

Modelación del Impacto Hidrosedimentológico de los Incendios Forestales

Juan Francisco Weber, Pablo Tomás Stehli, Eliana Jorquera

Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria - (X5016ZAA) Córdoba – Argentina. jweber@civil.frc.utn.edu.ar

Resumen - Se presentan los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo TREX en la cuenca del río de La Suela (provincia de Córdoba) con el objetivo de analizar el impacto de la ocurrencia de incendios en los hidrogramas y centrogramas de descarga de la cuenca, luego del primer episodio lluvioso post-incendio. TREX es un modelo hidrológico orientado a la simulación de eventos que puede representar procesos hidrológicos y sedimentológicos. Se analizó la dependencia de la variación porcentual en las magnitudes de los picos y volúmenes del hidrograma y del centrograma en función del área quemada y de dos índices de base heurística, observándose una mejor correlación con el volumen escurrido que para los picos, especialmente con el área. No se ha observado una correlación significativa con el centrograma. Se concluye que el modelo TREX permite obtener información valiosa para analizar la respuesta hidrológica de las cuencas serranas de Córdoba ante los eventos ígneos que frecuentemente las azotan.

Palabras claves: incendios forestales, modelación hidrológica, sedimentos, sierras de Córdoba

Modeling the hydro-sedimentological impact of wildfires

Abstract - Results of the simulations with TREX model in La Suela river basin (province of Cordoba) are presented. It aims to analyze the impact of wildfires in hydrographs and sedimentographs of that basin, caused by the first postfire rain. TREX is a distributed hydrological model designed for event simulation. It can represent several hydrological and sedimentological processes. Dependency between the change ratio in hydrograph and centrogram peaks, basin area, and two heuristic-based indexes, was analyzed. It shows a better correlation in runoff volume with area rather than peak flows. We conclude that TREX model gives valuable information to analyze the response of mountain basins of Cordoba to its frequent fire events.

Keywords: hydrological modeling, sediments, Cordoba mountains

INTRODUCCIÓN

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.

El impacto hidrológico de los incendios

Se describen sucintamente y en forma general

(Neary et al., 2005) las consecuencias más significativas de los incendios forestales sobre los procesos hidrológicos. Estos efectos serán tomados como base para la simulación del impacto en la cuenca de estudio, dada la ausencia de información experimental local sobre el tema.

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 intercepción vegetal. 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 (Fig. 1).



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

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) presenta una recopilación del impacto de los incendios en la conductividad hidráulica del suelo en distintos lugares del mundo, concluyendo que existe una relación entre la alta severidad del fuego y la conductividad hidráulica saturada.

Las reducciones de la conductividad hidráulica saturada son del orden del 20 a 48% comúnmente después de los incendios forestales, aunque hay reportes de reducciones del 88 a 92% para incendios con gran severidad.

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

El impacto sedimentológico de los incendios

Los incendios impactan de dos maneras principales en la producción de sedimentos en las cuencas. La primera es consecuencia de la desaparición (total o parcial) de la cubierta vegetal provocando erosión. La erosión de un suelo se produce cuando los sedimentos se exponen al agua o al aire y las velocidades tienen una magnitud suficiente como para separar y transportar los sedimentos. La erosión es ciertamente el impacto más visible y dramático del fuego aparte del consumo de la vegetación (Fig. 2).

La segunda forma es debida a la modificación de la composición del suelo durante el incendio, en particular la degradación de la fracción orgánica del mismo aumentando su fragilidad. Se han observado incrementos en la producción de sedimentos en cuencas de hasta 400 tn/ha/año. Cabe destacar el impacto en la calidad del agua y, por tanto, en el uso de la misma aguas abajo de una cuenca incendiada.



Fig. 2 - Erosión post-incendio (Neary et al., 2005)

DESARROLLO

Se describen a continuación la cuenca seleccionada para este estudio y la información disponible en ella, las formulaciones, hipótesis y operación del modelo TREX, y la metodología e hipótesis asumidas para la generación y propagación de los incendios y para las modelaciones hidrológica y sedimentológica.

Cuenca en estudio

La cuenca del río de La Suela se encuentra ubicada totalmente en la provincia de Córdoba, al sur de la localidad de Villa Carlos Paz accediendo a ella por la Ruta Nacional 20 (Fig. 3). Tiene una superficie de 131,8 km² comprendida entre los 900 y los 2200 metros sobre el nivel del mar. La cuenca está localizada en el núcleo central de las Sierras Pampeanas, entre los 31° 40' y 31° 30' de latitud sur y los 64° 30' y 64° 45' de longitud oeste, sobre el cordón de las Cumbres de Achala y sus estribaciones orientales (Fig. 3).

La cuenca del río de La Suela constituye desde el punto de vista hidrográfico la naciente norte de la cuenca imbrífera del río Segundo o Xanaes con desagüe en el sistema endorreico de la Laguna de Mar Chiquita o de Ansenusa. Dos subcuencas de carácter bien definidas que unen sus aportes a menos de 2 km del cierre de la cuenca conforman el drenaje: la subcuenca del río de La Suela propiamente dicha, que localiza sus nacientes en el Cordón de Achala a 2.200 m.s.n.m, y la subcuenca del Arroyo de la

CUENCA DEL RÍO LA SUELA
PROVINCIA DE CÓRDOBA

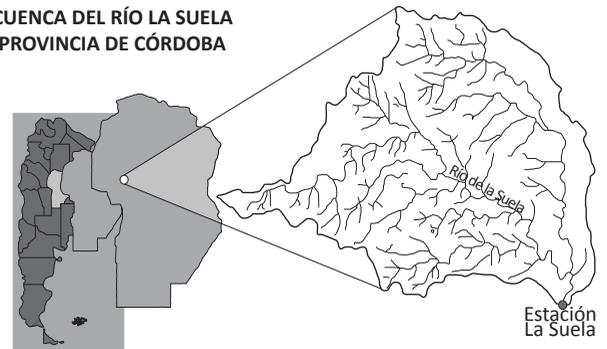


Fig. 3 - Ubicación geográfica cuenca del río de La Suela

Estancia, que lo hace a 1.500 m.s.n.m sobre las estribaciones de este, en la localidad de Copina.

