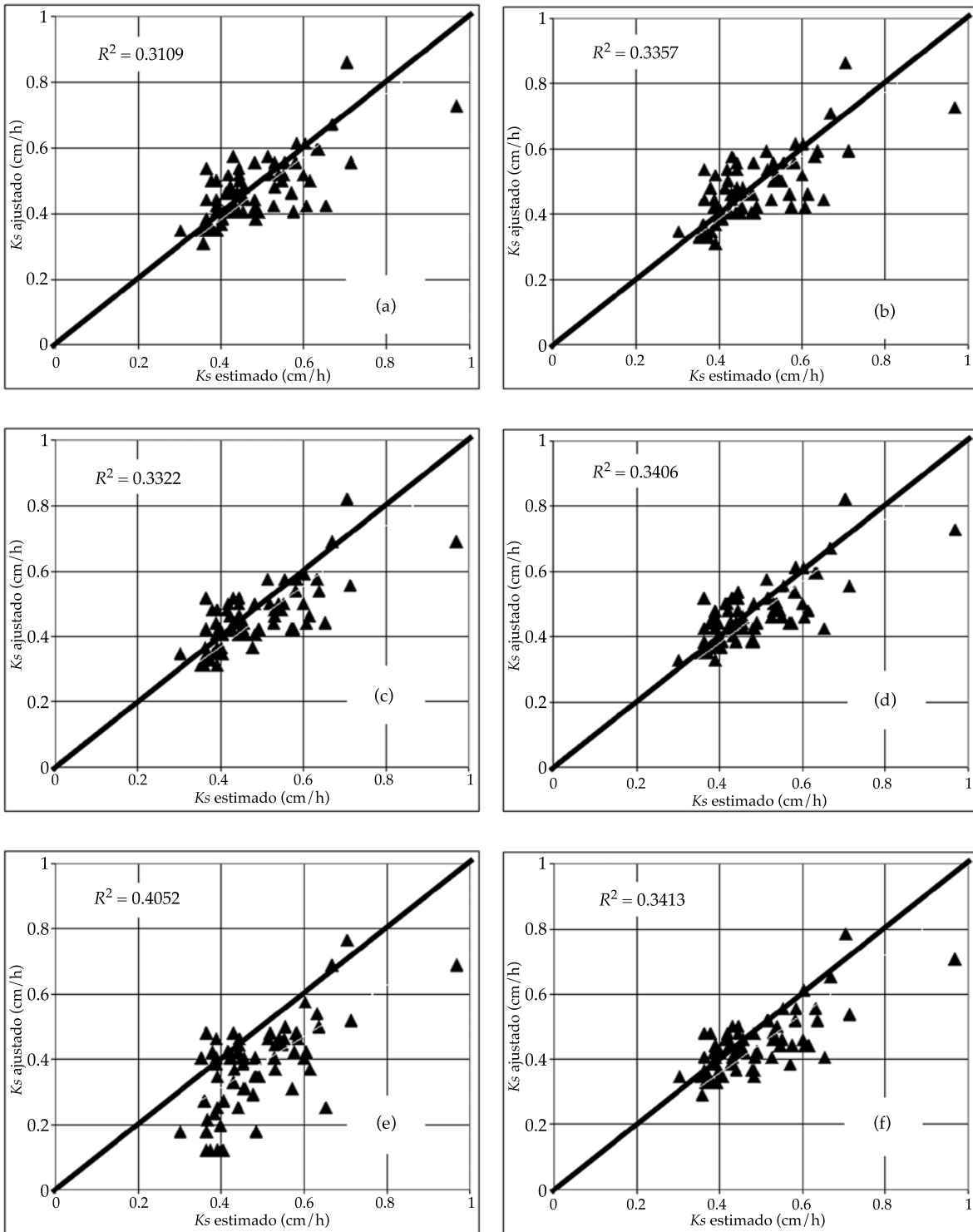


Figura 6. Comparaciones entre K_p ponderados a una profundidad de 2.50 m (abscisas) y K_e ajustados (ordenadas) para diferentes Se iniciales: a) 0.40, b) 0.50, c) 0.60, d) 0.70, e) 0.80 y f) 0.90, respectivamente.

