



Escorrentía y producción de sedimentos en encinares incendiados de la Sierra Madre Oriental, México

Alberto Vázquez Alvarado¹

Azalea Judith Ortiz Rodríguez^{1,2}

Álvaro Gerardo Palacio Aponte¹

Carlos Alfonso Muñoz Robles^{1,3*}

¹Facultad de Ciencias Sociales y Humanidades. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.

²Centro de Geociencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

³Instituto de Investigaciones de Zonas Desérticas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.

* Autor por correspondencia; correo-e: carlos.munoz@uaslp.mx

Resumen:

En condiciones de disturbio mínimo, los suelos de los ecosistemas forestales tienen tasas de infiltración altas, y por lo tanto, la magnitud de la escorrentía y la erosión es baja, situación que puede revertirse por el fuego. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de tres niveles de severidad de incendios en la escorrentía y producción de sedimentos, mediante simulación de lluvia en encinares de la Sierra Madre Oriental. Por medio de árboles de regresión se identificaron las características de la superficie del suelo que más influencia tienen sobre ambos procesos. La escorrentía promedio, la escorrentía máxima y la producción de sedimentos fueron mayores en áreas con severidad de incendio alta, que en las áreas con severidad moderada y áreas sin quemar. Las variables de con más repercusión fueron la rugosidad de la superficie del suelo, la pendiente y las coberturas de mantillo y fragmentos de rocas. Se concluye que la severidad de incendios es fundamental para entender los procesos hidrológicos superficiales y de erosión, y que las características de la superficie del suelo modificadas por el fuego, como la cobertura y la microtopografía afectan la escorrentía y producción de sedimentos en áreas quemadas. Los resultados son útiles para identificar áreas prioritarias para la restauración de suelos y definir acciones de mitigación de la erosión.

Palabras clave: Escorrentía, erosión del suelo, incendio forestal, infiltración, severidad del fuego, simulación de lluvia.

Fecha de recepción/Reception date: 12 de octubre de 2017

Fecha de aceptación/Acceptance date: 16 de mayo de 2018

Introducción

En la mayoría de los ecosistemas forestales, el fuego es un factor natural de disturbio y, a la vez, es un componente fundamental que contribuye a su formación estructural (Turner y Dale, 1998). Sin embargo, la influencia humana en la modificación de los regímenes de incendios ha propiciado problemas ambientales como la pérdida de diversidad biológica, la degradación de los suelos y la alteración del ciclo hidrológico (Doerr *et al.*, 2006).

El fuego modifica algunas propiedades del suelo, de las cuales, las físicas en particular, son uno de los factores que favorecen el aumento de la escorrentía y la erosión en bosques y matorrales (Shakesby, 2011). Una de las maneras de evaluar el impacto de un incendio es mediante la estimación de su severidad, misma que indica el grado de cambio en las propiedades del suelo, así como en la pérdida de vegetación y materia orgánica (Keeley, 2009).

Por lo tanto, los cambios en la respuesta hidrológica del suelo ocasionados por la cantidad de calor liberada durante el incendio tienen una relación directa con las diferencias observadas en su severidad (Vieira *et al.*, 2015). Un valor alto se relaciona con el consumo y destrucción parcial o total de la materia orgánica, lo que reduce la cantidad de vegetación y cobertura superficial del suelo (Keeley, 2009). Esta reducción expone al suelo a los efectos de la energía cinética de las gotas de lluvia, disminuye la estabilidad de sus agregados y puede ocasionar hidrofobicidad (Robichaud *et al.*, 2016), lo que incrementa la escorrentía y la erosión. Los efectos de los incendios en el suelo persisten con dependencia de ciertos factores como la capacidad de recuperación de la vegetación, las condiciones meteorológicas

posincendio, la disponibilidad de sedimentos para su transporte y la morfología de las laderas (Vieira *et al.*, 2015).

Los cambios en la infiltración, escorrentía y erosión como consecuencia de los incendios forestales han sido estudiados, en su mayoría, en bosques de pino y en matorrales de Estados Unidos de América y regiones mediterráneas de España y Portugal. En términos generales, los suelos afectados por el fuego reducen su capacidad de infiltración; y por ello, incrementan la escorrentía (Ferreira *et al.*, 2005); así, los suelos de áreas incendiadas son más propensos a la erosión hídrica en las temporadas de lluvias posteriores a una conflagración (Johansen *et al.*, 2001). El aumento de la escorrentía y la erosión como resultado de un incendio se verifican en mayor magnitud durante los primeros años, y en general, los estudios registran que las tasas de erosión tardan entre tres y nueve años en volver a la condición previa al un suceso de ese tipo (Robichaud *et al.*, 2000).

Sin embargo, las propiedades hidrodinámicas del suelo y su relación con la severidad de los incendios no han sido investigadas de manera amplia en otros países y ecosistemas (Shakesby, 2011). Para México, existen pocos trabajos publicados que se relacionan con el tema, y se han enfocado en las relaciones entre quemas prescritas y escorrentía en bosques de pino de Chihuahua (Alanis *et al.*, 2000), así como en los efectos de la severidad de incendios en la hidrofobicidad y estabilidad de agregados del suelo (Jordán *et al.*, 2011). Esta escasez de investigaciones pone de manifiesto el gran vacío en el conocimiento de los impactos de los incendios en los procesos hidrológicos y de erosión en México.

