

CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DE UN MODELO DE INFILTRACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL ARROYO PERGAMINO

MARÍA LILIANA DARDER¹; MARIO CASTIGLIONI^{2*}; ADRIÁN ANDRIULO¹; MARIA CAROLINA SASAL³

Recibido: 23/2/2018

Recibido con revisiones: 23/2/2018

Aceptado: 25/2/2019

RESUMEN

La infiltración regula el escurrimiento superficial y como consecuencia los procesos de erosión y contaminación. Existen diferentes ecuaciones de infiltración, siendo la de Green Ampt una de las más utilizadas en modelos hidrológicos y de erosión. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) Calibrar y analizar los parámetros de la ecuación de infiltración de Green Ampt bajo dos intensidades de lluvia, en distintos ambientes y bajo diferentes usos de la tierra, en la cuenca alta del Arroyo Pergamino. 2) Comparar el grado de eficiencia obtenido con el modelo de Green Ampt, al utilizar el potencial mátrico efectivo (Ψ) estimado por fórmula o mediante su calibración. En distintos ambientes pertenecientes a la cuenca alta del Arroyo Pergamino, en los años 2011 y 2013 se hicieron ensayos de infiltración mediante simulador de lluvia. Se aplicaron dos intensidades: 30 mm h⁻¹ y 60 mm h⁻¹. Se trabajó sobre tierras con aptitud agrícola y ganadera. En los lotes bajo agricultura se evaluaron dos secuencias de cultivo contrastantes y dos posiciones en el paisaje (loma y media loma). Con los resultados obtenidos se calibró Ke y Ψ del modelo de infiltración de Green Ampt. Se encontraron importantes diferencias porcentuales en los valores calibrados de Ke, entre las distintas condiciones experimentales evaluadas. No obstante, solo se observaron diferencias significativas al contrastar los resultados de este parámetro calibrado bajo una lluvia de 60 mm h⁻¹, entre las tierras con aptitud ganadera y agrícola, siendo en estas últimas el valor de Ke mayor. La predicción de Ψ por fórmula, no generó coeficientes de eficiencia aceptables, siendo recomendable su calibración a partir de ensayos de infiltración realizados a campo.

Palabras clave: Conductividad hidráulica efectiva, posición en el paisaje, sucesión de cultivos, lluvia simulada.

CALIBRATION OF INFILTRATION MODEL PARAMETERS IN THE PERGAMINO HIGH BASIN

ABSTRACT

Soil infiltration regulates surface runoff and on consequence erosion and contamination processes. There are different infiltration equations, being the Green Ampt one of the most used in hydrological and erosion models. The objectives of this work were: 1) Calibrate and analyze the parameters of the Green Ampt infiltration equation under two rain intensities, in different environments and under different land uses, in the upper basin of the Pergamino stream. 2) Compare the degree of efficiency obtained with the Green Ampt model, using the effective matric potential (Ψ) estimated by formula or by its calibration. In different environments belonging to the upper basin of the Pergamino stream, in 2011 and 2013 years, infiltration tests were made using a rainfall simulator. Two intensities were applied: 30 mm h⁻¹ and 60 mm h⁻¹. We worked on soils with agricultural and livestock aptitude. In agricultural plots two contrasting crop successions were evaluated and two landscape positions (hill and hillslope). With the results, the Ke and Ψ of the Green Ampt infiltration model were calibrated. There were important percentage differences in the calibrated Ke values, between the several experimental conditions evaluated. However, only significant differences were observed in this parameter when comparing the results obtained in livestock and agricultural soils, with a higher value of Ke in the latter. The Ψ prediction equation did not generate acceptable coefficients of efficiency, being recommended its calibration from field infiltration tests.

Key words: Effective hydraulic conductivity; landscape position; crop succession; simulated rain.

1 EEA Pergamino (INTA), Ruta 32, Km 4,5 (2700) Pergamino (B.Aires)

2 Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos (FAUBA), Av San Martín 4453 (1417) CABA

3 EEA Paraná (INTA), Ruta 11, Km 12,5 (3100) Paraná (E. Ríos)

* Autor de contacto: castigli@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

La correcta estimación del proceso de infiltración es importante para predecir de manera eficiente la escorrentía, la pérdida de suelo y de nutrientes durante los eventos de lluvia (Yu, 1999).

Los simuladores de lluvia han sido diseñados para evaluar la infiltración, el escurrimiento y las pérdidas de suelo en el terreno, bajo distintas condiciones de pendiente, roturación y cobertura de suelo (Irurtia & Mon, 1994; Aoki & Sereno, 2006). Aoki & Sereno (2006) utilizando un microsimulador de lluvias, determinaron que la velocidad final de infiltración, resultó ser un indicador de calidad de suelo válido para detectar diferencias significativas en las propiedades del horizonte superficial de un Haplustol típico en condiciones de bosque nativo y en un agroecosistema manejado con labranza convencional. Chagas *et al.* (2011) aplicando lluvia simulada de alta intensidad, pudieron diferenciar estadísticamente el comportamiento hidrológico de un suelo con aptitud ganadera no degradado respecto a otro similar afectado por erosión severa. De la Vega *et al.* (2004) utilizando resultados de infiltración generados a campo con simulador de lluvia, lograron representar dicho proceso de manera satisfactoria mediante una regresión trilineal, subdividiendo el mismo en tres etapas. Por su parte, Castiglioni *et al.* (2018) observaron que ante la presencia de estructuras de suelo de tipo laminar, el uso de esta herramienta que genera fundamentalmente flujo vertical del agua a travez del suelo, es mas efectiva en detectar dicho proceso de degradación física, respecto al instrumental mediante el cual el agua se mueve en el suelo en forma tridimensional.

Aoki & Sereno (2006) mencionaron que a partir de este tipo de ensayos se puede ajustar el proceso de infiltración a distintos modelos o ecuaciones. En este sentido, Landini *et al.* (2007) utilizaron los resultados de infiltración determinados a campo con doble anillo, para estudiar el ajuste de las ecuaciones de Kostiaikov-Lewis y Philip, logrando R^2 superiores a 0,6. Aoki & Sereno (2006) determinaron que la ecuación de Horton era mejor que la de Philip para describir el proceso de infiltración en un Haplustol típico de la provincia de Córdoba. Martínez *et al.* (2010) observaron

en una pastura para aprovechamiento ganadero, que el modelo de Swartzendruber representaba el proceso de infiltración medido a campo con doble anillo, de manera más eficiente que el de Mezencev. Por su parte, del Barrio (1984) al medir la capacidad de infiltración de los principales grandes grupos de suelos de la Región Pampeana, concluyó que la ecuación de Kostiaikov-Lewis era la más aconsejable para representar el proceso de infiltración medido a campo con doble anillo.

La ecuación de infiltración de Green Ampt (Green & Ampt, 1911) es una de las más usadas en modelos hidrológicos y de erosión (Van den Putte *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2016). La misma describe el proceso de infiltración a partir del efecto combinado de la succión capilar y la gravedad. Asume el movimiento de agua dentro del suelo considerando un frente de humedecimiento bien definido, el cual se desplaza uniformemente en profundidad, quedando el suelo saturado de agua por arriba de dicho frente, mientras que por debajo se encuentra en su condición inicial de humedad (Nearing *et al.*, 1996). Mein & Larson (1973) modificaron la ecuación original, para simular la tasa de infiltración durante una lluvia estable. Esta forma de la ecuación es comúnmente llamada Green-Ampt Mein-Larson (GAML) (Mao *et al.*, 2016). El modelo GAML describe el proceso de infiltración a partir de iniciado el escurrimiento, ya que hasta dicho momento denominado tiempo de encharcamiento, se considera que toda la lámina de lluvia es absorbida por el suelo (Van den Pute *et al.*, 2013).

