

ALTERACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE GREEN Y AMPT ANTE LA OCURRENCIA DE INCENDIOS EN SUELOS DE CÓRDOBA (ARGENTINA)

Juan Weber ^{(1)(*)}, Santiago Reyna⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Córdoba, Córdoba, Argentina.

⁽²⁾ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Córdoba, Argentina

^(*)e-mail: jweber@frc.utn.edu.ar

RESUMEN

En la provincia de Córdoba (Argentina), por sus características climáticas, se desarrollan frecuentemente incendios forestales en correspondencia con la estación seca. Hasta el momento no se han reportado mediciones sistemáticas del impacto de estos incendios en el comportamiento hidrológico de sus cuencas. Mediante el uso de simulador de lluvia portátil, y quemas controladas a temperaturas y duraciones representativas, se ha llevado a cabo una campaña de medición del impacto del fuego sobre la capacidad de infiltración en los suelos de Córdoba. Para ello, se han realizado mediciones en condiciones pre y post-incendio del escurrimiento superficial ante una lluvia simulada de intensidad conocida. Los resultados experimentales muestran una reducción de la capacidad de infiltración promedio del 32 % al finalizar los ensayos a consecuencia de la acción del fuego. A partir de estos resultados, se calibraron los parámetros del modelo de infiltración de Green y Ampt, analizando su alteración producto del fuego. La conductividad hidráulica presenta significativas reducciones, mientras que la carga de succión matricial se incrementa considerablemente. Se considera que los resultados obtenidos permitirán realizar evaluaciones cuantitativas del impacto de los incendios forestales en el ciclo hidrológico de las cuencas de la región serrana de Córdoba.

Palabras clave: Hidrología superficial, simulador de lluvia, incendios forestales, modelo de Green y Ampt

ABSTRACT

In the province of Córdoba (Argentina), due to its climatic characteristics, forest fires frequently develop in correspondence with the dry season. So far, there have been no systematic measurements of the impact of these fires on the hydrological behavior of their watersheds. Through the use of a portable rain simulator, and controlled burning at representative temperatures and durations, a campaign has been carried out to measure the impact of fire on the infiltration capacity in Córdoba soils. For this, measurements have been made in pre and post-fire conditions of surface runoff under a simulated rain of known intensity. The experimental results show a reduction of the average infiltration capacity of 32% at the end of the tests as a result of the fire action. From these results, the parameters of the infiltration model of Green and Ampt were calibrated, analyzing their alteration as a result of fire. The hydraulic conductivity presents significant reductions, while the suction head increases considerably. It is considered that the results obtained will allow quantitative assessments of the impact of forest fires in the hydrological cycle of the basins of the mountain region of Córdoba.

Keywords: Surface hydrology, rainfall simulator, wildfires, Green & Ampt model

INTRODUCCIÓN

La provincia de Córdoba se ubica en la región central de la República Argentina. En la provincia de Córdoba, por las características climáticas y régimen de precipitaciones, entre los meses de junio a septiembre 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).

Los incendios de campos siempre son preocupantes en una provincia proclive a este tipo de siniestros por las características de su clima, por las extensiones cubiertas por bosques autóctonos o implantados o por el difícil acceso en las zonas serranas. La susceptibilidad al fuego de las especies de la flora local, la acumulación de material vegetal muerto y las condiciones climáticas, favorecen en gran medida este fenómeno (Consigli, 1999).



Figura 1. Incendio forestal en la provincia de Córdoba.

El principal efecto del fuego es el que produce a través de la remoción de las plantas y la hojarasca. El impacto que ocasiona éste sobre una cuenca puede ser analizado considerando su perturbación sobre los procesos que intervienen dentro del ciclo hidrológico (DeBano et al., 1996). Se puede clasificar según la alteración que provoca dentro y fuera de los sitios afectados (Baker, 1990). En el primer grupo se encuentran: la disminución de la intercepción vegetal, alteración en la capacidad de infiltración y lixiviación, erosión y pérdidas por volatilización (Baker, 1990). Dentro del segundo grupo aparecen la modificación de los caudales y de

la calidad del agua. Entre los parámetros de calidad del agua más afectados por un incendio figuran las concentraciones de sedimentos aportados y la variación de nutrientes (Tiedemann, 1978; DeBano et al., 1996).

Los incendios y el calentamiento del suelo asociado pueden destruir la estructura del mismo, afectando tanto a la porosidad total como la distribución del tamaño de los poros en los horizontes superficiales de un suelo. La pérdida de macroporos superficiales reduce las tasas de infiltración y produce un aumento en la escorrentía. La alteración de la materia orgánica también puede conducir a una condición de suelo hidrofóbico que disminuye aún más las tasas de infiltración. El escenario que se produce durante la destrucción de la estructura del suelo por el fuego, y por tanto puede inducir una alteración de la capacidad de infiltración, es el siguiente:

- La estructura del suelo colapsa y aumenta la densidad del mismo ya que la materia orgánica que servía como un agente de unión ha sido destruida.
- El colapso de la estructura reduce la porosidad del suelo (principalmente los macroporos).
- La superficie del suelo se encuentra más compactada por el efecto de las gotas de lluvia que caen sobre las partículas del suelo y su desplazamiento conjunto con el desplazamiento de las cenizas, que hacen que los poros de la superficie del suelo se sellen parcial o totalmente.
- Los residuos de cenizas y carbón obstruyen los poros del suelo.
- Por último la superficie del suelo impenetrable reduce las tasas de infiltración en el suelo, produciendo un aumento en la escorrentía y en la erosión de las laderas.

Los efectos del fuego sobre el ciclo hidrológico son determinados en gran medida por la gravedad del incendio. No es posible describir adecuadamente los posibles impactos del fuego en todas las situaciones imaginables (Neary et al., 2005).

La propiedad de infiltración del suelo a menudo es alterada cuando el fuego destruye la vegetación y la hojarasca que cubren a una cuenca, según los mecanismos anteriormente indicados.

La disminución de la infiltración produce un aumento del flujo superficial y en consecuencia el aumento del caudal de descarga. Esto provoca un incremento de la erosión superficial que puede disparar procesos irreversibles de pérdida de suelo (Figura 2).



Figura 2. Pajonales de altura incendiados en las Sierras Grandes de Córdoba. Obsérvese la reducción de la cobertura vegetal, y la consecuente aparición de áreas de suelo expuesto, altamente erodible (fotografía del autor).

Se han reportado en la literatura mundial los efectos hidrológicos de los incendios forestales. Neary et al. (2005) realizan una presentación sistematizada del conocimiento en estos aspectos. En diversas regiones del planeta se han medido las respuestas hidrológicas de cuencas incendiadas. Doerr y Shakesby (2006) realizan una revisión crítica del estado del arte en el conocimiento del impacto hidrológico de los incendios forestales, concluyendo acerca de la necesidad de mejorar los modelos predictivos disponibles.

