

# EFICIENCIA RELATIVA DE MODELOS DE INFILTRACIÓN: CASO CIUDAD DE CÓRDOBA (ARGENTINA)

**Juan Francisco Weber**

Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba,  
Universidad Tecnológica Nacional.

Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria, CP (X5016ZAA), Córdoba, Argentina.  
[jweber@civil.frc.utn.edu.ar](mailto:jweber@civil.frc.utn.edu.ar)

## **Resumen**

Se presenta una comparación en el desempeño de diversos modelos de infiltración en áreas permeables del ejido urbano de Córdoba (Argentina). Los modelos considerados fueron: Green & Ampt , Horton , Kostiakov , Lewis-Kostiakov (Mecenzev), Philip , CN-SCS. Los parámetros de dichos modelos fueron ajustados previamente a partir de 34 ensayos realizados con un microsimulador de lluvia portátil diseñado y construido en el Laboratorio de Hidráulica, UTN-Facultad Córdoba. Este equipo, que es completamente desarmable y define una parcela de ensayo de 1 m<sup>2</sup>, permite generar lluvias de intensidades comprendidas entre los 65 y 120 mm/h; el exceso de precipitación se mide a través de dos vasos totalizadores graduados, en forma manual. La selección de los sitios de ensayo respondió a dos condiciones: el tipo y el uso del suelo. A su vez, se consideraron distintas condiciones de humedad inicial. La campaña de medición se extendió durante siete meses e implicó el trabajo de tres personas en forma simultánea, realizando entre dos y tres ensayos por semana. Los procedimientos de ajuste de parámetros se adecuaron a cada método en particular. Se comparó la eficiencia de cada modelo en la reproducción de las series temporales de infiltración acumulada medida. Como estadísticos de comparación se consideraron: el coeficiente de determinación R<sup>2</sup>, el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, el sesgo porcentual, y la media y desvío estándar de los valores absolutos de los residuos. Ponderando estos indicadores, se concluye que en el ámbito de estudio, el modelo de mejor desempeño es el de Horton, mientras que el de peor desempeño es el del CN-SCS.

**Palabras Clave.** infiltración, simulador de lluvia, hidrología urbana

## INTRODUCCIÓN

En trabajos ingenieriles vinculados al diseño y cálculo de obras de desagüe pluvial urbano, el proyectista se ve en la obligación, a la hora de cuantificar los caudales de aporte, a considerar dos tipos de superficies en las cuencas: las impermeables y las permeables. Las primeras, sin duda provocan un alto impacto en el volumen de crecidas y una disminución del tiempo de respuesta de la cuenca. En cuanto a las segundas, se han impuesto en la práctica un conjunto de modelos de uso generalizado a la hora de cuantificar la fracción de la precipitación de escurrimiento directo, y por tanto, la fracción infiltrada; estos modelos, de carácter conceptual (Ravi & Williams, 1998), intentan simplificar el abordaje riguroso del problema, representado por la ecuación de Richards (Chow et al., 1994), y por tanto son los utilizados más ampliamente en la práctica hidrológica.

Una de las principales dificultades que encuentra el modelador a la hora de aplicar estos modelos de infiltración es la de estimar los parámetros de los mismos, tratando de lograr una adecuada representación de la realidad. Lamentablemente, existen grandes dificultades a la hora de disponer de datos medidos de infiltración en áreas permeables urbanas en la República Argentina. En la ciudad de Córdoba, por ejemplo, recién se encara una tarea sistemática de producción de información experimental al respecto a partir del trabajo de Weber et al (2005), desde el Laboratorio de Hidráulica (LH-UTN), dependiente del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional a través una campaña de obtención de datos experimentales de infiltración en suelos de la ciudad de Córdoba, a través de la técnica del infiltrómetro de doble anillo. Este procedimiento de ensayo permite obtener mediciones directas de infiltración en áreas reducidas (puntuales). Son conocidas las severas limitaciones que presentan las mediciones así determinadas, fundamentalmente en relación a la falta de representatividad del proceso lluvioso en la técnica de ensayo, por un lado, y a la fuerte alteración de la superficie del terreno debido al hincado de los anillos; estas limitaciones conllevan a errores experimentales difíciles de cuantificar.

Con el objetivo de obtener una caracterización experimental más verosímil del proceso hidrológico de la infiltración, se propuso utilizar como instrumento de ensayo un simulador de lluvia portátil desarrollado en el LH-UTN; se visualizan como beneficios inmediatos: la mejor simulación del proceso lluvia – infiltración, y la menor alteración de la parcela de ensayo, es decir, se intenta subsanar las limitaciones del procedimiento del infiltrómetro de doble anillo anteriormente utilizado.

## EL SIMULADOR DE LLUVIA

Se describen a continuación las características generales del equipo utilizado en el desarrollo de la presente campaña de medición (Weber et al, 2010).

