

DESEMPEÑO DE UN NUEVO MICROSIMULADOR DE LLUVIA PARA ESTUDIOS HIDROLÓGICOS A CAMPO O EN LABORATORIO

Weber, Juan F¹ y Reyna, Santiago M.²

1. Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civi
Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional
Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria -
CP (X5016ZAA) - Córdoba - Argentina - Teléfonos: (54 - 351) - 468-4215 / 4006 / 4317 - int. 119-5 -
jweber@civil.frc.utn.edu.ar

2. Departamento de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exacta
Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
santiagoreyna@gmail.com

Resumen

Se presenta un nuevo microsimulador de lluvia portátil para mediciones de parámetros hidrológicos, de aplicación tanto *in situ* como en laboratorio. El aparato, que supone una mejora en relación al simulador de lluvia originalmente desarrollado en este Laboratorio, es completamente desarmable y define una parcela de ensayo de 0,25 m², y permite generar lluvias de intensidades comprendidas aproximadamente entre los 15 y 120 mm/h; el escurrimiento es recogido y medido digitalmente a través de una balanza electrónica. Si bien el equipo puede ser utilizado en mediciones en campo, el diseño original tiene en cuenta su utilización en laboratorio. Esto conlleva una serie de ventajas, entre ellas: condiciones ambientales controladas (temperatura, viento, etc.); accesibilidad a servicios (agua, electricidad, etc.); mejor operación de sistemas electrónicos de medición, entre otras. El proyecto contempla en líneas generales la cuantificación de la capacidad de infiltración en muestras de suelo en condiciones pre-incendio y post-incendio. Previo a la implementación sistemática de estos ensayos, es necesario definir una metodología que permita medir en forma confiable, y equiparable a la experimentación *in situ*, la capacidad de infiltración en muestras representativas de la capa superior del suelo. En este trabajo se describe la metodología experimental propuesta, consideraciones a tener en cuenta en el desarrollo del experimento y el procesamiento de la información, concluyendo que el equipo y metodología propuesta satisface los requerimientos fijados en el proyecto en marcha.

Palabras clave: simulador de lluvia; mediciones hidrológicas; infiltración

Abstract

A new portable rainfall simulator is presented for measurements of hydrological parameters, applicable both *in situ* and in the laboratory. The device, which is an improvement compared to the rainfall simulator originally developed in this laboratory, is completely disassembled and defines a test plot of 0.25 m², and can generate rainfall intensities between about 15 and 120 mm / h ; runoff is collected and digitally measured by an electronic balance. Although the equipment can be used in field measurements, the original design takes into account

laboratory use. This has a number of advantages, including: controlled environmental conditions (temperature, wind, etc.); accessibility to services (water, electricity, etc.); better operation of electronic measuring systems, among others. The project includes broadly quantifying infiltration capacity in soil samples in pre-fire and post-fire conditions. Prior to the systematic implementation of these tests, it is necessary to define a methodology to measure reliably, and comparable to experimentation in situ, infiltration capacity in representative samples of the topsoil. This paper presents the experimental methodology proposed, considerations to take into account in the development of the experiment and processing information is described, concluding that the equipment and methodology proposal fulfills the requirements set in the current project.

Keywords: Rainfall simulator; hydrologic measures; infiltration

INTRODUCCION

Los incendios en la cobertura vegetal son causados por el hombre o por la naturaleza. El fuego, si bien es un componente natural en algunos ecosistemas, puede considerarse como un factor de disturbio debido al fuerte impacto que ejerce sobre los componentes estructurales del sistema. Sus efectos se observan en distintos niveles, siendo las serranías y el pie de monte las áreas más susceptibles de ser afectadas por la erosión, cuando el suelo ha sufrido ese disturbio.

En la provincia de Córdoba por las características climáticas y régimen de precipitaciones, entre los meses de junio a setiembre se suceden numerosos incendios coincidiendo con la época de sequía de la zona (Figura 1). Estos incendios tienen diversos orígenes y se ven potenciados e influenciados por la presencia humana y sus condiciones naturales (baja humedad relativa, ocurrencia de heladas, vientos fuertes con orientación predominante norte-sur y abundancia de material combustible).



