

The book cover features a photograph of a forest fire. The lower half of the cover is a dark, textured grey, while the upper half is a lighter, textured grey. The photograph shows a forest with several trees, some of which are charred and blackened. The ground is covered in ash and charred debris. The text is printed in white on the dark background.

IMPACTO AMBIENTAL DE  
**INCENDIOS FORESTALES**

COORDINADOR:  
**José Germán Flores Garnica**

# IMPACTO AMBIENTAL DE INCENDIOS FORESTALES

COORDINADOR:  
José Germán Flores Garnica



### Grupo Mundi-Prensa

**Mundi-Prensa México, S. A. de C. V.**  
Río Pánuco 141 - Col. Cuauhtémoc  
06500 México, D. F.  
Tel. 00 525 55 533 36 38 - Fax 00 525 55 514 67 99  
E-mail: mundiprensa@mundiprensa.com.mx

**Mundi-Prensa Libros, S. A.**  
Castelló, 37 - 28001 Madrid  
Tel. +34 914 36 37 00 - Fax +34 915 75 39 98  
E-mail: libreria@mundiprensa.es

**Mundi-Prensa Barcelona  
Editorial Aedos, S. A.**  
Aptdo. de Correos 33388 - 08080 Barcelona  
Tel. +34 629 26 23 28 - Fax +34 933 06 34 99  
E-mail: barcelona@mundiprensa.es

#### TÍTULO DE LA OBRA:

Impacto ambiental de incendios forestales

#### EDICIÓN ORIGINAL PUBLICADA POR:

Mundi Prensa México, S. A. de C. V.  
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)  
Colegio de Postgraduados

#### COORDINADOR:

José Germán Flores Garnica  
1a. Edición, 2009

#### REVISIÓN DE ESTILO:

Paulina Vergara

#### DISEÑO DE CUBIERTA:

Rogelio Covarrubias Romo

#### DISEÑO Y FORMACIÓN:

Mario Alejandro Rojas Sánchez

#### PROPIEDAD DE

Mundi Prensa México, S. A. de C. V.  
Río Pánuco, 141, Col. Cuauhtémoc  
06500 México, D. F.

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción, total o parcial de este libro ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, registro u otros medios sin el permiso previo y por escrito de los titulares del copyright.

©Mundi Prensas México, S. A. de C. V., 2009

ISBN 978-607-7699-03-3

Impreso en China - Printed in China  
Everest Printing Co. Ltd.  
334 Huanzhi Road South,  
Nansha, Guangdong, China.  
Julio 2009 - 1500 ejemplares

# Relación de autores

**Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,  
Agrícolas y Pecuarias (México)**

José Germán Flores Garnica  
Juan de Dios Benavides Solorio  
David Arturo Moreno González  
Xavier García Cuevas  
Bartolo Rodríguez S.  
Javier Chavelas Polito  
Hector Eligio Alanís Morales  
Alvaro Orlando Gutiérrez Baeza  
Ramon Cabrera Orozco  
Miriam Meléndez Gómez  
Oscar G. Rosas Aceves

**Universidad Autónoma Chapingo (México)**

Dante Arturo Rodríguez Trejo

**Universidad de Guadalajara (México)**

Eduardo Santana Castellón  
Enrique J. Jardel Pelaez  
Gallina Petrovna Zaitseva  
Jorge E. Morfín Ríos  
Faviola Castillo Navarro

**Universidad Autónoma de Guadalajara (México)**

Laura Patricia Gomez Murillo

**Universidad Nacional Autónoma de México (México)**

Lourdes Villers Ruiz  
Ariadna Flores Rodríguez  
Lucia Almeida Leñero

**Universidad Autónoma de Nuevo León (México)**

José de Jesús Navar Cháidez

**University of Washington (USA)**

Ernesto Alvarado

**Colorado State University (USA)**

Lee MacDonald

**Universitat de Girona (España)**

Pere Pons Ferran

**Estación Experimental Forestal Viñales (Cuba)**

Isyoel Urrutia Hernández  
Beatriz Rodríguez Alfaro  
Yosvany Fleitas Camacho  
Yusbel Rodríguez Roque

**Estación Experimental Forestal Camagüey (Cuba)**

José A. Hernández Abreu

**Instituto de Investigaciones Forestales (Cuba)**

Yurisley García Reyes

# Contenido

Prólogo .....	ix
---------------	----

Introducción .....	xi
--------------------	----

## Caracterización de incendios forestales

Aspectos generales de los incendios forestales .....	3
Ecología del fuego y su impacto en los ecosistemas forestales .....	13
Variación espacial del comportamiento del fuego con base en el mapeo de combustibles forestales .....	23

## Impacto en la biodiversidad

El papel del fuego en la dinámica de los ecosistemas forestales .....	39
Modelaje espacial del impacto de incendios forestales en el potencial de la biodiversidad .....	49
Impacto de los incendios forestales en las comunidades vegetales de la cuenca del Río Magdalena, Distrito Federal .....	63
Regímenes de fuego en ecosistemas forestales de México .....	73

## Impacto en el arbolado

El fuego y sus efectos en los árboles .....	103
Impacto del material combustible en plantaciones de pino .....	121
Evaluación post-incendio del arbolado en un bosque templado .....	127

## Impacto en la regeneración

Efecto del fuego en la regeneración natural de ecosistemas forestales .....	141
Regeneración natural de sitios afectados por incendios forestales en un ecosistema tropical .....	153
Variación espacial de la regeneración natural en un bosque impactado por incendios forestales .....	165

### **Impacto en la fauna**

Efecto del fuego sobre la fauna en ecosistemas forestales .....	181
Manejo del fuego y conservación de la fauna silvestre en ecosistemas forestales de montaña .....	195

### **Impacto en el suelo**

Impacto en el suelo de dos tipos de quemas controladas en un rodal de bosque templado .....	225
Efecto del fuego sobre algunos microorganismos del suelo en una plantación forestal .....	233

### **Impacto en el agua**

Escurrimiento y erosión después de dos incendios forestales y una quema prescrita utilizando un simulador de lluvia .....	243
Impacto de una quema controlada en la infiltración y el escurrimiento superficial en un bosque de pino .....	265

### **Impacto en el aire**

Efectos del fuego sobre la calidad del aire .....	277
---	-----

### **Impacto en el paisaje**

Alteraciones del paisaje debido a los incendios forestales .....	293
--	-----

### **Impacto en la salud y bienestar del hombre**

Incendios forestales y salud humana .....	305
---	-----

### **Manejo del fuego**

Quemas controladas como herramienta alternativa en el manejo forestal integral .....	317
--	-----

## Prólogo

**E**l tema de los incendios forestales concierne a diferentes ramas del conocimiento humano, lo que dificulta entender este fenómeno si sólo se consideran aspectos aislados. En este libro varios autores, cada uno con experiencia en el trabajo o en el estudio de diversas perspectivas tendientes al manejo de los incendios forestales presentan sus experiencias. Experiencias que tienen que ver tanto con aspectos científicos como operativos, normativos y de educación; lo cual permite que el libro sea útil no solo para usuarios de varias disciplinas, sino también para otros con diferentes niveles de entendimiento del tema. Lo anterior hace que este libro sea una obra única. Y aunque no se pretende cubrir todos los casos posibles, sí se intenta presentar un panorama completo; con la ventaja de que se particulariza con ejemplos reales en cada uno de los temas tratados: impacto en el suelo, aire, fauna, vegetación, etcétera.

La estructura y contenido de esta obra tienen como propósito ser útiles para un público amplio. No solo para expertos, sino también para personas

con escasos, o nulos, conocimientos sobre el tema. Para los que nos dedicamos a estudiar los incendios forestales ha sido difícil encontrar, en una sola publicación, la documentación del impacto de los incendios en los diferentes elementos de los ecosistemas forestales, por lo que la pretensión de este libro es intentar cubrir dicha carencia; esperando que propicie un entendimiento más claro del papel del fuego en las comunidades vegetales.

Es importante para mí agradecer la disposición y entusiasmo de cada uno de los coautores para compartir su experiencia y conocimientos; así como su paciencia y empeño para la publicación de esta obra. También agradezco a todas aquellas personas que colaboraron en el proceso editorial de este libro.

Finalmente, invito a los lectores a compartir sus opiniones y comentarios sobre este libro, con la intención de que pueda ser ampliado y mejorado con más ejemplos de experiencias en condiciones particulares de ecosistemas forestales. Enviar correos a: flores.german@inifap.gob.mx. De antemano me disculpo por cualquier error u omisión cometidos.

DR. J. GERMÁN FLORES GARNICA

# Capítulo 18

## Escurrimiento y erosión después de dos incendios forestales y una quema prescrita utilizando un simulador de lluvia

Juan de Dios Benavides Solorio, Lee MacDonald, J. Germán Flores Garnica

### RESUMEN

Los incendios forestales en las montañas Rocosas de Colorado (USA) son un motivo de preocupación continua porque pueden presentar impresionantes incrementos en escurrimiento y erosión. Por esta razón, es necesario comprender los procesos y causas de estos dramáticos incrementos con la finalidad de predecir los futuros efectos de los incendios, estimar el escurrimiento y la erosión después de quemas prescritas y establecer prácticas efectivas para rehabilitar áreas incendiadas. El objetivo de este trabajo fue determinar si el escurrimiento y la producción de sedimentos están relacionados con las variables del sitio como severidad del fuego, porcentaje de cobertura, repelencia del suelo al agua, humedad del suelo tiempo después del incendio y la pendiente. Para eliminar la variabilidad natural de los eventos normales de lluvia, se aplicó una lluvia artificial de aproximadamente  $80 \text{ mm h}^{-1}$  sobre 26 parcelas de  $1 \text{ m}^2$  en el verano y el otoño del año 2000. Las parcelas fueron distribuidas en tres incendios: a) Un incendio forestal descontrolado que se presentó en junio del 2000, b) Una quema prescrita de noviembre de 1999 y c) Un incendio forestal descontrolado en julio de 1994. En 23 de las 26 parcelas, la tasa de escurrimiento relacionada con la lluvia excedió el 50% y casi la totalidad de los sitios tuvieron una fuerte repelencia al agua, provocada por los incendios. De esta forma, las tasas de escurrimiento fueron solamente entre un 15% y un 30% mayor en severidades altas en ambos incendios, que aquellas producidas por áreas sin quema o de severidad baja. Las dos parcelas de severidad alta del incendio de 1994, tuvieron bajas tasas de escurrimiento, debido probablemente, a los altos contenidos de humedad, al tiempo de la simulación y a la reducción de la repelencia al agua. La producción de sedimentos de los sitios de severidad alta en los dos

incendios más recientes, fue de un 16% a un 33% más grande que en los sitios no quemados o de severidad baja. El porcentaje de suelo desnudo explica el 78% de la variabilidad en la producción de sedimentos y la producción de sedimentos de las parcelas del incendio de 1994, fue consistente con la recuperación observada del porcentaje de cobertura.