### **Introducción**

Los simuladores de lluvia son instrumentos de investigación diseñados para aplicar agua de forma similar a los episodios tormentosos naturales. Son útiles para obtener datos de erosión, infiltración, escorrentía superficial y transporte de sedimentos. No obstante, las características de la lluvia natural deben ser simuladas de forma adecuada, los datos obtenidos deben ser analizados cuidadosamente y se debe efectuar una buena interpretación de los resultados para obtener información fiable en las condiciones para las que ha sido aplicable la lluvia (Benito et al., 2001).

## **Antecedentes**

Uno de los antecedentes de mayor peso en el diseño del simulador de lluvia fue el precedente local de un instrumento diseñado por Iurtia y Mon (1994); a partir de un modelo de Kamphorst (1987). Este microsimulador de lluvia fue luego modificado por Aoki y Sereno (1999), y se encuentra actualmente en uso en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Córdoba.

## **Formadores de gotas**

El formador utilizado se compone de una aguja hipodérmica introducida en tubo rígido, el cual se obtiene de cortar su propio estuche, al ras de dicha aguja. Los formadores ensayados correspondieron a un mismo diámetro de la aguja, 0,8 mm, y tres longitudes diferentes, 25,4 mm, 38,1 mm, 50,8 mm, las que corresponden a 1, 1 ½ y 2 pulgadas respectivamente.

Se realizó una serie de mediciones de laboratorio para determinar el comportamiento hidráulico de estos formadores. En base a esta información se decidió colocar un total de 289 formadores, distribuidos en 17 filas por 17 columnas, y separados a una distancia de 5,30 cm entre ejes, cubriendo de esta manera cada formador, un área aproximada de 28,10 cm<sup>2</sup> sobre la base de una batea de 96 cm x 96 cm de lado. El tipo de formador seleccionado fue el N° 3, correspondiente a la aguja de 2 pulgadas, ya que fue el que presentó las menores intensidades.

## **El simulador de lluvia**

El equipo (Figura 1) consta básicamente de una estructura metálica, de caño de acero de sección cuadrada, formando un prisma cuadrado de 2 m de altura y 1 m de lado. Este prisma se forma a través de cuatro columnas y cerrado por medio de cortinas rompevientos. Las columnas sostienen el sistema de alimentación de agua que esta compuesto por dos tanques; uno de alimentación, solamente y el otro de alimentación y regulación de intensidad.



**Figura 1. Simulador de lluvia en campaña**

La regulación de la intensidad se produce a través de un flotante (Achutegui et al., 1996). Debajo del sistema de alimentación de agua se encuentra la batea con los 289 formadores de gotas,

que producen la lluvia simulada. La base de este prisma esta constituida por un marco cuadrado de hierro, de 1 m de lado y 0,10 m de altura, con vertederos en sus cuatro lados y canales para el transporte del agua escurrida. Este marco de hierro, en su posición de trabajo es hincado en el suelo, constituyendo así las paredes límites de la parcela de medición. El peso total del equipo armado es de 110,60 kg; el peso del fluido puede llegar hasta los 100 kg.

### **Tareas de calibración**

Para la calibración se utilizaron cinco probetas graduadas de 1000 ml, con divisiones de 10 ml cada una. En su parte superior se les colocó un embudo de 32 cm de diámetro exterior y 31 cm de diámetro interior, funcionando el conjunto como un pluviómetro. Se midió el tiempo que tardó en llenarse un volumen fijo de 850 ml en cada pluviómetro para las diferentes cargas sobre formadores estudiadas. Estas fueron 11 cm, 13 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20cm, 22,5cm y 25cm.

Se verificó la normalidad de la distribución de las observaciones, estandarizando cada serie. Con los valores medios de intensidad obtenidos para cada carga, se ajustó una ecuación de regresión, que con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,997$  fue la (1).

$$i = 15,15h^{0,63} \quad (1)$$

En esta ecuación,  $i$  es la intensidad de lluvia producida (en mm/h) y  $h$  es la carga (en cm) sobre los formadores. Del análisis estadístico de los datos, se pudo concluir que los valores de intensidad obtenidos a partir de la ecuación (1) tienen una incertidumbre asociada de 3 mm/h, lo cual representa un error de entre el 3 y el 5 % de la intensidad producida.

## **TRABAJOS EXPERIMENTALES**

Se detallan a continuación las tareas de campaña y de laboratorio llevadas a cabo en el marco de la presente investigación. En primer lugar, se detallarán los criterios de planificación de tareas y selección de sitios de ensayo; posteriormente, se describirán las mediciones hidrológicas efectuadas, para finalmente describir los ensayos de suelos realizados (Weber et al, 2011).