Figura 1.- Incendio forestal. Sierras de Córdoba (Fotografía F. Barri)

El impacto hidrológico de los incendios

Una consecuencia hidrológica obvia de los incendios es que éstos destruyen la cubierta vegetal, reducen la hojarasca acumulada o ambos a la vez con sus consiguientes efectos en la pérdida de la interceptación vegetal (Neary et al, 2005). Es uno de los mayores cambios producidos por los incendios en las respuestas hidrológicas de primeras tormentas de verano de corta duración y alta densidad después de la temporada de incendios.

Los efectos del fuego en las propiedades de los suelos deben ser evaluados teniendo en cuenta la compleja matriz orgánica e inorgánica constituyente de los mismos. La magnitud de los cambios que ocurren durante el fuego depende fuertemente de factores como nivel de severidad del fuego, la combustión y transferencia de calor, magnitud y altura del suelo que se quema, proximidad de cada estrato del suelo con la superficie del mismo y las temperaturas que se necesitan para que cada propiedad del suelo cambie.

Un efecto que suele presentarse ante la ocurrencia de incendios es la aparición del suelo hidrófobo. La creación de suelos con repelencia al agua implica procesos físicos y químicos. Es importante en la modificación de los aspectos físicos tales como la infiltración y el movimiento del agua en los suelos.

La propiedad de infiltración del suelo a menudo es alterada cuando el fuego destruye la vegetación y la hojarasca que cubren a una cuenca. Cuando la combustión ha sido lo suficientemente grave como para exponer al suelo desnudo, la infiltración puede ser

reducida. La disminución de la infiltración produce un aumento del flujo superficial y en consecuencia el aumento del caudal de descarga (Neary, 2011).

Otros procesos hidrológicos como la evapotranspiración, el almacenamiento subterráneo, el flujo base y la producción de sedimentos también se ven alterados por los incendios, pero su análisis escapa al alcance de este estudio.

OBJETIVOS

Como objetivo general de esta línea de investigación se plantea caracterizar el impacto de los incendios forestales en el proceso de infiltración en suelos de cuencas hídricas de Córdoba. Para ello, uno de los objetivos particulares de esta investigación requiere desarrollar e implementar una metodología para la medición experimental del impacto hidrológico de los incendios.

En base a la experiencia desarrollada por este grupo de trabajo (Weber et al, 2011), se ha observado la conveniencia de llevar a cabo los experimentos correspondientes en el ámbito del Laboratorio; esto conlleva una serie de ventajas, entre ellas: condiciones ambientales controladas (temperatura, viento, etc.); accesibilidad a servicios (agua, electricidad, etc.); mejor operación de sistemas electrónicos de medición, entre otras.

Bajo esta premisa, se establece como objetivo de este trabajo, definir una metodología que permita medir en forma confiable, y equiparable a la experimentación in situ, la capacidad de infiltración en muestras representativas de la capa superior del suelo, ensayadas en el ámbito del Laboratorio; y realizar una experiencia piloto en suelos bien caracterizados hidrológicamente en forma previa por este grupo de trabajo, con el fin de validar esta metodología.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se describe el principal equipo experimental utilizado en este trabajo, el simulador de lluvia, el arreglo experimental que incluye a este equipo, y la metodología propuesta para la medición en laboratorio de la capacidad de infiltración de muestras de suelo.

El simulador de lluvia

Descripción general de los simuladores de lluvia: En el ámbito del Laboratorio de Hidráulica, UTN-FRC, se han llevado a cabo numerosas mediciones a través del dispositivo conocido como infiltrómetro de doble anillo (Weber et al., 2005). Este ensayo tiene la ventaja de ser de fácil implementación, pero presenta tres limitaciones importantes, a saber: 1°, el ensayo es de carácter puntual, esto es, el área involucrada es muy pequeña y por lo tanto los errores en la extrapolación a superficies del orden de magnitud de una cuenca son muy importantes; 2°, el ensayo está limitado a la condición de encharcamiento superficial permanente, lo cual limita la aplicabilidad de los parámetros a calibrar; y 3°, el dispositivo no representa fielmente la entrada hidrológica del sistema, esto es, la precipitación, dado que lo que se hace es mantener una lámina de agua constante en la superficie del suelo.