**Palabras clave:** Montañas Rocosas, repelencia al agua, severidad de incendios, suelos forestales, sedimentos.

### INTRODUCCIÓN

Los terrenos forestales sin disturbio son notables por sus altas tasas de infiltración, la disminución del escurrimiento sobre el suelo y las bajas tasas de erosión (DeBano, 1981; DeBano, 2000a; Hewlett, 1982). Teniendo como principio que los bosques crecen en áreas generalmente húmedas, los terrenos forestales son el principal origen de agua de muy buena calidad en muchas regiones, incluido el estado de Colorado, USA (Dissmeyer, 2000).

El fuego es un disturbio común en los terrenos forestales; los incendios forestales que provocan efectos severos altos son de particular importancia porque pueden producir cambios drásticos en el escurrimiento y erosión, procesos que generan a su vez, cambios adversos en los recursos acuáticos. Varios estudios han demostrado que el escurrimiento y las tasas de erosión después de los incendios forestales, se incrementan de unos  $\text{kg/ha}$  hasta cientos de  $\text{ton/ha}$ , lo que representa 3 órdenes de magnitud mayor



(Hendricks y Johnson, 1944; Helvey, 1980; Morris y Moses, 1987; DeBano *et al.*, 1996; DeBano 2000b; Robichaud *et al.*, 2000).

Los efectos del fuego en el escurrimiento y la erosión son de gran importancia en las montañas de Colorado porque el aumento de las densidades de pino y la proximidad de las especies *Pinus ponderosa* y *P. contorta* en las áreas urbanas han incrementado el riesgo de los incendios forestales. Lo anterior implica un gran potencial de ocurrencia de inundaciones severas, con grandes cantidades de erosión (Agnew *et al.*, 1997); por ejemplo, el incendio de Búfalo Creek de 1996 en esas montañas, es particularmente notable porque las tormentas de gran intensidad causaron grandes avenidas en pequeñas cuencas que incrementaron el escurrimiento de menos de  $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  hasta un impresionante  $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Jarrett, 2000). La suma de los procesos erosivos como el salpicamiento, la erosión laminar, la erosión en canalillos y las pequeñas cárcavas produjeron enormes cantidades de sedimento y un transporte de aguas abajo que dañó los taludes del Río South Platte y redujo en un tercio, la capacidad de la presa Strontia Springs. El incendio originó cambios notables en el escurrimiento y la erosión, provocando la muerte por avenidas de dos personas. Además, se destruyó el camino principal en varias ocasiones. Las altas concentraciones de ceniza y sedimento en el escurrimiento, producto de las áreas quemadas, causaron severos problemas a las plantas de tratamientos que abastecen a la ciudad de Denver, Colorado (Agnew *et al.*, 1997).

La mayor densidad observada en el presente en las montañas del norte de Colorado, en comparación con las del periodo de colonización (Veblen y Lorenz, 1991; Mast, 1993) indica que incendios similares al observado en 1996, se presentarán con certeza en el futuro. Los esfuerzos para detener los incrementos en el escurrimiento y la erosión después de los incendios forestales, son ampliamente reconocidos pero falta una comprensión básica de los procesos físicos, que ayudaría a designar prácticas efectivas de rehabilitación de áreas incendiadas (Robichaud *et al.*, 2000). Las quemas prescritas están siendo usadas para reducir el riesgo de los incendios forestales pero aún existe poca información sobre los efectos de los incendios forestales y las quemas prescritas que muestren cam-

bios en los escurrimientos y en las tasas de erosión en las montañas del norte de Colorado.

Los grandes cambios observados en el escurrimiento después de los incendios forestales son generalmente atribuidos a la presencia de una capa repelente al agua, que se encuentra en la superficie o cerca de la superficie y restringe la infiltración e induce el escurrimiento superficial (DeBano *et al.*, 1970; Scott y Van Wyk, 1990; Shahlaee *et al.*, 1991; Prosser y Williams, 1998; Inbar *et al.*, 1998). La intensidad de esta capa incrementa cuando la intensidad del fuego es más alta, debido al calentamiento del suelo y al consumo de la materia orgánica y de la materia en descomposición que libera hidrocarburos (Tiedeman *et al.*, 1979; DeBano, 2000b). También, se considera que muchos suelos forestales son naturalmente repelentes al agua (DeBano, 1981; Barret y Slaymaker, 1989; Burch *et al.*, 1989); los componentes hidrofóbicos encontrados en el suelo no están lo suficientemente concentrados en toda la superficie para restringir la infiltración sobre la totalidad de una ladera.

El cambio del escurrimiento sub-superficial al escurrimiento superficial, después de los incendios forestales, se facilita también por la pérdida de la materia orgánica y de la materia en descomposición que protegen al suelo del potencial salpicamiento que causa un taponamiento de los poros (DeBano, 2000b). En los incendios de severidad alta, la materia orgánica de la superficie del suelo se consume; como resultado, puede ocurrir una pérdida de la estabilidad de los agregados que pueden reducir el número de poros grandes que provocan a su vez, una reducción de las tasas de infiltración.

La pérdida de la capa protectora del suelo (materia orgánica y materia en descomposición) y los cambios en la superficie del suelo pueden propiciar grandes incrementos en la erosión del suelo. Después de la ocurrencia de un incendio de severidad alta, la superficie del suelo mineral es expuesta a la erosión por salpicamiento (Inbar *et al.*, 1998), y la reducción en las tasas de infiltración puede producir grandes aumentos en la erosión laminar y en los canalillos. En el caso de las montañas del Colorado Front Range, Delp (1968), observó relativamente poca erosión después de un incendio forestal pero menciona la necesidad de ampliar la base de datos

sobre tasas de erosión después de lluvias de alta intensidad. Morris y Moses (1987), encontraron que las tasas de flujo de sedimentos en laderas después de los incendios tienden a incrementarse desde pequeñas cantidades hasta 242 g/cm de lluvia (3 órdenes de magnitud mayor) en bosques de pino ponderosa. Ellos atribuyeron los incrementos a la reducción del follaje arbóreo y a la reducción de la cobertura del suelo, así como a la formación de una capa repelente al suelo que se encontraba muy cerca de la superficie. Después del incendio de Bufalo Creek, Agnew *et al.* (1997) señalaron que la falta de datos y de una comprensión de los procesos, dificulta determinar cuál sería el potencial catastrófico de la presencia de grandes avenidas y de erosión. MacDonald *et al.* (2000), desarrollaron un modelo espacial para predecir la erosión después de los incendios forestales en el oeste de Colorado, pero la confiabilidad de este modelo está limitada por la falta de datos para calibrarlo y validarlo. De forma más general, DeBano *et al.* (1996), señalaron la falta de datos sobre los efectos de los incendios en escurrimientos y calidad de agua en los bosques de pino ponderosa.

El efecto de los incendios y las quemas prescritas en los recursos acuáticos dependerá también, del tiempo que tarde el ecosistema en regresar a las condiciones anteriores al disturbio (MacDonald, 2000). La mayoría de los trabajos revisados indican que los incrementos significativos en escurrimiento y erosión se presentan entre el primer y segundo año después de la quema (Helvey, 1980; Robichaud y Waldrop, 1994; Inbar *et al.*, 1998) aunque este patrón general puede ser alterado de acuerdo al tiempo en que se presenten tormentas de alta intensidad (Helvey, 1980). Casi la totalidad de los estudios muestran que las tasas de erosión del suelo regresan a los niveles pre-disturbio, entre 3 y 9 años después del incendio (Robichaud *et al.*, 2000; Benavides y MacDonald, 2005). En las montañas del norte de Colorado, varios estudios han mostrado que la erosión del suelo es similar a las condiciones sin disturbio de 3 a 4 años después de la quema (Morris y Moses, 1987; Martin y Moody, 2001; Benavides y MacDonald, 2005) pero existe muy poca información de datos de tasas de erosión inmediatamente después de los incendios forestales.

Otra limitante en la medición de los cambios en el escurrimiento y la erosión después del incendio, es la variación temporal y espacial de la precipitación; no se sabe de antemano cuándo ocurrirá un evento ni cuál será la intensidad de la tormenta. En las montañas del norte de Colorado, las tormentas convectivas de alta intensidad del verano, generan los grandes picos y las altas tasas de erosión (Morris y Moses, 1987; Benavides y MacDonald, 2005) aunque también tienen la más alta variabilidad temporal y espacial.

El uso de simuladores de lluvia ayuda a evitar los problemas en la medición y comparación de la precipitación en áreas sujetas a eventos de lluvia de diferentes características (Meyer, 1988). La aplicación de cantidades de lluvia similares, permite comparar directamente los resultados de escurrimiento y erosión de diferentes sitios y evaluar estadísticamente los efectos de las características del sitio con la producción de agua y sedimento. Aunque la extrapolación de los datos del simulador de lluvia a grandes áreas y con diferentes tipos de lluvias es difícil, las simulaciones de lluvia son las más efectivas y predecibles para comparar el escurrimiento y la producción de sedimentos entre sitios (Meyer, 1988).