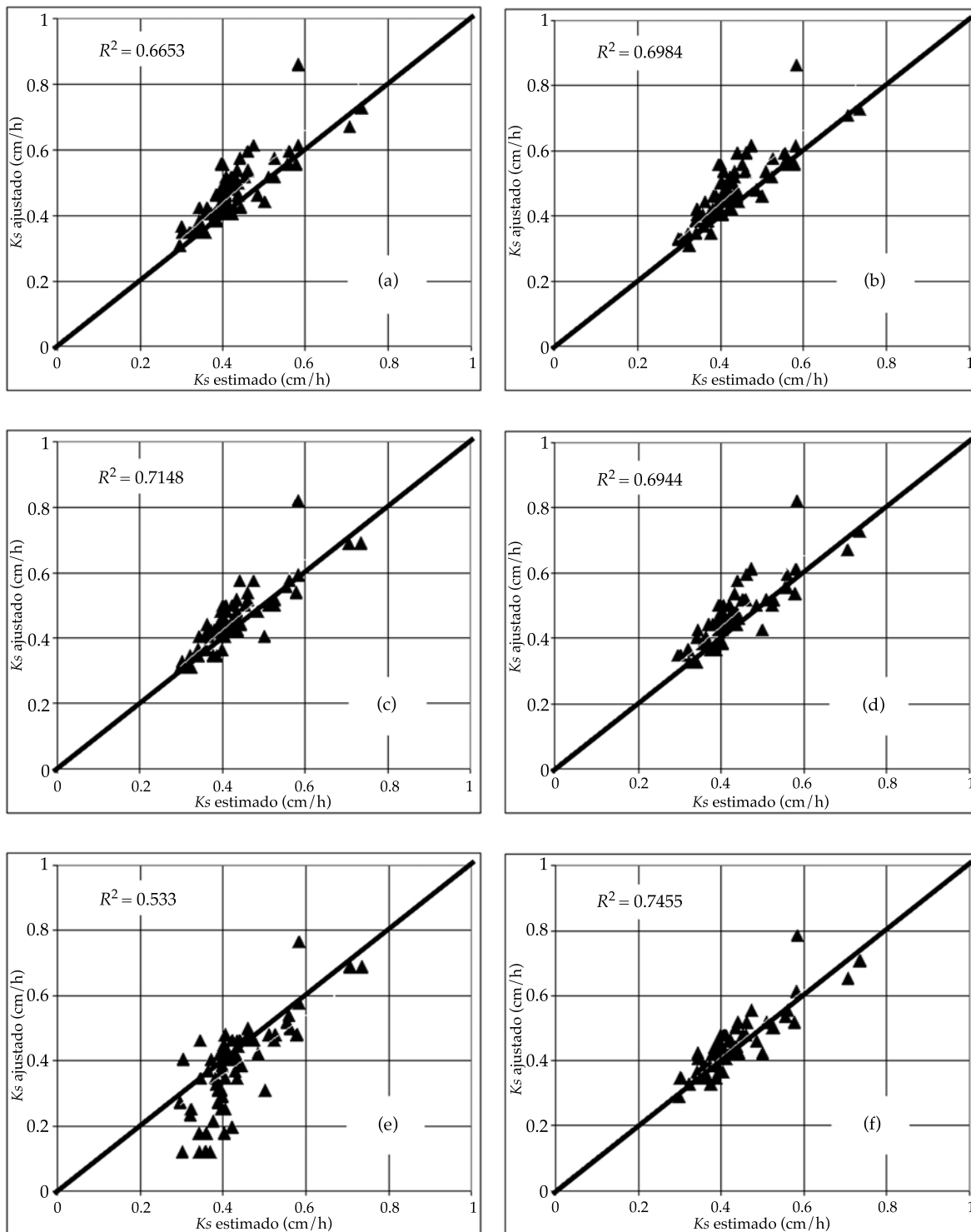


Figura 7. Comparaciones entre K_p ponderados a una profundidad de 0.50 m (abscisas) y K_e ajustados (ordenadas) para diferentes S_e iniciales: a) 0.40, b) 0.50, c) 0.60, d) 0.70, e) 0.80 y f) 0.90, respectivamente.

(e impresos en el ángulo superior izquierdo de cada figura) son considerablemente superiores a los anteriores.