Existen numerosas observaciones, a lo largo de las áreas frecuentemente sometidas a incendios, del cambio en la respuesta hidrológica a nivel de cuenca. Bart y Hope (2010) presentan la variación en la respuesta hidrológica de cuencas en California, ante las situaciones pre y post incendio. El efecto de los incendios en la escorrentía superficial, independientemente del período de tiempo examinado, se encontró que era variable, dependiendo principalmente de las condiciones de humedad posteriores al incendio. No se evidenció ninguna relación entre el cambio en la escorrentía posterior al incendio y el tamaño de la cuenca o el área quemada. Sempere et al. (1994) muestran el

impacto hidrológico de los incendios analizando los cambios observados en una pequeña cuenca mediterránea francesa comparando 23 años de registros preincendio y 3 años postincendio. Concluyen que el volumen total de agua escurrida, a nivel anual y mensual, aumenta entre un 25% y un 30% el año posterior al incendio con respecto al que se hubiese producido de no mediar el efecto del fuego. Respecto de los caudales punta, los valores medidos en los tres años hidrológicos posteriores al incendio fueron en promedio 280% mayores de los esperados según las estimaciones obtenidas por un modelo de regresión ajustado a partir de los episodios anteriores al incendio. Candela et al. (2005) analizan el impacto a nivel de cuenca de un incendio, estudiando la alteración de la curva de frecuencia de caudales a posteriori del fuego. Mayor et al. (2007) presentan un análisis de la dinámica a mediano plazo de una cuenca incendiada en la región de Alicante, España, en conjunto con otra cuenca vecina no incendiada. Tanto el escurrimiento anual como la producción de sedimentos se incrementaron en la cuenca afectada, prolongándose dichos efectos por más de seis años. Martín y Lavabre (1997) estiman la contribución del escurrimiento superficial y su separación del hidrograma total en una cuenca de Francia, luego de un incendio forestal. Mediante el análisis de dos eventos, concluyen que se observan claras diferencias en el volumen de escorrentía, pero similitudes en la descarga máxima. Loáiciga et al. (2001) muestran las alteraciones sufridas en una cuenca del Chaparral en California del Sud, debido a 10 grandes incendios ocurridos a lo largo de 45 años. En base a los registros, concluyeron que los escurrimientos totales anuales se incrementaron entre un 20 % a un 30 % en los años posteriores a los incendios. López Alonso et al. (2004) presentan los efectos de un incendio forestal sobre la respuesta hidrológica de una cuenca mediterránea en España. Han detectado una mayor respuesta hidrológica para los episodios hasta seis meses después del incendio, tanto en volumen de escorrentía como en caudal máximo, siendo más acusado el incremento para los episodios de mayor magnitud. Moody y Martín (2001) muestran la relación entre intensidad de lluvia y caudal pico en tres cuencas montañosas del oeste de los Estados Unidos, luego de un gran incendio. Las escorrentías máximas de estas tres cuencas hidrográficas quemadas oscilaron entre 3.2 m³/s.km² y 50 m³/s.km². Los autores sugieren que

estos valores podrían proporcionar estimaciones iniciales de los límites de escorrentía que se pueden usar para predecir inundaciones después de incendios forestales en terrenos montañosos.

Algunos autores han analizado el impacto del fuego en la capacidad de infiltración. Moody et al. (2009) realizaron mediciones de infiltración, utilizando el infiltrómetro de doble anillo, de un suelo afectado por incendios, modelándolo como un sistema de dos capas, y reportando valores para los parámetros del modelo de Phillip. Robichaud (2000) analiza el efecto del fuego en las tasas de infiltración de cuencas boscosas en las Montañas Rocosas, observando reducciones de entre el 10 y el 40 %. Kinner y Moody (2010) realizaron experimentos utilizando un simulador de lluvia, analizando la variabilidad espacial de la capacidad de infiltración en un sistema de suelo de dos capas, sobre laderas incendiadas. Doerr et al. (2006) concluyen, a partir de la observación in situ y en laboratorio, que la clasificación corriente de severidad de incendios no es adecuada para predecir el impacto hidrológico del fuego. Los autores remarcan que los impactos hidrológicos asociados a los efectos de fuego son más complejos que, simplemente, el incremento de la escorrentía y la erosión del suelo a medida que aumenta la gravedad del fuego. Para incendios forestales lo suficientemente severos sobre suelo ya hidrófobo, un incendio más severo, en la cual se destruya la repelencia de la superficie del suelo, resultaría en una menor respuesta del escurrimiento en comparación con un incendio menos severo. Sin embargo, durante las tormentas lo suficientemente intensas como para saturar rápidamente la superficie humectable, esta capa puede eliminarse mediante el flujo subsuperficial y la infiltración, con implicaciones potencialmente graves para la fertilidad del suelo, la recuperación del ecosistema después del incendio y la sedimentación y la calidad del agua río abajo. Lane et al. (2006) analizaron el impacto de un gran incendio forestal en Australia que quemó dos cuencas experimentales y una cuenca instrumentada, reportando incrementos del escurrimiento entre el 40 % y el 94 %, e incrementos en la producción de sedimentos en factores de 8 ó 9. Llovet (2005) hizo un seguimiento de la dinámica de la infiltración y de las producciones de escorrentía superficial y sedimentos, así como de parámetros asociados, en zonas afectadas por el fuego de la región

mediterránea española. Reconoció sistemas vulnerables, tendientes a manifestar procesos de degradación posteriores a un incendio forestal y los factores críticos que los determinan. Para ello utilizó un simulador de lluvia portátil en cuatro experimentos, considerando diversas hipótesis sobre la dinámica de los procesos involucrados.

Más recientemente, se ha puesto atención en el rol que juega la capa de cenizas producida por el incendio forestal en la alteración de la respuesta hidrológica de las cuencas quemadas. Esta es un área en plena investigación con diversos grupos a nivel mundial trabajando en el tema. Nuevamente, se destaca el carácter local de los fenómenos observados. Balfour et al. (2014), en base a la observación de dos cuencas que sufrieron incendios de alta severidad en Montana, indican que la formación de costras superficiales debidas a la presencia de las cenizas tuvo una importancia fundamental en la alteración de la respuesta hidrológica de esas cuencas a corto plazo. Bodí et al. (2014) profundizan en la relación entre la composición química de la ceniza y sus efectos, entre otros sobre el ciclo hidrológico. En esta revisión del conocimiento que presentan, destacan la importancia que tiene la incorporación de parte de la ceniza en la capa superior de matriz de suelo, generando un sistema de dos capas. Concluyen que este sistema funciona de diferentes maneras en función de: la profundidad de la capa de cenizas y su tipo, en tipo de suelo, y las características de la precipitación. Jordán et al. (2016) focalizan en la importancia que tiene la humectabilidad de la capa de cenizas en las tasas de escurrimiento y erosiones post-fuego. Realizaron sus experimentos en la región del matorral mediterráneo en Sevilla (España). Observan que el desprendimiento de partículas de ceniza (asociado a la energía cinética de impacto de la gota) es más acentuado en cenizas hidrófobas, y que en este caso la tasa de escurrimiento post-fuego está en relación inversa con la profundidad de la capa de cenizas. Stoof et al. (2016) presentan resultados experimentales que contradicen la hipótesis habitualmente asumida de que las cenizas provocan una reducción en la capacidad de infiltración debido a su infiltración y posterior sellado de la capa superior del suelo. Si bien sus experimentos fueron realizados sobre arenas puras, son de atención las hipótesis alternativas que plantean estos autores, lo que muestra el límite actual del conocimiento en el tema.

A diferencia de otros lugares del mundo azotados

por esta misma problemática, entre los que se pueden citar California, España, Portugal, Australia, etc., a nivel local no se han reportado mediciones sistemáticas del impacto hidrológico de los incendios forestales.