Por esa razón, el objetivo del presente trabajo fue analizar el efecto de la severidad de incendios forestales (severidades moderada y alta, así como áreas sin quemar usadas como referencia) a mediano plazo (<3 años desde el incendio) en la respuesta hidrológica (escorrentía promedio y escorrentía máxima) y de erosión (producción de sedimentos), mediante pruebas de simulación de lluvia con intensidad alta en dos encinares de la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí. La hipótesis nula es que la escorrentía y la producción de sedimentos se modifican en función de la severidad del incendio, y que, a mayor severidad, la escorrentía y la producción de sedimentos aumentan con respecto a las áreas sin quemar.

Materiales y Métodos

Área de estudio y selección de sitios

El área de estudio comprendió la parte central del corredor ecológico de la Sierra Madre Oriental, dentro del estado de San Luis Potosí, correspondiente a los municipios Alaquines y Lagunillas (Figura 1), que se ubican en una zona de alto riesgo de incendios, de acuerdo con la Ley para la Prevención y Manejo Integral e Institucional de los Incendios Forestales para el Estado de San Luis Potosí.

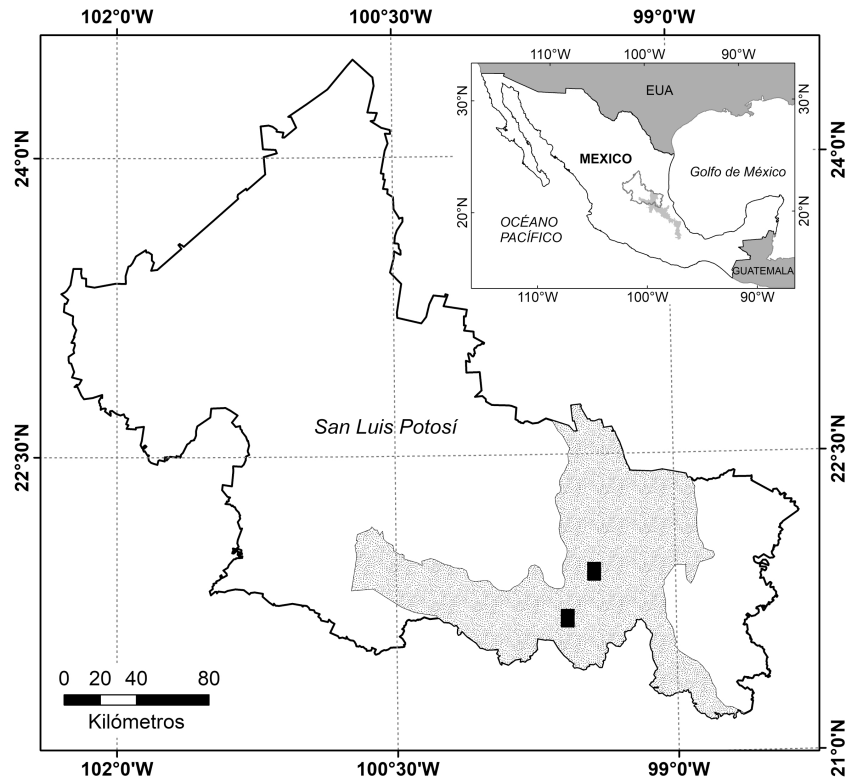


Figura 1. Localización de los sitios de estudio (rectángulos negros) dentro del Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental del estado de San Luis Potosí, México (área sombreada).

La fisiografía está representada en su mayoría por sierras, y en menor proporción por cañones, valles y planicies cuya altitud varía entre 250 y 1 800 m. La conformación geológica de los principales sustratos se constituye por rocas calizas que han dado lugar a geoformas kársticas como consecuencia de la disolución de dichas rocas.

Los climas prevalecientes en el área de estudio, según la clasificación de Köppen modificada por García (1973), son el cálido subhúmedo (A)C(W₀), con precipitación media anual entre los 800 y 1 200 mm y temperatura media anual de 22 a 24 °C; y el clima semicálido subhúmedo (A)C(W₂), con precipitación media anual entre 1 200 y 1 500 mm y temperatura media anual de 18 a 22 °C.

Los principales tipos de vegetación son el bosque de encino, el matorral submontano y las selvas bajas y medianas caducifolias y subcaducifolias. La agricultura y la ganadería se practican de manera extensiva y la caña de azúcar es el primer cultivo en la región (Rzedowski, 2006).

La respuesta hidrológica y la producción de sedimentos se caracterizaron en dos sitios incendiados, con un tiempo desde el incendio menor a tres años hasta el momento de las mediciones. Ambos se localizaron en suelos de tipo Leptosol y con características similares en términos de topografía y vegetación (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características de los sitios de estudio.

Característica	Sitio 1	Sitio 2
Altitud (m)	1 100	1 300
Pendiente (%)	32.0	26.0
Exposición	SE	S
Textura del suelo*	Franco-arcilloso	Arcilloso-grueso
Tipo de vegetación y especie dominante	Bosque de encino (<i>Quercus polymorpha</i> Schltdl. & Cham.)	Bosque de encino (<i>Quercus germana</i> Schltdl. & Cham)
Tiempo desde el incendio (meses)	10	31

*La textura del suelo corresponde al sistema de clasificación de la Sociedad Internacional de Ciencia del Suelo (International Society of Soil Science, 1929).

En cada sitio, se identificaron visualmente áreas con tres condiciones posincendio de acuerdo a lo propuesto por Odion y Hanson (2006): (1) severidad alta, en donde la vegetación leñosa fue quemada en más de 80 %, (2) severidad moderada, donde el fuego afectó entre 40 % y 80 % de la vegetación leñosa, y (3) áreas con evidencia mínima de fuego o sin quemar, donde la vegetación leñosa fue afectada en menos de 10 %.