La subcuenca La Suela (60% del área) ubicada en el sector sudoeste de la cuenca tiene su nacimiento en el borde oriental de las Sierras Grandes. Su punto de mayor altitud se encuentra en las nacientes del arroyo del Carnero, uno de sus principales afluentes (Dasso, 1983). La subcuenca La Estancia es de menor altitud y respuestas más lentas (pendiente 2%). La longitud del río principal (Carnero - La Suela) desde sus nacientes, hasta la estación de cierre es de 28,92 Km, con una pendiente media uniforme del 4% alcanzando una pendiente máxima en el escalón tectónico del 13%.

Los suelos se ajustan a las características de suelos azonales (litosólicos y regosólicos), cuya particularidad se traduce en la falta de horizontes definidos y a su reducido espesor. Derivan de la alteración directa de la roca y su profundidad está supeditada a la posición topográfica que ocupen. En general son suelos superficiales a muy superficiales, de buena permeabilidad, textura arenosa a franco arenosa y con regular cantidad de materia orgánica (Barbeito y von Müller, 1981). La cobertura vegetal se distribuye en tres pisos: monte serrano, arbustal o romerillal y pastizales y bosquesillos de altura, cuya existencia, amplitud, densidad y elevación están en función de la altitud, latitud y orientación geográfica. La diferencia de altitud de la cuenca del río de La Suela determinó la existencia de estos tres pisos distribuidos según dos grandes ambientes:

- Sub-andino: corresponde a las cumbres por encima de los 1.600 m.s.n.m.

- Pedemontano por debajo de esta altitud.

Información de base

La red histórica existente en la cuenca, operada desde 1971 al 1995, estaba integrada por once estaciones pluviométricas – pluviográficas con una densidad aproximada de 1/12 km², dos estaciones meteorológicas completas ubicadas una en la parte alta (estación El Cóndor) y la otra en el cierre de la cuenca (estación La Suela) y una estación de aforo en el cierre de la misma.

Mediciones de precipitación: Se dispuso de datos de ocho estaciones pluviográficas – pluviométricas distribuidas en el área de la cuenca, provenientes del Banco de Datos de CIRSA.

Mediciones de caudales: Por las características geológicas y fisiográficas de la cuenca del río de La Suela y el carácter permanente de su curso principal se presume que la totalidad de los diversos tipos de escurrimiento dados en el área de aporte pasan por la estación hidrométrica La Suela, considerada como cierre de la cuenca. Esto significa que el caudal medido en dicha estación corresponde al caudal total, o sea la sumatoria de los componentes superficial, subsuperficial y de drenaje subterráneo o de base.

Para la determinación de la serie de caudales instantáneos se utilizaron los registros limnigráficos cada 15 minutos.

El modelo hidrológico TREX

TREX (Two-dimensional Runoff, Erosion, and eXport model) es un modelo bidimensional de escurrimiento, erosión y transporte de sedimentos y contaminantes (England et al., 2007; Velleux et al., 2008). Está basado en el modelo de cuencas CASC2D. Los procesos hidrológicos simulados son: precipitación, intercepción, infiltración y pérdidas por transmisión en el cauce, almacenamiento, flujo superficial y en canales y derretimiento de nieve.

Este modelo utiliza la relación de Green y Ampt para definir la infiltración en la superficie del terreno y en los cauces y, a partir del balance, el flujo

superficial. Este flujo está gobernado por las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento; TREX utiliza la aproximación de la onda difusiva unidimensional en cauces y bidimensional en la superficie de la cuenca, suponiendo que el flujo es turbulento y que la resistencia al flujo se puede describir utilizando la formulación de Manning (Stehli et al., 2012).

Para simular el proceso hidrológico TREX plantea una solución numérica explícita de las ecuaciones de balance de masa mediante la segmentación de la cuenca en elementos cuadrados iguales, a los cuales se le asignan los parámetros relativos a las características de infiltración del suelo y coeficientes de rugosidad. Este modelo es de código libre, está escrito en el lenguaje de programación C y está disponible en la página web de la Universidad Estatal de Colorado. Tiene una fuerte base física en la conceptualización de los procesos superficiales, pero no considera los procesos subsuperficiales y subterráneos (Jorquera et al., 2012).

Procesos Hidrológicos en TREX

Se describen someramente a continuación las ecuaciones que representan los procesos hidrológicos relevantes incluidos en el modelo TREX (Velleux et al., 2008).

El volumen bruto de precipitación (V_g) que llega a la superficie en función del tiempo es igual a la intensidad de precipitación bruta (i_g) por el área de la región donde ocurre la precipitación (A_s). El volumen neto (V_n) resulta de descontarle al bruto el volumen interceptado (V_i). El balance se explicita en la ecuación (1).

$$\frac{\partial V_g}{\partial t} = i_g \cdot A_s \quad \Rightarrow \quad V_n = V_g - V_i \quad (1)$$

Según el volumen interceptado sea mayor o menor que el volumen bruto habrá o no volumen neto de agua sobre la superficie de la cuenca. El volumen de precipitación neta también se puede expresar (2) como una tasa de precipitación neta (efectiva):

$$i_n = \frac{1}{A_s} \frac{\partial V_n}{\partial t} \quad (2)$$

Para definir la infiltración de agua en la superficie de la cuenca como así también en los cauces que la forman, el modelo TREX utiliza las relaciones de Green y Ampt (1911, citado por Chow et al., 1994).

$$f = K_h \left(1 + \frac{\theta (1 - S_e) \dot{\theta}_e}{F} \right) \quad (3)$$

donde K_h es la conductividad hidráulica, ψ la altura de succión del frente de saturación (altura de succión capilar), S_e el porcentaje de saturación efectiva del suelo, θ_e la porosidad efectiva del suelo, f la tasa de infiltración y F la altura de infiltración acumulada vinculadas a través de:

$$f = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

lo cual da lugar a una relación no lineal resuelta a través de un método iterativo (Chow et al., 1994).