En consecuencia, los objetivos del presente trabajo fueron: 1) Comparar las tasas de escurrimiento y de producción de sedimentos de áreas quemadas en las montañas del norte de Colorado y 2) Relacionar las variables dependientes del escurrimiento y la producción de sedimentos con las variables independientes del sitio como severidad del fuego, porcentaje de cobertura del suelo, repelencia al agua, humedad del suelo, tiempo después del incendio y la pendiente. Solamente se utilizó un simulador para estandarizar los eventos de una lluvia para cada parcela. El propósito general fue medir y entender los efectos del fuego —en casos de incendios forestales y quemas prescritas— sobre el escurrimiento y la erosión en bosques de *Pinus ponderosa* (pino ponderosa) y *Pinus contorta* (pino lodgepole) en las montañas del norte de Colorado. Esta información es necesaria para predecir los cambios provocados por el fuego en escurrimiento y erosión, con la finalidad de asignar prioridades para tratamientos de combustibles y diseñar programas efectivos de rehabilitación de áreas incendiadas.

## MÉTODOS

### Áreas de estudio

Las áreas de estudio están localizadas en tres zonas diferentes donde ocurrieron incendios en el norte del estado de Colorado en las Montañas Rocosas (Figura 1). Los tres incendios fueron en bosques susceptibles de incendios en elevaciones medias dominadas por bosques de pino ponderosa y pino lodgepole (Cuadro 1). Los suelos son generalmente, clasificados como migajón arenoso, y los rangos de tipo de suelo de la clasificación americana van del Typic Argicryolls a Ustic Haplocryalfs (Nelly, 2001).

El incendio Bobcat fue descontrolado; quemó un total de 4300 ha en junio del 2000. La mayor parte del área quemada tenía vegetación de pino ponderosa, aunque se tenían pequeños rodales de pino lodgepole y de douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*). La quema prescrita de Lower Flowers fue realizada en noviembre de 1999 y contó con una superficie de 300 ha. El área quemada muestra vegetación de pino ponderosa con pequeños rodales de pino lodgepole. La severidad de la quema en la mayor parte de la superficie, fue de moderada a baja, aunque hubo pequeñas áreas de severidad alta. El incendio Hourglass fue el tercero en este estudio y también se descontroló; se presentó en julio de 1994 y la zona de la ocurrencia se encuentra a mayor elevación que los demás por lo que el pino lodgepole fue el dominante (Cuadro 1). Este incendio quemó 516 ha y la mayor parte del área fue clasificada como de severidad alta (Omi, 1994).

Las parcelas establecidas en cada incendio fueron estratificadas por la severidad del fuego ya que ésta es la principal variable que controla el escurrimiento y la erosión después de los incendios forestales (DeBano *et al.*, 1996). La severidad del incendio fue clasificada de acuerdo con el criterio desarrollado por Wells *et al.* (1979) y utilizada por el Servicio Forestal de los Estados Unidos (USDA Forest Service, 1995). En áreas con alta severidad, la totalidad de la capa orgánica fue consumida por el fuego, asimismo, fue visible la alteración de la estructura y el color de la capa superficial del suelo mineral. En una severidad moderada la hojarasca y la materia orgánica parcialmente descompuesta, son totalmente consumidas o carbonizadas pero la capa inferior del suelo mineral no se observa visiblemente alterada. En áreas con severidad baja la hojarasca y la materia orgánica parcialmente descompuesta, son chamuscadas, parcialmente quemadas o no quemadas y no se observa ninguna alteración en la capa inferior del suelo mineral.

### Simulación de lluvia

Se realizaron un total de 26 simulaciones en parcelas pequeñas de 1 m<sup>2</sup> en áreas con bosque de pino (Cuadros 1 y 2). Las parcelas fueron estratificadas en tres severidades diferentes (alta, moderada y baja o sin quema). La mayor parte de las simulaciones se realizaron en los dos incendios más recientes y sobre todo, en las áreas de severidad alta porque son estas áreas las de mayor importancia y posiblemente, tengan la mayor variabilidad (Cuadro 1). La mayor

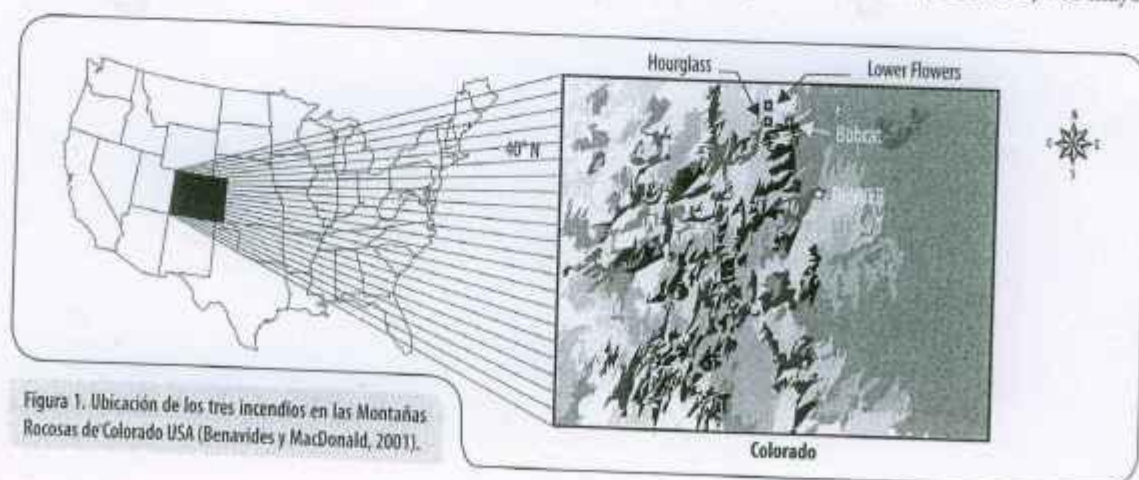


Figura 1. Ubicación de los tres incendios en las Montañas Rocosas de Colorado USA (Benavides y MacDonald, 2001).

Cuadro 1. Características de los incendios y simulaciones por severidad. (Benavides y MacDonald, 2001).

Nombre incendio	Tipo	Fecha incendio	Área (ha)	Vegetación de plno	Altitud (m)	Número de simulaciones			
						Severidad			
						alta	mod.	Baja sev. ó sin quema	Total
Bobcat	Incendio	Junio 2000	4,289	ponderosa	1670-2580	7	5	4	16
Lower Flowers	Quema prescrita	Nov. 1999	300	ponderosa	2530-2940	2	2	2	6
Hourglass	Incendio	Julio 1994	516	lodgpole	2590-2930	2	0	2	4
Total						11	7	8	26

Cuadro 2. Características de los sitios, fecha de simulación y humedad del suelo antes de la simulación por incendio y severidad (Benavides y MacDonald, 2001).

Incendio	Número del sitio	Severidad de fuego	Fecha de simulación	Cobertura del suelo (%)	Pendiente (%)	Humedad del suelo (%)
Bobcat	1	Alta	junio 23	92*	24	1.0
Bobcat	2	Alta	julio 20	11	25	1.0
Bobcat	3	Alta	julio 21	10	22	1.0
Bobcat	4	Alta	julio 24	8	38	1.0
Bobcat	5	Alta	julio 25	17	45	1.0
Bobcat	15	Alta	agosto 15	15	25	1.5
Bobcat	16	Alta	octubre 31	6	40	9.4
Media				23	31	2.3
Bobcat	6	Moderada	agosto 02	79	32	1.7
Bobcat	7	Moderada	agosto 03	88	23	1.5
Bobcat	8	Moderada	agosto 04	95	24	1.6
Bobcat	9	Moderada	agosto 07	90	21	1.1
Bobcat	14	Moderada	agosto 14	90	16	1.7
Media				88	23	1.5
Bobcat	11	Baja	agosto 09	99	21	1.4
Bobcat	13	Baja	agosto 11	100	22	1.6
Bobcat	10	Unburned	agosto 08	98	23	1.2
Bobcat	12	Unburned	agosto 10	100	23	1.8
Media				99	22	1.5
Lower Flowers	1	Alta	agosto 16	9	26	1.0
Lower Flowers	2	Alta	agosto 18	1	30	9.5
Media				5	28	5.3
Lower Flowers	3	Moderada	agosto 26	66	25	9.0
Lower Flowers	6	Moderada	octubre 19	91	19	5.4
Media				79	22	7.2
Lower Flowers	4	Sin quema	octubre 14	100	18	19.1
Lower Flowers	5	Sin quema	octubre 17	100	15	10.1
Media				100	17	14.6
Hourglass	1	Alta	septiembre 02	79	30	20.7
Hourglass	2	Alta	septiembre 02	100	36	27.4
Media				90	33	24.1
Hourglass	3	Sin quema	septiembre 19	100	21	3.3
Hourglass	4	Sin quema	octubre 03	100	28	8.3
Media				100	25	5.8

\* La mayor parte de la cobertura son residuos de la quema como cenizas.

cantidad de parcelas se establecieron en el incendio Bobcat porque tiene mejor accesibilidad y mayor variabilidad de sitios de severidad alta y moderada. En el incendio más antiguo, el Hourglass, las parcelas fueron establecidas en áreas no quemadas y en áreas de severidad alta debido a que no era confiable, después de varios años, poder identificar áreas de severidades moderadas o bajas.