Resulta de interés cuantificar cómo se altera el proceso de infiltración en suelos de Córdoba ante la ocurrencia del fuego, tanto en cuanto a la información experimental hasta ahora inexistente, como en relación a la modelación del mencionado proceso; y cómo esta alteración se manifiesta en un cambio en los parámetros de modelos hidrológicos de infiltración, en particular el ampliamente difundido e implementado modelo de Green y Ampt.

En relación a esto último, resulta necesario además cuantificar la fracción de lluvia detenida por la vegetación, es decir, la intercepción vegetal. No se conocen a la fecha resultados experimentales vinculados a este proceso hidrológico, para las especies típicas de la región serrana de la provincia de Córdoba. Por tanto, también es de interés cuantificar este proceso hidrológico poco conocido a nivel local.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es describir en qué medida el fuego puede afectar los parámetros del modelo de Green y Ampt en cuencas de la zona serrana de la provincia de Córdoba (Argentina). Como objetivos particulares, se pueden citar:

- Desarrollar e implementar una metodología para la medición experimental del impacto hidrológico de los incendios en suelos de Córdoba.
- Caracterizar experimentalmente el impacto hidrológico de los incendios en suelos de Córdoba, a través del uso de un microsimulador de lluvia.
- Describir el posible impacto del fuego sobre los parámetros del modelo hidrológico de infiltración de Green y Ampt en suelos de Córdoba.

MATERIALES Y MÉTODOS

La medición de la capacidad de infiltración se

determinó en forma indirecta a partir de la medición del escurrimiento superficial producto de una lluvia simulada de intensidad conocida. Para esto último se utilizó un simulador de lluvia portátil, denominado como Tipo B, que surgió de una modificación del simulador de lluvia original, también desarrollado en este Laboratorio (denominado Tipo A), con el que se realizó una amplia campaña de medición de la capacidad de infiltración de los suelos de Córdoba (Weber et al., 2011).

Cabe destacar que el simulador Tipo B ha sido exitosamente utilizado en laboratorio (Weber y Reyna, 2016), pero limitaciones operativas llevaron a evaluar su aplicación a campo, como aquí se describe.

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

- La estructura: construida con perfiles para estantería, formando un prisma de 2.0 m de alto y 0.5 m de lado.
- El sistema de alimentación: está conformado por dos tanques, una bomba y un filtro de agua.
- El sistema de lluvia: consta de una red realizada con conectores tipo "T", unidos por trozos de manguera. Los formadores de gotas son agujas hipodérmicas que se introducen en los conectores. 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.
- El sistema de recolección del escurrimiento superficial: sobre el lado excavado de la parcela de suelo se coloca una bandeja de descarga, la misma direcciona el agua hacia el instrumento para medir el escurrimiento superficial.

Las ventajas del ensayo en campo frente al ensayo en Laboratorio explorado anteriormente (Weber y Reyna, 2017) se pueden resumir en:

- Requiere muy poco esfuerzo físico.

- La cubierta vegetal del área seleccionada no se verá modificada por la falta de luz solar.
- Produce muy poca alteración en el suelo ensayado
- La preparación de la parcela para el ensayo se hace de manera rápida
- La cantidad de herramientas y elementos para el ensayo es menor que la utilizada en Laboratorio.



Figura 3. Simulador de lluvia Tipo B instalado en campo.

Aun así, el trabajo en campo conlleva algunas desventajas, entre las que se pueden citar:

- Las condiciones climáticas limitan la cantidad de días con la posibilidad de realizar ensayos.
- Se deben tomar las correspondientes precauciones para evitar la influencia del viento sobre el experimento (Figura 7).
- Hay un tiempo adicional en el traslado de herramientas y equipo hacia la zona.
- No es posible pesar el suelo ensayado (para realizar un balance de masas) ni obtener datos de percolación del mismo.
- Los servicios pueden no estar al alcance.

Arreglo experimental

El arreglo experimental (Figura 4) 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 sobre una parcela de 50 cm x 50 cm, la cual está confinada lateralmente para asegurar la unidimensionalidad del flujo.

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, la interceptación vegetal y el escurrimiento acumulados.

El equipamiento de medición utilizado incluye: una balanza electrónica (de 6 kg x 1 g de resolución), con puerto de comunicaciones USB, para el registro del escurrimiento superficial; un sensor de humedad volumétrica de suelo, electrónico de tipo resistivo, también con comunicación USB; y un termómetro infrarrojo (pirómetro) para la medición de la temperatura de quema.

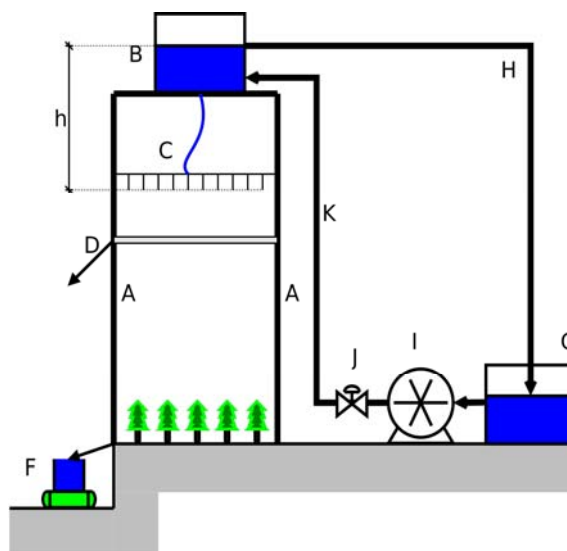


Figura 4. Arreglo experimental.

Para la cuantificación del impacto del fuego, se realizaron dos ensayos, denominados pre-incendio y post-incendio, sobre la misma parcela, bajo intensidades de lluvia similares, registrando la

variación en el escurrimiento observado.

Instalación, puesta a punto y uso del equipo en campaña

A tal fin, se desarrollan los siguientes pasos:

Excavación del pozo de medición e hincado de chapas laterales

La parcela de ensayo se materializa con el hincado de chapas de confinamiento las que se hincan en el suelo en forma vertical, alrededor de 10 cm de profundidad (Figura 5). Asimismo, en el lado libre se ubica la bandeja colectora del escurrimiento. Las juntas con las chapas se toman con suelo cemento y la junta con la bandeja colectora se toma con sellador siliconado, asegurándose que no se produzcan sobreelevaciones que entorpezcan el flujo hacia la bandeja. Sobre uno de los lados de la parcela es necesario realizar una excavación de aproximadamente 70 cm x 70 cm de 50 cm de profundidad para instalar la balanza que registrará el escurrimiento superficial y también para instalar el sensor de humedad, que se introducirá horizontalmente hasta el centro de la parcela. La cara expuesta del suelo a ensayar se cubre de un baño de parafina para su impermeabilización (Figura 6).



Figura 5. Excavación del pozo de medición e hincado de chapas laterales.

Instalación del simulador de lluvia y cierre con cortina cortavientos

A diferencia de los ensayos en Laboratorio, en los ensayos en campo, se debe tener en cuenta la acción perjudicial del viento (Figura 7). Para contrarrestarla, se le adicionó al simulador una mampara cortaviento consistente en una cortina plástica.



Figura 6. Instrumentación del ensayo y parafinado de la cara libre.

Puesta en régimen del simulador de lluvia

Se coloca la bandeja interceptora (D) (Figura 4), que evitará que precipite sobre la parcela 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 en el sistema el estado estacionario.