### **Sitios de ensayo**

Al igual que en tareas previas (Weber et al, 2005), para la definición de los sitios de ensayo se consideró que las dos variables a priori más influyentes sobre los resultados a obtener eran el tipo de suelo y el uso del suelo. Con respecto al tipo, más que a una clasificación geotécnica se asumió que una clasificación de características regionales resultaría con mayor representatividad hidrológica. Para ello, se fijó como criterio la clasificación de ambientes geomorfológicos desarrollada por Quintana Salvat y Barbeito (1994). Este trabajo detectó básicamente dos ambientes diferenciados en el ejido de la ciudad de Córdoba: la planicie loessoide (correspondiente a un suelo del tipo limo arenoso, de gran cohesión en condiciones de baja humedad) y la terraza de inundación del antiguo cauce del río Suquía (Primero), la cual fue a su vez clasificada por los autores citados en tres subambientes: terraza baja, media y alta, según su cercanía al actual cauce del río que atraviesa la ciudad.

En cuanto al uso del suelo, se distinguió básicamente en tres tipos fundamentales: los patios

y jardines de viviendas residenciales (espacios verdes con bajo tránsito), las plazas, parques y paseos públicos (espacios verdes con medio tránsito), y finalmente las calles no pavimentadas (calles de tierra). El principal criterio de selección se basó en la intensidad del tránsito, tanto peatonal como vehicular, debido a su impacto directo en la capacidad del infiltración del suelo. Además, se agregó como punto de interés especial el lecho de una laguna de detención en la zona norte de la ciudad.

En la Figura 2 se muestra el Plano Geomorfológico de la ciudad de Córdoba, con la indicación de los sitios seleccionados (clasificados según el uso de suelo) y los diversos ambientes geomorfológicos descriptos (Weber et al., 2011). Puede observarse la amplitud geográfica de la región involucrada. La Tabla 1 muestra los sitios de ensayo seleccionados clasificados según el uso del suelo y el ambiente geomorfológico. Como puede verse, no fue posible conseguir terreno disponible para realizar el ensayo correspondiente a espacios verdes de bajo tránsito en la terraza media del río Suquía, debido a que este ambiente cubre un área relativamente pequeña y fuertemente urbanizada de la ciudad. En total se ensayaron 12 sitios a lo largo del ejido urbano de la ciudad.

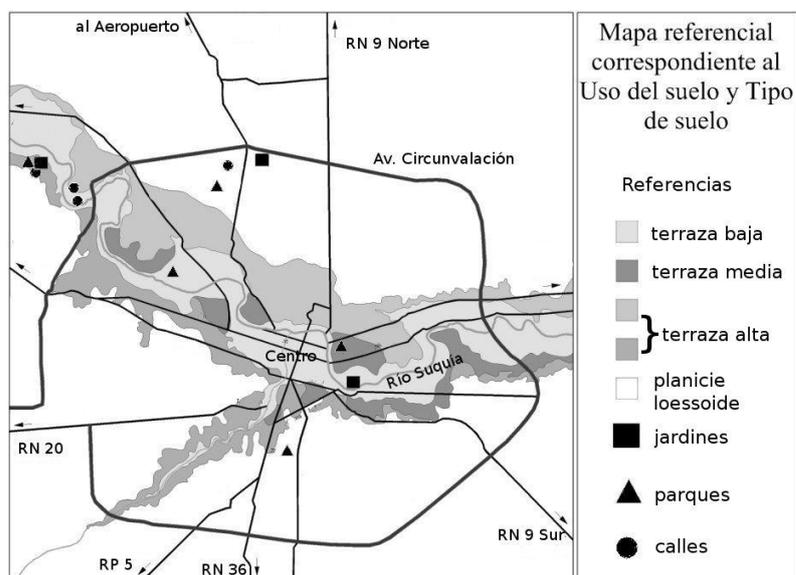


Figura 2. Ubicación de sitios de ensayo

Tabla 1. Sitios de ensayo

Tipo de suelo (ambiente geomorfológico)	Uso del suelo		
	Espacios verdes (bajo tránsito)	Espacios verdes (medio tránsito)	Calles no pavimentadas (alto tránsito)
Terraza alta	ITS Villada	ITS Villada	ITS Villada
Terraza media	-----	Parque General Paz	Justo Liebig 5940 – B° Villa Belgrano
Terraza baja	Torres de B° Junior	Parque de las Naciones	Carlos Gauss 4619 – B° Villa Belgrano
Planicie loessoide	L. Suárez de Figueroa – B° M. de Sobremonte	- parque UTN - Laguna de detención	Hugo Miatello 4600 – B° Poeta Lugones