En cada uno de los sitios se midieron las siguientes variables independientes:

- a) Porcentaje de cobertura del suelo
- b) Pendiente
- c) Humedad superficial del suelo
- d) Repelencia al agua

La cobertura fue evaluada en el cuadro del metro cuadrado en los cruces de una malla de  $10 \times 10$  cm<sup>2</sup>, la pendiente fue medida con clinómetro y la humedad del suelo fue medida antes de realizar la simulación, con el método gravimétrico (Gardner, 1986), en tres muestras de suelo tomadas alrededor del perímetro de la parcela para no causar disturbio y en un espesor de 0-5 cm. La repelencia al agua fue evaluada con el método de la gota de agua (WDPT), que se refiere al tiempo que tarda una gota de agua en penetrar el suelo (DeBano, 1981); se eligieron tres puntos de medición alrededor de la parcela de 1 m<sup>2</sup>. Además, se colocaron al menos tres gotas de agua en cada punto y se tomó el tiempo que tardaron en ser absorbidas en cada cm de profundidad; el periodo máximo de observación elegido fue de 120 segundos. Las mediciones del método WDPT iniciaron en la superficie y se realizaron a cada cm hasta llegar a los 5 cm.

La lluvia fue aplicada con un simulador tipo Purdue que consta de una boquilla oscilante por la cual se dispersa la lluvia que se encontraba a una altura de 2.8-3.0 m y arriba del centro de la parcela (Meyer y Harmon, 1979; Williams *et al.*, 1995) (Figura 2). Para cada parcela de 1 m<sup>2</sup> se instaló un cuadro de metal que se insertó en el suelo a una profundidad de 5 cm y en un extremo pendiente-abajo se instaló un colector para el escurrimiento. Para evitar la infiltración no deseada o la pérdida de escurrimiento, los bordes internos fueron sellados con una mezcla de bentonita y agua. Las parcelas al igual que

el simulador, fueron cubiertos con plástico para proteger la lluvia del efecto del viento.

Cada simulación consistió en una única aplicación constante de lluvia por un periodo de 60 minutos. Los sitios no fueron humedecidos antes de la simulación porque los eventos de mayor interés son las tormentas convectivas del verano que típicamente, ocurren cuando los suelos están secos. La intensidad media de la lluvia fue de 79 mm h<sup>-1</sup>, aunque el rango que se presentó fue de 66 a 94 mm h<sup>-1</sup> (Cuadro 2). Se eligió una intensidad media de aproximadamente 80 mm h<sup>-1</sup> porque es comparable con altas intensidades de 1 hora que se han observado en el norte de Colorado. La tasa y distribución de la lluvia en cada simulación fue medida utilizando siete pluviómetros instalados dentro y alrededor de cada parcela. En algunas simulaciones se utilizó una cubierta plástica en el sitio de 1 m<sup>2</sup> para medir con mayor precisión la intensidad de la lluvia. La cubierta plástica fue usada al final de la simulación, cuando cesó el escurrimiento, con la finalidad de cubrir el fondo de la parcela de 1 m<sup>2</sup>, y captar la lluvia por un periodo de aproximadamente 10 minutos de duración.

El escurrimiento se midió cada minuto, durante el tiempo de la simulación y por un periodo de 30 segundos, utilizando un cilindro graduado. También se midió el tiempo desde el inicio del escurrimiento hasta el término. Una muestra de cada dos, fue almacenada en botellas plásticas de 500 o 1000 ml,



Figura 2. Simulador de lluvia utilizado en campo en un sitio de alta severidad.

para llevarlas al laboratorio donde fueron pesadas y filtradas, en papel filtro previamente pesado. El diámetro de los poros fue de  $5 \mu\text{m}$ . Los filtros con el sedimento incluido se secaron por 24 horas a  $105^\circ\text{C}$  y posteriormente, se pesaron para conocer el peso del sedimento por cada muestra de agua. El peso de todo el sedimento fue sumado y extrapolado para obtener el total de sedimento durante el periodo de la simulación. En todas las parcelas al final de la simulación, se realizaron pequeños surcos para observar la profundidad y la cobertura de la infiltración. Las variables dependientes tomadas en las parcelas fueron las siguientes:

- a) Tiempo de inicio del escurrimiento
- b) Equilibrio del escurrimiento
- c) Relación escurrimiento/lluvia
- d) Duración del escurrimiento después de terminar la lluvia
- e) Porcentaje de cambio en escurrimiento sobre el área principal del hidrograma
- f) Concentración media de sedimento
- g) Producción total de sedimento.

### Análisis estadístico

El análisis de varianza fue utilizado para determinar si existían diferencias significativas en las variables dependientes entre incendios y severidad del fuego dentro de los incendios. Si el análisis del modelo general presentaba una diferencia estadística de  $p \leq 0.05$ , se procedió a utilizar una prueba de medias para determinar específicamente cuáles medias eran estadísticamente diferentes, por lo tanto se utilizó la prueba de comparaciones múltiples (LSMeans) con el uso del SAS (SAS Institute, Inc., 1999). Se utilizaron regresiones lineales simples para determinar la relación entre la variable independiente y las principales variables dependientes.

## RESULTADOS

### Características de los sitios

La mayoría de las simulaciones se realizaron entre julio y agosto del 2000 sobre condiciones calurosas y ambiente muy seco. Los valores de la humedad del

suelo superficial fueron menores a 2% para casi los 16 sitios del incendio Bobcat. Las condiciones de humedad antecedente fueron más variables para los otros dos incendios porque la mayor parte de estas simulaciones se hicieron en otoño y después de la presencia de lluvias o de incipientes nevadas. La humedad del suelo fue menor al 10% en cuatro simulaciones de severidad alta y moderada en la quema prescrita de Lower Flowers, y entre un 10% y un 20% para las dos simulaciones en sitios sin quema. En el caso del incendio Hourglass, los valores de humedad superficial del suelo fueron mayores al 20% para las dos simulaciones en sitios con severidad alta, pero menores de un 10% para las dos simulaciones en sitios sin quemar (Cuadro 2).

El porcentaje de cobertura del suelo se relacionó inversamente con la severidad del fuego en los sitios de los incendios más recientes (Bobcat y Lower Flowers) (Cuadro 2). El porcentaje de cobertura en estos dos incendios, para sitios con severidad alta, fue menor a un 20%, con excepción de la primera simulación del incendio Bobcat (Sitio 1). Esta primera simulación fue realizada tres días después de que el incendio fuera controlado, cuando el sitio se encontraba en una pequeña depresión que contenía ceniza y algunos residuos quemados; se consideró de severidad alta. Las otras simulaciones se realizaron un mes después del incendio y para ese tiempo, el viento había removido las cenizas y los residuos de la superficie del suelo. Los sitios con severidad moderada tuvieron una cobertura de al menos un 80%, mientras que las áreas de severidad baja o sitios sin quema, tuvieron casi un 100% de cobertura (Cuadro 2). En el incendio antiguo Hourglass uno de los sitios con severidad alta tuvo un 79% de cobertura y el otro casi un 100%.

La pendiente promedio de todos los sitios fue de 26%, y el rango total varió de un 15% a un 45% (Cuadro 2). Se observa en el porcentaje de suelo desnudo, una tendencia a incrementarse con la pendiente ( $R^2 = 0.28$ ;  $p = 0.005$ ), debido probablemente, a que la intensidad del fuego tiende a incrementarse cuando el fuego quema a favor de la pendiente.

El pino ponderosa domina el dosel de los sitios del incendio Bobcat y la quema de Lower Flowers, mientras que en el incendio Hourglass domina el pino lodgepole. Esta diferencia en vegetación no se

considera con una influencia significativa en el escurrimiento y la erosión, así como Huffman *et al.* (2001) no encontraron diferencias significativas en la repelencia al agua resultado de los incendios en estos dos tipos de vegetación.

La siguiente sección mostrará primero, la información relacionada con el escurrimiento en el incendio Bobcat, debido a que éste tiene el muestreo más amplio y los resultados más consistentes. El escurrimiento de los otros dos incendios se compara con los resultados del incendio Bobcat, y el efecto de las variables independientes será analizado utilizando los datos conjuntos de todos los incendios.

### Escurrecimiento

Los hidrogramas del escurrimiento fueron sorprendentemente consistentes en la forma y en las tasas de equilibrio (Figura 3); en los sitios con severidad alta en el incendio Bobcat, el escurrimiento generalmente inició a los 4 minutos después de la aplicación de la lluvia (Cuadro 3), y el equilibrio se alcanzó en los cinco minutos (p. e., Figura 3a). Hubo muy poco cambio en la tasa de escurrimiento en los restantes 55 minutos de lluvia simulada (Cuadro 3). Para los siete sitios de severidad alta, el promedio de la relación escurrimiento/lluvia fue de un 66% con una desviación estándar de un 8%. El sitio con severidad alta y alto contenido de ceniza tuvo una relación de escurrimiento/lluvia de un 79% y este valor es más alto que cualquier otro de los sitios (Cuadro 3).

Los cinco sitios de severidad moderada del incendio Bobcat produjeron menos escurrimiento que los sitios de severidad alta (Figura 4) y los hidrogramas de severidad moderada tuvieron curvas ascendentes y curvas de recesión más largas (Figura 3a y 3b; Cuadro 3). Cuando se comparan los sitios de severidad alta, el escurrimiento medio fue de un 58% para severidad moderada y un 66% para la alta, el tiempo de iniciación del escurrimiento fue de 4.2 minutos contra 2.4 minutos, y la duración del escurrimiento después de terminada la aplicación de la lluvia, fue de 8.8 minutos contra 3.5 minutos (Cuadro 3). Todas las diferencias fueron significativas a un  $p < 0.05$ .

Las cuatro simulaciones de severidad baja o áreas sin quema en el incendio Bobcat tuvieron hidrogramas que no fueron estadísticamente diferentes de los

sitios con severidad moderada (Cuadro 3; Figuras 3b y 3c). La principal diferencia fue que el escurrimiento en algunos sitios de severidad baja, o áreas sin quema, tendieron a incrementar de forma muy lenta sobre todo el periodo (Figura 3c).