Estado de la superficie del suelo y simulaciones de lluvia

Se seleccionaron cinco áreas de cada condición posincendio dentro de los sitios para establecer parcelas de simulación de lluvia y evaluar la escorrentía y la producción de sedimentos. Previo a las pruebas de simulación de lluvia, se estimó visualmente la proporción (%) de la cobertura de plantas, mantillo y fragmentos de rocas que cubrían las parcelas, y la suma de todos estos componentes representó la cobertura total. Se les tomó una fotografía y se verificó la cobertura por componente en gabinete, mediante una clasificación digital. La rugosidad de la superficie se midió con una cadena metálica de 3 mm, dispuesta a lo largo de la parcela de simulación (Saleh, 1993) y la pendiente con un nivel portátil marca *Petru*. Se recolectaron dos muestras de suelo superficial (0–5 cm) adyacentes a cada parcela de simulación de lluvia para determinar contenido de humedad, densidad aparente (g cm^{-3}) con el método de la probeta y las fracciones (%) de arena, limo y arcilla por el análisis granulométrico con el método de la pipeta. Todas las simulaciones de lluvia se realizaron en la primavera de 2014, cuando la humedad antecedente del suelo en su capa superior fue $<8\%$ (w/w).

Se utilizaron infiltrómetros de tipo *Cornell*, los cuales son simuladores de lluvia portátiles (*Cornell Sprinkle Infiltrometer*) (Ogden et al., 1997), que se colocan en parcelas circulares de 457.3 cm^2 para aplicar agua de lluvia (Figura 2). Estos son robustos, prácticos y se transportan con facilidad en terrenos de difícil acceso. Tienen un depósito para agua (20 L) con una pipeta que permite el paso de aire durante las pruebas de simulación, que además sirve para definir la intensidad de la lluvia, si se modifica su altura dentro del depósito. El

agua de lluvia sale del simulador por gravedad, y, al pasar por un sistema capilar formado por pequeños tubos en espiral, forma gotas que caen a la parcela delimitada por un anillo metálico insertado dentro del suelo a una profundidad de 7 cm, que tiene una salida para la recolección de la escorrentía. Para los fines del estudio, los simuladores de lluvia se calibraron para aplicar, en promedio, 287.5 mm h^{-1} (D. E. = 57.8 mm h^{-1}) de agua durante 30 min, que representa eventos de lluvia de intensidad alta que producen escorrentía y erosión en la región. Tasas de aplicación de lluvia similares se han usado para producir escorrentía con ese tipo de simuladores (Mohammadshirazi *et al.*, 2016; Santi *et al.*, 2016).



a) Infiltrómetro instalado en el sitio de estudio; b) Detalle del interior de una parcela de medición de escorrentía.

Figura 2. Infiltrómetro Cornell con simulador de lluvia.

Una vez que se produjo escorrentía, se midió su volumen cada minuto hasta el término de la simulación de lluvia. La tasa de escorrentía se graficó con el tiempo de duración del experimento, para generar hidrogramas por cada una de las condiciones posincendio. Se calcularon las tasas de escorrentía promedio y escorrentía máxima (el valor de escorrentía más alto alcanzado durante la simulación de lluvia en mm h^{-1}) para cada parcela de simulación de lluvia. Se recolectaron submuestras de 150 mL de

la escorrentía producida en cada parcela y fueron secadas en el laboratorio de suelos del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la UASLP a 105 °C por 24 h, para determinar la producción total de sedimentos (g m^{-2}).

Análisis de datos

Para detectar diferencias entre curvas de escorrentía, los hidrogramas se agruparon por condición posincendio, y se compararon usando 1 000 pruebas de permutación con la opción *Growthcurve* de la librería *Statmode* disponible en el programa R (R Development Core Team, 2015).

La tasa de escorrentía promedio, la tasa de escorrentía máxima y la producción total de sedimentos en las parcelas de simulación de lluvia se cuantificaron con base en un análisis de varianza no-paramétrico *Kruskal-Wallis* en virtud de que los datos no seguían una distribución normal. Se utilizaron contrastes en pares para identificar diferencias entre condiciones posincendio y los valores de significancia estadística para ambos análisis fueron especificados como $P < 0.05$.

Para identificar las principales características de la superficie del suelo que influyen en la escorrentía promedio y la producción de sedimentos, se integraron todos los datos de las tres condiciones posincendio y se construyeron árboles de regresión con la librería *Rpart* en el programa R.

Este método no-paramétrico fragmentó, de manera recursiva, un espacio multidimensional definido por variables explicativas en subgrupos lo más homogéneos posible para minimizar la varianza. Los datos de la escorrentía promedio y la producción de sedimentos se dividieron en nodos internos con las variables explicativas ordenadas de manera jerarquizada y descendente hacia la izquierda y derecha del nodo principal, y generaron nodos terminales a partir de los umbrales definidos por las variables explicativas.

Resultados

Estado de la superficie del suelo

La cobertura de herbáceas, mantillo y cobertura total fueron mayores en las parcelas sin quemar, en comparación con las de severidad moderada y alta ($P < 0.005$; Cuadro 2). Estas coberturas de herbáceas, mantillo y cobertura total fueron similares en las parcelas de severidades moderada y alta ($P > 0.05$), y la cobertura de rocas lo fue entre las tres condiciones posincendio; al igual que la pendiente en las parcelas de simulación de lluvia ($P > 0.05$); sin embargo, la rugosidad fue mayor en las parcelas sin quemar, seguida en orden descendente de las severidades moderada y alta ($P < 0.001$).

Cuadro 2. Características de la superficie del suelo medidas en parcelas de simulación de lluvia por condición posincendio.