Medición de la intensidad de lluvia generada

Una 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 la balanza electrónica, registrando la masa de agua escurrida superficialmente. Simultáneamente también se inicia el registro del sensor de humedad de suelo. El ensayo finaliza cuando se ha alcanzado una tasa de escurrimiento relativamente constante, lo que para los tipos de suelos loésicos ensayados se alcanza entre los 60 y 90 minutos. Para finalizar, se instala

nuevamente la bandeja interceptora (D) y se paran los instrumentos de registro.



Figura 7. Simulador de lluvia con cortina cortavientos instalada.

Desmontaje de la estructura

Se desmonta la estructura del simulador de lluvia y se retiran los instrumentos de medición, dejando instaladas las chapas de confinamiento y preservando la parcela para el ensayo post-incendio.

Ensayo post-incendio

Luego de algunos días, los necesarios para alcanzar un estado de humedad inicial equivalente al del ensayo preincendio, se aplica una quema controlada mediante un lanzallamas (Figura 8), se deja enfriar la superficie de la parcela, se montan nuevamente la estructura del simulador y los instrumentos de medición, y se repite el proceso antes indicado.

Intercepción vegetal

La capacidad de intercepción vegetal fue cuantificada mediante el método de humectación artificial. En este método el espécimen a ensayar se pesa, y manteniéndolo sobre la balanza se humecta mediante un rociador, agregando agua hasta alcanzar el peso máximo posible. La diferencia de peso representa la capacidad de intercepción de ese espécimen, en g.

Para cada espécimen en estudio, se capturaron fotografías cenitales con dimensiones de referencia. Luego, mediante un programa de procesamiento digital de imágenes, se rectificó y escaló la imagen y se detectó la máscara correspondiente al área foliar (Figura 9) la que fue medida en función de la escala del píxel. Finalmente, el volumen de agua retenido por el follaje dividido el área foliar da como resultado la capacidad de intercepción como lámina (en mm).

El procedimiento se aplicó reiteradas veces a cada espécimen, para garantizar la repetibilidad de los resultados, previo secado del follaje.



Figura 8. Parcela quemada.

Caracterización edafológica

Se determinó el contenido de humedad gravimétrico por extracción de muestras in situ y secado en estufa. Se extrajeron muestras representativas para la determinación de: granulometría (por cribado e hidrometría), peso unitario, y ajuste de parámetros del sensor de humedad.

Caracterización experimental de la hidrofobicidad

Para la caracterización de la hidrofobicidad, se utilizó el método del tiempo de penetración de una gota de agua (Carter y Gregorich, 2008). Este método, de tipo cualitativo, como su nombre lo indica, consiste en medir el tiempo (WPDT) que tarda una gota en infiltrarse sobre la superficie del suelo.



Figura 9. Procesamiento digital de imágenes para la determinación del área foliar.

MODELO HIDROLÓGICO

Green y Ampt, en 1911, propusieron un modelo simplificado para explicar la infiltración, factible de presentar una solución analítica, basado en la suposición de la existencia de un frente abrupto (frente húmedo) entre la columna saturada y la no saturada del suelo (Ravi y Williams, 1998). Las hipótesis fundamentales del modelo son las siguientes (Tucci, 1993):

- El suelo está totalmente saturado desde la superficie hasta el frente húmedo; por debajo, el suelo continúa en las condiciones previas a la precipitación. A medida que el frente húmedo avanza en profundidad, estas condiciones permanecen válidas
- En la superficie del frente húmedo (que separa el suelo saturado del no saturado) la tensión capilar es siempre la misma, independiente de la posición y del tiempo.

Aplicando las leyes de conservación de masa y de cantidad de movimiento, y combinándolas, se llega a la expresión para la infiltración acumulada:

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

donde K es la conductividad hidráulica (permeabilidad vertical) del suelo, ψ 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:

$$f(t) = K \left[\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right] \quad (2)$$

Tanto la expresión (1) como la (2) representan formulaciones implícitas para las incógnitas F y f , por lo que deben ser resueltas iterativamente.

El modelo de Green y Ampt ha sido ampliamente implementado en diversos modelos hidrológicos computacionales, tanto agregados -entre ellos HEC-HMS, EPA-SWMM- como distribuidos, entre ellos T-REX (Velleux et al., 2008). Es uno de los pocos modelos de infiltración cuyos parámetros tienen una correspondencia directa con las propiedades físicas del suelo y, en teoría, podrían ser determinados directamente en laboratorio. Sin embargo, es habitual que los parámetros se ajusten también sobre mediciones de campo de infiltración tanto puntuales (como la que se describen en este trabajo) como a nivel de cuenca (obteniéndose en este caso valores medios areales de dichos parámetros).

En la Tabla 1 se presentan valores de referencia de los parámetros del modelo de Green y Ampt (adaptada de Chow et al., 1994) para algunos tipos de suelo, en donde los valores entre paréntesis corresponden al intervalo centrado en la media (valor indicado) y con radio igual a un desvío estándar.

Green y Ampt (1911) derivaron la primera ecuación de base física que describe la infiltración de agua en un suelo. El modelo de Green y Ampt ha sido objeto de considerables desarrollos en física e hidrología del suelo aplicada debido a su simplicidad y

rendimiento satisfactorio para una gran variedad de problemas hidrológicos. Para muchos problemas hidrológicos, el uso de enfoques más sofisticados (por ejemplo, los modelos basados en la ecuación de Richards no lineal) es impracticable e ineficiente debido a que se requiere más información sobre los parámetros hidráulicos del suelo (por ejemplo, retención de agua y funciones de conductividad hidráulica). En estos métodos, generalmente se evalúa todo el perfil de humedad-presión del suelo, aunque la principal cantidad de interés es el flujo en uno o ambos de los límites. Por lo tanto, no es sorprendente que la ecuación de Green y Ampt haya sido el modelo de elección de la estimación de la infiltración en muchos modelos hidrológicos de base física. Además, el Servicio de Investigación Agrícola (ARS, por sus siglas en inglés) del USDA ha realizado un trabajo extensivo para desarrollar relaciones empíricas para obtener los parámetros del modelo de Green y Ampt (Brakensiek y Onstad, 1977, Rawls et al., 1982, Springer y Cundy, 1987), proporcionando así un ímpetu adicional para su inclusión en muchos modelos de cuencas hidrográficas (Ravi y Williams, 1998).

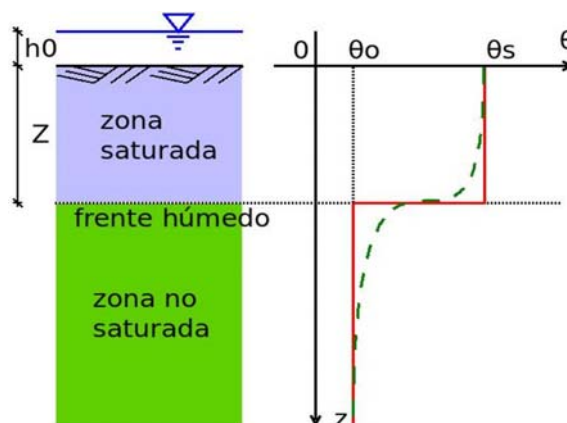


Figura 10. Esquema conceptual del modelo de Green y Ampt.

DESARROLLO

Se decidió trabajar en la zona ubicada al norte del ejido urbano de la ciudad de Alta Gracia, en la urbanización Villa Juana que a la fecha está aún en sus primeras etapas de obra y por lo tanto presenta la ventaja de mostrar las condiciones típicas de los campos ubicados al piedemonte de la vertiente oriental de las Sierras Chicas de Córdoba (Figuras 11 y 12).