La fracción de precipitación no retenida ni infiltrada genera un flujo superficial tanto mantiforme (bidimensional) como en canales (unidimensional). El flujo superficial puede ocurrir cuando la profundidad del agua en el plano terrestre supera el umbral de almacenamiento de la depresión. El flujo superficial se rige por la conservación de la masa (continuidad) y la conservación de cantidad de movimiento. Las ecuaciones de continuidad para el flujo en dos dimensiones gradualmente variado sobre un plano rectangular en coordenadas (x, y) son:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} = i_n - f + W = i_e \quad (5)$$

donde h es la altura de flujo superficial, W un término fuente/sumidero (descarga/aporte unitario puntual), i_n la intensidad de precipitación neta obtenida a partir de (1), i_e la intensidad de precipitación en exceso, y q_x , q_y los caudales por unidad de ancho en la dirección x o y. Suponiendo que el flujo es turbulento, la resistencia se puede describir utilizando la formulación de Manning (Chow et al., 1994) tanto

para los flujos bidimensionales como unidimensionales. La ecuación (5) es discretizada en el espacio por el método de diferencias finitas (Fig. 4), mientras que para la integración temporal se utiliza el método de Euler.

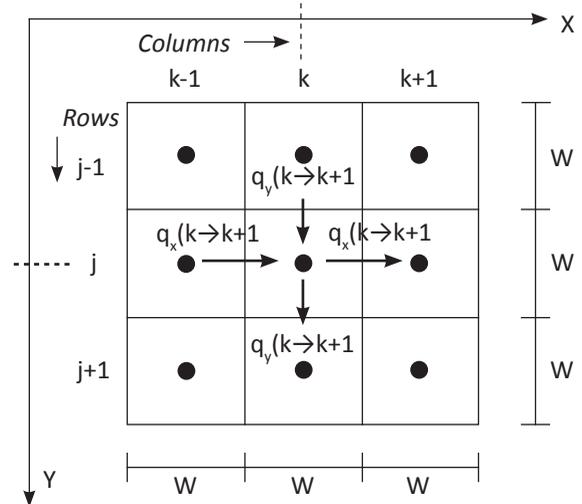


Fig. 4 - Esquema de cálculo en TREX

Procesos sedimentológicos en TREX

Los principales procesos en el submodelo de transporte de sedimentos (Stehli, 2013) son:

- 1- Advección-Difusión.
- 2- Erosión.
- 3- Deposición.

4- Procesos de lecho (respuesta del lecho a la erosión y deposición).

Advección - Difusión

Para el plano terrestre en dos dimensiones (integrado verticalmente) la concentración de partículas es gobernada por la conservación de la masa (continuidad de sedimentos) (Julien, 1998).

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + \frac{\partial \hat{q}_{tx}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{q}_{ty}}{\partial y} = \hat{J}_e - \hat{J}_d + \hat{W}_s = \hat{J}_n \quad (6)$$

siendo C_s la concentración de partículas de sedi-

mentos en el flujo, q_x, q_y el flujo total de sedimentos en las direcciones x e y respectivamente, J_e el flujo volumétrico de erosión de sedimentos, J_d el flujo volumétrico de deposición de sedimentos, W_s el flujo volumétrico de ingreso/salida de sedimentos y J_n el flujo volumétrico neto de transporte de sedimentos. El flujo total de transporte de sedimentos en cualquier dirección tiene tres componentes: advectivo, dispersivo (mezcla) y difusivo.

Erosión

Las relaciones que existen sobre erosión del suelo varían en complejidad desde simples ecuaciones empíricas a modelos basados en la física que se aplican en diferentes escalas espaciales y temporales. Una de las más comunes entre las relaciones de erosión del suelo en cuencas es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y sus variantes. La USLE (Wischmeier y Smith, 1978) es una relación empírica basada en una gran cantidad de mediciones de parcelas de campo. Utiliza seis factores que están asociados con el clima, el suelo, la topografía, la vegetación y la gestión de uso de la tierra.

Julien en sus trabajos recomienda una modificación a la relación de Kilinc y Richardson (1973) incluyendo los términos de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos de erodibilidad del suelo, cobertura, y prácticas de manejo para estimar la capacidad de transporte de sedimentos total superficial (tanto para la dirección x como y).

$$J_c = \frac{q_s}{B_e} \quad (7)$$

donde J_c es la capacidad de transporte de sedimentos en el flujo, B_e el ancho de la superficie de erosión en la dirección del flujo y q_s la capacidad de transporte de sedimentos total (kg/m s) dada por

$$q_s = 1,542 \cdot 10^8 q^{2,035} S_f^{1,66} \hat{K} \hat{C} \hat{P} \quad (8)$$

siendo q la velocidad unitaria del flujo líquido, S_f la pendiente de fricción, y K, \hat{C} y P los factores

de la USLE vinculados a la erodibilidad, cobertura, y prácticas de manejo del suelo, respectivamente.

En el caso de cauces la capacidad de transporte se determina utilizando la relación de Englund-Hansen (Julien, 1998).