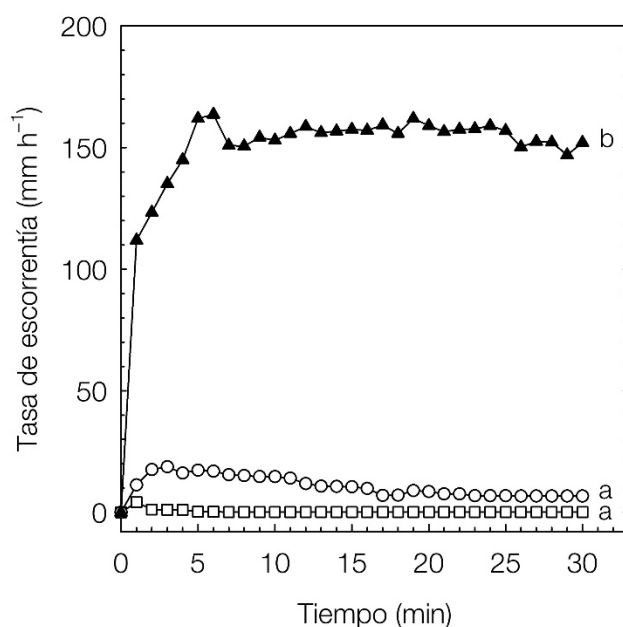
Característica de la superficie del suelo	Condición posincendio		
	Sin quemar	Severidad moderada	Severidad alta
Cobertura de plantas (%)	22.50 (4.22) b	8.00 (4.36) a	3.50 (1.83) a
Cobertura de mantillo (%)	66.00 (4.99) b	27.00 (5.12) a	19.50 (3.34) a
Cobertura de fragmentos de rocas (%)	3.00 (1.53) a	1.50 (1.07) a	4.50 (1.90) a
Cobertura total (%)	91.50 (2.24) b	36.50 (4.6) a	27.50 (4.90) a
Suelo desnudo (%)	8.50 (2.24) a	63.50 (5.27) b	72.50 (4.90) b
Pendiente (%)	16.30 (2.2) a	14.20 (2.5) a	17.10 (4.0) a
Índice de rugosidad (adimensional)	0.59 (0.045) c	0.41 (0.020) b	0.31 (0.014) a
Densidad aparente (g cm^{-3})	0.95 (0.19) a	1.12 (0.30) a	1.19 (0.24) a
Fracción de arenas (%)	30.50 (1.60) a	31.00 (1.95) a	34.10 (1.12) a

Se muestran valores promedio (\pm EE).

Letras distintas dentro de cada fila indican diferencias significativas entre condiciones posincendio ($P < 0.05$). $n = 10$ para cada condición posincendio.

Escorrentía y producción de sedimentos en las condiciones posincendio

En las tres condiciones posincendio, la escorrentía inició en los dos primeros minutos después del inicio de las simulaciones de lluvia. No obstante, las curvas de los hidrogramas en la severidad alta tuvieron valores de escorrentía superiores en comparación con los de la severidad moderada y las parcelas sin quemar (pruebas de permutación; $P < 0.002$) (Figura 3). Las curvas de la severidad moderada y áreas sin quemar fueron similares entre sí ($P > 0.05$). En estas dos últimas condiciones, la escorrentía fue menor y se incrementó de forma lenta durante los 30 min de la duración de las simulaciones de lluvia; mientras que, en la severidad alta la escorrentía aumentó rápidamente en la fase de transición (lapso entre el encharcamiento y la escorrentía constante en el hidrograma) y obtuvo los valores más altos durante los primeros siete minutos.



▲ = Severidad alta; ○ = Severidad moderada; □ = Sin quemar. Letras distintas indican diferencias significativas entre curvas ($P < 0.05$). $n = 10$ para cada condición.

Figura 3. Hidrogramas por condición posincendio.

La escorrentía promedio, la máxima y la producción total de sedimentos fueron mayores en parcelas de severidad alta, en comparación con la severidad moderada y áreas sin quemar ($P < 0.0001$; Cuadro 3). Sin embargo, las diferencias en escorrentía máxima y la producción de sedimentos no fueron significativas entre las parcelas de severidad moderada y en parcelas sin quemar ($P > 0.05$).

Cuadro 3. Escorrentía y producción de sedimentos por condición posincendio.

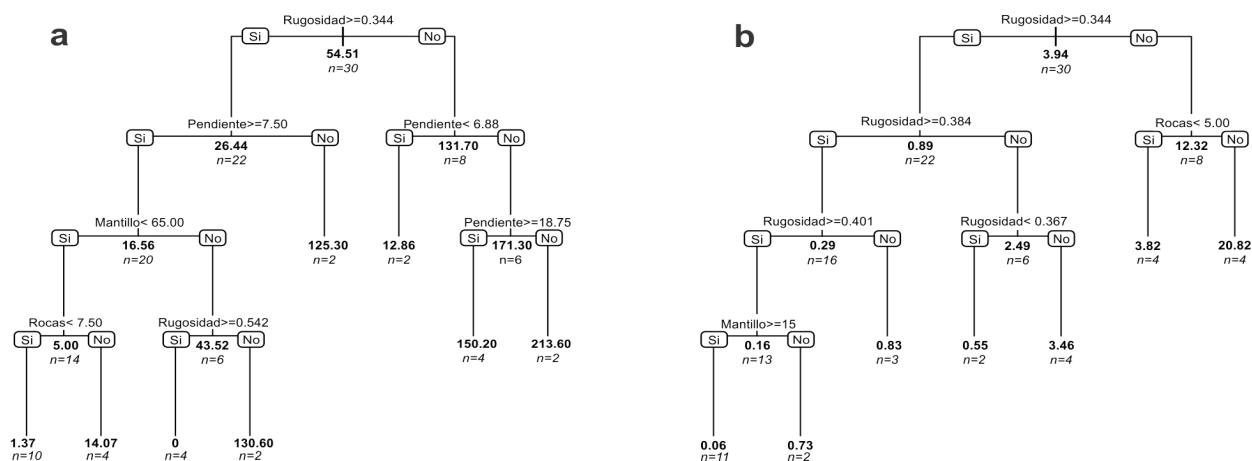
Condición posincendio	Escorrentía promedio (mm h⁻¹)	Escorrentía máxima (mm h⁻¹)	Producción de sedimentos (g m⁻²)
Sin quemar	0.37 (0.25) a	4.20 (3.92) a	0.12 (0.11) a
Severidad moderada	10.87 (6.67) a	22.83 (13.86) a	0.86 (0.64) a
Severidad alta	152.29 (31.00) b	199.83 (31.25) b	10.84 (4.09) b