Los hidrogramas del escurrimiento para los dos sitios con severidad alta de la quema de Lower Flowers, fueron muy similares a los hidrogramas de severidad alta del incendio Bobcat (Cuadro 3; Figuras 3a y 3d); en los dos sitios se presentó una rápida respuesta después de la aplicación de la lluvia y el escurrimiento fue relativamente constante durante toda la simulación.

La curva de recesión en Lower Flowers fue ligeramente más larga y el escurrimiento un poco menor que en los sitios de severidad alta del incendio Bobcat, pero sólo la duración del escurrimiento final fue estadísticamente diferente ( $p = 0.002$ ).

Las dos simulaciones en Lower Flowers en sitios con severidad moderada, tuvieron resultados muy diferentes; el sitio 6 tuvo un escurrimiento de un 63% que incluye una curva de ascenso y recesión muy rápidas, mientras que el otro sitio de severidad moderada (sitio 3) tuvo el menor escurrimiento con un 32% y la curva más larga de recesión (12.8 minutos) de todas las simulaciones (Cuadro 3, Figura 3e). El bajo escurrimiento del sitio 3 fue sorprendente, debido a que tenía un 66% de cobertura del suelo, cuando se compara con el 91% de cobertura del sitio 6, y la humedad superficial del suelo fue solamente un poco más alta que el sitio 6 (9.0% contra un 5.4%). La excavación del sitio 3 después de la simulación, mostró que la infiltración se presentó en casi el 90% del sitio. Aunque los sitios de severidad moderada en Lower Flowers, tuvieron bajos escurrimientos, tiempos más largos para inicio del escurrimiento y curvas de recesión más largas que los sitios de severidad alta, el tamaño de muestra reducido y la alta variabilidad, indican que ninguna de estas diferencias fue estadísticamente significativa a un  $p < 0.05$ .

Los hidrogramas de los dos sitios sin quema en el fuego prescrito de Lower Flowers fueron comparables con los dos de severidad alta (Cuadro 3; Figuras 3d y 3f). Para las dos áreas el escurrimiento medio fue de 61%. El tiempo para el inicio del escurrimiento y la duración de la curva de recesión para los sitios no

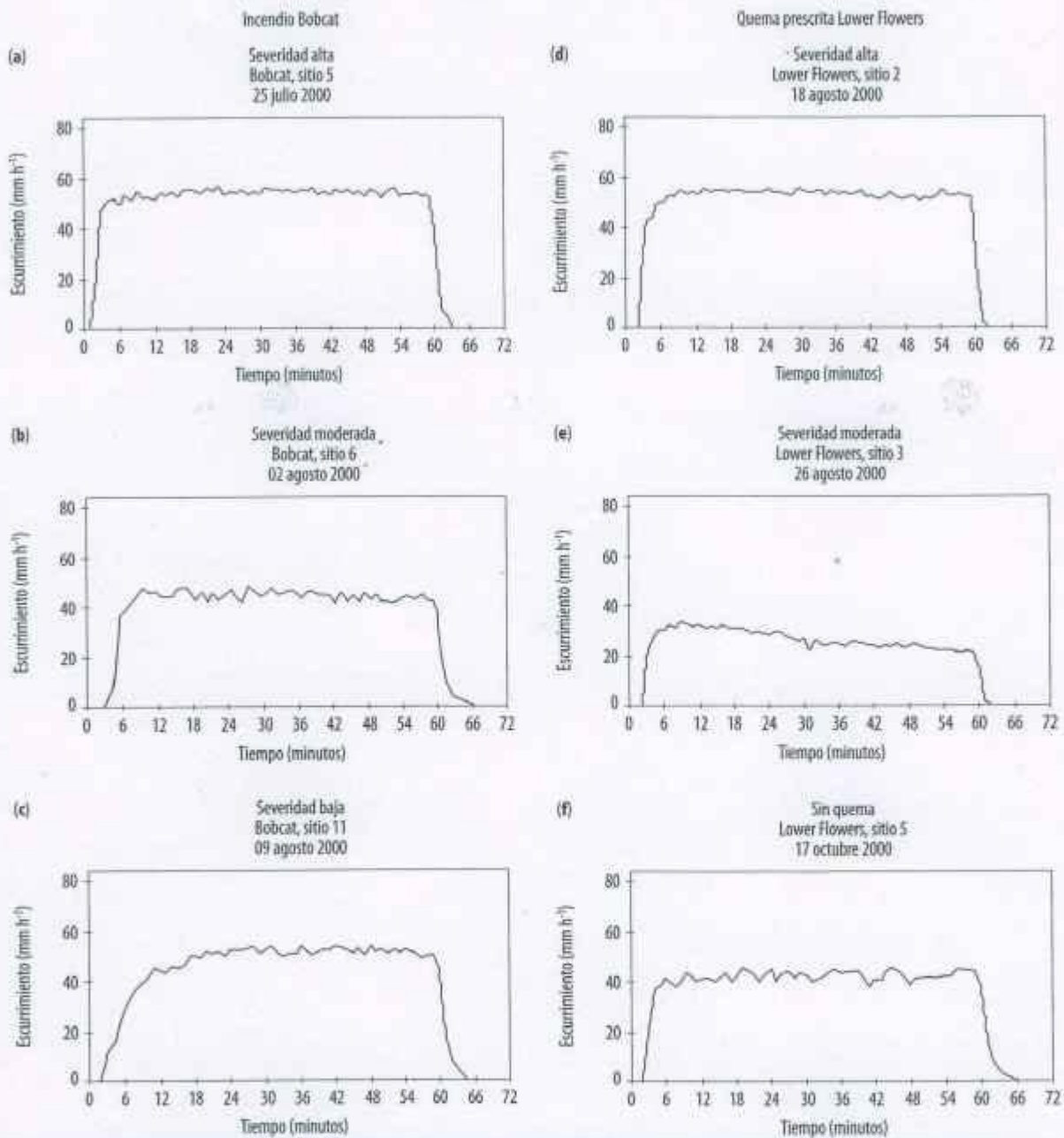


Figura 3. Hidrogramas típicos de escurrimiento de: incendio Bobcat (a-c) y Quema prescrita Lower Flowers (d-f) para severidades diferentes. La lluvia simulada se aplicó desde 0 a 60 minutos a una intensidad de 66-94 mm h<sup>-1</sup> (Benavides y MacDonald, 2001).

quemados, fue ligeramente superior a la de los sitios con severidad alta, pero ninguna de las características del escurrimiento de los sitios no quemados, fue estadísticamente diferente de ninguno de los sitios de severidad alta o moderada.

Las dos simulaciones de severidad alta en el incendio Hourglass tuvieron un promedio de escurrimiento del 36% y una media de la curva de recesión con duración de 4.7 minutos (Cuadro 3). Por el contrario, las dos simulaciones en sitios sin quemas,



Cuadro 3. Datos de escurrimiento por cada simulación, incendio y severidad (Benavides y MacDonald, 2001).

Incendio	Número Del sitio	Severidad del fuego	Intensidad de lluvia (mm h <sup>-1</sup> )	Flujo en equilibrio (mm h <sup>-1</sup> )	Tasa escurrim/ lluvia (%)	Tiempo de inicio de escurrim. (mins)	Duración del escurrim. después de simulación (mins)
Bobcat	1	Alta	93	80	79	02:50	02:50
Bobcat	2	Alta	85	60	66	03:25	03:45
Bobcat	3	Alta	84	60	70	02:05	02:30
Bobcat	4	Alta	82	55	64	01:55	03:20
Bobcat	5	Alta	86	54	61	01:46	03:15
Bobcat	15	Alta	76	50	54	04:05	04:30
Bobcat	16	Alta	94	66	68	04:00	04:00
Media			86	61	66	02:26	03:27
Bobcat	6	Moderada	76	44	55	04:35	07:53
Bobcat	7	Moderada	80	55	63	04:55	10:00
Bobcat	8	Moderada	78	52	62	02:57	09:25
Bobcat	9	Moderada	73	39	50	04:03	08:35
Bobcat	14	Moderada	79	52	61	04:30	08:13
Media			77	48	58	04:12	08:49
Bobcat	11	Baja	80	51	58	03:00	08:10
Bobcat	13	Baja	79	44	50	02:43	09:30
Bobcat	10	Sin quema	74	48	58	06:00	13:10
Bobcat	12	Sin quema	78	44	52	02:50	08:40
Media			78	47	55	03:38	09:52
Lower Flowers	1	Alta	78	50	62	02:25	08:26
Lower Flowers	2	Alta	85	53	60	01:30	05:30
Media			82	52	61	01:57	06:58
Lower Flowers	3	Moderada	80	27	32	03:00	12:48
Lower Flowers	6	Moderada	75	50	63	02:52	08:30
Media			77	39	48	02:56	10:39
Lower Flowers	4	Sin quema	77	42	59	03:26	07:30
Lower Flowers	5	Sin quema	66	48	62	02:52	07:35
Media			71	45	61	03:09	07:32
Hourglass	1	Alta	75	34	43	01:40	05:00
Hourglass	2	Alta	80	24	28	05:15	04:20
Media			77	29	36	03:27	04:40
Hourglass	3	Sin quema	63	42	64	03:20	12:03
Hourglass	4	Sin quema	80	46	54	02:48	08:00
Media			72	44	59	03:04	10:01

tuvieron un escurrimiento del 59% y una media de la curva de recesión de 10 minutos. Los valores bajos del escurrimiento en los sitios de severidad alta no son sorprendentes ya que el porcentaje de cobertura de ambos sitios fue de un 79% y un 100% (Cuadro 2). Como se discutió anteriormente, los bajos escurrimientos para la severidad alta pueden deberse a la alta humedad inicial.