Deposición

La deposición es la sedimentación (pérdida) de material arrastrado por el flujo hacia un límite inferior por gravedad. El proceso de deposición es influenciado por muchos factores incluyendo la densidad de las partículas, diámetro y forma, y la turbulencia del flujo. El flujo de deposición puede ser expresado como un índice de masa de la eliminación de partículas de la columna de agua a través del tiempo y la concentración de partículas de sedimentos que son arrastradas por el mismo:

$$J_d = v_{se} C_s \quad (9)$$

donde J_d es el flujo de deposición, v_{se} la velocidad de sedimentación efectiva de la partícula y C_s la concentración de partículas en el flujo. Para la estimación de v_{se} , TREX afecta a la velocidad teórica de sedimentación por una probabilidad de deposición P_{dep} de tipo gaussiana, función de la tensión de corte en el lecho.

Procesos de lecho

En respuesta a la diferencia entre el transporte por el lecho, la erosión y los flujos de deposición, la adición neta (elevación del nivel) o pérdida neta (erosión) de las partículas del lecho provoca que éste se incremente o disminuya. Este aumento o la disminución se rige por la ecuación de continuidad de los sedimentos o de Exner (conservación de la masa):

$$\rho_b \frac{\partial z}{\partial t} = v_{se} C_s - v_{\gamma} C_{sb} \quad (10)$$

donde ρ_b es la densidad aparente de sedimen-

tos en la superficie del lecho, z la elevación de la superficie del lecho, v_r la velocidad de resuspensión (erosión) y C_{sb} la concentración de partículas de sedimentos en el lecho.

Modelado de incendios

La metodología empleada para la generación de las manchas de incendios (Weber et al., 2013a) incluye los siguientes ítems:

- (1) definir modelos de combustibles y barreras de fuego en la cuenca del río La Suela,
- (2) asignar probabilidades de inicio del fuego a diferentes zonas dentro de la cuenca,
- (3) asignar probabilidades de ocurrencia de vientos, en base a registros históricos, según su dirección y velocidad,
- (4) generar mapas de velocidades de propagación, según el modelo de Rothermel (1983) dependiendo de la orientación y velocidades del viento,
- (5) definir focos de inicio de incendios,
- (6) simular la propagación del incendio para cada punto de inicio, dirección y velocidad de viento, generando así las manchas de incendios, y
- (7) asignar probabilidades de ocurrencia a cada mancha, asumiendo que las componentes estocásticas del modelo son únicamente la ubicación del foco y las características del viento (que se asume homogéneo y estacionario).

Para ello se asumieron las siguientes hipótesis:

- (a) Focos de inicio de fuego arbitrariamente distribuidos cada 2250 m.
- (b) Ocho direcciones posibles de vientos (cada 45°) asumiéndolos homogéneos en toda la extensión de la cuenca.
- (c) Seis velocidades posibles de vientos (de 10 a 60 km/h) asumiéndolas homogéneas en toda la extensión de la cuenca.
- (d) La humedad de los combustibles es igual en toda la extensión de la cuenca.

Para la generación de los mapas de velocidades de propagación se utilizó el sistema de información geográfica GRASS (Neteler y Mitsova,

2008) que requiere la siguiente información:

- (a) Modelos de Combustibles.
- (b) Velocidad y Dirección de viento.
- (c) Modelo digital de elevación.
- (d) Mapa de aspecto (orientación).
- (e) Humedad de los combustibles.

Para el cálculo de las velocidades y direcciones de propagación GRASS utiliza la orientación, elevación, dirección y velocidad del viento y humedad de los combustibles (tanto vivos como muertos) y el modelo de propagación de Rothermel dado por:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \varphi_w \varphi_s)}{\rho_b \zeta Q_{ig}} \quad (11)$$

donde R es la velocidad de propagación, I_R la intensidad de la reacción (energía liberada en el frente de incendio por unidad de área y de tiempo), ξ la proporción de la intensidad de reacción que calienta a las partículas adyacentes de combustible hasta la ignición (fracción adimensional del flujo de energía), ζ el factor de calentamiento efectivo, φ_s un factor que tiene en cuenta la pendiente, φ_w un coeficiente adimensional que tiene en cuenta el viento en la propagación del frente y Q_{ig} el calor de preignición (el calor necesario para llevar una unidad de peso de combustible al punto de ignición).

La propagación del incendio se realiza ingresando un punto de ignición y tomando como base los mapas desarrollados de velocidad y dirección de propagación del incendio. Pueden ser incluidas barreras de incendios que se incorporan como valores θ en los mapas de velocidades de propagación. En el caso de la cuenca de la Suela, se definieron según los siguientes criterios:

- (1) rutas pavimentadas y caminos con un ancho mayor a 3 m, y
- (2) ríos con un ancho mayor a 5 m, lechos rocosos y sin una abundante vegetación en sus costas que puede usarse como una ruta de propagación de los incendios.

En la Fig. 5 pueden observarse como ejemplo algunas de las manchas de incendios resultado de esta simulación.

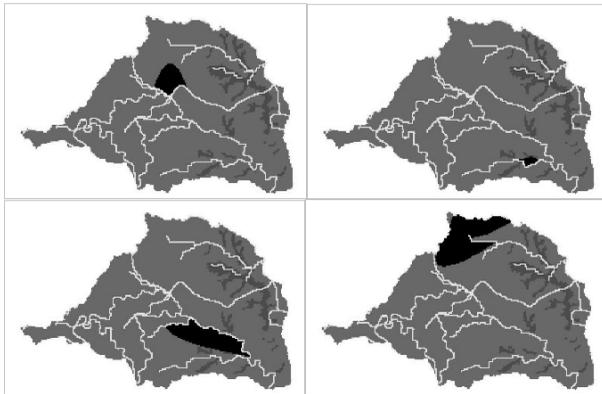


Fig. 5 - Manchas de incendios (en negro) simuladas para distintos focos de inicio, velocidades y direcciones de viento

En la Fig. 6 se presenta la distribución de frecuencias de incendios simulados según su superficie. Cabe destacar que estas hipótesis dieron lugar a 1056 simulaciones.