Se muestran valores promedio (\pm EE); Letras distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre condiciones posincendio ($P < 0.05$). $n = 10$ para cada condición.

Influencia del estado de la superficie del suelo en la escorrentía y la erosión

Las características de la superficie del suelo de las parcelas de simulación de lluvia que más influyeron tanto en la escorrentía promedio, como en la producción de sedimentos fueron el índice de rugosidad, la pendiente, la cobertura de fragmentos de rocas y la cobertura de mantillo. En términos generales, a menor rugosidad, la pendiente y la cobertura de fragmentos de rocas aumentan; en cambio la cobertura de mantillo disminuye; la escorrentía promedio y la producción de sedimentos se incrementaron (figuras 4a y 4b). El valor más

alto de escorrentía promedio se alcanzó cuando el índice de rugosidad fue menor o igual a 0.344 y la pendiente superior a 6.88 %, lo que produce más de 150 mm h⁻¹.



Si el umbral indicado por cada variable explicativa se cumple, se procede a seguir con la partición de la izquierda, de lo contrario, se sigue con la partición del lado derecho.

Figura 4. Árboles de regresión para explicar: (a) La tasa de escorrentía promedio (negritas; mm h⁻¹), y (b) La producción de sedimentos (negritas; g m⁻²).

Por otra parte, en las parcelas donde la escorrentía fue mínima (0 mm h⁻¹), la pendiente fue mayor o igual a 7.50 %, con cobertura de mantillo superior a 65 % y el índice de rugosidad mayor a 0.542. Las condiciones bajo las cuales se produjo más cantidad de sedimento ocurrieron cuando el índice de rugosidad fue menor o igual a 0.344, con una cobertura de fragmentos de rocas mayor a 5 %. Cuando la producción de sedimentos fue mínima, se presentó un índice de rugosidad superior a 0.344 y cobertura de mantillo mayor a 15 %.



Discusión

Variaciones en la superficie del suelo ocasionadas por incendios

Se analizó el efecto de la severidad de los incendios en la escorrentía y en la producción de sedimentos con simulación de lluvia. Se aporta evidencia de que los impactos del fuego en las características de la superficie del suelo y en la escorrentía y producción de sedimentos persisten aun 3 años después de eventos con severidad alta ocurridos en los encinares estudiados. En general, se advierte que la cobertura de mantillo y la rugosidad de la superficie del suelo cambian en función de la severidad del incendio y ambas son las características de la superficie del suelo que más influyen en la producción de escorrentía y sedimentos. Sin embargo, no todos los parámetros considerados fueron diferentes entre las tres condiciones posincendio, lo que destaca la complejidad de la interacción entre el suelo, la intensidad del fuego, la vegetación y el tiempo desde que ocurrió el incendio; lo que da lugar a diferentes severidades que modifican en distinta magnitud los procesos hidrológicos superficiales (Robichaud *et al.*, 2016).

Los bosques sin disturbio tienen tasas de escorrentía y erosión bajas (DeBano, 2000), pero una vez que sucede un incendio, la superficie del suelo cambia. La cobertura vegetal y de mantillo se reduce, hay una menor intercepción de gotas de lluvia y la rugosidad brindada por la cobertura decrece, lo cual impide el encharcamiento del agua, baja la capacidad de infiltración y aumenta la pérdida del suelo (Miller *et al.*, 2013; Pierson *et al.*, 2013). De esta manera, la cobertura del suelo cumple la doble función de mitigar el impacto de las gotas de lluvia y de mantener la rugosidad de la superficie, aspectos de gran importancia para favorecer la infiltración y aminorar la erosión.

La cobertura del suelo es una de las características de la superficie que más se modifica con el fuego, y en este estudio varió de manera consistente entre las condiciones posincendio. Fue menor en áreas incendiadas en comparación con las no quemadas, debido a que la mayoría de las especies herbáceas desaparecen incluso con incendios de baja severidad (Lavoie *et al.*, 2010). Las densidades de plantas son menores en áreas quemadas, incluso dos años después del incendio en bosques de encino (Elliott y Vose, 2010). Por otra parte, el mantillo también fue menor en las áreas quemadas, y existe evidencia de que se reduce de forma inmediata luego de un incendio, y pueden pasar entre dos y tres años para recuperar sus niveles preincendio (Davies *et al.*, 2009; Bates *et al.*, 2011), lo cual concuerda con la información presentada.

Con base en los resultados, la disminución de cobertura en las parcelas de áreas incendiadas deja al suelo desprotegido ante la energía cinética de las gotas de lluvia hasta en 72.5 %, lo que impacta a la escorrentía y producción de sedimentos, incluso después de 31 meses posteriores al incendio.