Esto último da la pauta que para los fines de caracterizar el proceso de infiltración en la superficie del terreno da mejor resultado, al considerar los primeros horizontes del suelo para parametrizar las propiedades hidráulicas del conjunto. En otras palabras, podría afirmarse que son los primeros estratos los que dominan el proceso de infiltración bajo la superficie.

Para analizar con mayor detalle el efecto de las condiciones antecedentes de humedad, se obtuvo un valor promedio de conductividad hidráulica para las 68 series de suelos analizadas tanto para los valores ajustados como para los estimados mediante ponderación. Esto se hizo con el fin de contar con un valor representativo del conjunto de suelos analizados, aunque este promedio no tenga aplicación alguna salvo en el análisis propuesto en esta parte del trabajo.

La figura 8 muestra la comparación de valores promedio ajustados y ponderados de conductividades hidráulicas para todas las

series de suelo en función del contenido de humedad inicial. Allí se observa que los valores ajustados de K_e promedio son asintóticos a los valores ponderados K_p análogos para contenidos de humedad cercanos a la saturación.

La ponderación inversa o armónica se utiliza para obtener conductividades equivalentes cuando el flujo circula en sentido transversal a un suelo saturado estratificado (Custodio & Llamas, 1983). En el caso analizado, el medio no está saturado, por lo tanto los resultados se acercarán a la metodología de ponderación cuando más cerca se esté de las hipótesis de saturación. En la figura 8 se plasma un resultado lógico, que además permite analizar el grado de aceptación que se le puede brindar a la fórmula de ponderación.

Por ejemplo, para las series de suelos analizadas, serían aceptables las estimaciones de conductividades hidráulicas saturadas mediante ponderación hasta un rango del orden del 50% de su saturación efectiva con un rango de errores acotados al 10%.

Si se piensa, además, que en la región analizada, los tenores de humedad para las

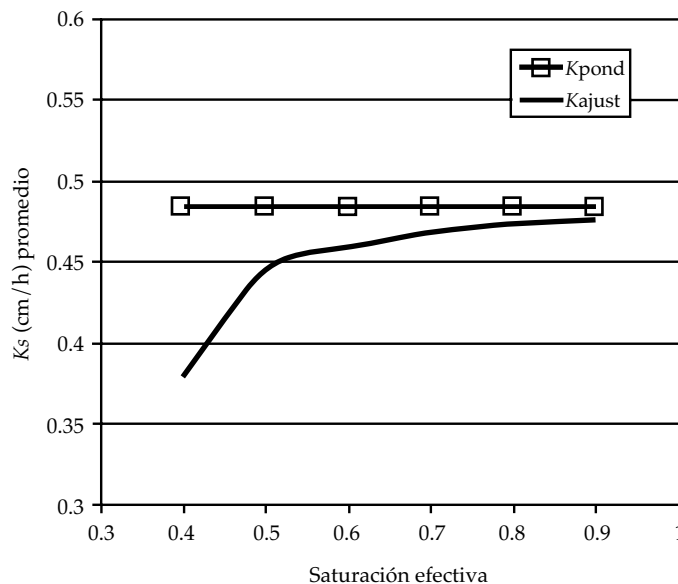


Figura 8. Comparación de valores promedio de K_p y K_e para todas las series de suelos en función de la humedad inicial.

profundidades hasta el horizonte "B" en la generalidad de los casos se encuentran por encima del 50% de la saturación efectiva debido al carácter "húmedo" del clima, puede aseverarse que la metodología de ponderación es adecuada para representar las conductividades hidráulicas del conjunto de estratos.

Conclusiones

Se ha validado una metodología de agregación para obtener conductividades hidráulicas equivalentes de un medio homogéneo en suelos heterogéneos no saturados. El procedimiento consistió en dos etapas. En una primera etapa se propuso una modelación numérica del flujo en zona no saturada, específicamente para este trabajo, en el dominio heterogéneo discretizado con alto grado de detalle y parametrizado mediante funciones de pedotransferencia adecuadas. En una segunda etapa se calibraron los parámetros equivalentes del modelo de frente húmedo con los resultados alcanzados en la primera etapa, comparándolos con los propuestos en la metodología de agregación. El procedimiento se aplicó a 68 perfiles típicos de suelos que caracterizan el sector meridional de la provincia de Santa Fe (Argentina). Los resultados alcanzados validan la metodología de agregación propuesta para un numeroso muestreo de composiciones texturales, propiedades hidráulicas y contenidos de humedad antecedente. Con el fin de caracterizar el proceso de infiltración en la superficie del terreno, da mejor resultado considerar en las ponderaciones los primeros horizontes del suelo para parametrizar las propiedades hidráulicas del conjunto. Podría afirmarse que son los primeros estratos los que dominan el proceso de infiltración bajo la superficie.