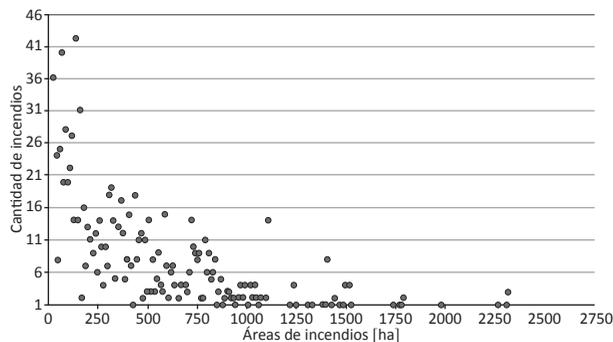


Fig. 6 - Frecuencia de incendios simulados según su superficie (ha)

Modelado hidrológico

Para analizar el impacto hidrológico de los incendios simulados en la cuenca de La Suela (Weber et al., 2013b) se consideró un evento lluvioso (que se asume posterior y temporalmente próximo al incendio) con un periodo de retorno de 10 años (Neary et al., 2005) y una duración de 3 horas, aplicando como relación intensidad-duración-recurrencia la dada por el modelo DIT (Caamaño y Dasso, 2003).

Esta lámina fue distribuida temporalmente (en intervalos de 0,5 h) según los patrones presentados

por estos autores. Como distribución espacial se asumió la distribución elíptica dada por Hansen (citado por Weber et al., 2012) con dos orientaciones posibles de su eje mayor: N-S y E-W. La elipse así generada no varía su posición espacial pero sí su intensidad a lo largo del tiempo. De este modo se obtuvieron intensidades variables entre 1,6 y 73,2 mm/h. En la Fig. 7 se muestra, a modo de ejemplo, la distribución espacial de la intensidad de lluvia para la tormenta de orientación E-W y en el instante $t = 0,2$ h.



Fig. 7 - Distribución espacial de la intensidad (mm/h) para la tormenta de dirección E-W, en $t = 0,2$ h

La modelación se realizó a través de TRES utilizando como parámetros los calibrados para la misma cuenca a partir de información hidrometeorológica disponible (Stehli et al., 2012) para reproducir su respuesta en las condiciones originales (pre-incendio).

Para la simulación hidrológica post-incendio los parámetros antes mencionados fueron afectados según lo descrito anteriormente y de acuerdo a lo indicado por la literatura (en ausencia de mediciones locales) bajo las siguientes hipótesis:

(a) La conductividad hidráulica de los suelos quemados se reduce en un 50 %.

(b) El parámetro n de Manning en el área quemada se reduce, desde los valores iniciales calibrados, a 0,025 en todos los casos (Beeson et al., 2001).

(c) La interceptación vegetal se reduce a 0 (desaparición completa de la cubierta).

Además del universo de 1056 incendios simulados se seleccionó aleatoriamente una muestra de 139 casos a los cuales se aplicaron las tormentas con orientación E-W y N-S antes descriptas, obteniéndose por lo tanto 278 simulaciones más los dos escenarios pre-incendio de contraste.

Modelado sedimentológico

Debido a la ausencia de mediciones sistemáticas de caudales sólidos en la cuenca de La Suela (y en general en todos los ríos de la provincia) se realizaron estimaciones de los parámetros del modelo sedimentológico en base a simulaciones previas hechas en la cuenca de Rio Caeté, en Brasil (Stehli, 2013).

Se consideraron 5 tipos de suelo (Barbeito y Von Müller, 1981) (Fig. 8) a los cuales se asociaron propiedades sedimentológicas en base a las proporciones de las fracciones granulométricas descriptas en la Tabla 1 y al grado de pedregosidad considerando además los sitios con roca expuesta.

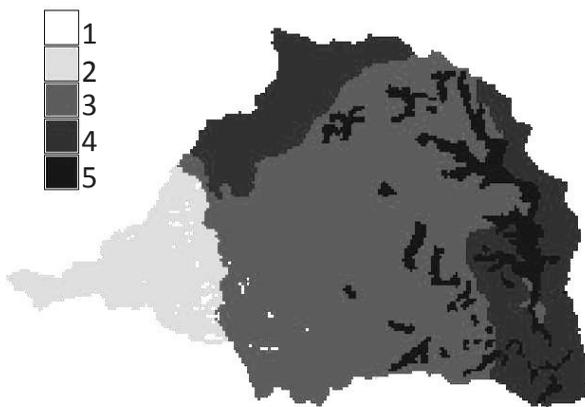


Fig. 8 - Tipos de suelo en la cuenca de La Suela

Tanto en la Fig. 8 como en la Tabla 1 los tipos de suelo corresponden a: (1) suelo desnudo; (2) granito de alta rocosidad; (3) granito de baja rocosidad; (4) gneis; (5) sedimentos.

Las propiedades hidrosedimentológicas de estos tipos de suelo se alteran en función de la intersección con las manchas de incendios generadas, planteando así la necesidad de formular 139 mapas

de suelo diferentes, más la condición preincendio (Fig. 8).