Uno de los principales hallazgos en este estudio fue la menor rugosidad de la superficie del suelo en áreas incendiadas, con respecto a las no quemadas; la disminución de dicha variable explicó gran parte de la escorrentía promedio y la producción de sedimentos en las parcelas de simulación de lluvia. Los resultados sugieren que el fuego disminuye la rugosidad y deja una superficie más lisa y homogénea debido a la combustión de materiales orgánicos, lo que concuerda con los trabajos de Sankey *et al.* (2010) y Stoof *et al.* (2015); esta disminución de la rugosidad reduce la resistencia de la superficie e incrementa el flujo de agua y en consecuencia la erosión. Ello destaca la importancia de conocer la dinámica de la rugosidad en áreas incendiadas, con el fin de mejorar la predicción de procesos hidrológicos y fundamentar medidas de conservación de los suelos, que pueden enfocarse a incrementar la rugosidad de la superficie; por ejemplo, a través de la revegetación.

La densidad aparente y las fracciones de las partículas del suelo no fueron diferentes entre las tres condiciones posincendio. Estas dos propiedades físicas del suelo son quizás en las que menos cambios se registran como consecuencia directa del fuego. En general, las fracciones de las partículas de suelo no son afectadas (Oswald *et al.*, 1999), lo que si puede suceder, es que después de un incendio, la remoción de las partículas más finas en pendientes muy pronunciadas deriva en el aumento de partículas más gruesas (Mermut *et al.*, 1997; Capulín *et al.*, 2009). Por otra parte, se tiene referencia de que la densidad aparente del suelo se mantiene con valores similares a las condiciones preincendio cuando ocurren conflagraciones de severidad baja y moderada (Stoof *et al.*, 2015), que coincide con los resultados del presente estudio, aunque es posible que luego de incendios frecuentes de baja intensidad, la densidad aparente pueda aumentar debido a que se reduce el porcentaje de macroporos (Boyer y Miller, 1994).

Severidad de los incendios, escorrentía y producción de sedimentos

La escorrentía y la producción de sedimentos fueron mayores por más de un orden de magnitud en las áreas con severidad alta que en las zonas con severidad moderada o sin quemar. En gran medida, los cambios en el suelo por efectos del fuego están asociados al grado de severidad con que el evento se presenta (Gimeno, 2000); es decir, aquellas zonas con un grado de severidad mayor tienen cambios más drásticos en las propiedades hidrodinámicas del suelo, en comparación con aquéllas donde es menor.

La escorrentía y la producción de sedimentos fueron diferentes solo en la severidad alta comparada con la moderada y la condición sin quemar, lo que concuerda con lo citado por Ferreira *et al.* (2005) y Vega *et al.* (2005) para matorrales mediterráneos; y por Robichaud (2000), Johansen *et al.* (2001) y Benavides y MacDonald (2005) en bosques de clima templado. Esto debido a que los incendios de severidad baja o moderada no producen cambios notables en la

estabilidad de los agregados del suelo; no obstante, los incendios de severidad alta pueden modificar dicha propiedad en función del tipo de suelo y la desagregación puede ser una consecuencia de la destrucción de la materia orgánica del suelo (Mataix *et al.*, 2011).

En áreas con severidad alta, la pérdida de cubierta superficial deja al suelo con menor protección ante agentes erosivos y con mayor erosionabilidad (Robichaud *et al.*, 2016). En el caso del presente estudio, se confirmó una proporción más alta de suelo desnudo en las parcelas de simulación de lluvia, que resultó en una mayor escorrentía y erosión, como lo documentado por Vieira *et al.* (2015).

Los valores similares de escorrentía y producción de sedimentos en las condiciones de severidad moderada y sin quemar sugieren que la escorrentía puede ser baja aun en áreas quemadas. Esto se explica por la existencia de un umbral en términos de cobertura, y en ese sentido, en áreas incendiadas se ha observado que mientras la proporción de suelo desnudo no sobrepase 70 %, la escorrentía y la erosión son mínimas (Johansen *et al.*, 2001). Lo que concuerda con los resultados aquí documentados, en los que las parcelas con una proporción de suelo desnudo menor a 63.5 % (condiciones de severidad moderada y sin quemar) produjeron las cantidades más bajas de escorrentía y producción de sedimentos, en comparación con las parcelas de severidad alta, con alrededor de 73 % de suelo desnudo (27 % de cobertura total).

Los árboles de regresión mostraron que la rugosidad, la pendiente y la cobertura de mantillo y fragmentos de rocas desempeñan un papel importante en la escorrentía y la producción de sedimentos. En parcelas con un índice de rugosidad alto, mayor cobertura de mantillo y menor pendiente, que corresponden a severidad moderada o sin quemar, se produce la menor escorrentía y arrastre de sedimentos. Este resultado confirma que la rugosidad se relaciona con la cantidad y tipo de cobertura superficial del suelo, ambas variables disminuyen al ocurrir un incendio y ocasionan el aumento del flujo de agua y el transporte de sedimento (Miller *et al.*, 2013).

Los efectos del fuego en las propiedades físicas, químicas e hidrodinámicas del suelo persisten en periodos cortos o largos, en función de la severidad del incendio, las condiciones de la superficie del suelo y la capacidad de recuperación después del incendio (Pardini *et al.*, 2004). Al respecto, el conocimiento detallado del nivel de daño y su temporalidad (severidad, tiempo desde el incendio) es un factor esencial para cuantificar el impacto de los incendios forestales y proceder con acciones de rehabilitación o restauración (De Santis *et al.*, 2009). En el presente estudio se determinó que solo las áreas con severidad alta producen más escorrentía y erosión, lo que puede usarse como un criterio para priorizar acciones de conservación de suelo y agua.