Características generales de los ensayos

Se realizaron cinco ensayos dobles (pre y post-incendio), a distancias comprendidas entre 1.5 y 4.0 m, denominados ensayos 1 a 5, en un sector con una cobertura vegetal relativamente sana, y con servicios al alcance. Los ensayos se realizaron entre finales del año 2016 y mediados del año 2017.

Tabla 1. Parámetros del modelo de Green y Ampt (adaptada de Chow et al., 1994).

Tipo de suelo	η (adim.)	K (cm/h)	ψ (cm)
Arena	0.437 (0.374-0.500)	11.78	4.95 (0.97-25.36)
Marga	0.463 (0.375-0.551)	0.34	8.89 (1.33-59.38)
Arcilla limosa	0.479 (0.425-0.533)	0.05	29.22 (6.13-139.4)
Arcilla	0.475 (0.427-0.523)	0.03	31.63 (6.39-156.5)

Green y Ampt asumieron un perfil de contenido de agua tipo pistón (Figura 10) con un frente húmedo bien definido. El perfil de tipo pistón supone que el suelo está saturado con un contenido de agua volumétrico θ_s (excepto por aire atrapado) hasta el frente húmedo. En el frente húmedo, el contenido de agua cae abruptamente a un valor antecedente de θ_0 , que es el contenido inicial de agua. La presión del agua en el frente húmedo se supone que es ψ_0 (negativo). Se supone que la presión del suelo en la superficie, ψ_s , es igual a la profundidad de encharcamiento.



Figura 11. Sitio de ensayo.

En cada sitio se realizaron los dos ensayos: preincendio y post-incendio, con el simulador de lluvia; se extrajeron tres muestras de suelo para la

determinación del contenido de humedad inicial w por el método de secado en estufa; y se realizó un ensayo de hidrofobicidad, bajo las mismas temperaturas de incendio que en el ensayo post-incendio. También se determinó la intensidad i de lluvia generada. En todos los casos se utilizaron en los formadores de gotas, agujas hipodérmicas de diámetro 0.8 mm. La Tabla 2 presenta algunas características generales de los ensayos realizados.



Figura 12. Ubicación del sitio de ensayo.

De acuerdo a la metodología indicada anteriormente, en los ensayos post-incendio se provocaron fuegos cuyas temperaturas medias sobre la superficie del suelo oscilaron entre 731 °C y 816 °C, con dispersiones relativamente bajas (desvíos estándar de hasta 15 °C). La Tabla 3 resume la información indicada según cada punto de ensayo.

La información adquirida en forma digital consistió en los registros de masa en la balanza electrónica (medición del escurrimiento superficial) y de la diferencia de potencial registrada por el sensor de humedad del suelo.

Mediciones en suelos

Se realizó una caracterización granulométrica de una muestra de suelo de 1000 g del sector de ensayos, tanto por análisis mecánico (tamizado) como hidrométrico, obteniéndose la curva de la Figura 13. Puede apreciarse que el d_{50} de la muestra es aproximadamente 0.3 mm, correspondiente a las arenas finas. A partir de cuatro muestras indisturbadas de masas comprendidas entre 461 g y 1095 g, se determinó el peso unitario, el que arrojó

valor de $1.50 \text{ kg/dm}^3 \pm 0.05 \text{ kg/dm}^3$ para un contenido de humedad (gravimétrica) de 8.1 %.

Tabla 2. Características generales de los ensayos.

Sitio	Ensayo	carga (cm)	i (mm/h)	Duración (hh:mm)	w (%)	Prof. sensor hum. (cm)
1	Pre-incendio	72	115	01:13	—	18
	Post-incendio	72	111.1	01:13	13.94	18
2	Pre-incendio	67	74.7	01:02	17.76	18
	Post-incendio	67	73.3	01:03	17.48	18
3	Pre-incendio	72	93.2	01:03	16.55	18
	Post-incendio	72	91.9	01:04	19.31	18
4	Pre-incendio	60	61.7	02:00	16.51	23
	Post-incendio	60	62.9	02:55	13.94	23
5	Pre-incendio	70	83.7	00:54	17.22	15
	Post-incendio	70	83.9	00:56	16.63	15

Tabla 3 Temperaturas medias, y su dispersión, en las quemas controladas.

Sitio	T (°C)	$\sigma(T)$ (°C)
1	740	15.2
2	767	10.0
3	816	12.2
4	731	14.1
5	753	12.0

Se encontró que las muestras consideradas arrojaron una proporción de 83.9 % de arenas, seguido de un 13.5 % de limos y sólo un 2.6 % de arcilla, correspondiendo entonces una clasificación textural como franco-arenoso.

Se determinó la curva de calibración del sensor de humedad a partir de los registros iniciales de este sensor instalado en campo y las humedades determinadas en base a las muestras extraídas al inicio del ensayo.

Hidrofobicidad

Se realizaron además dos ensayos de

hidrofobicidad (con fechas 10/5/17 y 24/5/17). Se procedió a cortar con tijera la vegetación y limpiar suavemente la superficie con un pincel, aplicando 16 gotas al área a quemar; las gotas infiltraron en un lapso de 1 a 2 segundos. Luego, se quemó la superficie a temperaturas de 810 °C y 730 °C respectivamente, esperando el posterior enfriado del suelo, para aplicar un número equivalente de gotas en la superficie quemada; obteniéndose tiempos de penetración de la gota de agua (WPDT) comprendidos entre 10 y 22 minutos, para las gotas más alejadas y más cercanas al punto de aplicación de la llama. En base a esto (Carter y Gregorich, 2008), se clasifica al suelo como *severamente hidrofóbico*.

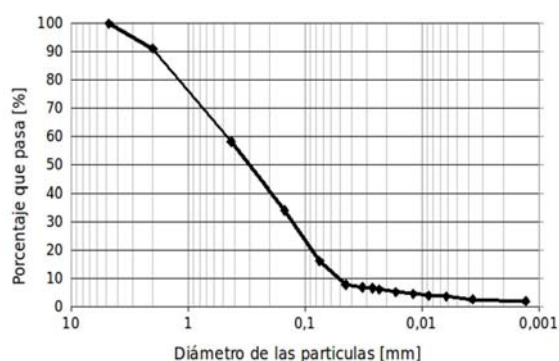


Figura 13. Curva granulométrica del suelo del sitio de ensayo.

Estimación de la interceptación vegetal

Para la estimación de la interceptación vegetal, se siguió el procedimiento descrito anteriormente. Para ello, se identificaron las especies presentes en las cinco parcelas de ensayo, según se indica en la Tabla 4. De cada especie, se extrajeron tres especímenes de talla similar a los presentes en las parcelas de ensayo. Se llevaron al Laboratorio y se implementó el método de humectación artificial previamente descrito, mediante cinco repeticiones en cada espécimen: pesado previo, rociado hasta la saturación, pesado posterior, secado del follaje. Esto dio lugar a cinco observaciones de la masa retenida (en g) por cada espécimen.

Para cada espécimen se determinó el área foliar por el procedimiento de edición digital de imágenes descripto. Se obtuvieron fotografías cenitales de cada espécimen, con un fondo que realzara el contraste y permitiera escalar la imagen; ésta se rectificó y se procesó para obtener el área foliar. A

partir de la masa en g (o el volumen en cm³) de agua retenida y del área foliar, se obtuvo la lámina interceptada (en mm) por cada observación, por cada espécimen y por cada especie. En la Tabla 4 se presentan las capacidades de interceptación vegetal de las especies identificadas.