No hubo diferencias significativas en las tasas de escurrimiento entre el incendio Bobcat y la quema de Lower Flowers, cuando los datos se estratificaron por la severidad de la quema (Figura 4). Tampoco hubo diferencias significativas en los hidrogramas entre los tres incendios para los sitios de severidad baja o sin quema. Los sitios con severidad alta para los dos incendios más recientes tuvieron diferencias

significativas en el escurrimiento al compararlos con el incendio Hourglass (Figura 4).

### Efecto de las variables del sitio en el escurrimiento

En el incendio Bobcat y en la quema prescrita Lower Flowers se presentaron pequeñas diferencias en la repelencia al agua, debidas a la severidad del fuego (Figuras 5 y 5b). Los suelos fueron generalmente más repelentes a 1-2 cm por debajo de la superficie del suelo, declinando rápidamente a partir de los 3 cm. Los resultados son más consistentes con el estudio más detallado sobre suelos hidrofóbicos en los mismos incendios (Huffman *et al.*, 2001). En los sitios de severidad alta del incendio más antiguo, el Hourglass, no se tuvieron evidencias de repelencia al agua, aunque se presentó una moderada o débil presencia de repelencia al agua en todo el perfil en los sitios sin quema (Figura 5c). Los sitios de severidad alta se evaluaron a finales del otoño, después de la presencia de varias tormentas que incrementaron la humedad

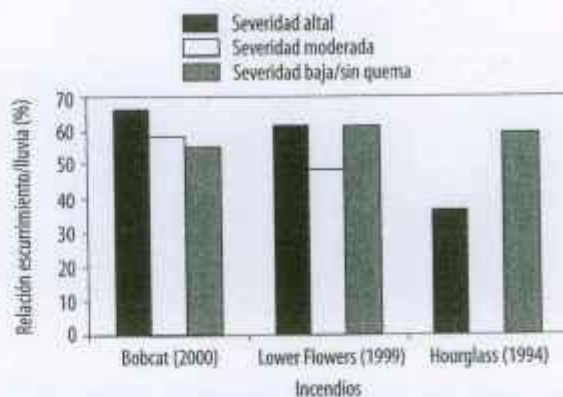


Figura 4. Promedio de la relación escurrimiento/lluvia por incendio y severidad del fuego (Benavides y MacDonald, 2001).

del suelo en un 20% o más (Cuadro 2). Otros estudios (p.e., Doerr y Thomas, 2000; Huffman *et al.*, 2001) mencionan que los suelos pierden la repelencia al agua con los valores anteriores de humedad del suelo.

La tasa de escurrimiento para todos los sitios se incrementa con la repelencia al agua como se indica con el método WDPT a 2 cm de profundidad ( $R^2 = 0.38$ ;  $p = 0.0008$ ) (Figure 6a). Si sólo se consideran los sitios de severidad alta, el  $R^2$  entre WDPT y el

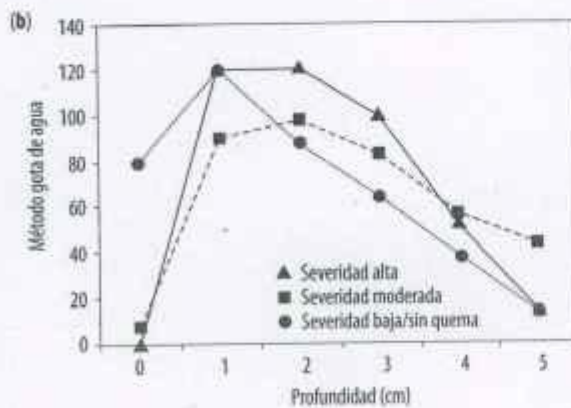
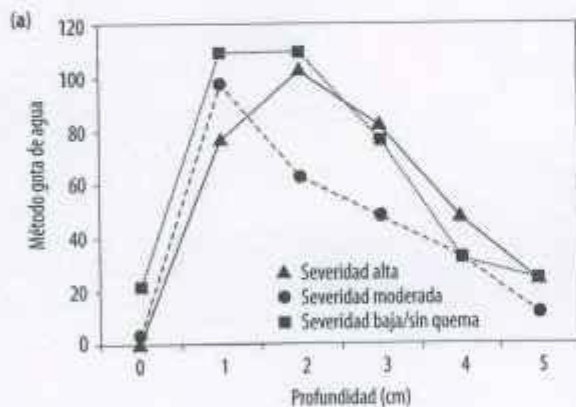
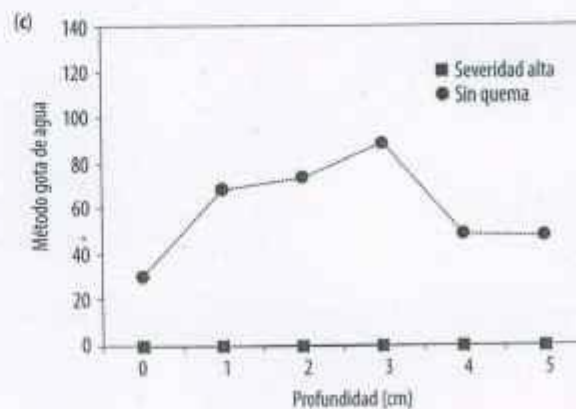


Figura 5. Repelencia al agua desde la superficie del suelo hasta una profundidad de 5 cm, determinada por el tiempo de penetración de la gota de agua en el suelo para: (a) incendio Bobcat, (b) quema prescrita Lower Flowers y (c) incendio Hourglass. El valor cero representa la superficie del suelo o la hojarasca, si estuvo presente. La persistencia de la gota de lluvia en cada profundidad se realizó hasta un máximo de 120 segundos (Benavides y MacDonald, 2001).



escurrimiento se incrementa de un 38% a un 81%. También, se presentó una alta correlación entre el escurrimiento y el decremento de la humedad del suelo en los sitios de severidad alta ( $R^2 = 0.71$ ;  $p = 0.001$ ), pero esta correlación se debe en gran parte, a los dos sitios del incendio Hourglass que tuvieron altos contenidos de humedad y bajas tasas de escurrimiento (Figura 6b).

El escurrimiento en los sitios de severidad moderada también declinó cuando aumentaba la humedad del suelo pero solamente fue significativa a un  $p = 0.009$  (Figura 6b). La humedad del suelo tuvo poco efecto en el escurrimiento para los sitios de severidad baja o no quemados.

Se observa una tendencia aunque no muy alta, del método WDPT a incrementarse cuando decrece la humedad del suelo ( $R^2 = 0.26$ ;  $p = 0.009$ ). El escu-

rrimiento no tuvo ninguna relación con la pendiente o el porcentaje de cobertura del suelo.

### Producción de sedimentos

Las características generales de los sedigramas fueron sorprendentemente consistentes para casi todos los casos, se observó un rápido incremento en las concentraciones de sedimento casi inmediatamente después del inicio del escurrimiento (Figura 7). La concentración de sedimento generalmente, cae rápidamente después del pico inicial para continuar constante o declinar un poco en los 50 minutos restantes de la simulación (Figura 7). En los sitios con severidad alta los picos de la concentración de sedimento alcanzaron hasta  $90 \text{ g L}^{-1}$  y las concentraciones al final de la simulación, fueron de al menos,  $30 \text{ g L}^{-1}$ . En la severidad baja o sitios no quemados, el pico de las concentraciones de sedimento fue de menos de  $10 \text{ g L}^{-1}$  y las concentraciones al final de la simulación, fueron de menos de  $5 \text{ g L}^{-1}$  (Figuras 7c y 7f).

La producción de sedimento total promedio para los sitios de severidad alta del incendio Bobcat fue de  $1280 \text{ g}$ , o casi siete veces más que el promedio de sedimentos de los sitios de severidad moderada con  $179 \text{ g}$  (Cuadro 4; Figura 8), y la diferencia fue altamente significativa ( $p < 0.0001$ ). La producción media de sedimento de sitios de severidad baja o sitios no quemados fue de solamente  $80 \text{ g}$ , o la mitad del sedimento medido a severidad moderada y esta diferencia fue estadísticamente diferente a  $p = 0.03$ . Las diferencias observadas en la producción de sedimentos fueron un poco más grandes que las diferencias en las concentraciones de sedimentos debido a que en los sitios de severidad alta, el equilibrio del escurrimiento fue un 27% mayor que en los sitios con severidad moderada (Cuadro 3). Un sitio de severidad alta en el incendio Bobcat tuvo la más alta tasa de escurrimiento, así como residuos del incendio como cubierta de suelo (Bobcat 1) y presentó además un 41% menos de sedimento que la media de los otros seis sitios de severidad alta, lo cual sugiere que la producción de sedimentos no es simplemente una función de la tasa de escurrimiento. Las primeras tres simulaciones mostradas en el Cuadro 4 tienen

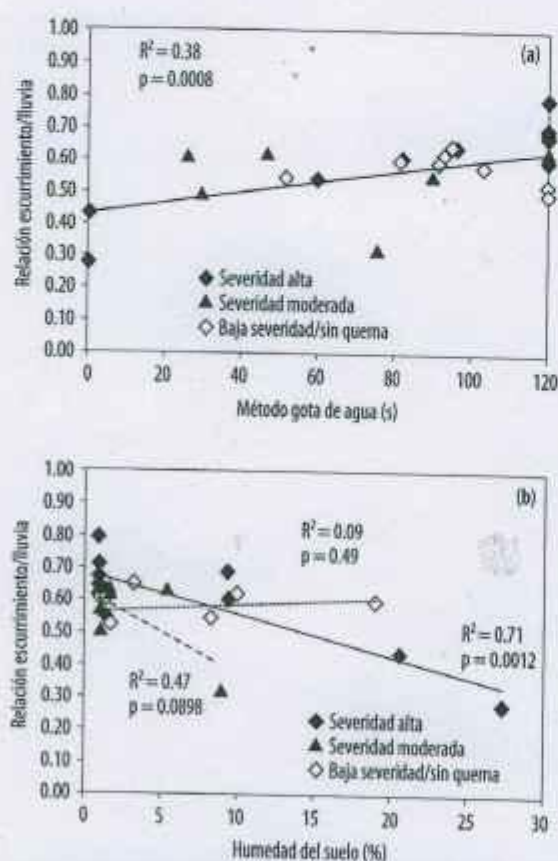


Figura 6. Relaciones entre la tasa de escurrimiento/luvia y: (a) promedio del método de gota de agua (WDPT) a 2 cm y (b) porcentaje de humedad del suelo (Benavides y MacDonald, 2001).