Este es uno de los pocos modelos de infiltración cuyos parámetros tienen una correspondencia directa con las propiedades físicas del suelo, que pueden ser determinadas directamente en laboratorio (Weber & Apestegui, 2013). Sin embargo, van de Zweep & Stone (1991) y Risse *et al.* (1992; 1994), mostraron que estimar los parámetros del modelo GAML usando propiedades del suelo no era muy adecuado, y propusieron que estos fueran calibrados a partir de mediciones de infiltración realizadas a campo (Yu, 1999). De la misma manera, si bien existe información acerca de los valores de los parámetros del modelo GAML para un extenso rango de suelos (Rawls *et al.*, 1983), su calibración es necesaria de manera

de poder contemplar su variabilidad espacial, las insuficiencias del modelo y la dependencia entre sus parámetros (Risse *et al.*, 1995). Por otra parte, no verificar a campo si la información obtenida de la bibliografía es representativa de la realidad analizada, podría generar grandes errores en la estimación de la escorrentía (Elhakeem & Papanicolaou, 2012).

El modelo GAML presenta dos parámetros: la conductividad hidráulica efectiva (K_e) y el potencial mátrico efectivo (Ψ), el cual es función del contenido de agua inicial del suelo y de la tensión en el frente de humedecimiento. Se ha observado que los resultados de infiltración estimados, son sensibles a los cambios en los valores de dichos parámetros, especialmente respecto a la conductividad hidráulica efectiva (Nearing *et al.*, 1990; De Roo & Jetten, 1999). Risse *et al.* (1994) consideraron que calibrar Ψ a través de mediciones realizadas a campo, no mejoraba la predicción del escurrimiento respecto a la estimación de dicho parámetro a partir de la ecuación desarrollada por Rawls & Brakensiek (1983). Landini *et al.* (2007) al utilizar las funciones de edafotransferencia desarrolladas por Saxton & Rawls (2006) para estimar los parámetros de dicho modelo, obtuvieron una buena predicción en algunos ensayos de infiltración, no obstante lo cual dichos autores aconsejaron la generación de ecuaciones adaptadas a los suelos de cada región. Martínez *et al.* (2011) observaron que la mejor eficiencia en la predicción del fenómeno de infiltración por parte del modelo de Greem Apmppt, ocurría al usar como parámetros de entrada los valores obtenidos con las funciones de edafotransferencia desarrolladas por Wosten & Nemes (2004), en relación a las aportadas por Saxton & Rawls (2006) o a los obtenidos mediante el programa Rosetta (Schaap *et al.* 2001). No obstante, estos autores también sugirieron desarrollar funciones predictivas que se ajusten a las características de los suelos locales y a las distintas alternativas de manejo.

La infiltración es un proceso que presenta gran variabilidad espacial, la que puede estar asociada a la ocurrencia de cambios en las características de los suelos, a la posición que ocupan los mismos en el paisaje, a la profundidad de suelo

analizada, a los instrumentos y métodos de medición, como así también al error experimental y al diferente uso de la tierra.

Tálamo *et al.* (2016), trabajando en suelos bajo vegetación de bosque en Salta, determinaron que la tasa de infiltración disminuía con la intensidad de la lluvia simulada, la pendiente y la humedad del suelo, pero no así con la ocurrencia de incendios forestales. Por su parte, Rey Montoya *et al.* (2017) determinaron para un Argiudol ácuico de Corrientes, que la infiltración básica era mayor en siembra directa respecto a la obtenida bajo labranza convencional y reducida. A su vez, Cabrera *et al.* (2011) determinaron en un Hapludol típico de Córdoba, que el incremento de la carga animal producía una disminución en la velocidad de infiltración inicial, potenciándose este efecto bajo la condición de suelo húmedo. También, Bacigaluppo *et al.* (2017) observaron en un Argiudol del sur de Santa Fé, que la diferente sucesión de cultivos afectaba la tasa de infiltración básica.

Tomando en cuenta estos antecedentes y bajo el supuesto de que los distintos usos de la tierra, la diferente posición en el paisaje, la presencia de suelos con características contrastantes y la intensidad de lluvia aplicada, afectan significativamente los parámetros del modelo de infiltración GAML, los objetivos del presente trabajo fueron: 1) Calibrar y analizar los parámetros de la ecuación de infiltración GAML bajo dos intensidades de lluvia, en distintos ambientes bajo diferentes usos de la tierra en la cuenca alta del Arroyo Pergamino, 2) Comparar el grado de eficiencia obtenido con el modelo GAML, al utilizar el potencial mátrico efectivo estimado por fórmula o mediante su calibración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características edáficas y climáticas del área de trabajo

El trabajo se llevó a cabo en distintos ambientes pertenecientes a la cuenca alta del Arroyo Pergamino, utilizando resultados de infiltración provenientes de ensayos efectuados a campo con simulador de lluvia.

En dicha área, en las posiciones altas del paisaje predominan los Argiudoles típicos (Serie Pergamino y su fases con distinto grado de erosión), mientras que en los bajos los suelos forman asociaciones y complejos muy heterogéneos, que contienen proporciones variables de los suelos encontrados en las tierras altas, entremezclados con Alfisoles salinos y alcalinos, típicos de los bordes del arroyo (INTA, 1972).

El clima regional es templado, con temperaturas medias diarias que oscilan entre 10 y 12 °C en el invierno y 23 a 25 °C en el verano. La precipitación media anual histórica es de 984 mm (período 1910-2015) (Estación meteorológica EEA INTA Pergamino). En la **Figura 1** se detalla la distribución mensual media de las precipitaciones para el área bajo estudio, junto con la ocurrida durante el año previo a los dos momentos en que se realizó el trabajo de campo (junio de 2010 a mayo de 2011 y junio de 2012 a mayo de 2013). De su análisis se desprende que en 2010/11 dicho período fue más seco que lo normal (21%), mientras que en 2012/13 fue más húmedo (30%). No obstante, considerando solamente los cinco meses previos a la realización del trabajo (enero-mayo), la diferencia porcentual en lámina de lluvia caída durante los años 2011 y 2013 respecto a los valores medios registrados para igual período del año se invirtió, siendo un 13% mayor en el año 2011 y un 14% menor

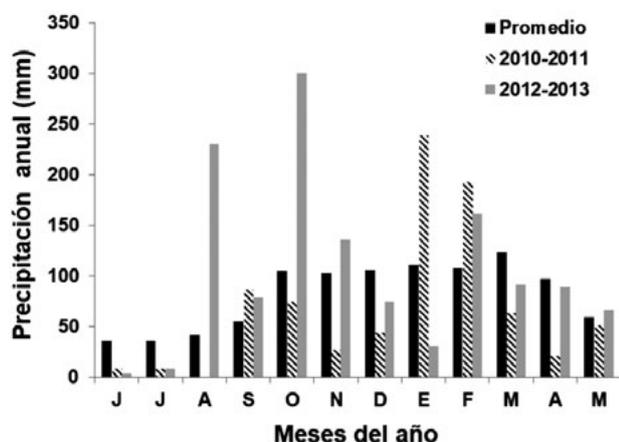


Figura 1. Precipitaciones medias mensuales para el área bajo estudio y las ocurridas el año previo a la realización del trabajo de campo

Figure 1. Average monthly rainfall for the study area and those that occurred the previous year to the field work

en el año 2013. Este comportamiento generó un contenido de humedad edáfica superficial significativamente menor en las tierras con aptitud agrícola en 2013 respecto a 2011 ($p < 0,05$), no sucediendo lo mismo en aquellas con aptitud ganadera (**Tabla 3**).