Es necesario señalar que tanto la escorrentía, como la erosión de suelo dependen del nivel de la escala de análisis (López *et al.*, 2013), y los estudios que existen sobre el tema usan diferentes escalas, aparatos e intensidades de lluvia variables (en caso de usar simuladores de lluvia), no siempre incluyen el nivel de severidad del incendio como una covariable, y las mediciones se realizan en diversas temporalidades posincendio, lo cual dificulta la comparación directa de los resultados (Malvar *et al.*, 2011; Vieira *et al.*, 2015). Esto, aunado a la escasez de investigaciones similares en México, dificulta la posibilidad de contrastar los resultados obtenidos.

A pesar de que la simulación de lluvia tiene limitaciones como herramienta de investigación, en términos de escala, permite comparar las repuestas hidrológicas y de erosión de manera relativa entre diversos tratamientos (severidad de incendios), lo que da un panorama de la dinámica de los procesos hidrológicos superficiales a escala local, y puede servir como base para trabajos a escala de ladera o microcuencas. Para lograrlo, sería recomendable realizar más pruebas de simulación de lluvia y estudiar la interacción de las respuestas hidrológicas con variables que influyen en la escorrentía y la erosión, como la longitud de la pendiente, la variabilidad espacial de las características del suelo y la conectividad hidrológica.

Conclusiones

Los incendios en los encinares estudiados de la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí modifican características de la superficie del suelo, como la cobertura de plantas y la rugosidad. Cambios que, a su vez, afectan la respuesta hidrológica en función de la severidad de los mismos. En áreas con severidad alta, escurren en promedio 152.29 mm h^{-1} , en contraste con 10.87 y 0.37 mm h^{-1} en áreas de severidad moderada y baja, respectivamente. La producción de sedimentos sigue un patrón similar, con 10.84 g m^{-2} con severidad alta, seguido en orden descendente por 0.86 g m^{-2} con severidad moderada y 0.12 g m^{-2} con severidad baja.

La rugosidad de la superficie del suelo, la pendiente y la cobertura de mantillo y fragmentos de rocas son las variables de mayor influencia en la cantidad de escorrentía y erosión. A menor rugosidad, mayor pendiente y baja cobertura de mantillo y de fragmentos de rocas; se espera mayor escorrentía y producción de sedimentos. De manera práctica, estas características de la superficie del suelo pueden integrarse como una variable en modelos que expliquen la escorrentía y la erosión en escalas de ladera y de microcuenca, mientras que la severidad de incendios puede usarse como un indicador para definir áreas prioritarias para restauración de suelos y ecosistemas forestales.

Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por el Programa de Mejoramiento del Profesorado (Proyecto PROMEP/103.5/13/6575), que también otorgó una beca al primer autor. Los autores agradecen a Estefani Ramírez Ramos y a Jesús Moreno Ramírez por el apoyo en el trabajo de campo y a los propietarios de los terrenos, quienes permitieron la realización del estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Alberto Vázquez Alvarado: trabajo de campo y elaboración del manuscrito; Azalea Judith Ortiz Rodríguez: revisión y corrección del manuscrito; Álvaro Gerardo Palacio Aponte: revisión general y aplicación de correcciones al manuscrito; Carlos Alfonso Muñoz Robles: trabajo de campo y elaboración del manuscrito.

Referencias

- Alanis M., H., J. Návar and P. A. Domínguez. 2000. The effect of prescribed burning on surface runoff in a pine forest stand of Chihuahua, Mexico. *Forest Ecology and Management* 137: 199-207.
- Bates, J. D., K. W. Davies and R. N. Sharp. 2011. Shrub-steppe early succession following juniper cutting and prescribed fire. *Environmental Management* 47(3): 468-481.
- Benavides S., J. and L. H. MacDonald. 2005. Measurement and prediction of post-fire erosion at the hillslope. *International Journal of Wildland Fire* 14(4): 457-474.
- Boyer, W. D. and J. H. Miller. 1994. Effect of burning and brush treatments and soil physical properties in young longleaf pine stands. *Forest Ecology and Management* 70(1-3): 311-318.
- Capulín G., J., L. Mohedano C. y R. Razo Z. 2009. Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio. *Terra Latinoamericana* 28: 79-87.
- Davies, K. W., J. D. Bates and J. J. James. 2009. Microsite and herbaceous vegetation heterogeneity after burning. *Oecologia* 159(3): 597-606.

- De Santis, A., E. Chuvieco and P. J. Vaughan. 2009. Short-term assessment of burn severity using the inversion PRPSPECT and GeoSail models. *Remote Sensing of Environment* 113(1): 126-136.
- DeBano, L. F. 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology* 231-232: 4-32.
- Doerr, S. H., R. A. Shakesby, W. H. Blake, C. J. Chafer, G. S. Humphreys and P. J. Wallbrink. 2006. Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology* 319(1-4): 295-311.
- Elliott, K. J. and J. M. Vose. 2010. Short-term effects of prescribed fire on mixed oak forests in the southern Appalachians: vegetation response. *The Journal of the Torrey Botanical Society* 137(1): 49-66.
- Ferreira A., J. D., C. O. A. Coelho, A. K. Boulet, G. Leighton-Boyce, J. J. Keizer and C. J. Ritsema. 2005. Influence of burning intensity on water repellency and hydrological processes at forest and shrub sites in Portugal. *Australian Journal of Soil Research* 43(3):327-336.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F., México. 252 p.
- Gimeno, E. 2000. Changes in organic matter, nitrogen, phosphorous and cations in soil as a result of fire and water erosion in a mediterranean landscape. *European Journal of Soil Science* 51(2): 201-210.
- International Society of Soil Science. 1929. Minutes of the first commission meetings, International Congress of Soil Science. Transactions of the First Commission of the International Society of Soil Science 4: 215-220.
- Johansen, M. P., T. E. Hakonson and D. D. Breshears. 2001. Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forests with shrublands and grasslands. *Hydrological Processes* 15(15): 2953-2965.
- Jordán, A., L. M. Zavala, J. Mataix, A. L. Nava and N. Alanís. 2011. Effect of fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils. *Catena* 84: 136-147.
- Keeley, J. E. 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* 18(1): 116-126.