### Ensayos efectuados

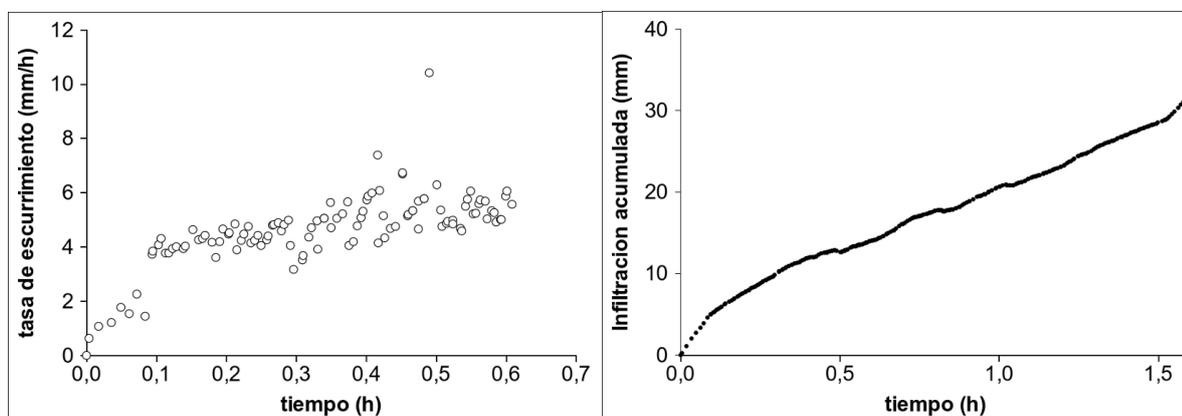
En cada uno de los sitios seleccionados se realizaron tres ensayos con el simulador de lluvia,

bajo intensidades relativamente constantes (del orden de los 70 mm/h) con diferentes condiciones iniciales de humedad, las cuales fueron obtenidas o bien por las condiciones climáticas imperantes o bien los terrenos fueron humedecidos (regados) previamente a partir de condiciones secas. Además, en la mayoría de los sitios se realizó simultáneamente el ensayo clásico de infiltración mediante el infiltrómetro de doble anillo, como control y contraste de las mediciones efectuadas. La campaña de medición se extendió durante siete meses e implicó el trabajo de tres personas en forma simultánea, realizando entre dos y tres ensayos por semana.

La duración de los ensayos fue variable, comprendida en general entre 1.5 y 2 h, dependiendo del comportamiento observado in situ del proceso de infiltración, en cuanto a la velocidad con que se alcanzó la condición de régimen. El número y frecuencia de las observaciones también fue dependiente de las condiciones locales encontradas, observándose una menor frecuencia de medición en el simulador (y por tanto, una mayor frecuencia en el infiltrómetro) en los suelos de mayor capacidad de infiltración. Para facilitar la tarea de medición, se seleccionó en cada caso el volumen de registro, el cual varió desde 50 hasta 500 cm<sup>3</sup>.

### **Procesamiento de la información**

Los datos así obtenidos fueron procesados utilizando la planilla de cálculo Microsoft Excel, que permitió no sólo la representación gráfica de la información recopilada, sino también las tareas de ajuste de parámetros que se describirán posteriormente. En la figura 3 se presentan, a modo de ejemplo, la tasa de escurrimiento superficial y la infiltración acumulada obtenidas para un ensayo en uno de los sitios en particular (L. Suárez de Figueroa – B° M. de Sobremonte) bajo una intensidad de lluvia de 66,6 mm/h.



**Figura 3. Tasa de escurrimiento superficial (izquierda) e infiltración acumulada (derecha) – 2° medición - Marqués de Sobremonte**

### **MODELOS DE INFILTRACION CONSIDERADOS**

Se consideraron seis modelos de infiltración comúnmente utilizados en la práctica hidrológica (Ravi & Williams, 1998): Horton, Kostiaikov, Mezencev, Green & Ampt, SCS, y Phillip, los que se describen sucintamente a continuación. En todos los casos,  $f(t)$  representa la tasa de infiltración (usualmente en mm/h) y  $F(t)$  la infiltración acumulada (en mm), relacionadas por:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{2}$$

### **Modelo de Horton**

Horton en 1940 propuso, en base a numerosas observaciones experimentales, las siguientes expresiones para estimar la tasa de infiltración y la infiltración acumulada:

$$f(t) = f_b + (f_0 - f_b)e^{-kt} \quad (3)$$

$$F(t) = f_b t + \frac{f_0 - f_b}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

que corresponde a un modelo de tres parámetros:  $f_b$ ,  $f_0$  y  $k$ , donde  $f_b$  es la tasa base de infiltración (capacidad mínima de infiltración),  $f_0$  es la tasa inicial de infiltración y  $k$  un parámetro de forma.