Componente	Tipo de suelo				
	1	2	3	4	5
Arena gruesa	5,0	8,0	15,5	17,3	20,1
Arena media	5,0	8,0	19,8	20,4	31,3
Limo	1,0	6,3	15,8	23,0	26,9
Arcilla	0	2,7	18,9	19,3	21,7
Roca	89,0	75,0	30,0	20,0	0,0
Dm (mm)	228	192	76,9	51,3	0,15

Tabla 1 - Porcentaje de las partículas componentes de cada tipo de suelo y diámetros medios Dm (en mm)

Definición de índices de riesgo

Se propusieron índices de riesgo hidrológico y sedimentológico, de carácter heurístico, según las siguientes ecuaciones:

$$I_h = A \cdot P \cdot C \tag{12}$$

$$I_s = \frac{A \cdot P \cdot C}{D} \tag{13}$$

donde I_h e I_s representan los índices de riesgo hidrológico y sedimentológico respectivamente, A es la superficie del área quemada, P la pendiente media del área quemada, C la cobertura vegetal del área quemada (equivalente a la pérdida de cobertura) y D el diámetro medio de las partículas de suelo del área quemada (Tabla 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figs. 9 y 10 se presentan, a título de ejemplo, los hidrogramas y concentrogramas obtenidos de la simulación de la respuesta de la cuenca en condiciones preincendio y ante tres combinaciones de foco de inicio del fuego, dirección y velocidad del viento.

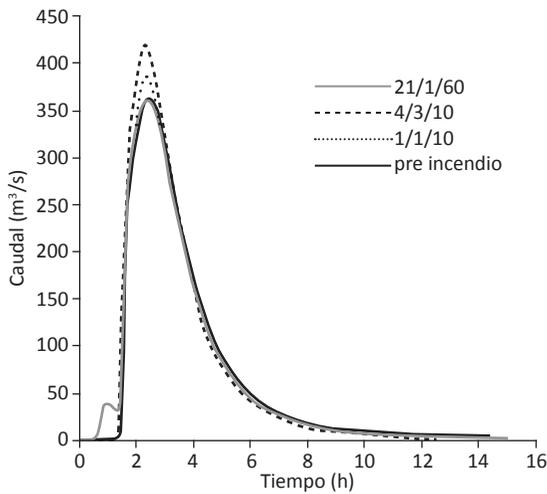


Fig. 9 - Hidrogramas simulados – condición original y tres escenarios. El código indica: foco de inicio / dirección / velocidad del viento

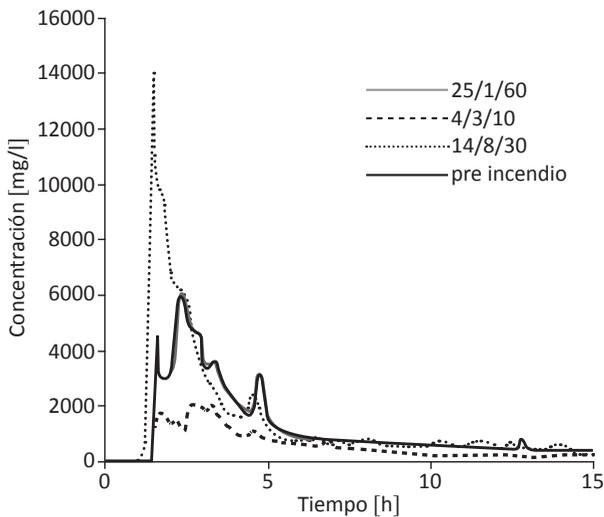


Fig. 10 - Concentrogramas simulados – condición original y tres escenarios. El código indica: foco de inicio / dirección / velocidad del viento

Puede observarse la variabilidad en la respuesta ante el mismo episodio lluvioso siendo las diferencias más acentuadas en la concentración de sedimentos obtenida.

En las Figs. 11 y 12 se muestra la variación porcentual (en relación a la situación preincendio) en el caudal pico y en el volumen total escurrido (respectivamente) en función de la probabilidad de

ocurrencia para los 278 escenarios de incendio simulados según la dirección del viento (E-W o N-S). Como puede apreciarse no existen diferencias significativas en función de la dirección, y en todos los casos se observa que los incendios más probables (y por tanto, de menor impacto) producen las menores variaciones en la respuesta hidrológica.

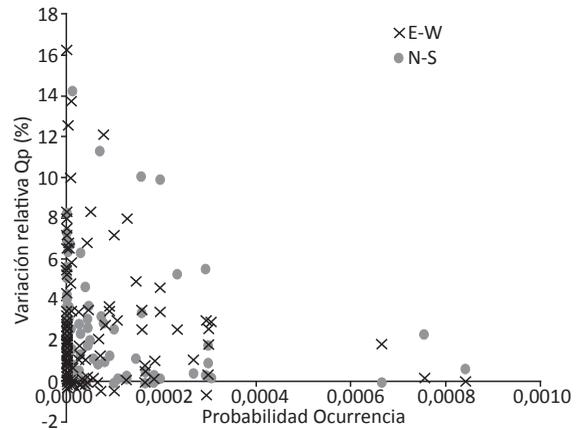


Fig. 11 - Variación relativa del caudal pico en función de la probabilidad de ocurrencia y la dirección del viento

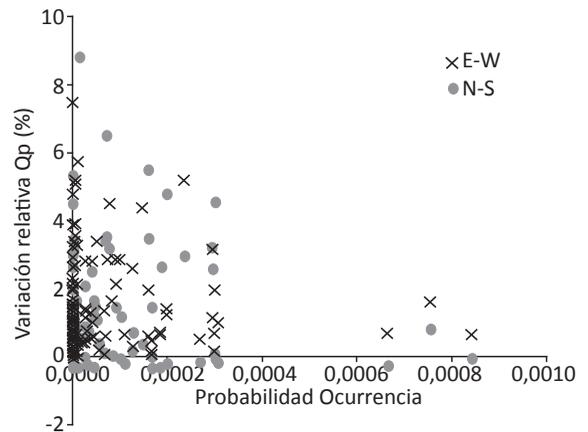


Fig. 12 - Variación relativa del volumen escurrido, en función de la probabilidad de ocurrencia y la dirección del viento

En las Figs. 13 y 14 se presentan estas mismas variaciones porcentuales pero en función del índice de riesgo hidrológico (ecuación 12), y en las Figs. 15 y 16 en función del área quemada (en ha).