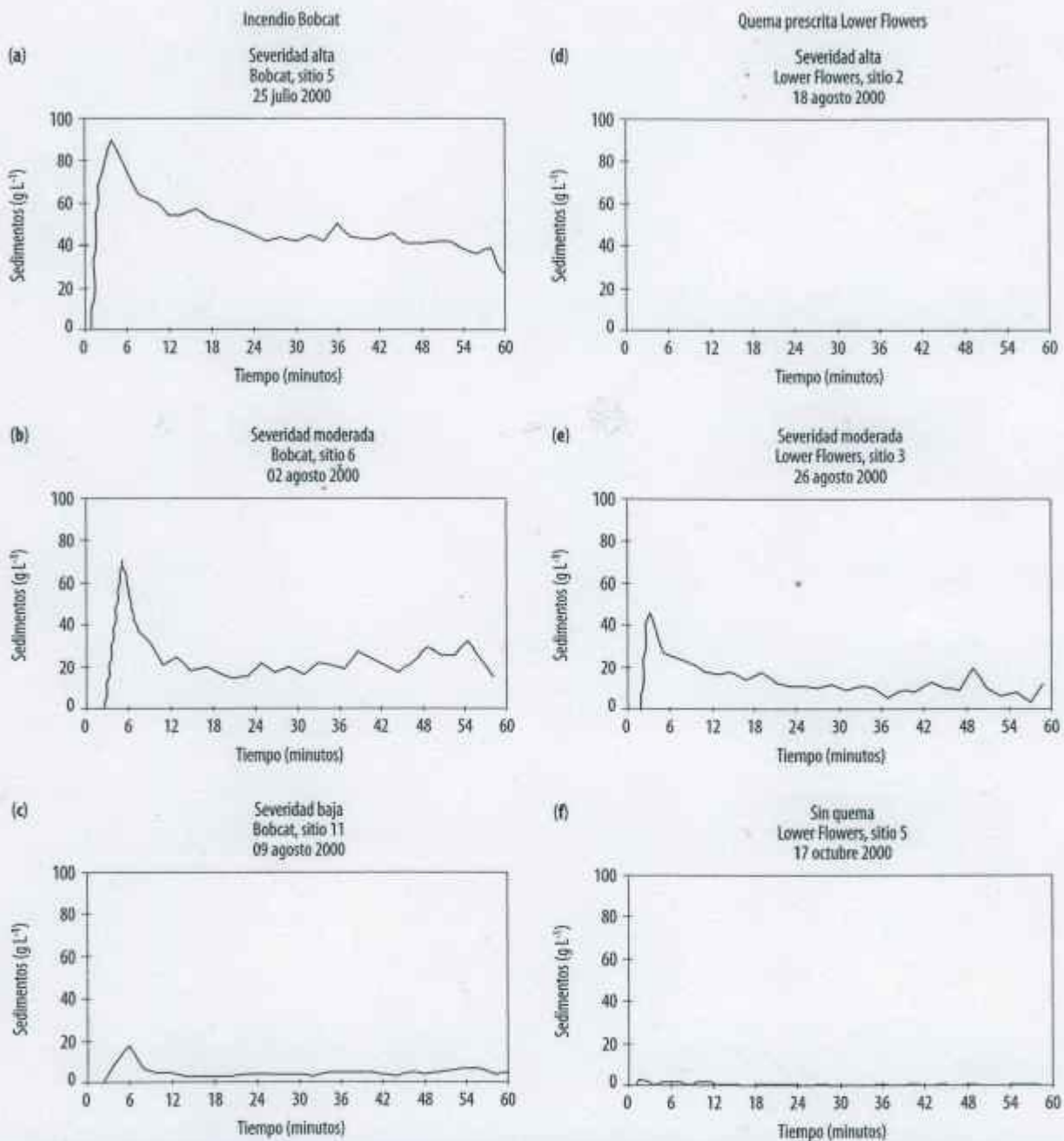


Figura 7. Sedigramas típicos observados en: incendio Bobcat (a-c) y quema prescrita Lower Flowers (d-f) para diferentes severidades. La lluvia simulada se aplicó por un lapso de tiempo de 0 a 60 minutos a una intensidad de 66-94 mm h<sup>-1</sup>.

menor cantidad de concentración de sedimentos porque una cantidad alta de sedimento se depositó en la canaleta del escurrimiento.

El comportamiento general de la producción de sedimentos de los sitios de la quema de Lower

Flowers fue muy similar al del incendio Bobcat (Cuadro 4; Figura 8). El sedimento promedio de los dos sitios de severidad alta fue de 850 g, y el promedio de sedimentos de los sitios de severidad moderada fue de 111 g. Los dos sitios sin quemas

Cuadro 4. Producción de sedimento y concentración de sedimentos por sitio, incendio y severidad.

Incendio	Numero de sitio	Severidad de incendio	Sedimento total (g)	Concentración de sedimento (g L <sup>-1</sup> )
Bobcat	1	Alta	804	11.0
Bobcat	2	Alta	1100	19.3
Bobcat	3	Alta	1030	17.6
Bobcat	4	Alta	1690	32.3
Bobcat	5	Alta	1570	30.1
Bobcat	15	Alta	1040	25.5
Bobcat	16	Alta	1750	28.6
Media			1280	23.5
Bobcat	6	Moderada	223	5.4
Bobcat	7	Moderada	279	5.6
Bobcat	8	Moderada	173	3.6
Bobcat	9	Moderada	86	2.4
Bobcat	14	Moderada	133	2.8
Media			179	4.0
Bobcat	13	Baja	59	1.5
Bobcat	11	Baja	122	2.6
Bobcat	12	Sin quema	55	1.4
Bobcat	10	Sin quema	85	2.0
Media			80	1.9
Lower Flowers	1	Alta	590	12.3
Lower Flowers	2	Alta	1110	21.9
Media			850	17.1
Lower Flowers	3	Moderada	131	5.1
Lower Flowers	6	Moderada	90	1.9
Media			111	3.5
Lower Flowers	4	Sin quema	37	0.4
Lower Flowers	5	Sin quema	14	0.8
Media			26	0.6
Hourglass	1	Alta	86	2.6
Hourglass	2	Alta	19	0.9
Media			52	1.7
Hourglass	3	Sin quema	21	0.5
Hourglass	4	Sin quema	23	0.5
Media			22	0.5

tuvieron una producción de sedimentos de 26 g, o el equivalente del 3% de la media de sedimentos de los sitios con severidad alta. Como en el caso del incendio Bobcat, la diferencia en la producción de sedimentos entre las severidades altas y moderadas fue también significativa ( $p=0.03$ ), pero la diferencia entre la severidad moderada y las parcelas sin quema, no fue significativa.

La producción de sedimentos de las cuatro simulaciones del incendio Hourglass fue similar a las cantidades de los sitios de severidad baja y sin quema en el incendio Bobcat y la quema de Lower Flowers (Cuadro 4; Figura 8). La producción media de sedimentos de los dos sitios con severidad alta fue de 52 g, pero el sitio con un porcentaje de cobertura de 69% y con altas tasa de escurrimiento produjo casi

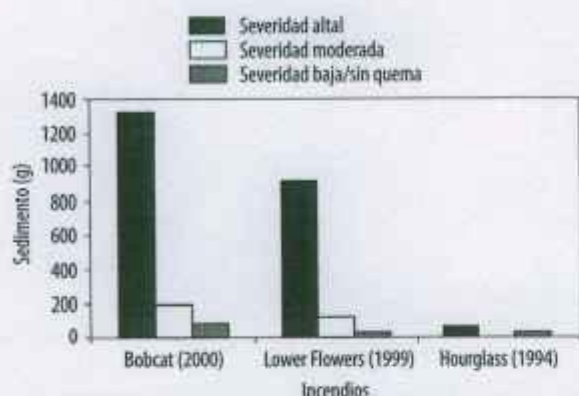


Figura 8. Promedio de producción de sedimentos por incendio y severidad.

7 veces más sedimento que el sitio con un 100% de cobertura del suelo y con una tasa de esguerramiento baja. Las dos parcelas que no fueron quemadas en el incendio Hourglass, tuvieron solamente una producción de sedimentos de 21 g y 23 g. Aunque la media de sedimentos de los sitios con severidad alta fue dos veces más alta que en los sitios no quemados, la diferencia no fue significativa debido al tamaño de la muestra y a la variabilidad de los sitios con severidad alta.

Las comparaciones de la producción de sedimentos entre los incendios, no mostraron diferencias estadísticas entre Bobcat y Lower Flowers cuando se estratificaron por severidad (Figura 8). Sin embargo, la producción de sedimentos de los sitios de severidad

alta en estos dos incendios, fue estadísticamente diferente cuando se comparó con el incendio Hourglass (Figura 8). No hubo diferencias significativas entre los tres incendios para los sitios de severidad baja o no quemados.

### Efecto de las variables del sitio en la producción de sedimentos

La repelencia al agua tuvo una fuerte correlación con la producción de sedimentos para los sitios quemados a severidad alta ( $R^2 = 0.43$ ;  $p = 0.03$ ) (Figura 9a).

Las otras dos clases de severidad no tuvieron relaciones significativas entre la repelencia al agua y la producción de sedimentos. De la misma forma, la humedad del suelo estuvo inversamente relacionada con la producción de sedimentos en los sitios quemados a severidad alta ( $R^2 = 0.43$ ;  $p = 0.03$ ), mientras que en las otras dos severidades no hubo una relación significativa (Figura 9b). La alta correlación para los sitios de severidad alta, se debe en gran parte, a que dos sitios de severidad alta del incendio Hourglass tuvieron poca cantidad de sedimentos, alta humedad del suelo y ausencia de repelencia al agua.