Tabla 4. Especies identificadas en las parcelas de ensayo y su capacidad de interceptación.

Identificador	Nombre Vulgar	Nombre científico	C (mm)
A	Cardo	<i>Carduus pycnocephalus</i>	0.139
B	Diente de León	<i>Taraxacum officinale</i>	0.206
C	Sunchillo	<i>Wedelia Glauca</i>	0.228
D	Pata de Perdiz	<i>Cynodon dactylon</i>	0.366
E	Pasto horqueta	<i>Paspalum notatum Flüggé</i>	0.349

Luego, a partir de la interpretación de fotografías cenitales tomadas en cada parcela de ensayo, se determinó el área de cobertura de cada una de las especies descriptas en la Tabla 4, y ponderando las capacidades de interceptación presentadas en la misma Tabla, se determinó la capacidad de interceptación C para cada sitio (en condiciones preincendio). En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos.

Ajuste del modelo hidrológico

En base a la información recopilada en campaña, se realizó el ajuste de los parámetros del modelo de Green y Ampt, 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:

$$F.O. = \sum_{i=1}^n (F_i - F_i^c)^2 \quad (3)$$

El proceso se automatizó mediante un código especialmente desarrollado en GNU Octave (Eaton et al., 2007) que permitió ajustar los parámetros óptimos del modelo de Green y Ampt a través del algoritmo de optimización multidimensional no restringida de Nelder-Mead.

Tabla 5. Capacidad de intercepción vegetal C de los ensayos pre-incendio.

Sitio	C (mm)
1	0.331
2	0.309
3	0.350
4	0.063
5	0.351

El método de Nelder-Mead (Mathews y Fink, 2004) es un algoritmo de optimización ampliamente utilizado. Es debido a Nelder y Mead (1965) y es un método numérico para minimizar una función objetivo en un espacio multidimensional. El método utiliza el concepto de un simplex, que es un polítopo de $N + 1$ vértices en N dimensiones: un segmento de línea en una línea, un triángulo en un plano, un tetraedro en un espacio tridimensional y así sucesivamente. El método busca de modo aproximado una solución óptima local a un problema con N variables cuando la función a minimizar varía suavemente.

Cabe destacar que para este procedimiento se asumió la hipótesis simplificada que el suelo sigue siendo homogéneo luego del incendio; esto es una simplificación, ya que en realidad existe evidencia que las propiedades hidrológicas luego del fuego se ven severamente alteradas en la capa superficial, reduciéndose el efecto del fuego en la profundidad; esto implicaría la definición de un modelo de dos capas, lo cual por un lado incrementaría su complejidad y su parametrización, y por el otro reduciría el uso práctico de los parámetros ajustados en virtud de la limitada implementación de los modelos de infiltración de dos capas en las herramientas computacionales de uso común en análisis hidrológico. Por ello, en esta primera aproximación al problema, se optó por asumir la homogeneidad del suelo en la condición post-incendio a los fines de la determinación de los parámetros de los modelos hidrológicos de uso común.

Además, corresponde indicar que los procedimientos de ajuste descritos debieron ser modificados incluyendo una componente aleatoria (Monte Carlo) a los fines de evitar que la función objetivo quedara atrapada en mínimos locales. Esto permitió obtener parámetros físicamente significativos y numéricamente consistentes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La información recolectada por los sensores (balanza electrónica y sensor de humedad) fue procesada para su posterior uso. Los registros de masa adquiridos por la balanza electrónica fueron concatenados (para obtener la masa acumulada), eliminando valores erróneos; luego, a partir de las intensidades indicadas en la Tabla 2 y las capacidades de intercepción vegetal de la Tabla 5 (sólo para los ensayos pre-incendio) se determinó la infiltración acumulada $F(t)$, la que se grafica en las Figuras 14 a 18 para cada sitio, comparando los resultados de los ensayos pre y post-incendio.

En los sitios ensayados, se ha observado una reducción máxima de la capacidad de infiltración promedio del 32 % (con valores comprendidos entre 12 % y 51 %) lo que se corresponde con lo reportado en la bibliografía en diversos sitios del mundo (Neary et al., 2005).

La capacidad de intercepción vegetal estimada arrojó un valor promedio de 0.28 mm, pequeño en relación a las láminas precipitada e infiltrada, pero que juega un papel importante en el retardo del inicio del escurrimiento observado.

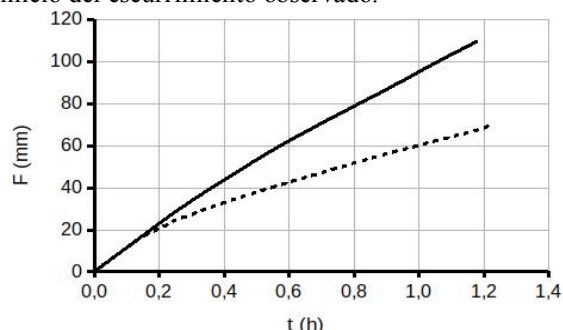


Figura 14. Curvas de infiltración acumulada en los ensayos pre-incendio (línea continua) y post-incendio (línea de trazos) – Sitio 1.

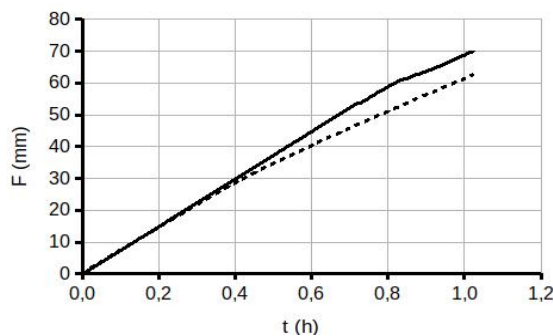


Figura 15. Curvas de infiltración acumulada en los ensayos pre-incendio (línea continua) y post-incendio (línea de trazos) – Sitio 2.

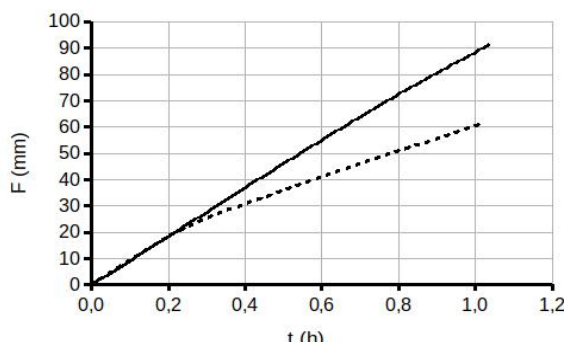


Figura 16. Curvas de infiltración acumulada en los ensayos pre-incendio (línea continua) y post-incendio (línea de trazos) – Sitio 3.

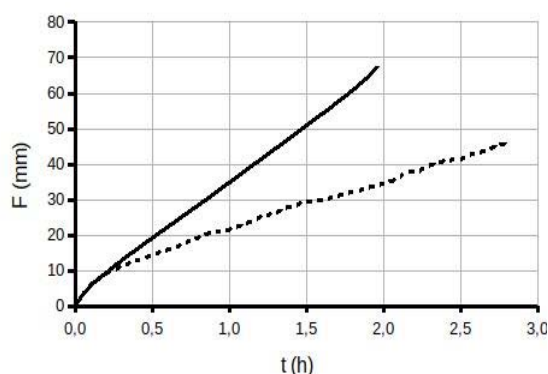


Figura 17. Curvas de infiltración acumulada en los ensayos pre-incendio (línea continua) y post-incendio (línea de trazos) – Sitio 4.