El micro simulador de lluvia tiene la ventaja de reproducir con más fidelidad el fenómeno de la precipitación. Numerosos autores (Marelli, 1989) muestran la importancia del impacto de las gotas en la microcapa superior del suelo en el balance hídrico, además del efecto evidente sobre la erosión superficial. Por otra parte, en este tipo de dispositivos es posible simular una precipitación de intensidad variable en el tiempo, incluso una precipitación discontinua. La necesidad de reproducir bajo condiciones controladas los

efectos de la precipitación, y en especial el impacto de las gotas de lluvia sobre las propiedades físicas del suelo superficial, y las consecuencias que ello provoca en la infiltración, escorrentía y erosión, condujeron desde hace años al desarrollo de diferentes mecanismos e instrumentos que tratan de simular la lluvia natural (Pla Sentis, 1981; Rostagno y Garayzar, 1995). El mayor de estos problemas recae sobre la reproducción de gotas que se asemejen a las de una lluvia natural.

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: En el ámbito del Laboratorio de Hidráulica, UTN-FRC, se desarrolló un simulador de lluvia portátil con el objetivo de medir in situ la capacidad de infiltración de las áreas permeables del ejido de la ciudad de Córdoba (Weber et al., 2010).

El equipo (Figura 2) 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.

La regulación de la intensidad se produce a través de un flotante. 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. Este equipo, que mostró un adecuado desempeño en la campaña de medición de la capacidad de infiltración de los suelos de Córdoba llevada adelante (Weber et al, 2011) presenta una serie de limitaciones en relación a la línea de investigación propuesta, entre ellas se pueden citar:

- dado que al menos deberán realizarse dos mediciones de la capacidad de infiltración sobre el mismo lugar (antes y después del incendio provocado), es necesario que el simulador permanezca en el mismo sitio (para no alterar la parcela en estudio) y eso limitaría considerablemente los lugares posibles de ensayo, principalmente por cuestiones de seguridad (robos, vandalismo etc.).
- si bien este simulador fue diseñado para ser transportable, su traslado y operación requieren de al menos tres operarios, lo que también supone una restricción operativa a los fines antes decriptos.
- Por Ley provincial 8751/99 (Manejo del Fuego) queda prohibido el uso del fuego en el ámbito rural y/o forestal, y por tanto, también se impone una severa restricción para llevar a cabo el plan de investigación propuesto in situ.
- Condiciones ambientales como viento, elevadas temperaturas, lluvia, etc. pueden alterar tanto el ensayo como los resultados del mismo.

Por estas razones se decidió una modificación del simulador de lluvia que permita más adecuadamente la medición en laboratorio de la capacidad de infiltración.

Equipo propuesto: en base al antecedente del simulador de lluvia original antes descrito, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones a la hora de diseñar el simulador de lluvia a escala de laboratorio:

- disminuir el peso de la estructura para facilitar el armado, desarmado y transporte del simulador.
- mejorar el sistema de variación de la carga hidráulica para facilitar la generación de diferentes intensidades de lluvia simulada.
- facilitar el reemplazo de los formadores de gotas
- mejorar el sistema de suministro de agua
- poder realizar mediciones en laboratorio, para evitar alteraciones en el ensayo debido a los factores climatológicos que se pueden encontrar en campo.

Las partes que componen el simulador de lluvia (Figura 3) son:

- la estructura: construida con perfiles para estantería, formando un prisma de 2,0m de alto y 0,5m de lado
- el sistema de alimentación: está conformado por dos tanques, una bomba y un filtro de agua. Uno de los tanques se encuentra a nivel del piso y está conectado a la bomba. Ésta alimenta al segundo tanque que se encuentra en la parte superior de la estructura. Este tanque posee una entrada de alimentación y un orificio de descarga, el cual mantiene constante el nivel del agua. En todo el proceso el agua es filtrada para evitar obstrucciones en los formadores de gota.
- el sistema de lluvia: consta de una red realizada con conectores tipo "T" (utilizados en acuarios), unidos por trozos de manguera. Los formadores de gotas son agujas hipodérmicas que se introducen en los conectores. De esta forma se construyó una red con 169 formadores de gotas con agujas de 0,4mm de diámetro, fácilmente intercambiables. La malla formadora de gotas puede colocarse a diferentes alturas, permitiendo variar la carga, obteniendo diferentes intensidades de lluvia simulada
- el sistema de puesta en régimen: conformado por una bandeja interceptora que se coloca entre el sistema de lluvia y la muestra de suelo. Evitando que se altere el contenido de humedad durante la puesta en régimen.
- el sistema de medición de intensidad: se utiliza la bandeja interceptora. La misma posee una descarga que escurre a un vaso graduado.
- la muestra de suelo: la muestra es extraída en campo. Sus dimensiones son 50cm x 50cm x 20cm de alto. El contenedor lleva un geotextil en su fondo, que permite el paso del agua pero no del suelo. Los laterales del cajón están cubiertos por nylon para garantizar un avance vertical del flujo.
- el sistema de recolección del escurrimiento superficial: en uno de los lados de la muestra de suelo se coloca una bandeja de descarga, la misma direcciona el agua hacia el instrumento para medir el escurrimiento superficial.