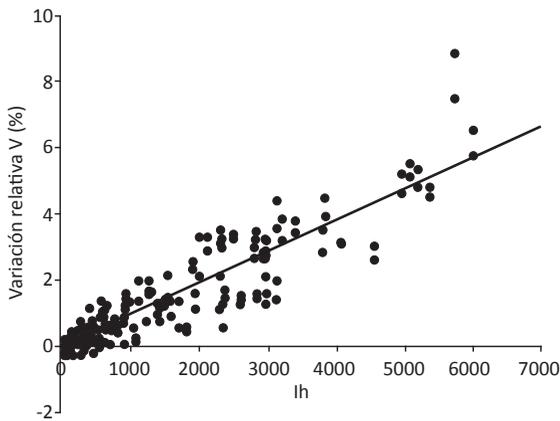


Fig. 13 - Variación relativa del volumen escurrido en función del índice de riesgo hidrológico

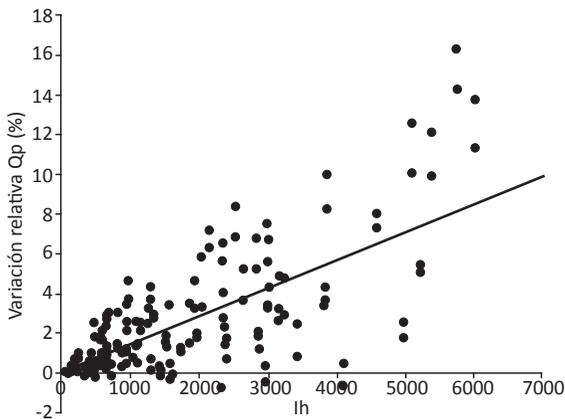


Fig. 14 - Variación relativa del caudal pico en función del índice de riesgo hidrológico

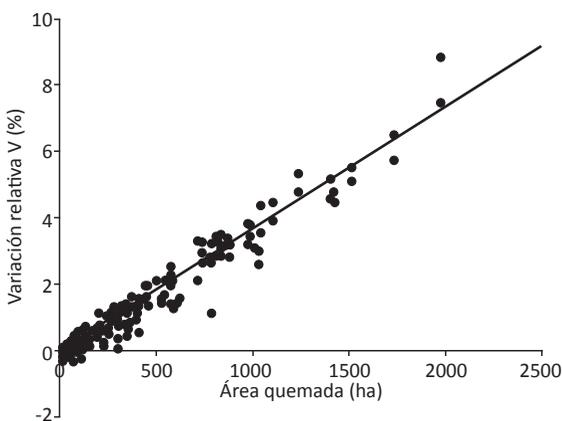


Fig. 15 - Variación relativa del volumen escurrido en función del área quemada

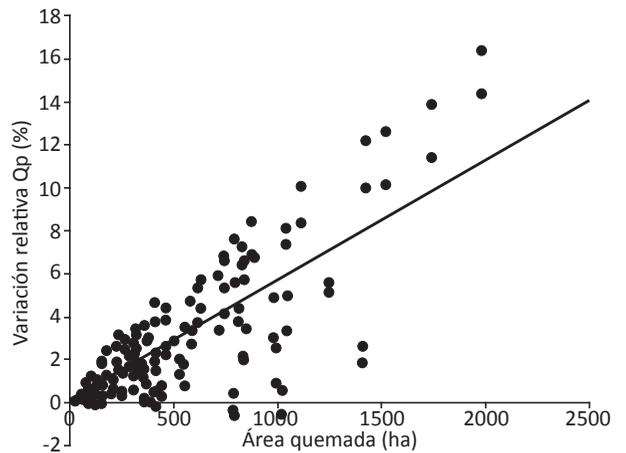


Fig. 16 - Variación relativa del caudal pico en función del área quemada

En todos los casos se observa una correlación entre las variables mencionadas, pero sorprendentemente esta correlación es mayor con el área quemada, y no con I_h , siendo que este índice incluye más información del proceso. Esto se cuantifica en la Tabla 2 donde se presenta la recta de regresión y el coeficiente de determinación R^2 para cada una de las relaciones mencionadas.

Figura	Recta de regresión	R^2
13	$Y = 9,6.10^{-4} X - 9,78.10^{-2}$	0,82
14	$Y = 1,4.10^{-3} X - 3,93.10^{-2}$	0,52
15	$Y = 3,8.10^{-3} X - 0,20$	0,94
16	$Y = 5,7.10^{-3} X - 0,24$	0,63

Tabla 2 - Rectas de regresión y coeficiente de determinación R^2 para las relaciones de las Figs. 13 a 16

Puede apreciarse que si bien existen algunos valores negativos para la variable dependiente (lo que indica una disminución del caudal pico o del volumen total erogado, según el caso), en la gran mayoría de los casos se produce un incremento de las variables analizadas a posteriori de la ocurrencia del incendio.

Similares análisis se realizaron con la variación porcentual del pico de concentración de sedimentos y la masa total de sedimentos erogada por

la cuenca. A título de ejemplo se presenta la Fig. 17 donde se muestra la variación porcentual de la masa total de sedimentos en función del índice de riesgo sedimentológico (ecuación 13). Puede verse que prácticamente no hay una tendencia definida entre las dos variables, cosa que sucede también para los demás análisis realizados.