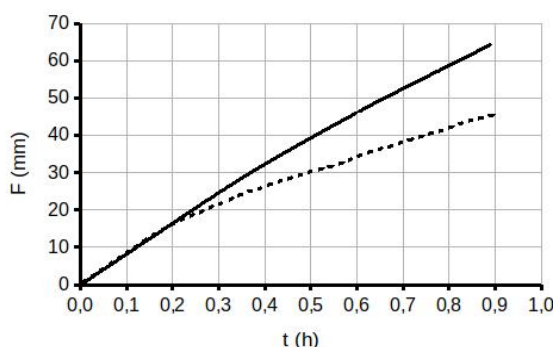


Figura 18. Curvas de infiltración acumulada en los ensayos pre-incendio (línea continua) y post-incendio (línea de trazos) – Sitio 5.

El incremento máximo observado por el sensor de humedad pasó de un valor medio de 2.2 % (pre-incendio) al 0.7 % (post-incendio), evidenciando el menor ingreso de agua al suelo por pérdida de la capacidad de infiltración.

Se calibraron los parámetros del modelo de Green y

Ampt a los 10 ensayos, según la metodología descrita. En la Tabla 6 se presentan los parámetros así ajustados, junto con el coeficiente de determinación, como una medida de la bondad del ajuste. En las Figura 19 a 21 se realiza una comparación gráfica de dichos parámetros, bajo condiciones pre y post-incendio.

Tabla 6. Parámetros calibrados del modelo de Green y Ampt para los ensayos pre-incendio y post-incendio, junto con el coeficiente de determinación del ajuste.

sitio	ensayo	K (mm/h)	$\Delta\theta$	ψ (mm)	R ²
1	pre-incendio	83.45	0.191	19.56	0.9983
	post-incendio	33.22	0.191	98.91	0.9972
2	pre-incendio	68.91	0.134	4.07	0.9973
	post-incendio	56.02	0.138	13.41	0.9975
3	pre-incendio	88.43	0.152	1.21	0.9995
	post-incendio	44.01	0.111	70.51	0.9966
4	pre-incendio	30.90	0.153	7.82	0.9996
	post-incendio	9.15	0.191	68.01	0.9981
5	pre-incendio	68.81	0.142	7.35	0.9979
	post-incendio	33.45	0.151	58.68	0.9954

Los parámetros del modelo de Green y Ampt han sufrido alteraciones diferenciadas por causa del fuego (Figuras 19 a 21). La conductividad hidráulica K ha sufrido reducciones, variables entre un 19 % y un 70 % (con una media del 50 %); el déficit inicial de humedad $\Delta\theta$ no presenta un comportamiento definido con la acción del fuego, mientras que la carga de succión ψ sufre incrementos notables, de hasta 58 veces su valor; esto se explica por un incremento de las acciones capilares, en la estructura del suelo quemado.

CONCLUSIONES

Ha sido posible llevar a cabo una campaña sistemática de medición de la capacidad de infiltración en suelos de Córdoba (Argentina) bajo condiciones pre y post-incendio. El simulador de lluvia nuevamente se muestra como una

herramienta poderosa para la caracterización experimental de procesos hidrológicos. La instrumentación digital ha posibilitado la adquisición de un volumen y calidad de información sin precedentes en la región; la incorporación del sensor de humedad posibilitará en un futuro el análisis no sólo de la capacidad de infiltración, sino también del flujo en el medio poroso no saturado subyacente.

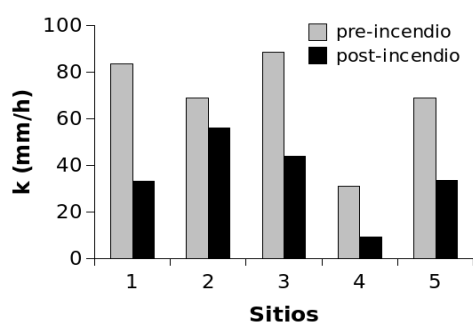


Figura 19. Alteración del parámetro K del modelo de Green y Ampt, a causa del fuego.

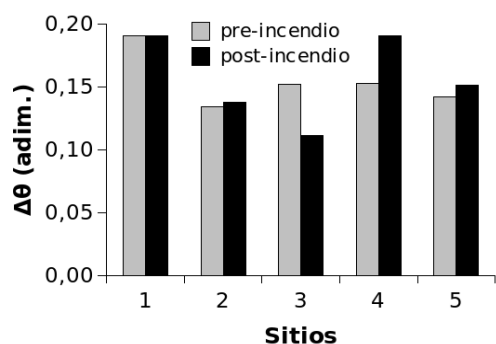


Figura 20. Alteración del parámetro $\Delta\theta$ del modelo de Green y Ampt, a causa del fuego.

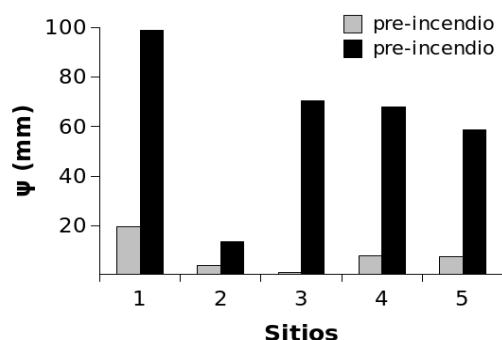


Figura 21. Alteración del parámetro ψ del modelo de Green y Ampt, a causa del fuego.

Las temperaturas alcanzadas en el fuego prescripto caen dentro del rango de temperaturas estimadas en

incendios forestales típicos (Dennison et al., 2006). Los tiempos de acción del fuego son compatibles con las velocidades de propagación obtenidas por simulación numérica en trabajos previos en la región (Weber et al., 2013).

Se ha confirmado la alteración de la capacidad de infiltración de los suelos del piedemonte de las sierras de Córdoba, con reducciones significativas que alientan a investigar la variabilidad espacial de la respuesta detectada, a través de futuras campañas de medición en otros ambientes de la provincia.

Si bien la información recopilada puede estar limitada por las hipótesis simplificativas asumidas en el diseño del experimento, se considera que los resultados obtenidos (tanto los resultados experimentales directos, como la alteración de los parámetros del modelo de infiltración de Green y Ampt) permitirán realizar evaluaciones cuantitativas del impacto que los recurrentes incendios forestales que azotan la provincia de Córdoba (Argentina) tienen sobre las crecidas repentinas que ocurren al iniciarse la temporada de lluvias en la región, y que trae diversas consecuencias negativas. Varios aspectos asociados a la acción de los incendios forestales, como el incremento de caudales pico de inundación, el incremento de la dificultad de potabilización del agua, la disminución de la calidad del agua en los embalses, etc., podrían contar con argumentos y justificaciones cuantitativas a partir de los resultados de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los becarios de investigación, Gabriel Bogino Castillo y Alexis Padrón Gentile, a la urbanización Villa Juana a través de Nicolás Vargas, al biólogo José Toledo por la identificación de las especies presentes, y a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional (Argentina) por la financiación de la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baker, M. B. Jr. (1990). Hydrologic and water quality effects of fire. Proceedings of a