Arreglo experimental

El arreglo experimental (Figura 3) consta de un simulador de lluvia de baja presión (A) -cuyos formadores de gotas son agujas hipodérmicas-, alimentado por un banco de bombeo (I), que descarga su precipitación simulada en un bloque de suelo indisturbado (E), el cual está confinado lateralmente para asegurar la unidimensionalidad del flujo. Este bloque prismático (o muestra) tiene unas dimensiones de aproximadamente 50 x 50 cm de base y 20 cm de altura, con una masa del orden de los 80 kg. La altura asegura una duración de al menos 1 hora del ensayo, de modo que el frente húmedo no alcance en ese

tiempo la base del prisma, con lo cual la percolación resulte poco significativa, y por tanto pueda asumirse que el comportamiento hidrológico de la muestra sea similar al que tendría in situ. El prisma está apoyado sobre un geotextil que permite el pasaje del agua de percolación pero evita la erosión del suelo.

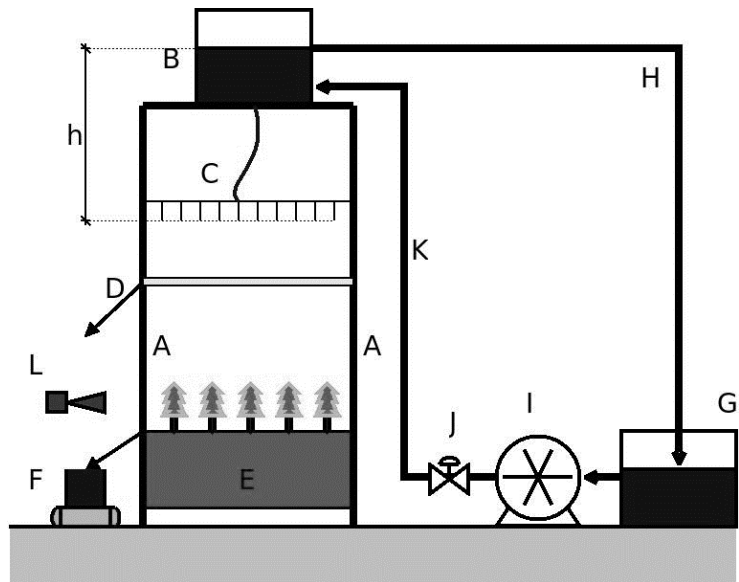


Figura 3. Nuevo simulador de lluvia (izquierda). Esquema del arreglo experimental (derecha)

El escurrimiento superficial generado se conduce a una canaleta colectora que descarga en un recipiente montado sobre una balanza electrónica que permite registrar la masa de agua acumulada a un intervalo de tiempo prefijado. Previo al inicio del ensayo se mide la intensidad de la lluvia recolectando la precipitación en una bandeja colectora (D) en forma volumétrica. Despreciando otros fenómenos, la infiltración acumulada se obtiene como diferencia entre la precipitación y el escurrimiento acumulados.

El equipamiento de medición utilizado incluye: dos balanzas electrónicas (de 6 kg x 1 g, y 4 kg x 0,1 g, respectivamente), con puerto de comunicaciones USB, para el registro del escurrimiento superficial y de la percolación; un sensor de humedad volumétrica de suelo, electrónico de tipo resistivo, también con comunicación USB; y una báscula electrónica de 300 kg x 100 g, que permite registrar el peso total de la muestra antes y después del ensayo, para obtener una estimación global del incremento de humedad en la misma (Figura 4).