### **Modelo de Kostiakov**

Kostiakov, en 1932 propuso las siguientes ecuaciones para estimar la infiltración:

$$f(t) = at^{-b} \quad (5)$$

$$F(t) = \frac{a}{1-b} t^{1-b} \quad (6)$$

donde  $a$  y  $b$  son los parámetros del modelo. Es de notar que la ecuación (5) tiende a 0 cuando  $t$  tiende a infinito, por lo que el modelo no da buenos resultados para periodos extendidos.

### **Modelo de Mezencev**

Mezencev propuso las siguientes ecuaciones con el objeto de mejorar el comportamiento del modelo de Kostiakov, en especial para periodos largos:

$$f(t) = f_b + at^{-b} \quad (7)$$

$$F(t) = f_b t + \frac{a}{1-b} t^{1-b} \quad (8)$$

Se trata de un modelo de tres parámetros:  $a$ ,  $b$  y la tasa base de infiltración  $f_b$ .

### **Modelo de Green y Ampt**

Green y Ampt, en 1911, propusieron un modelo simplificado para explicar la infiltración, factible de presentar una solución analítica, basado en la hipótesis de la existencia de un frente abrupto entre la columna saturada y la no saturada del suelo. Aplicando las leyes de conservación de masa y de cantidad de movimiento, y combinándolas, se llega a la expresión para la infiltración acumulada:

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

donde  $K$  es la conductividad hidráulica (permeabilidad vertical) del suelo,  $\psi$  es la altura o potencial de succión mátrica o capilar del suelo,  $\Delta\theta$  es la variación máxima en el contenido de humedad del suelo (diferencia entre la porosidad y el contenido de humedad inicial). Por diferenciación, se obtiene la expresión para la tasa de infiltración:

$$f(t) = K \left( \frac{\psi \Delta\theta}{F} (t) + 1 \right) \quad (10)$$

Tanto la expresión (9) como la (10) representan formulaciones implícitas para las incógnitas  $F$  y  $f$ , por lo que deben ser resueltas iterativamente.

### **Modelo del SCS**

El Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (SCS-USDA) desarrolló en 1957 una relación entre precipitación y escorrentía basado en datos diarios:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (11)$$

donde  $P$  es la precipitación total,  $P_e$  es el escurrimiento superficial,  $I_a$  son las abstracciones iniciales y  $S$  es la retención potencial máxima, función del contenido de humedad inicial; estos dos últimos son los parámetros del modelo. Para obtener la infiltración acumulada  $F$ , se plantea la ecuación de balance:

$$F = P - P_e \quad (12)$$

### **Modelo de Phillip**

Phillip presentó una solución simplificada a la ecuación de Richards, mediante el uso de la transformada de Botzmann, obteniendo una serie infinita de la cual conservó los dos primeros términos:

$$F(t) = St^{1/2} + Kt \quad (14)$$

donde  $K$  es la conductividad hidráulica ya descrita, y  $S$  es un factor denominado sortividad o adsorción (función del potencial de succión mátrica del suelo). Por diferenciación de la ecuación (16) se obtiene la tasa de infiltración:

$$f(t) = \frac{1}{2} St^{-1/2} + K \quad (15)$$

## **RESULTADOS**

En base a la información recopilada en campaña, se realizó el ajuste de los parámetros de los siete modelos descriptos, buscando la minimización de la función objetivo  $F.O.$  representada por la suma de las desviaciones cuadráticas entre los  $n$  valores de infiltración acumulada observados ( $F_i$ ) y

calculados ( $F_i^c$ ), para cada sitio de ensayo y cada condición inicial de humedad:

$$F.O. = \sum_{i=1}^n (F_i - F_i^c)^2 \quad (16)$$

El proceso se automatizó mediante el desarrollo de herramientas de optimización no lineal específicas para cada caso (por ej., ver Weber y Apestegui, 2013, 2014; Weber, 2014a, 2014b). De este modo se obtuvieron 34 juegos de parámetros para cada modelo. En la Figura 4 se muestra, a título de ejemplo, la infiltración acumulada medida junto con la estimada por los seis modelos mencionados, para una medición en particular.

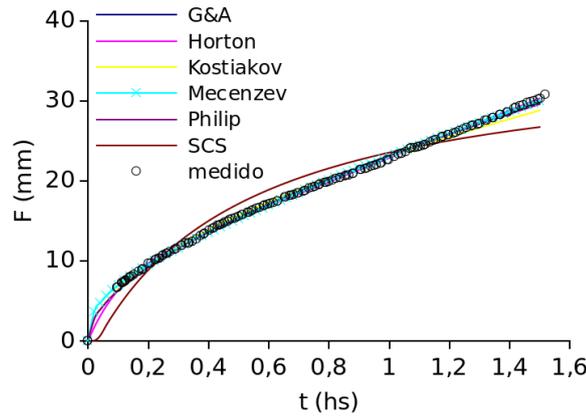


Figura 4. Infiltración medida y simulada – 1º medición calle Gauss

### Comparación de la eficiencia de los modelos ajustados

Se comparó la eficiencia de cada modelo en la reproducción de las series temporales de infiltración acumulada medida. Como estadísticos de comparación se consideraron: el coeficiente de determinación  $R^2$  (17), el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE (18), el sesgo porcentual PBIAS (19), y la media  $\mu(|\varepsilon|)$  (20) y desvío estándar  $\sigma(|\varepsilon|)$  (21) de los valores absolutos de los residuos.