Las intensidades de lluvia aplicadas en los ensayos de infiltración surgieron de un análisis previo realizado con los partes meteorológicos diarios del período 2001-2010, generados por el área de Agrometeorología (EEA INTA Pergamino). Primero se identificaron las máximas intensidades de lluvia horaria diaria, agrupándolas en intervalos de intensidad creciente a partir de los 10 mm h⁻¹, dado que valores menores corresponden a eventos de carácter no erosivo (Wischmeier & Smith, 1978). De acuerdo a los resultados de dicho análisis, se comprobó que las intensidades de lluvia predominantes en todos los años fueron aquellas menores a los 45 mm h⁻¹ (entre el 77% y 99%). A su vez, los valores medios correspondientes a las intensidades de lluvia entre 10 y 45 mm h⁻¹ y entre 45 y 100 mm h⁻¹ fueron 30 mm h⁻¹ y 60 mm h⁻¹, respectivamente. Por lo tanto, estas últimas fueron seleccionadas para la región bajo estudio, como representativas de eventos con alta recurrencia e intensidad moderada (30 mm h⁻¹) y poco frecuentes pero de alta intensidad (60 mm h⁻¹).

Determinaciones realizadas

Las determinaciones fueron realizadas a campo sobre suelos con aptitud agrícola (Ag) y ganadera (Gan). Entre estos últimos, se consideraron tres distancias al curso de agua: 6 m, 30 m y 100 m (Ang, Me y An, respectivamente), considerando que dichas distancias reflejarían una distinta respuesta de los suelos presentes al proceso de infiltración. En los ambientes agrícolas se trabajó en la loma (L) y media loma (ML) de lotes bajo siembra directa, con sucesiones de cultivo contrastantes durante los últimos 5 años. En este sentido, en algunos existió el predominio del cultivo de soja (Mo), mientras que en otros el esquema de rotación estuvo más equilibrado con gramíneas (R). En todos los casos se hicieron tres repeticiones por posición en el paisaje y por esquema de rotación. Las determinacio-

nes fueron realizadas en los años 2011 y 2013, aplicándose en el primero una intensidad de lluvia de 60 mm h⁻¹ y en el segundo de 30 mm h⁻¹, en el primer caso durante una hora y en el segundo en un lapso de dos horas. El trabajo se realizó en forma posterior a la cosecha del cultivo de verano (mes de mayo), sin eliminar de la superficie del suelo los rastros remanentes del cultivo anterior para el caso de los suelos bajo agricultura, ni el tapiz vegetal en aquellos con aptitud ganadera.

El simulador de lluvia utilizado posee una parcela de escurrimiento de 50 cm de lado (Irrurtia & Mon, 2004), realizándose las lecturas de lámina de lluvia y de escurrimiento cada 5 minutos. De esta manera, para dicho lapso de tiempo se obtuvo por diferencia la lámina de agua infiltrada y por consiguiente la evolución de la tasa de infiltración cada 5 minutos. Las simulaciones de lluvia realizadas a 60 mm h⁻¹ fueron en total 85, efectuándose 28 en lomas, 28 en medias lomas y 29 en ambientes con aptitud ganadera. Por su parte, a 30 mm h⁻¹ se hicieron 74 simulaciones, realizándose 27 en lomas, 27 en medias lomas y 20 en las posiciones bajas del paisaje. En este último ambiente y bajo una intensidad de lluvia de 30 mm h⁻¹, solo se analizó la respuesta de los sectores que se encuentran a 6 m y 100 m del curso de agua.

Paralelamente, se determinaron otras propiedades del suelo superficial (0-5 cm): contenido de humedad gravimétrica inicial (H₂O); porcentaje de carbono orgánico (Co); pH (pH) y textura. También, en cada sitio de observación se determinó el peso de la materia seca por unidad de superficie, correspondiente a rastros o a la pastura presente (MS). La densidad aparente (Dap) fue estimada a partir de la determinación de la porosidad con el modelo de Saxton & Rawls (2006), el que toma en cuenta el porcentaje de arena, arcilla y de carbono del suelo.

Calibración de parámetros

Con la información obtenida de los ensayos de infiltración, se realizó la calibración del modelo de infiltración de GAML, siendo la ecuación original (1) la que se detalla abajo.

$$f = Ke \frac{\Psi \Delta\theta}{F} + 1 \quad (1)$$

Siendo:

Ke: conductividad hidráulica efectiva del suelo (mm h⁻¹)

$\Delta\theta$: Diferencia entre el contenido inicial de humedad del suelo y el del mismo suelo saturado (cm³ cm⁻³)

Ψ : tensión mátrica en el frente de humedecimiento (mm)

F: infiltración acumulada (mm)

Dicha calibración se realizó de dos maneras:

a) Ajustando secuencialmente los dos parámetros (Kea y Ψ a) hasta lograr la reproducción más satisfactoria de la evolución de la tasa de infiltración encontrada a campo.

b) Ajustando únicamente la Ke (Keb), al mismo tiempo que Ψ (Ψ b) fue estimada teniendo en cuenta las constantes que corresponden a la ecuación de retención hídrica de Brooks Corey (1964) (λ y λ_b). En este sentido, Brakensiek *et al.* (1981) presentaron un método para determinar Ψ teniendo en cuenta la siguiente ecuación (2).

$$\Psi = \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \frac{\lambda_b}{2} \quad (2)$$

Siendo:

λ : índice de tamaño de poros de Brooks Corey

λ_b : tensión capilar en el punto de entrada de aire al suelo (mm)

λ y λ_b fueron estimadas a partir del uso de ecuaciones de predicción desarrolladas por Rawls & Brakensiek (1983), para cuya resolución es necesario conocer el contenido de arena y de arcilla del suelo y su porosidad.

El ajuste de parámetros se realizó para cada ensayo de simulación de lluvia, buscando optimizar la tasa de infiltración estimada cada 5 minutos por el modelo de infiltración con la observada a campo, desde el momento de producido el encharcamiento del suelo (inicio del escurrimiento) hasta finalizar el ensayo. La función objetivo que se utilizó para establecer los mejores valores de Ke y Ψ ajustados, fue el coeficiente de eficiencia (Nash & Sutcliffe, 1970), cuya fórmula se describe más abajo.

Este coeficiente se simboliza como R_N^2 y calcula el grado de ajuste de los valores observados y estimados respecto a una línea 1:1.

$$R_N^2 = \frac{\sum(Sim_i - Obs_i)^2}{\sum(Obs_i - Media_{obs})^2} \quad (3)$$

Siendo:

Sim_i: Valores simulados

Obs_i: Valores observados

Media_{obs}: Valor medio observado

R_N^2 puede variar entre $-\infty$ y 1. Un valor R_N^2 igual a 1 indica una simulación perfecta (ajuste perfecto a la línea 1:1). Valores menores a cero (negativos) indican que el error del modelo es mayor que la variabilidad de la propiedad bajo estudio y por lo tanto es mejor usar el promedio de los datos que utilizar los valores simulados.

A su vez, la conductividad hidráulica se estimó mediante tres procedimientos detallados en la bibliografía (Rawls & Brakensiek, 1983; Risse *et al.*, 1995; Nearing *et al.*, 1996), los cuales para su resolución utilizan variables edáficas simples. Posteriormente se compararon los resultados obtenidos, con los de Ke generados a partir de su calibración con los ensayos de simulación de lluvia realizados a campo.