Figura 4. equipamiento de medición utilizado: balanza con comunicación USB (izquierda); sensor de humedad volumétrica de suelo (centro); báscula electrónica 300 kg x 100 g (derecha)

Metodología experimental

La metodología propuesta puede resumirse en los siguientes pasos:

- Selección y extracción de la muestra: se selecciona el sitio de extracción de la muestra de suelo atendiendo a su representatividad y evitando la presencia de perturbaciones significativas (como raíces de gran tamaño, hormigueros, rocas de cierto volumen, etc.). La extracción se realiza excavando una trinchera en la periferia del bloque, sin perturbarlo, y cortando con una sierra la base del mismo; para su manipulación se impermeabilizan los laterales con parafina fundida, y se protege con film plástico. También se extraen muestras de suelo en la cercanía para la determinación del contenido de humedad volumétrico.
- Pesaje e instrumentación de la muestra: se realiza el pesaje de la muestra (E) con la báscula, se miden sus lados, y se instala el sensor de humedad de suelo. Luego, se posiciona la muestra en el simulador de lluvia (A), colocando por debajo de la misma el geotextil, y dejando por debajo el espacio necesario para el montaje de la bandeja recolectora de la percolación y la balanza electrónica dispuesta para su medición. Se confina lateralmente la muestra, en la superficie, con chapa de cinc y se rellena la interfaz con suelo cemento, dejando un lado libre; sobre este lado se monta la bandeja colectora y se rellena la interfaz de contacto con sellador siliconado. En la descarga de la bandeja colectora se instala la otra balanza electrónica bajo un vaso recolector del escurrimiento superficial (F).
- Puesta en régimen del simulador de lluvia: se coloca la bandeja interceptora (D), que evitará que precipite sobre la muestra mientras el simulador de lluvia se pone en régimen, y además se utilizará para la medición de la intensidad de la lluvia generada. Se llena el tanque inferior (G), se pone en funcionamiento la bomba (I) y gradualmente se abre la válvula (J) lo cual permitirá que el nivel del agua suba en el tanque superior (B) y comience la alimentación a la parrilla de formadores de gotas (C), los cuales comenzarán a precipitar sobre la bandeja interceptora (D). Al alcanzar el agua en el tanque (B) el nivel del desborde (H), se establece el retorno, y se fija la posición de la válvula (J), logrando el sistema el estado estacionario.
- Medición de la intensidad de lluvia generada: un vez alcanzado el régimen, se mide en forma volumétrica el caudal escurrido por la bandeja interceptora (D); a partir del área de la misma, se establece la intensidad de la precipitación generada. Esto mismo se realiza al finalizar el ensayo, para verificar que esta intensidad se ha mantenido constante en el tiempo.
- Realización del ensayo: se extrae la bandeja interceptora (D) y al mismo tiempo se inicia la medición con las balanzas electrónicas, registrando las masas de agua escurrida superficialmente y percolada. Simultáneamente también se inicia el registro del sensor de humedad de suelo. El ensayo finaliza cuando se ha alcanzado un desarrollo franco de la percolación, lo que para los tipos de suelos loésicos ensayados, y la altura de la muestra considerada (22 cm) se alcanza entre los 60 y 90 minutos. Para finalizar, se instala nuevamente la bandeja interceptora (D) y se paran los instrumentos de registro.
- Mediciones finales: finalizado el ensayo, se registra nuevamente la intensidad de lluvia, y luego se extrae la muestra de suelo y se pesa nuevamente con la báscula, registrando el incremento de masa producto de la infiltración ocurrida.

RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados de un ensayo preliminar realizado según la metodología descrita, los parámetros de un modelo de infiltración ajustados a los datos experimentales obtenidos, y su comparación con los valores típicos para suelos de la misma zona.

Mediciones preliminares

Se realizó un ensayo preliminar para poner a punto la metodología con una muestra extraída en un suelo de tipo loésico. El sensor de humedad se instaló a la mitad de la altura del bloque (11 cm).

El ensayo preliminar se realizó el 21/8/15, con una carga hidráulica sobre los formadores de gotas de 89 cm, lo que dio lugar a una intensidad constante de lluvia de 51,5 mm/h. La duración del ensayo fue de 1 hora 22 minutos; hasta que se desarrolló en forma franca la percolación. Es de destacar que a los 10 minutos de iniciado el ensayo, se alcanza el encharcamiento en la muestra. La adquisición digital y automática de la información experimental dio lugar a 4984 registros de escurrimiento superficial (cada 1 segundo) y 49828 registros del contenido de humedad (cada 0,1 segundo). Esta información fue luego procesada y filtrada, para obtener la gráfica de la Figura 5.