$$R^2 = \frac{\sigma(F_i, F_i^c)}{\sigma(F_i) \cdot \sigma(F_i^c)} \quad (17)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (F_i - F_i^c)^2}{\sum (F_i - \bar{F})^2} \quad (18)$$

$$PBIAS = \frac{\sum (F_i - F_i^c)}{\sum (F_i)} \cdot 100 \quad (19)$$

$$\mu(|\varepsilon|) = \frac{\sum |F_i - F_i^c|}{N} \quad (20)$$

$$\sigma(|\varepsilon|) = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_i^c)^2}{N}} \quad (21)$$

En las Figuras 5 y 6 se presentan, para los 34 ensayos realizados, los valores de  $R^2$ , NSE, PBIAS y  $\mu(|\varepsilon|)$ , respectivamente. Puede verse que, para el coeficiente de determinación  $R^2$ , el desempeño del método CN-SCS es en todos los casos el peor; mientras que para los estadísticos NSE, PBIAS y  $\mu(|\varepsilon|)$  (y también para  $\sigma(|\varepsilon|)$ ) tanto este método como el modelo de Lewis-Kostiakov (Mecenzev) arrojan los peores resultados. Esto se puede ver resumido en la Tabla 2, donde se muestran los valores medios de estos parámetros según el modelo considerado. Para los cinco parámetros, el modelo de Horton es el que arrojó el mejor valor (el más alto o el más bajo, según el caso).

Con los valores de los parámetros estadísticos obtenidos, se estableció un puntaje arbitrario (ranking) entre 1 (el mejor valor para ese estadístico) y 6 (el peor valor) para cada uno de los 34 ensayos efectuados y para cada estadístico. En la Figura 7 se presenta el porcentaje de ensayos en los cuales cada uno de los modelos obtuvo el mejor desempeño, según cada uno de los estadísticos considerados. Puede apreciarse que tanto para  $R^2$ , NSE,  $\mu(|\varepsilon|)$  y  $\sigma(|\varepsilon|)$  el modelo de Horton presenta el mayor porcentaje de puntajes 1; mientras que para PBIAS se iguala al modelo de Philip. También puede verse que sólo en el caso de PBIAS (y para dos ensayos) SCS alcanza el primer puesto en el ranking.

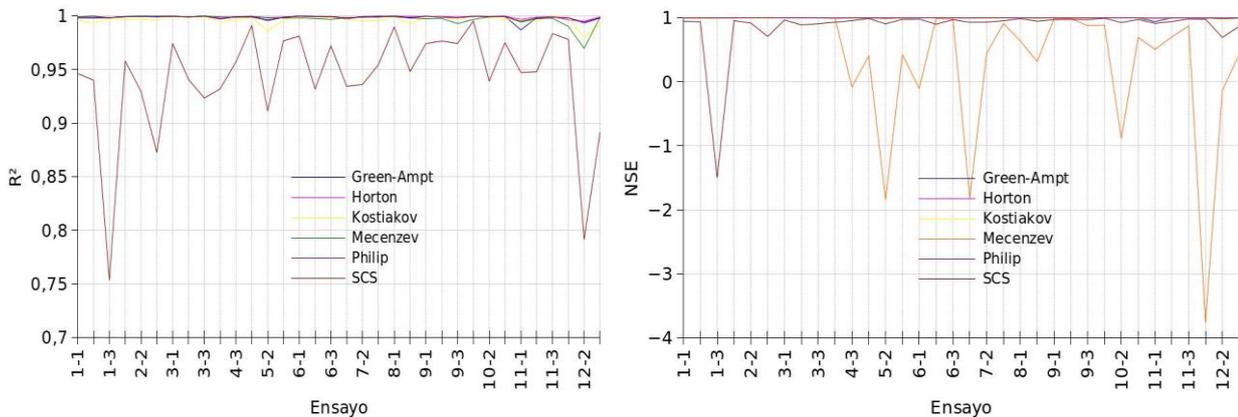


Figura 5. Valores de  $R^2$  (izquierda) y NSE (derecha) según ensayo.