Análisis estadístico

Se verificó el supuesto de normalidad en la distribución de los resultados, por medio de la prueba de Shapiro-Wilks modificada. Ante la falta de distribución normal en los resulta-

dos, se realizaron análisis de varianza y test de comparación de medias, utilizando la prueba de Kruskal & Wallis (1952). También se hicieron análisis de correlación (Di Rienzo *et al.*, 2001). Para llevar a cabo estos estudios se utilizó el software InfoStat versión 2017 (Di Rienzo *et al.*, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los suelos y de su cobertura superficial

La textura superficial de los suelos sobre los que se trabajó fue fundamentalmente franco limosa, aunque en los ambientes bajos también se observaron algunos suelos franco arenosos y limosos. En la **Tabla 1** se detalla el valor promedio y su variabilidad en la distribución de partículas, contenido de carbono orgánico, pH y densidad aparente estimada, correspondientes al estrato superficial de cada ambiente analizado, como así también el peso de la materia seca de los rastrojos dispuestos sobre el suelo o del tapiz vegetal perteneciente a la pastura.

Hubo diferencias en la distribución de partículas entre los suelos correspondientes al ambiente agrícola y ganadero, presentando estos últimos mayor contenido de arena y menor porcentaje de arcilla, siendo este tamaño de partícula en los suelos del ambiente cercano al arroyo el que presentó mayor variación. Dentro del mismo, el contenido de carbono aumentó en la medida que los suelos ocuparon posiciones más distantes al

Tabla 1. Valores promedio y variabilidad de algunas propiedades del suelo superficial en los distintos ambientes evaluados.

Table 1. Average values and variability of some surface soil properties in the different environments evaluated.

Posición	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Co (%)	pH	Dap (gr cm ⁻³)	MS (kg ha ⁻¹)
L	16,6 (18)	21,2 (13)	62,2 (5)	2,1 (14)	6,3 (5)	1,3 (4)	9494 (49)
ML	18,4 (25)	18,6 (16)	62,9 (6)	2,1 (20)	6,2 (9)	1,3 (6)	11224 (37)
Ang	43,9 (16)	7,8 (43)	48,3 (19)	1,2 (65)	8,9 (9)	1,5 (9)	1776 (50)
Me	39,0 (17)	8,6 (41)	52,4 (14)	2,7 (23)	8,8 (8)	1,2 (8)	4631(31)
An	36,3 (28)	8,9 (43)	54,9 (16)	3,1 (36)	9,0 (7)	1,2 (12)	4058 (18)

L: Loma. ML: media loma. Ang, Me y An: sitios del ambiente ganadero con distancias al curso de agua de 6 m, 30 m y 100 m, respectivamente. Co: carbono orgánico. Dap: densidad aparente. MS: peso de la materia seca correspondiente a rastrojos o pastura. Valores entre paréntesis corresponden al coeficiente de variación (%).

L: hill. ML: hillslope. Ang, Me and An: livestock sites with distances to the stream of 6 m, 30 m and 100 m, respectively. Co: organic carbon. Dap: bulk density. MS: stubble or pasture dry matter weight. Values in parentheses correspond to the coefficient of variation (%).

curso de agua. El pH fue mayor en los suelos del bajo, mientras que el peso seco del material vegetal presente en la superficie del suelo, fue sensiblemente inferior en esta última posición del paisaje.

Calibración de parámetros del modelo GAML

En la **Tabla 2** se detallan los resultados medios y la variabilidad de K_e y Ψ , obtenidos a partir de las dos formas mencionadas de ajuste de parámetros del modelo de infiltración GAML, como también el coeficiente de eficiencia medio alcanzado por dicho modelo al reproducir los resultados de campo.

Kea mostró valores mayores en las tierras agrícolas respecto a las ganaderas, independientemente de la intensidad de lluvia aplicada, mientras que los resultados de Keb fueron más parecidos entre ambos usos de la tierra. También hubo diferencias entre Kea y Keb, sobre todo para las tierras bajo agricultura. La variabilidad de los parámetros del modelo de GAML entre sitios de muestreo fue en general alta, siendo ésta distinta según la intensidad de lluvia aplicada y el ambiente analizado. Los CV fueron similares, salvo algunas excepciones, a los encontrados entre las repeticiones realizadas en un mismo sitio. Por lo tanto, la variabilidad de cada sitio fue tan alta como la generada a partir de la diferente posi-

ción de los suelos en el paisaje y por el diferente esquema de sucesión de cultivos en las tierras agrícolas.

El coeficiente de eficiencia obtenido con el modelo GAML a partir de ajustar sus parámetros fue variable. Sin embargo, este fue siempre mayor cuando K_e y Ψ fueron calibrados en forma conjunta, salvo cuando se aplicó una tasa de lluvia de 30 mm h^{-1} sobre las tierras con aptitud ganadera, en que ambos métodos de calibración obtuvieron un coeficiente de eficiencia similar (**Tabla 2**). Risse *et al.* (1994) consideraron que la calibración de Ψ no producía mejoras en el comportamiento del modelo GAML, dada su baja sensibilidad a dicho parámetro (Skaggs & Khaleel, 1982). Como consecuencia, dichos autores propusieron la estimación de Ψ a partir de la ecuación desarrollada por Rawls & Brakensiek (1983). Landini *et al.* (2007) usando las funciones predictivas de Saxton & Rawls (2006) para estimar ambos parámetros del modelo GAML, obtuvieron una representación de lo sucedido a campo muy favorable, con coeficientes de eficiencia que oscilaron entre 0,79 y 0,98. Sin embargo, Martínez *et al.* (2011) utilizando también la ecuación de Saxton & Rawls (2006), la generada por Wosten & Nemes (2004) y al usar el programa Rosetta (Schaap *et al.*, 2001) para estimar K_e y Ψ , no obtuvieron resultados tan satisfactorios al confrontar la información de campo con la generada por el

Tabla 2. Valores medios y variabilidad de los parámetros del modelo GAML y su coeficiente de eficiencia, de acuerdo a la intensidad de lluvia aplicada y a la aptitud de las tierras.

Table 2. Mean values and variability of GAML model parameters and its coefficient of efficiency, according to rainfall intensity applied and land aptitude.

Intensidad lluvia Aptitud de las tierras	30 mm h ⁻¹				60 mm h ⁻¹			
	Agrícolas		Ganaderas		Agrícolas		Ganaderas	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Kea (mm h ⁻¹)	10,8	71	1,7	47	20,2	73	2,2	101
Ψ_a (mm)	119,7	151	707,2	35	361,6	102	689,9	29
Efi	0,3	64	0,3	15	0,6	26	0,4	30
Keb (mm h ⁻¹)	1,1	57	2,4	30	6,3	36	4,7	48
Ψ_b (mm)	300,9	9	208,9	24	299,3	9	158,0	18
Efi	-1,3	154	0,3	21	-29,9	183	0,3	47

Kea: conductividad hidráulica efectiva calibrada conjuntamente con Ψ_a ; Ψ_a : potencial mátrico efectivo calibrado. Efi: coeficiente de eficiencia; Keb: conductividad hidráulica efectiva calibrada; Ψ_b : potencial mátrico efectivo estimado por fórmula.