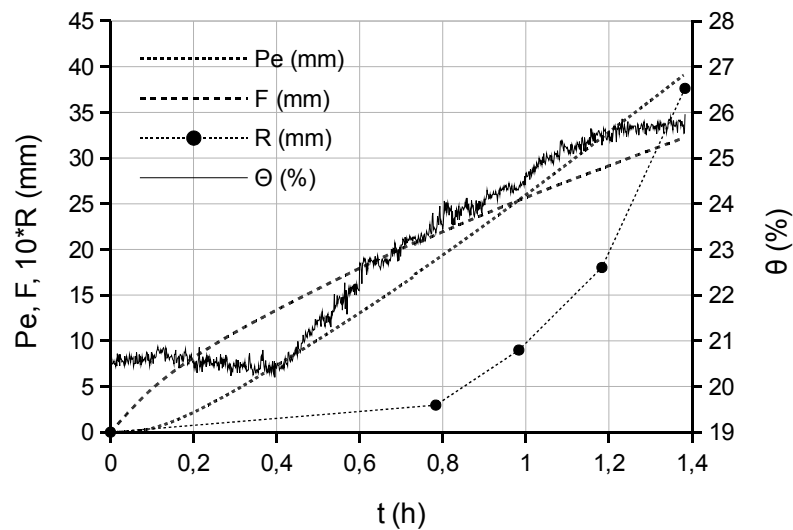


Figura 5.- Resultados experimentales: escurrimiento superficial (Pe), infiltración (F), percolación (R) y contenido de humedad (θ)

Ajuste del modelo de Horton

A los resultados de infiltración acumulada obtenidos, se ajustó el modelo de infiltración de Horton, que demostró ser el de mejor desempeño en el área en estudio (Weber, 2015). La infiltración acumulada en función del tiempo $F(t)$ viene dada por (Tucci, 1993):

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

donde f_0 es la tasa de infiltración inicial (en mm/h), f_b es la tasa de infiltración base (en mm/h) y k es un parámetro de forma o constante de decaimiento (en 1/h).

Los parámetros fueron estimados mediante un código ad-hoc que implementa el algoritmo de optimización de Nelder-Mead (Mathews y Fink, 2000). Este algoritmo es un método numérico para minimizar una función objetivo en un espacio multidimensional, que en este caso es la suma de los residuos cuadráticos entre las infiltraciones acumuladas medidas F_i y observadas F_i^c :

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

El método utiliza el concepto de un simplex: en este caso un tetraedro en un espacio tridimensional. El método busca de modo aproximado una solución óptima local a un problema con N variables (tres en este caso, f_0 , f_b y k) cuando la función a minimizar varía suavemente. Los resultados obtenidos ($f_0 = 50,33$ mm/h, $f_b = 17,57$ mm/h y $k = 4,02$ 1/h) son consistentes con los ajustes realizados en campañas de medición in situ previas en la misma zona (Weber, 2014), como puede observarse en la Figura 6.

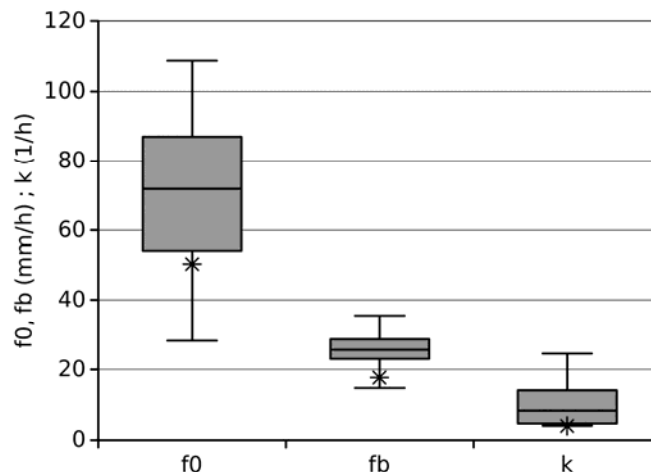


Figura 6.- Diagrama de cajas de los parámetros del modelo de Horton para suelos loésicos de la ciudad de Córdoba. El asterisco (*) representa los valores del ensayo preliminar

CONCLUSIONES

Ha sido posible diseñar e implementar un procedimiento experimental para la determinación en laboratorio de la capacidad de infiltración a partir de muestras representativas. La ejecución de un ensayo preliminar permitió ajustar los detalles y precauciones en el procedimiento.