- Lavoie, M., G. Starr, M. C. Mack, T. A. Martin and H. L. Gholz. 2010. Effects of a Prescribed Fire on Understory Vegetation, Carbon Pools, and Soil Nutrients in a Longleaf Pine-Slash Pine Forest in Florida. *Natural Areas Journal* 30(1): 82-94.
- López V., M., J. Poesen, A. Navas and L. Gaspar. 2013. Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees. *Catena* 102: 62-73.
- Malvar, M. C., S. A. Prats, J. P. Nunes and J. J. Keizer. 2011. Post-fire overland flow generation and inter-rill erosion under simulated rainfall in two eucalypt stands in north-central Portugal. *Environmental Research* 111(2): 222-236.
- Mataix S., J., A. Cerdà, V. Arcenegui, A. Jordán and L. M. Zavala. 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth Science Reviews* 109(1-2): 44-60.
- Mermut, A. R., S. H. Luk, M. Romkens and J. Poesen. 1997. Soil loss by splash and wash during rainfall from two loess soils. *Geoderma* 75: 203-214.
- Miller, R. F., J. C. Chambers, D. A. Pyke, F. B. Pierson and J. C. Williams. 2013. A review of fire effects on vegetation and soils in the Great Basin region: response and site characteristics, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-308. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO, USA. 136 p.
- Mohammadshirazi, F., V. K. Brown, J. L. Heitman and R. A. McLaughlin. 2016. Effects of tillage and compost amendment on infiltration in compacted soils. *Journal of Soil and Water Conservation* 71(6): 443-449.
- Odion, D. C. and C. T. Hanson. 2006. Fire severity in conifer forests of the Sierra Nevada, California. *Ecosystems* 9(7): 1177-1189.
- Ogden, C. B., H. M. van Es and R. R. Schindelbeck. 1997. Miniature rain simulator for measurement of infiltration and runoff. *Soil Science Society of America Journal* 61(4): 1041-1043.
- Oswald, B. P., D. Davenport and L. Neuenschwander. 1999. Effects of slash pile burning on the physical and chemical soil properties of Vassar soils. *Journal of Sustainable Forestry* 8: 75-86.
- Pardini, G., M. Gispert and G. Dunjó. 2004. Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain. *Science of the Total Environment* 328(1-3): 237-246.

- Pierson, F. B., C. J. Williams, S. P. Hardegree, P. E. Clark, P. R. Kormos and O. Z. Al-Hamdan. 2013. Hydrologic and erosion responses of sagebrush steppe following juniper encroachment, wildfire, and tree-cutting. *Rangeland Ecology and Management* 66(3): 274-289.
- R Development Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org> (2 de febrero de 2015).
- 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.
- Robichaud, P. R., J. L. Beyers and D. G. Neary. 2000. Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments, General Technical Report RMRS-GTR-63, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO, USA. 85 p.
- Robichaud, P. R., J. W. Wagenbrenner, F. B. Pierson, K. E. Spaeth, L. E. Ashmun and C. A. Moffet. 2016. Infiltration and interrill erosion rates after a wildfire in western Montana, USA. *Catena* 142: 77-88.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D. F., México. 505 p.
- Saleh, A. 1993. Soil roughness measurement: chain method. *Journal of Soil and Water Conservation* 48(6): 527-529.
- Sankey, J. B., J. U. H. Eitel, N. F. Glenn, M. J. Germino and L. A. Vierling. 2010. Quantifying relationships of burning, roughness, and potential dust emission with laser altimetry of soil surfaces at submeter scales. *Geomorphology* 135(1-2): 181-190.
- Santi, L. A., J. Melo Damian, M. Roberto Cherubin, T. Jorge, C. Amado, M. Tonini Eitelwein, A. Luis Vian and W. F. Bejarano Herrera. 2016. Soil physical and hydraulic changes in different yielding zones under no-tillage in Brazil. *African Journal of Agricultural Research and Development* 11(15): 1326-1335.
- Shakesby, R. A. 2011. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. *Earth Science Reviews* 105(3-4): 71-100.
- Stoof, C. R., A. J. D. Ferreira, W. Mol, J. Van den Berg, A. De Kort, S. Drooger, E. C. Slingerland, A. U. Mansholt, C. S. S. Ferreira and C. J. Ritsema. 2015. Soil surface changes increase runoff and erosion risk after a low-moderate severity fire. *Geoderma* 239-240: 58-67.

Turner, M. G. and V. H. Dale. 1998. Comparing large, infrequent disturbances: what have we learned? *Ecosystems* 1(6): 493–496.

Vega J., A., C. Fernández and T. Fonturbel. 2005. Throughfall, runoff and soil erosion after prescribed burning in gorse shrubland in Galicia (NW Spain). *Land Degradation & Development* 16(1): 37-51.

Vieira, D. C. S., C. Fernández, J. A. Vega and J. J. Keizer. 2015. Does soil burn severity affect the post-fire runoff and interrill erosion response? A review based on meta-analysis of field rainfall simulation data. *Journal of Hydrology* 523: 452-464.