Kea: effective hydraulic conductivity calibrated together with Ψ_a ; Ψ_a : effective matric potential calibrated. Efi: Coefficient of efficiency. Keb: effective hydraulic conductivity calibrated; Ψ_b : effective matric potential estimated by formula.

modelo GAML. En este sentido, de los 14 ensayos realizados por estos investigadores, la ecuación de Wosten & Nemes (2004) generó ocho resultados positivos en el coeficiente de eficiencia con un valor promedio de 0,29, mientras que los restantes procedimientos de estimación obtuvieron coeficientes de eficiencia mayoritariamente negativos. A su vez, en el trabajo de Martínez *et al.* (2011) quedó evidenciado que los resultados de estimación de K_e y Ψ son altamente dependientes de la base de datos usada para el desarrollo de las distintas funciones de edafotransferencia, presentando los resultados de estos parámetros estimados por las tres ecuaciones utilizadas en dicho estudio diferencias altamente significativas.

Van der Zweep & Stone (1991), determinaron coeficientes de eficiencia de -0,9 cuando K_e fue estimada en una cuenca bajo pastura, mientras que dicho valor mejoró a 0,6 cuando K_e fue calibrada a partir de mediciones realizadas a campo. Risse *et al.* (1992) compararon seis métodos de estimación de la K_e con dos de calibración, generando este último procedimiento mejores resultados con un coeficiente de eficiencia de 0,5. Por su parte, Risse *et al.* (1994) mencionaron que los métodos comunes de estimación de K_e son inadecuados, y que por lo tanto es conveniente que dicho parámetro sea calibrado para el área bajo estudio.

A partir del análisis de correlación, se pudo determinar que las distintas propiedades edáficas que se usaron para caracterizar al estrato superficial de los suelos sobre los que se trabajó (**Tabla 1**), no incidieron sobre el grado de eficiencia del modelo de infiltración.

Viendo los resultados poco satisfactorios obtenidos con el ajuste de K_{eb} y Ψ_b (**Tabla 2**), el resto del análisis se centró en K_e y Ψ_a . A su vez, y con la finalidad de solo considerar los resultados de estos parámetros que lograron los mejores ajustes en cada situación evaluada, para cada intensidad de lluvia, aptitud de las tierras, posición en el paisaje y esquema de secuencia de cultivos, se tomaron en cuenta únicamente aquellos resultados de K_e y Ψ_a que generaron coeficientes de eficiencia iguales o superiores al valor promedio obtenido en cada una de dichas situaciones. De esta manera, el número original de ensayos ana-

lizados se redujo, quedando para una intensidad de lluvia de 60 mm h⁻¹ 35 y 16 bajo tierras agrícolas y ganaderas, respectivamente, mientras que con 30 mm h⁻¹ quedaron, en ese mismo orden, 20 y 10 ensayos.

K_e y Ψ_a no presentaron distribución normal, sin poder lograr su normalización a partir de distintas transformaciones realizadas sobre los resultados, por lo que el análisis estadístico del efecto de la intensidad de lluvia, de la aptitud de las tierras, de la posición en el paisaje o de la diferente sucesión de cultivos sobre dichos parámetros se determinó a partir de un análisis de varianza no paramétrico, utilizando para ello la prueba de Kruskal & Wallis (1952).

En la **Tabla 3** se observan los valores medios y la variabilidad de K_e y Ψ_a , la eficiencia del modelo de infiltración calibrado y el contenido de humedad inicial del suelo para los distintos sitios donde fueron realizados los ensayos de infiltración.

Dadas las diferencias existentes en el contenido de humedad edáfica inicial entre años para los suelos con aptitud agrícola, no se pudieron hacer deducciones respecto al efecto de la intensidad de lluvia aplicada sobre los resultados de K_e y Ψ_a obtenidos. No obstante, y si bien no se observaron diferencias significativas en dichos parámetros entre las dos intensidades de lluvia aplicadas en las tierras con aptitud ganadera y agrícola, es de destacar que con lluvia simulada de 60 mm h⁻¹ la K_e se incrementó un 100% y un 200% respectivamente, respecto a cuando se aplicaron 30 mm h⁻¹ (**Tabla 3**).

Los valores medios de K_e (**Tabla 3**) oscilaron entre 1,2 mm h⁻¹ (An30) y 19,7 mm h⁻¹ (L60), presentando un promedio de 12,8 mm h⁻¹ para los suelos franco limosos, de 0,8 mm h⁻¹ para los franco arenosos y de 7,5 mm h⁻¹ para los limosos, siendo sus medianas en ese mismo orden: 5,0; 0,8 y 2,3 mm h⁻¹, respectivamente. Rawls *et al.* (1983) publicaron resultados de K_e para las mismas texturas de suelo de 6,5; 10,9 y 3,4 mm h⁻¹, respectivamente, lo que hace pensar que los valores de las medianas obtenidos en el presente trabajo, salvo para el caso de los suelos franco arenosos, fueron bastante similares a los citados por

Tabla 3. Valores medios y variabilidad de los parámetros del modelo de infiltración de GAML, su coeficiente de eficiencia y contenido de humedad inicial del suelo para los distintos sitios donde se realizaron los ensayos de infiltración.

Table 3. Mean values and variability of the GAML infiltration model parameters, its coefficient of efficiency and initial soil moisture, for the different sites where the infiltration tests were carried out.

Sitio/Intensidad	Kea (mm h ⁻¹)	Ψ _a (mm)	Efi	H ₂ O (%)
Ag30	5,3 (119)	283,3 (117)	0,5 (33)	24,7 (22)
Gan30	1,6 (97)	747,3 (60)	0,5 (12)	26,6 (18)
Ag60	15,8 (93)	428,6 (120)	0,8 (15)	29,7 (15)
Gan60	3,2 (188)	632,8 (53)	0,6 (21)	27,6 (34)
L30	8,5 (94)	141,7 (148)	0,5 (47)	25,4 (17)
ML30	3,5 (127)	359,6 (101)	0,5 (21)	24,1 (26)
Mo30	5,9 (123)	253,7 (107)	0,5 (36)	24,7 (18)
R30	4,2 (101)	338,4 (130)	0,5 (23)	24,7 (28)
Ang30	1,8 (108)	822,4 (61)	0,5 (14)	26,7 (24)
An30	1,2 (34)	634,6 (64)	0,4 (9)	26,4 (12)
L60	19,7 (70)	262,0 (153)	0,8 (15)	29,1 (10)
ML60	12,6 (119)	568,8 (100)	0,8 (14)	30,3 (18)
Mo60	18,5 (82)	441,2 (130)	0,8 (15)	31,1 (17)
R60	14,3 (102)	421,1 (117)	0,8 (15)	30,0 (13)
Ang60	1,9 (85)	862,3 (9)	0,6 (24)	27,1 (38)
Me60	5,8 (163)	622,4 (66)	0,6 (20)	24,3 (20)
An60	1,5 (145)	490,1 (64)	0,6 (24)	31,2 (40)

Ag30 y Gan30: tierras agrícolas y ganaderas bajo lluvia simulada de 30 mm h⁻¹, respectivamente. Ag60 y Gan60: tierras agrícolas y ganaderas bajo lluvia simulada de 60 mm h⁻¹, respectivamente. L30, ML30, Ang30 y An30: ambientes de loma, media loma, 6 m y 100 m de distancia al curso de agua con lluvia simulada de 30 mm h⁻¹, respectivamente. L60, ML60, Ang60, Me60 y An60: ambientes de loma, media loma y 6 m, 30 m y 100 m de distancia al curso de agua con lluvia simulada de 60 mm h⁻¹, respectivamente. Mo30 y R30: lotes con mayor proporción de soja en la sucesión de cultivos y con una relación gramíneas/leguminosas más equilibrada bajo lluvia simulada de 30 mm h⁻¹, respectivamente. Mo60 y R60: lotes con mayor proporción de soja en la sucesión de cultivos y con una relación gramíneas/leguminosas más equilibrada bajo lluvia simulada de 60 mm h⁻¹. Kea: conductividad hidráulica efectiva ajustada. Ψ_a: potencial mátrico efectivo calibrado. Efi: coeficiente de eficiencia. H₂O: contenido de humedad superficial inicial. Valores entre paréntesis corresponden al coeficiente de variación (%).