Los valores ajustados del modelo de infiltración de Horton, acordes a los ya determinados en la zona en mediciones anteriores, muestran que el procedimiento en laboratorio es comparable en sus resultados a la experimentación in situ, si bien los mismos se ubican sistemáticamente en el primer cuartil de sus distribuciones. Esto puede estar relacionado a las condiciones iniciales de humedad, además de particularidades del sitio de extracción de la muestra.

Se considera que el procedimiento descrito podrá ser aplicado para los futuros

análisis de la alteración de la capacidad de infiltración producto de los incendios forestales. Para ello, aún resta la definición e implementación de una técnica que permita estimar la interceptación vegetal en la muestra.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional, por el financiamiento del Proyecto de Investigación y Desarrollo 25/E183 “Caracterización experimental y modelación numérica de los procesos de infiltración, interceptación vegetal e impacto por incendios en cuencas de Córdoba - Fase II” en el marco del cual se desarrolló el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Benito E., E. de Blas, J. L. Santiago y M. E. Varela** (2001). Descripción y Puesta a Punto de un Simulador de Lluvia de Campo para Estudios de Escorrentía Superficial y Erosión del Suelo. *Cuadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe* no 26.
- Marelli H. J.** (1989). *La Erosión Hídrica. Proyecto: Alternativas Mejoradas Conservacionistas de Producción Agrícola Ganadera en el Sur de Córdoba*. Publicación técnica N°1. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Marco Juárez, Córdoba, Argentina.
- Mathews, J. y K. Fink** (2000). *Métodos Numéricos con MATLAB*. Prentice-Hall, Madrid.
- Neary D. G.** (2011). Impacts of wildfire severity on hydraulic conductivity in forest, woodland, and grassland soils. In: Elango L, ed. *Hydraulic Conductivity - Issues, Determination and Application*. Rijeka, Croatia: INTECH; 2011, 123–142. ISBN 978-953-307-288-3, 434 p.
- Neary, D. G., K. C. Ryan, y L. F. DeBano** eds. (2005). (revised 2008). *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol.4. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 p.
- Pla Sentis, I.** (1981). Simuladores de Lluvia Para el Estudio de Relaciones Suelo Agua Bajo Agricultura de Secano en los Trópicos. *Rev. Fac. Agron.* 12 (1-2): 81-93. Maracay, Venezuela.
- Rostagno, C.M. y D. Garayzar** (1995). Diseño de un Simulador de Lluvia para Estudios de Infiltración y Erosión de Suelos. *Ciencia del Suelo*, 13, 41 – 43.
- Tucci, C. E. M. (Ed.)** (1993), *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre.
- Weber , J. F., L. Apestegui, y E. Baldazar.** (2011). Medición de la capacidad de infiltración in situ de suelos de la ciudad de Córdoba mediante un microsimulador de lluvia portátil. In *XXIII Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2011*, pages 235–254, Resistencia.
- Weber J., J. Urbano, E. Stuyck, D. Azelart y N. Martinez** (2005). Caracterización de los Parámetros del Modelo de Infiltración de Horton en Suelos de la Ciudad de Córdoba. *Cuadernos del Curiham*, vol 11 N° 1, 29-38.
- Weber, J. F.** (2014). Parámetros del modelo de infiltración de Horton obtenidos mediante el uso de un simulador de lluvia – Córdoba, Argentina. *Revista Ambiente & Água*, V. 9 No. 1, pp. 161-172, enero-marzo de 2014. DOI: 10.4136/1980-993X, ISSN: 1980-993X. Brasil, en línea (<http://www.ambi-agua.net/>).
- Weber, J. F.** (2015). Eficiencia relativa de modelos de infiltración: caso ciudad de Córdoba (Argentina). *XXV Congreso Nacional del Agua – CONAGUA2015 - 15 al 19 de junio de 2015 - Paraná, Entre Ríos*.
- Weber, J. F., H. I. Paoli y L. Apestegui** (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.