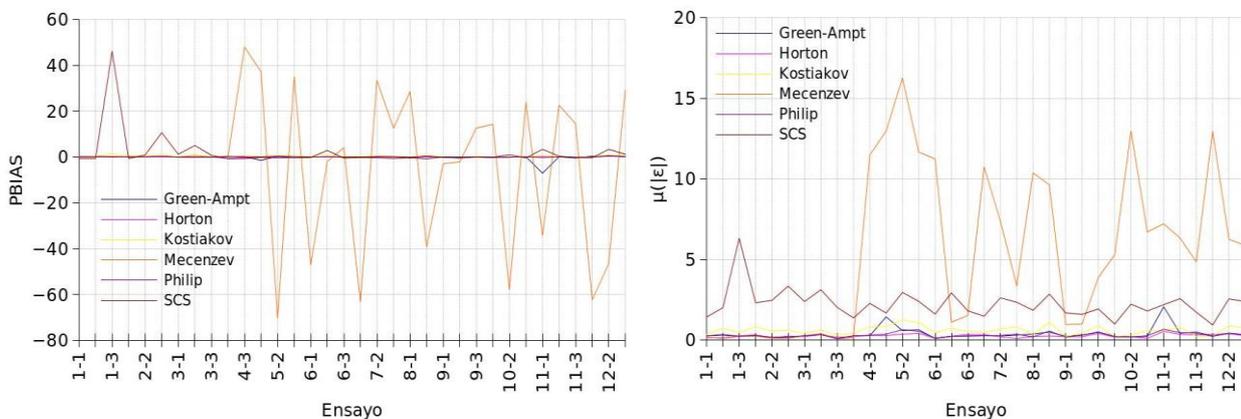
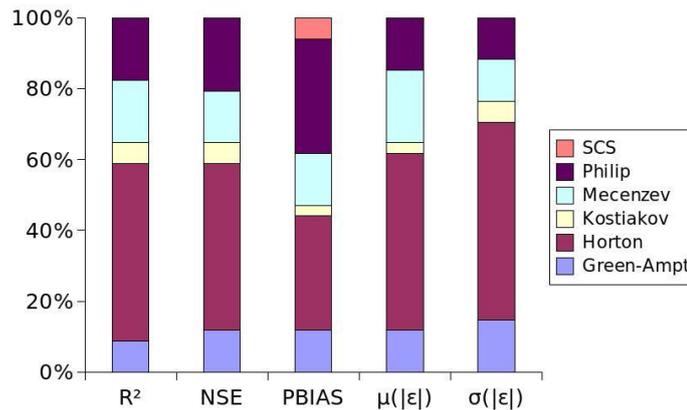


Figura 6. Valores de PBIAS (izquierda) y  $\mu(|\varepsilon|)$  (derecha) según ensayo.

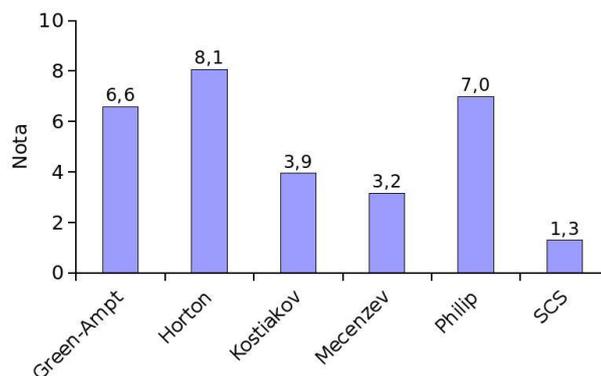
**Tabla 2. Valores medios de parámetros, según el modelo considerado**

Parámetros	Green-Ampt	Horton	Kostiakov	Mecenzev	Philip	SCS
R <sup>2</sup>	0,9984	0,9990	0,9962	0,9972	0,9986	0,9420
NSE	0,9968	0,9988	0,9942	0,3949	0,9985	0,8615
PBIAS	-0,2034	0,0351	0,4576	-3,2612	0,0814	2,0249
$\mu( \varepsilon )$	0,3803	0,2559	0,5997	5,4014	0,3112	2,2351
$\sigma( \varepsilon )$	0,2737	0,1811	0,4510	2,9809	0,2215	1,7234



**Figura 7. Porcentaje de casos donde cada modelo alcanza el primer puesto, según estadísticos**

Las posiciones obtenidas en el ranking así definido, para cada estadístico, fueron promediadas según cada modelo. De ese modo se obtuvo un conjunto de cinco calificaciones para cada modelo, las que a su vez fueron nuevamente promediadas para dar lugar a una única calificación cuyos límites teóricos son 1 (máxima calificación) y 6 (mínima calificación). Estos valores fueron escalados linealmente entre 0 y 10, e intentan representar una métrica única para juzgar el desempeño global de cada modelo; los resultados pueden verse en la Figura 8.