Ag30 and Gan30: agricultural and livestock lands under 30 mm h⁻¹ simulated rain, respectively. Ag60 and Gan60: agricultural and livestock lands under 60 mm h⁻¹ simulated rain, respectively. L30, ML30, Ang30 and An30: hill, hillslope, 6 m 100 m to de stream under 30 mm h⁻¹ simulated rain, respectively. L60, ML60, Ang60, Me60 and An60: hill, hillslope, 6 m, 30 m and 100 m to the stream under 60 mm h⁻¹ simulated rain, respectively. Mo30 and R30: plots with higher soybean proportion in the crop succession and with a more balanced grass/ legume ratio under 30 mm h⁻¹ simulated rain, respectively. Mo60 and R60: plots with higher soybean proportion in the crop succession and with a more balanced grass/ legume ratio under 60 mm h⁻¹ simulated rain, respectively. Kea: effective hydraulic conductivity calibrated. Ψ_a: effective matric potential calibrated. Efi: coefficient of efficiency. H₂O: initial surface soil moisture. Values in parentheses correspond to the coefficient of variation (%).

estos autores. Respecto a estos últimos suelos, se debe considerar que los mismos están ubicados en los sectores bajos del paisaje y que a pesar de tener una textura más favorable para el desarrollo del proceso de infiltración, presentan al mismo tiempo condiciones adversas como la presencia de sodio, lo que queda evidenciado a partir de los altos valores de pH superficial registrados en los mismos (**Tabla 1**). Debido a estas características distintas de estos suelos franco arenosos, se debieron las diferencias observadas con los resultados de Ke publicados por Rawls *et al.* (1983).

A su vez, el promedio general de Kea (9,0 mm h⁻¹) y su variabilidad (CV: 135%), fueron similares a lo estimado de acuerdo a la ecuación desarrollada por Rawls & Brakensiek (1983), por la cual se obtuvo un valor promedio de 10,8 mm h⁻¹ y un CV de 153%. Por su parte, los restantes estimadores analizados (Risse *et al.*, 1995; Nearing *et al.*, 1996) presentaron resultados por debajo de la mitad de la Kea calibrada y con una variabilidad inferior al 75%. Ninguna de estas opciones de estimación de la conductividad hidráulica, presentó correlaciones significativas con los valores de Kea calibrados a campo.

Martinez *et al.* (2011) estimaron mediante la ecuación predictiva de Wosten y Nemes (2004) para los suelos franco limosos bajo pastura y con distinta carga animal sobre los que trabajaron, un valor de K_e promedio de $7,3 \text{ mm h}^{-1}$ con un coeficiente de variación del 33%, mientras que Landini *et al.* (2007) para la misma textura de suelos bajo pastura determinaron un valor de K_e promedio de $5,1 \text{ mm h}^{-1}$ con una variabilidad del 25%. Estos resultados de K_e son superiores al promedio hallado en el presente trabajo para los suelos con aptitud ganadera (Gan30 y Gan60), siendo más parecidos los obtenidos por Landini *et al.* (2007) y Martinez *et al.* (2011) a los que fueron calibrados a 30 m del curso de agua bajo 60 mm h^{-1} de lluvia simulada (Me60), siendo en todos los casos la variabilidad de K_e menor al ser estimada por fórmula (**Tabla 3**).

Los resultados de Ψ_a (**Tabla 3**) estuvieron entre $141,7 \text{ mm}$ (L30) y $747,3 \text{ mm}$ (Gan30), con valores medios de $474,1 \text{ mm}$, $558,5 \text{ mm}$ y $667,8 \text{ mm}$ para los suelos franco limosos, franco arenosos y limosos, respectivamente. Con la excepción de los suelos franco limosos, dichos valores fueron superiores a los publicados por Rawls *et al.* (1983), para suelos de similar textura (franco limosos: $29,2$ a $953,9 \text{ mm}$; franco arenosos: $26,7$ a $454,7 \text{ mm}$; limosos: $13,3$ a $593,8 \text{ mm}$). Es de hacer notar, que el valor medio calibrado de este parámetro (472 mm), fue también superior y con una variabilidad mayor (CV: 96%) respecto a estimar el mismo a partir de la ecuación de Rawls & Brakensiek (1983), que arrojó un valor medio de 260 mm y un coeficiente de variación del 28%, sin mostrar este parámetro una correlación significativa entre sus valores calibrados y estimados por fórmula. Por su parte, Landini *et al.* (2007) mediante la ecuación de Saxton & Rawls (2006) estimaron para los suelos franco limosos bajo pastura con que trabajaron, un valor promedio de Ψ de 521 mm con una variabilidad del 47%, siendo este valor también menor a todos los resultados de Ψ calibrados en el presente trabajo en suelos con aptitud ganadera (**Tabla 3**).

Según se observa en la **Tabla 3**, los coeficientes de eficiencia variaron entre $0,4$ (An30) y $0,8$

(Mo60, R60, L60, ML60, Ag60), comprobándose que el mejor ajuste de parámetros fue logrado en las tierras agrícolas bajo una intensidad de lluvia de 60 mm h^{-1} , independientemente de su posición en el paisaje o de la sucesión de cultivos implementada. Con coeficientes de eficiencia más bajos se ubicaron las tierras con aptitud ganadera, también con una intensidad de 60 mm h^{-1} , siendo los parámetros ajustados bajo una lluvia simulada de 30 mm h^{-1} , los que menor grado de ajuste obtuvieron, independientemente del uso de la tierra, posición en el paisaje y sucesión de cultivos implementada.

Solo se comprobaron diferencias significativas en los valores ajustados de K_e , al ser estos comparados entre tierras con aptitud agrícola y ganadera bajo una intensidad de lluvia de 60 mm h^{-1} , y en los de Ψ_a al realizar el mismo contraste de resultados bajo una intensidad de lluvia de 30 mm h^{-1} . En el primer caso el valor medio fue mayor para las tierras agrícolas, mientras que en el segundo lo fue para las ganaderas. Castiglioni *et al.* (2006) tampoco encontraron diferencias significativas en la tasa de infiltración básica de un Argiudol vértico de la Pampa Ondulada bajo siembra directa, al comparar los valores de infiltración básica entre ambientes de loma y media loma, generados con simulador de lluvia. Por su parte, Bacigalupo *et al.* (2017) luego de nueve años de ensayo, pudieron ver incrementos de hasta el 170% en la tasa de infiltración básica de un Argiudol típico del sur de Santa Fé, al comparar el efecto del monocultivo de soja respecto al de otras secuencias de cultivo con incorporación de distinta proporción de gramíneas. A su vez, Tálamo *et al.* (2016) encontraron un decrecimiento en la tasa de infiltración en suelos de la Pcia. de Salta, ante aumentos en la intensidad de la lluvia simulada. Sin embargo en dicho estudio, de manera diferente a lo ocurrido en el presente trabajo, se utilizaron intensidades de lluvia superiores (75 mm h^{-1} a 145 mm h^{-1}).