Se observa que los valores calibrados de conductividades hidráulicas son asintóticos a los valores ponderados análogos para humedades cercanas a la saturación. Considerando que la ponderación armónica propuesta se utiliza para obtener conductividades equivalentes

cuando el flujo circula en sentido transversal a un suelo saturado estratificado, los resultados serán mejores cuando más cerca se esté de las hipótesis de saturación. Para las series de suelos analizadas serían aceptables las estimaciones de conductividades hidráulicas saturadas mediante ponderación hasta saturaciones efectivas del orden del 50%, con un rango de errores acotados al 10%.

Recibido: 26/09/12

Aceptado: 17/01/14

Referencias

- Acutis, M., & Donatelli, M. (2003). SoilPar 2.00: Software to Estimate Soil Hydrological Parameters and Functions. *Europ. J. Agronomy*, 18, 373-377.
- Basile, P. A., Riccardi, G., Zimmermann, E., & Stenta, H. (2010). Simulation of Erosion-Deposition Processes at Basin Scale by a Physically-Based Mathematical Model. *International Journal of Sediment Research*, 25(2), 91-109.
- Corey, A. (1977). *Mechanics of Heterogeneous Fluids in Porous Media* (150 pp.). Fort Collins: Water Resources Publications.
- Custodio, E., & Llamas, R. (1983). *Hidrología subterránea* (2350 pp.). Segunda edición. Vol. 1. Barcelona: Editorial Omega.
- Muñoz-Carpena, R., & Gowdich, L. (2005). *Aplicación del método de infiltración de Green-Ampt con redistribución de humedad del suelo entre encharcamientos. Estudios de la zona no saturada del suelo*. Vol. VII. En F. J. Samper-Calvete & A. Paz-González (Eds.). La Coruña, España: Tórculo Artes Gráficas.
- Schaap, M. G., Leij, F. J., Van Genuchten, M. Th. (1999). A Bootstrap Neural-Network Approach to Predict Soil Hydraulic Parameters. In M. Th. Van Genuchten, F. J. Leij, & L. Wu (Eds.). *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media* (pp. 1237-1250). University of California, Riverside.
- Zimmermann, E. (1998). *Esquema explícito para la resolución de la ecuación de Richards* (pp. 258-266). Congreso Nacional del Agua. Vol. 2. Santa Fe, Argentina.
- Zimmermann, E., & Riccardi G. (2000). *Modelo de simulación hidrológica superficial y subterránea para áreas de llanura* (pp. 169-178). Vol. II. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. IAHR Div. LA, Córdoba, Argentina.
- Zimmermann, E. (2003). Modelo hidrológico superficial y subterráneo desarrollado para la simulación de sistemas de llanura. 2. Estrategias para la calibración. *Journal of Earth Sciences. Boletín Geológico y Minero*, 114(2), 159-169.
- Zimmermann, E., & Basile, P. (2007). *Funciones hidráulicas de*

suelos limosos: regresiones no lineales con propiedades físicas y granulométricas. XXI Congreso Nacional del Agua y IV Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Tucumán, Argentina.

Zimmermann, E., Scuderi, C., Riccardi, G., Stenta, H., Basile, P., García, M., & Rentería, J. (2008). *Asignación de parámetros hidráulicos de suelos utilizando composición textural, características físicas y estratigráficas*. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR Div. LA, Cartagena de Indias, Colombia.

Zimmermann, E., & Basile, P. (2011). Estimación de parámetros hidráulicos en suelos limosos mediante diferentes funciones de pedotransferencia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(1), 99-116.

Dirección institucional de los autores

Dr. Erik Zimmermann

Dr. Pedro Basile

Departamento de Hidráulica
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET).

Riobamba 245 bis (2000)

Rosario, ARGENTINA

Teléfono y fax: +54 (341) 4808 541

erikz@fceia.unr.edu.ar

pbasile@fceia.unr.edu.ar