- Symposium on Effects of Fire Management of Southwestern Natural Resources. Technical report, USDA Forest Service.
- Balfour, V. N., Doerr, S. H., y Robichaud, P. R. (2014). The temporal evolution of wildfire ash and implications for post-fire infiltration. *International Journal of Wildland Fire*, 23(5), 733–745.
- Bart, R. y Hope, A. (2010). Streamflow response to fire in large catchments of a mediterranean-climate region using paired-catchment experiments. *Journal of Hydrology*, 388, 370–378.
- Bodí, M. B., Martín, D. A., Balfour, V. N., Santín, C., Doerr, S. H., Pereira, P., Cerdà, A., y Mataix-Solera, J. (2014). Wildland fire ash: production, composition and eco-hydro-geomorphic effects. *Earth-Science Reviews*, 130, 103–127.
- Brakensiek, D. y Onstad, C. (1977). Parameter estimation of the Green and Ampt infiltration equation. *Water Resources Research*, 13(6), 1009–1012.
- Candela, A., Aronica, G. y Santoro, M. (2005). Effects of forest fires on flood frequency curves in a mediterranean catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 50(2), 193–206.
- Carter, M. R. y Gregorich, E. G., eds. (2008). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Boca Raton, EEUU. CRC Press Taylor & Francis Group, second edition.
- Chow, V. T., Maidment, R., y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia. Mc Graw-Hill.
- Consigli, R. E. (1999). El productor agropecuario y los incendios rurales. Sitio Argentino de Producción Animal. URL http://www.produccion-animal.com.ar/incendios_y_uso_del_fuego/14-productor_y_los_incendios_rurales.pdf.
- DeBano, L. F., Folliott, P. F., y Baker, M. B. Jr. (1996). Fire severity effects on water resource. Technical report, USDA Forest Service. Mountain Research Station.
- Dennison, P. E., Charoensiri, K., Roberts, D. A., Peterson, S. H., y Green, R. O. (2006). Wildfire temperature and land cover modeling using hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 100(2), 212–222.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A. (2006). Forest fire impacts on catchment hydrology: A critical review. *Forest Ecology and Management*, (234S):S161.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Blake, W. H., Chafer, C. J., Humphreys, G. S., y Wallbrink, P. J. (2006). Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology*, 319, 295–311.
- Eaton, J. W.; Bateman, D. y Hauberg, S. (2007). GNU Octave: a high-level interactive language for numerical computations. Disponible en www.octave.org.
- Green, W. H. y Ampt, G. (1911). Studies on soil physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(01), 1–24.
- Jordán, A., Zavala, L. M., Granged, A. J., Gordillo-Rivero, Á. J., García-Moreno, J., Pereira, P., Bárcenas-Moreno, G., de Celis, R., Jiménez-Compán, E., y Alanís, N. (2016). Wettability of ash conditions splash erosion and runoff rates in the post-fire. *Science of the Total Environment*, 572, 1261–1268.
- Kinner, D. A. y Moody, J. A. (2010). Spatial variability of steady-state infiltration into a two-layer soil system on burned hillslopes. *Journal of Hydrology*, 381, 322–332.
- Lane, P. N. J., Sheridan, G. J., y Noske, P. J. (2006). Changes in sediment loads and discharge from small mountain catchments following wildfire in south eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 331, 495–510.
- Llovet, J. (2005). Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo. PhD thesis, Universitat d'Alacant-Dept d'Ecologia.
- Loáiciga, H. A., Pedreros, D. y Roberts, D. (2001). Wildfire-streamflow interactions in a chaparral watershed. *Advances in Environmental Research*, 5, 295–305.
- López Alonso, R., Pérez Gispert, A., y Batalla, R. J. (2004). Efectos de un incendio forestal sobre la respuesta hidrológica de la cuenca mediterránea de Arbúcies (cordilleras costeras catalanas, NE España). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(2), 305–316.
- Martin, C. y Lavabre, J. (1997). Estimation de la part du ruissellement sur les versants dans les crues du ruisseau du Rimbaud (massif des Maures, Var, France) après l'incendie de forêt d'août 1990. *Hydrological Sciences Journal*, 42(6), 893–907.
- Mathews, J. H. y Fink, K. D. (2004). *Numerical Methods using Matlab*, 4th Ed., Pearson Prentice Hall.

- Mayor, A. G., Bautista, S., Llovet, J. y Bellot, J. (2007). Post-fire hydrological and erosional responses of a mediterranean landscape: Seven years of catchment-scale dynamics. *Catena*, 71, 68–75.
- Moody, J. A., Kinner, D. A. y Úbeda, X. (2009). Linking hydraulic properties of fire-affected soils to infiltration and water repellency. *Journal of Hydrology*, 379, 291–303.
- Moody, J. A., y Martin, D. A. (2001). Post-fire, rainfall intensity–peak discharge relations for three mountainous watersheds in the western USA. *Hydrological Processes*, 15, 2981–2993.
- Neary, D. G., Ryan, K. C. y DeBano, L. F. (2005). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. Technical report, Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountains.
- Nelder, J. A. y Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7(4), 308–313.
- Ravi, V. y 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.
- Rawls, W., Brakensiek, D., y Saxton, K. (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316–1320.
- Robichaud, P. R. (2000). Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *Journal of Hydrology*, (231–232), 220–229.
- Sempere, D., Urbano, A., Lavabre, J. y Dolz, J. (1994). Consecuencias hidrológicas de los incendios forestales. *Ingeniería del Agua*, 1(4), 33–48.
- Springer, E. P. y Cundy, T. W. (1987). Field-scale evaluation of infiltration parameters from soil texture for hydrologic analysis. *Water Resources Research*, 23(2), 325–334.
- Stoof, C. R., Gevaert, A. I., Bayer, C., Hassanpour, B., Morales, V. L., Zhang, W., Martin, D., Giri, S. K., y Steenhuis, T. S. (2016). Can pore-clogging by ash explain post-fire runoff? *International Journal of Wildland Fire*, 25(3), 294–305.
- Tiedemann, A. R. (1978). Regional impact of fire. Proceedings of the conference “Fire and Ecosystems Properties”. Technical report, USDA Forest Service.
- Tucci, C. E. M. (Ed.). (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre. Editora da Universidade, UFRGS.
- Velleux M., England J., y Julien P. (2008). TRex: Spatially distributed model to assess watershed contaminant transport and fate. *Science of the Total Environment*, 404(1), 113–128.
- 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, Argentina. pp. 235-254.
- Weber, J. F. y Reyna, S. M. (2016). Medición en laboratorio de la capacidad de infiltración en suelos mediante un simulador de lluvia. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú.
- Weber, J. F. y Reyna, S. M. (2017). Mediciones preliminares en laboratorio del impacto del fuego en la capacidad de infiltración. V Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica - MEH17. Buenos Aires, Argentina.
- Weber, J. F., Stehli, P. T. y Jorquera, E. (2013). Modelación matemática de los incendios en la zona serrana de la provincia de Córdoba. IV Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial - MACI 2013, Buenos Aires, Argentina.

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 27/11/2018 y aprobado para su publicación el 18/06/2019.

COMO CITAR

Weber, J. F. y Reyna, S. M. (2019). Alteración de los parámetros del modelo de Green y Ampt ante la ocurrencia de incendios en suelos de Córdoba (Argentina). *Cuadernos del CURIHAM*. 25, 1-17. DOI: <https://doi.org/10.35305/curiham.v25i0.112>

Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)