De acuerdo a lo mencionado, entre los factores estudiados en este trabajo hubo pocos efectos estadísticamente significativos sobre la K_e . Sin embargo, este parámetro ajustado con una lluvia simulada de 30 mm h^{-1} , fue más de un 200% superior en las tierras agrícolas que en las ganaderas, en la loma fue

un 142% mayor respecto a la media loma, mientras que a 60 mm h⁻¹, la Kea fue superior en un 50% en la loma respecto a la media loma. También con lluvia simulada de 60 mm h⁻¹, la Kea ajustada a 30 m del curso de agua fue superior en más de un 200% respecto a la calibrada a 6 m y 100 m del arroyo. En los restantes casos las diferencias encontradas no superaron el 50%.

Esta falta de contrastes significativos para esta propiedad, probablemente se deba a que los cambios de gradiente en la pendiente entre la loma y media loma, las diferencias entre las intensidades de lluvia aplicadas, como la cantidad de años bajo sucesiones de cultivo contrastantes, no fueron lo suficientemente grandes como para que su efecto sobre el proceso de infiltración superara la variabilidad intrínseca observada en esta propiedad.

Análisis de correlación

A través del análisis de correlación, se buscó entre las variables detalladas en la **Tabla 1** y la humedad inicial del suelo, aquellas que mejor explicaran el comportamiento de Kea y Ψ_a . Para este análisis, se tuvieron en cuenta aquellas situaciones en las que hubo suficiente cantidad de resultados: Ag30, Ag60, Gan30, Gan60, L60, ML60, Mo60, R60. Se pudo comprobar en pocos casos, la existencia de correlaciones significativas de Kea y Ψ_a con la distribución de partículas, el contenido de carbono orgánico, la densidad aparente estimada, el pH, el peso de la materia seca correspondiente a los rastrojos superficiales o al tapiz vegetal de la pastura y con dos parámetros relacionados con la humedad superficial del suelo (**Tabla 4**). De su análisis surge que la cobertura superficial del suelo

Tabla 4. Coeficientes de correlación entre Kea y Ψ_a con otros parámetros

Table 4. Correlation coefficients between Kea and Ψ_a with other parameters

	Dap	Arcilla	Co	MS	Arena	pH	Limo	$\Delta\theta$	H ₂ O
Kea30	-0,5*	0,5*	0,4*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Kea60	ns	0,5**	ns	0,4**	-0,4**	-0,4**	ns	ns	ns
KeaAg30	-0,5*	ns	0,5*	ns	ns	-0,6*	-0,5*	ns	ns
KeaML60	ns	0,5*	0,5*	0,5*	ns	ns	ns	ns	ns
KeaMo60	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,6*	ns
KeaR60	-0,4*	ns	ns	0,5*	ns	ns	ns	ns	ns
Ψ_a 30	0,5**	-0,6**	-0,6**	ns	ns	0,6**	ns	-0,6**	0,4*
Ψ_a 60	ns	-0,3*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Ψ_a Ag30	0,6**	ns	-0,6**	ns	ns	ns	ns	-0,5*	ns
Ψ_a Ag60	0,4**	ns	-0,4*	ns	0,4*	ns	ns	ns	ns
Ψ_a Gan60	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,6*	ns
Ψ_a L60	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,6*	ns	ns
Ψ_a ML60	0,6**	ns	-0,6**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Ψ_a Mo60	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,7**	ns
Ψ_a R60	0,5*	ns	ns	-0,5*	ns	ns	ns	ns	-0,4*

Kea: conductividad hidráulica efectiva calibrada. Ψ_a : potencial mátrico efectivo calibrado. 30: lluvia simulada de 30 mm h⁻¹. 60: lluvia simulada de 60 mm h⁻¹. Ag y Gan: tierras con aptitud agrícola y ganadera, respectivamente. L y ML: tierras ubicadas en la loma y media loma, respectivamente. Mo y R: lotes con un predominio de soja en la rotación y con mayor equilibrio de gramíneas en la sucesión de cultivos, respectivamente. Dap: densidad aparente. Co: carbono orgánico. MS: peso de la materia seca correspondiente a rastrojos o pastura. $\Delta\theta$: diferencia entre el contenido inicial de agua en el suelo y su saturación. H₂O: contenido de humedad inicial del suelo superficial. **:p<0,01; *:p<0,05; ns: no significativo

Kea: effective hydraulic conductivity calibrated. Ψ_a : effective matric potential calibrated. 30: 30 mm h⁻¹ simulated rain. 60: 60 mm h⁻¹ simulated rain. Ag and Gan: lands with agricultural and livestock aptitude, respectively. L and ML: hill and hillslope, respectively. Mo and R: plots with higher soybean proportion in the crop succession and with a more balanced grass/legume ratio, respectively. Dap: bulk density. Co: organic carbon. MS: stubble or pasture dry matter weight. $\Delta\theta$: difference between the initial surface soil moisture and its saturation. H₂O: initial surface soil moisture. **: p <0,01; *: p <0,05; ns: not significant.

solo pudo influir sobre el valor de K_e ante la ocurrencia de una alta intensidad de lluvia. Dentro de los valores de textura hallados en el estrato superficial de los suelos analizados, el contenido de arcilla fue el factor más influyente afectando positivamente a K_e y negativamente a Ψ . También dentro de los valores de carbono orgánico registrados, su incremento favoreció el aumento de K_e , disminuyendo al mismo tiempo el valor de Ψ , sucediendo lo contrario con la densidad aparente.

CONCLUSIONES

Si bien se comprobaron diferencias porcentuales importantes en los valores medios de K_e al aplicar dos intensidades de lluvia distintas, al estar los suelos ubicados en distintas posiciones del paisaje o al contrastar lo sucedido en tierras con distinta aptitud de uso, únicamente en este último caso los valores de este parámetro resultaron ser significativamente menores en las tierras ganaderas respecto a las agrícolas bajo una lluvia de 60 mm h^{-1} . Para el caso de Ψ , también solo se observaron diferencias estadísticas entre tierras con distinta aptitud de uso, pero al aplicar una intensidad de lluvia de 30 mm h^{-1} , siendo en este caso el valor medio de Ψ superior en aquellas con aptitud ganadera. Los estimadores de K_e tomados de la bibliografía, en general no resultaron adecuados para predecir el comportamiento de esta propiedad, aunque desde un punto de vista general, los valores publicados por Rawls *et al.* (1983) o los estimados a partir de la ecuación de Rawls & Brakensiek (1983), fueron similares a los promedios determinados en el presente trabajo.

La predicción de Ψ por fórmula no produjo coeficientes de eficiencia aceptables a partir de su uso en el modelo de infiltración GAML, por lo que sería recomendable su calibración con información de campo. A su vez, los valores calibrados de este parámetro siempre fueron mayores a los obtenidos por fórmula o a los publicados en la bibliografía. Dado que la ecuación de infiltración de Green Ampt es ampliamente utilizada en distintos modelos de escurrimiento y erosión, es importante seguir generando información para una correcta predicción de sus parámetros en distintos ambientes, usos de la tierra y a otras escalas que la utilizada en el presente trabajo