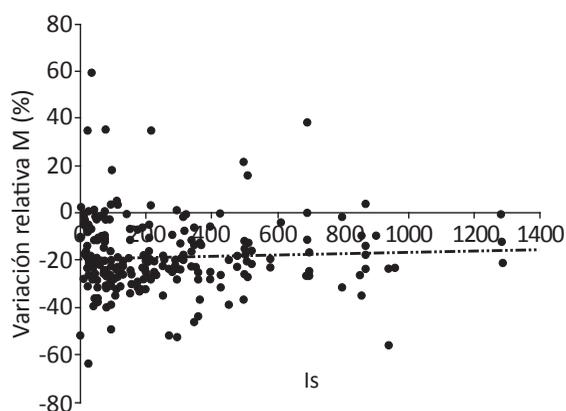


Fig. 17 - Variación relativa de la masa total de sedimentos, en función del índice de riesgo sedimentológico. $R^2 = 2,1 \cdot 10^{-3}$

Incluso se ha observado que los resultados del modelo sedimentológico de TREX resultan muy sensibles al paso de tiempo de cálculo seleccionado, produciendo diferencias apreciables en los resultados y corroborando lo indicado por los propios autores del modelo, ya que se trata de un área de reciente implementación y en una línea de investigación abierta. En cualquier caso los resultados del modelo sedimentológico deben ser interpretados en el contexto de las incertidumbres propias de la estimación de la producción de sedimentos en cuencas y de las incertidumbres en la medición de las concentraciones, propias de la Hidráulica Fluvial.

CONCLUSIONES

Ha sido posible implementar el modelo hidrológico distribuido TREX en la cuenca del río de La Suela para la simulación del impacto hidrosedimentológico de los incendios forestales que frecuentemente azotan la región serrana de la provincia de Córdoba.

Se ha observado un incremento de hasta 16%

en el caudal pico en la crecida post-incendio y hasta un 8.8% en el volumen de escurrimiento total. Estos resultados son acordes a lo publicado en la bibliografía. Se observa que la variación del volumen de escurrimiento depende principalmente de la extensión de la superficie quemada, mientras que la de los picos de crecida se ve influenciada además por la ubicación del incendio en la cuenca y sus propiedades originales como la cubierta vegetal, pendiente y rugosidad.

Los resultados de la modelación sedimentológica no muestran una tendencia clara sobre el efecto que producen los incendios en la cuenca. Esta incertidumbre es atribuible tanto a la ausencia de información de campo contra la que validar los resultados, como a ciertas limitaciones que el propio modelo TREX tendría en relación a la elección del paso de tiempo de cálculo. En cualquier caso los resultados pueden servir como punto de partida para futuras mejores estimaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo quieren manifestar su agradecimiento al Plan Provincial de Manejo del Fuego, al Centro de la Región Semiárida (Instituto Nacional del Agua), al Ministerio de Ciencia y Tecnología de la provincia de Córdoba y a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS

Neary, Ryan, DeBano, eds., "Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water". Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol.4. Ogden, UT: U.S.D.A., Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 p, (2005 revised 2008).

Neary, "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; 123-142. ISBN 978-953-307-288-3, 434 p, (2011).

Dasso, "Cuenca piloto experimental del río de La Suela: caracterización geométrica y topológica de su sistema de drenaje". Informe Técnico, CIHRSA - INA, (1983).

Barbeito & Von Müller, "Estudios de erosión. Cuenca experimental del río de La Suela - Reconocimiento y mapeo de la cubierta vegetal". Reporte técnico.

CIHRSA - INA, Villa Carlos Paz, (1981).

England, Velleux & Julien, "Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed". *Journal of Hydrology*, 347(1):229-241, (2007).

Velleux, England & Julien, "TRES: Spatially Distributed Model to Assess Watershed Contaminant Transport and Fate". *Science of the Total Environment*, 404(1):113-128, (2008).

Stehli, Weber & Jorquera, "Implementación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido de simulación de eventos". *Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As.*, (2012).

Jorquera, Weber & Reyna, "Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada". *Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As.*, (2012).

Chow, Maidment & Mays, "Hidrología aplicada". McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia, (1994).

Stehli, "Modelación matemática distribuida del impacto hidrológico-ambiental de los incendios en la zona serrana de la provincia de Córdoba". *Trabajo final de Ingeniería Civil – U.T.N., F.R.C.*, (2013).

Julien, "Erosion and Sedimentation". *First Paperback Edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK.* 280 p, (1998).

Wischmeier & Smith, "Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning". U.S.D.A., *Agriculture Handbook No. 537*, (1978).

Kilinc y Richardson, "Mechanics of soil erosion

from overland flow generated by simulated rainfall". *Hydrology Paper no. 63, Colorado State University. Fort Collins, Colorado, USA*, (1973).

Weber, Stehli & Jorquera, "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*, (2013a).

Rothermel, "How to predict the spread and intensity of forest and range fires". *General Technical Report Int-143, U.S.D.A., Forest Service*, (1983).

Neteler & Mitasova, "Open Source GIS: A GRASS GIS Approach". Springer, (2008).

Weber, Stehli & Jorquera, "Modelación matemática del impacto hidrológico de incendios en una cuenca de las sierras de Córdoba". *Primer Congreso Iberoamericano de Protección, Gestión, Eficiencia, Reciclado y Reúso del Agua – CIPGER 2013, Córdoba*, (2013b).

Caamaño Nelli y Dasso, "Lluvias de diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias". Editorial Universitat. 222 páginas. ISBN: 987-9406-43-5. Córdoba, Argentina, (2003).

Weber, Jorquera y Stehli, "Simulación de la respuesta hidrológica de una cuenca ante el movimiento de una tormenta". *Mecánica Computacional, Vol. XXXI No. 4*, pp. 579-603. AMCA, Salta. ISSN: 1666-6070, (2012).

Beeson, Martens & Breshears, "Simulating overland flow following wildfire: mapping vulnerability to landscape disturbance". *Hydrological Processes* 15:2917-2930, (2001).