**Figura 8. Calificación global del desempeño de cada modelo, en escala de 0 a 10**

## CONCLUSIONES

A partir de la información recopilada in situ durante la campaña realizada en diversos sitios de la ciudad de Córdoba, ha sido posible ajustar los parámetros de distintos modelos de infiltración, junto con cinco estadísticos que brindan información acerca de distintos aspectos de la calidad del ajuste obtenido. Con el fin de establecer un criterio global de puntuación de su desempeño, se propuso un procedimiento heurístico de calificación que arrojó como resultado que el modelo de

Horton es el de mejor desempeño en el ámbito de estudio, seguido en orden decreciente por los modelos de Philip. Green-Ampt, Kostiaikov y Mecenzev. El método del CN-SCS en todos los casos ha arrojado los peores resultados.

## AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología (UTN) por el apoyo recibido a través del subsidio al Proyecto de Investigación código 25/E157. Al Laboratorio de Geotecnia – UTN-FRC. A la Dirección de Parques y Paseos, Municipalidad de Córdoba. A los becarios y colaboradores L. Apestegui, E. Baldazar, M. Bupo, E. Rondan, F. Cosiansi, E. Cobelas. O. Gribosqui, A. Guerrero, D. Apestegui, J. Apestegui, D. Ferrero, I. Paoli, F. Obregón, y al Instituto Técnico Salesiano Villada.

## BIBLIOGRAFÍA

- Achutegui A., Abreu X., Páez M.L.** (1996) "*Diseño y Evaluación de un Simulador de Lluvias Tipo Gotero con Efecto Vibratorio*". *Venezuelos* 4:24-28 .
- Aoki A.M. y Sereno R.** (1999) "*Modificaciones de un Microsimulador de Lluvia*". *Investigación Agrícola*, vol 19 N° 1 y 2, 47-51 .
- Chow, V. T.; D. R. Maidment y L. W. Mays** (1994) *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Horton, R. E.** (1939), "*Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity*", *Transactions American Geophysical Union*, Washington, p 693-711.
- Irurtia C.B., Mon R.** (1994) "*Microsimulador de Lluvia para Determinar Infiltración a Campo*". *Publicación N° 176*. Instituto de Suelos, Castelar, Buenos Aires, República Argentina. Pp. 18 .
- Kamphorst, A.** (1987) "*A Small Rainfall Simulator for the Determination of Soil Erodibility*". *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35, 407 – 415 .
- Quintana Salvat, F. y Barbeito, O.**, (1994) – "*Base geológica - geomorfológica para la planificación territorial de la ciudad de Córdoba y su entorno - Ejido Municipal*". *Fotointerpretación N° 1*, Vol. II, págs. 209-256. Córdoba, República Argentina.
- Ravi, V., Williams, J. R.** (1998). *Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models*. Volume I. Technical Report No. EPA/600/R-97/128a . United States Environmental Protection Agency , National Risk Management Research Laboratory , Ada, OK 74820 .
- Soil Conservation Service** (1972) *National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology*. U.S. Dept. of Agriculture, Washington.
- Weber, J. F., Apestegui, L., Baldazar, E.** (2011) *Medición de la capacidad de infiltración in situ de suelos de la ciudad de Córdoba mediante un microsimulador de lluvia portátil*. XXIII Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2011, Resistencia.
- Weber, J. F., Paoli, H. I., Apestegui, L.** (2010). "*Microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos*". *Tecnología y Ciencia*, Año 9, N° 18, pp. 47-53. ISSN 1666-6917. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.
- Weber, J. F., Urbano, J. M., Stuyck, E. E., Azelart, D., Martínez, N. B.** (2005) "*Caracterización de los parámetros del modelo de Infiltración de Horton en suelos de la ciudad de Córdoba*". *Cuadernos del Curiham*. ISSN 1514-2906. UNR Editora, Rosario. Vol. 11, No. 1, 29-38. .
- Weber, J. F., Apestegui, L.** 2013. "*Parámetros del modelo de infiltración de Green y Ampt en suelos de la ciudad de Córdoba, Argentina*". *Cuadernos del Curiham*. Vol. 19, pp. 87-103. ISSN 1514-2906. UNR Editora, Rosario.
- Weber, J. F., Apestegui, L.** 2014. "*Parámetros de los modelos de Kostiaikov y Lewis-Kostiaikov para áreas permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba*". 2º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fe, Argentina, del 23 al 26 de setiembre de 2014 .
- Weber, J. F.** 2014a. "*Parámetros del modelo de pérdidas CN-SCS para áreas permeables de la ciudad de Córdoba, Argentina*". V Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua - 12 al 14 de noviembre de 2014 – Córdoba, Argentina.
- Weber, J. F.** 2014b. "*Parámetros del modelo de infiltración de Horton obtenidos mediante el uso de un simulador de lluvia – Córdoba, Argentina*". *Revista Ambiente & Agua*, V. 9 No. 1, pp. 161-172, enero-marzo de 2014. DOI: 10.4136/1980-993X, ISSN: 1980-993X. Brasil,