BIBLIOGRAFÍA

- Aoki, AM & R Sereno. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Agriscientia* XXIII (1):23-31.
- Bacigaluppo, S; G Gerster & F Salvagiotti. 2017. Ecorregión Pampeana, centro-sur de Santa Fe. Sistema productivo: agrícola continuo. En: Ediciones INTA. Manual de indicadores de calidad del suelo para las Ecorregiones de Argentina. Pp 259-266.
- Brakensiek, D L; R L Engleman & W J Rawls. 1981. Variation within texture classes of soil water parameters. *Trans Am Soc Agric Eng* 24(2): 335-339.
- Brooks, R H & A T Corey. 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Paper 3, Colorado State University, Ft. Collins, Colorado.
- Cabrera, FS; C Cholaky & A Becker. 2011. Propiedades hidrofísicas en un Hapludol típico de Córdoba en relación al pisoteo animal. *Ci. Suelo*. 29(2): 141-150.
- Castiglioni, MG; MJ Massobrio; CI Chagas; OJ Santanatoglia & A Buján. 2006. Infiltración del agua bajo labranza cero del suelo en una microcuenca agrícola de Argentina. *Terra Latinoamericana* 24(3): 423-430.
- Castiglioni, MG; FB Kraemer & JJ Marquez Molina. 2018. Conductividad hidráulica saturada determinada por distintos procedimientos en suelos con alta humedad inicial. *Ci. Suelo*. En prensa. 36 (2): 158-171
- Chagas, CI; FB Kraemer; S Utin; C Irurtia & OJ Santanatoglia. 2011. Influencia de las propiedades edáficas y la posición en el paisaje sobre la respuesta hidrológica de los suelos pertenecientes a una cuenca de la Pampa Ondulada. *Cuadernos del Curiham* 17:25-32.
- De la Vega, G; MG Castiglioni; MJ Massobrio; CI Chagas; OJ Santanatoglia; C Irurtia. 2004. Infiltración en un Argiudol vértico bajo siembra directa en condiciones variables de cobertura y humedad inicial. *Ci. Suelo* 22 (1): 52-55.
- De Roo, A P J & V G Jetten. 1999. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. *Catena* 37 (3-4): 477-493.
- del Barrio, RA. 1984. Infiltración de agua en suelos de la Región Pampeana. *Rev. Facultad de Agronomía*. 5 (3):183-191.
- Di Rienzo, J A; F Casanoves; M G Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & C W Robledo. 2017. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Di Rienzo, J; F Casanoves; L Gonzalez; E Tablada; M Díaz; C Robledo & M Balzarini. 2001. Estadística para las Ciencias Agropecuarias. 4ta Ed. Trunfar. Córdoba, Argentina.
- Elhakeem, M & A N Papanicolaou. 2012. Runoff Curve Number and Saturated Hydraulic Conductivity Estima-

- tion via Direct Rainfall Simulator Measurements. *J of Water Manag Model* R245-09: 141-155.
- Green, W H & G Ampt. 1911. Studies in soil physics. I: The flow of air and wáter through soils. *J Agr Sci* 4: 1-24.
- INTA. 1972. Cartas de Suelo de la República Argentina. Hoja 3360-32 Pergamino 106p
- Irurtia, C & R Mon. 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Publicación N° 176. SAGPyA, INTA. CIRN, Instituto de Suelos, Castelar. Argentina. 18 p.
- Kidwell, M R; M A Weltz & D P Guertin. 1997. Estimation of Green-Ampt effective hydraulic conductivity for rangelands. *J Range Manage* 50(3): 290-299.
- Kruskal, W H & W A Wallis. 1952. Use of ranks on one-criterion variance analysis. *J Am Stat Assoc* 47: 583-621.
- Landini, AM; D Martínez; H Días; E Soza; D Agnes & C Sainato. 2007. Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ci. Suelo* 25(2):123-131.
- Lane, L J & M Nearing (Editors). 1989. USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation. NSERL Report No. 2., National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Mao, L; Y Lia; W Haoa; X Zhouc; C Xua & T Leib. 2016. A new method to estimate soil water infiltration based on a modified Green-Ampt model. *Soil Till Res* 161: 31-37.
- Martínez, D; A Landini; E Soza; C Sainato & OS Heredia. 2011. Efecto del pisoteo animal sobre las propiedades de un suelo. Parte II: Infiltración y conductividad hidráulica saturada. *Agro-Ciencia, Rev. Chil. Cs. Agropec.* 27(1):15-27
- Mein, R G & C L Larson. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resour Res* 9 (2): 384-394.
- Nash, J E & J V Sutcliffe. 1970. River Flow Forecasting Through Conceptual Models, Part 1, A Discussion of Principles. *J Hydrol* 10:282-290.
- Nearing, M A; B Y Liu; L M Risse & X Zhang. 1996. Curve numbers and Green-Ampt effective hydraulic conductivities. *Water Resour Bull* 32(1):125-136.
- Nearing, M A; L Deer-Ascough & J M Lafflen. 1990. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Trans ASAE* 33(3): 839-849.
- Rawls, W J & D L Brakensiek. 1983. A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters. In *Proc. ASAE Conf. on Advances in Infiltration*, ASAE, St. Joseph, Michigan, pp. 102-112.
- Rawls, W J & D L Brakensiek. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel-Seytoux H J (eds) *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling*. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences), vol 275. Springer, Dordrecht
- Rawls, W J; D L Brakensiek & N Miller. 1983. Green Ampt infiltration parameters from soils data. *J Hidraul Div, Am Soc Civ Eng* 109(1):62-70.
- Rey Montoya, TS; FA Paredes; HC Dalurzo; C Fernández López & RM Kersting. 2017. Propiedades físicas de un Argiudol ácuico bajo diferentes sistemas de manejo. *Ci. Suelo*. 35(1):171-180.
- Risse, L M; B Y Liu & M A Nearing. 1995. Using curve numbers to determine baseline values of Green-Ampt effective hydraulic conductivities. *Water Resour Bull* 31(1): 147-158.
- Risse, L M; M A Nearing & M R Savabi. 1992. An evaluation of hydraulic conductivity prediction routines for WEPP using natural runoff plot data. *ASAE Paper No 92-2142*. St. Joseph, Mich: ASAE:
- Risse, L M; M A Nearing & M R Savabi. 1994. Determining the Green-Ampt effective hydraulic conductivity from rainfall-runoff data for the WEPP model. *Trans ASAE* 37(2):411-418.
- Saxton, K E & W J Rawls. 2006. Soil wáter characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci Soc Am J* 70: 1569-1578.
- Schaap, MG; FJ Leij & MT Van Genuchten. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions *J. Hydrol.* 251: 163 -176.
- Skaggs, R W & R Khaleel. 1982. Infiltration. Chapter 4. In: C.T. Haan, H.P. Johnson and D.L. Brakensiek (Ed). *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*. Monograph 5, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, pp 121-166.
- Tálamo, A; R Bemudez; L Garibaldi & A. Chavez. 2016. Erosión y escorrentía en respuesta a lluvias simuladas e incendios en bosques secos de montaña. *Cienc. Suelo*. 34(1):105-111.
- USDA-SCS. 1985. *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Van de Zweep, R A & JJ Stone. 1991. Evaluation of the WEPP hillslope profile hydrology componen ton a semi-arid rangeland watershed. *ASAE Paper NO 91-2552*. St. Joseph, Mich. ASAE.
- Van den Putte, A; G Govers; A Leys; C Langhans; W Clymans & J Diels. 2013. Estimating the parameters of the Green-Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better. *J Hydrol* 476: 332-344.

- Weber, J F & L Apestegui. 2013. Parámetros del modelo de infiltración de Green & Ampt en suelos de la ciudad de Córdoba, Argentina. Cuadernos del Curiham 19:87-103.
- Wischmeier, WH & DD Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. Agricultural handbook 537. United States Department of Agriculture. Washington. D.C.
- Wösten, JH & A Nemes. 2004. Pedotransfer functions for Europe. In Y. Pachepsky, Rawls W. J. (eds.). Developments In soil science. (30):431-435. Elsevier, Beltsville, Maryland, USA.
- Yu, B. 1999. A comparison of the Green-Ampt and a spatially variable infiltration model for natural storm events. Trans ASAE 42(1):89-97.