El porcentaje de suelo desnudo se correlacionó positivamente con el incremento de la producción de sedimentos cuando todos los datos de todas las severidades e incendios fueron incluidos ( $R^2 = 0.78$ ;  $p < 0.0001$ ), debido a que los sitios de severidad alta

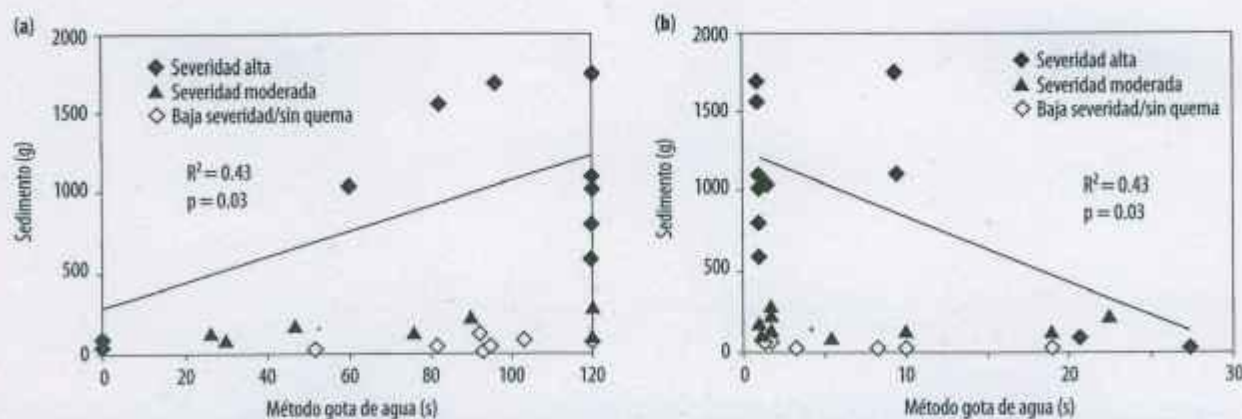


Figura 9. Relación entre producción de sedimentos por sitio y: (a) promedio de gota de agua a 2 cm y (b) porcentaje de humedad del suelo. La línea de regresión y estadísticas son solamente para sitios de alta severidad.

tuvieron poca cobertura y alta producción de sedimentos (Figura 10a). El incremento de la pendiente fue significativo en la producción de sedimentos con todos los datos, y la pendiente explica el 43% de la variabilidad de la producción de sedimentos (Figura 10b). Como se observó anteriormente, los sitios con mayor pendiente se quemaron con mayor severidad. Cuando los datos se estratificaron por severidad, las correlaciones no fueron significativas, pero se considera que la pendiente y la severidad alta son las responsables de los significativos incrementos en sedimentos cuando la pendiente aumenta.

## DISCUSIÓN

### Tasas de escurrimiento

Se considera que las severidades altas son las que inducen a generar una fuerte capa hidrofóbica (DeBano, 1981) por lo tanto, las áreas quemadas a severidad alta, deben tener menores tasas de infiltración en comparación con las severidades moderadas o bajas. Aunque pocos estudios han evaluado la repelencia al agua, la infiltración y el escurrimiento en bosques de pino ponderosa o lodgepole después de los incendios, las tasas de infiltración se redujeron en un 62% en bosques de pino ponderosa de Arizona que fueron quemados a severidad alta (Campbell *et al.*, 1977). Zwolinski (1971) encontró que en bosques de pino ponderosa los sitios quemados a severidades altas y bajas, tuvieron menores valores de infiltración que

los sitios no quemados en el primer verano después del incendio.

En contraste, los resultados de este estudio presentaron sólo pequeñas diferencias en la relación escurrimiento/lluvia cuando se estratificaron por severidad. Los promedios de las tasas de escurrimiento para los sitios de severidad alta en el incendio Bobcat se incrementaron únicamente, un 13% más que las medias de los sitios de severidad moderada, y un 20% más que las medias de los sitios no quemados o de severidad baja (Figura 4). Las diferencias en escurrimiento por severidad del fuego, fueron menos consistentes que en los otros dos incendios.

Una posible razón de las pequeñas diferencias en las tasas de escurrimiento con severidad del fuego, es la alta intensidad de la lluvia aplicada con el simulador. La media de la lluvia aplicada fue de 79 mm h<sup>-1</sup>, y en 23 de las 26 parcelas estudiadas el escurrimiento fue mayor de un 50% de la aplicación de la lluvia. Aun en los sitios sin quema, el escurrimiento medio fue de 58%. Si se asume que las pérdidas por evaporación son nulas, los hidrogramas de los sitios no quemados indican que la tasa de equilibrio se encuentra solamente entre 20 y 35 mm h<sup>-1</sup>. Si los sitios no quemados tienen tasas de escurrimiento de un 50% bajo condiciones de alta intensidad de lluvia, no se observan incrementos substanciales en escurrimiento al ocurrir el incendio.

Las pequeñas diferencias observadas en este estudio son contrarias a los resultados de otros estudios con simuladores de lluvia en áreas quemadas;

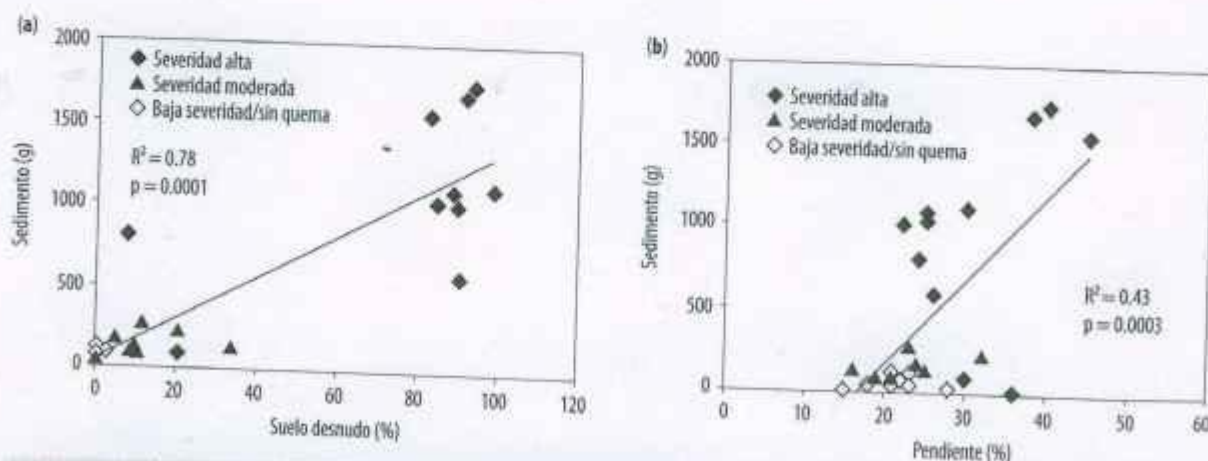


Figura 10. Relación entre producción de sedimentos por sitio y: (a) suelo desnudo y (b) pendiente.

Simanton *et al.* (1990) utilizaron intensidades de lluvia de  $65 \text{ mm h}^{-1}$  y obtuvieron escurrimientos cuatro veces más altos en severidades altas comparados con sitios no quemados o de severidad baja en arbustos de Artemisa. Robichaud y Waldrop (1994) aplicaron  $100 \text{ mm h}^{-1}$  en áreas boscosas del sur de los Estados Unidos y generaron 10 veces más escurrimiento en áreas de severidad alta comparado con sitios de severidad baja. Al parecer, las pequeñas diferencias observadas en este estudio acerca del escurrimiento, se debieron a las altas tasas de escurrimiento encontradas en sitios no quemados o de severidad baja en comparación con otros investigadores (p. e., Shahlac *et al.*, 1991).

Los datos de campo y la prueba de gota de agua sugieren que la repelencia al agua, tanto natural como producto de los incendios, indica que es una de las causas de los altas tasas de escurrimiento. Las Figuras 5a y 5b indican que los suelos fueron repelentes al agua a profundidades de 1-3 cm de la superficie en todos los sitios del incendio Bobcat y la quema de Cogger Flowers, independientemente de la severidad del fuego. Robichaud y Hungford (2000) también encontraron que los suelos forestales fueron repelentes al agua cuando estaban secos en áreas no quemadas y en áreas bajo incendios. En el sureste de Australia el escurrimiento se incrementó de un 5 a un 15% en condiciones secas en bosques de eucalipto en áreas no quemadas (Burch *et al.*, 1989). Pierson *et al.* (2001) encontraron que en áreas no quemadas entre los doseles de las copas de arbustos se generaron más escurrimientos que en áreas de doseles que habían sido quemadas.

En el caso del incendio Hourglass, los sitios no quemados tuvieron una débil repelencia al agua a una profundidad de 5 cm, mientras que en áreas quemadas a severidad alta no se presentó repelencia al agua (Figura 5c). La falta de repelencia en los sitios de severidad alta en el incendio Hourglass puede ser atribuida a los altos contenidos de humedad del suelo, más de 20% (Cuadro 2). Otros estudios mostraron que la repelencia al agua producto de los incendios, no se encuentra presente con tales contenidos de humedad, haciendo que los suelos puedan ser más humedecibles que bajo condiciones secas (Shahlac *et al.*, 1991; Doerr y Thomas, 2000; Huffman *et al.*, 2001). Los altos contenidos de humedad del suelo y

la correspondiente falta de repelencia es posiblemente, la causa de que los dos sitios de severidad alta del incendio Hourglass tuvieran tasas de escurrimiento de solamente un 36%. Las excavaciones en la parcela después de las simulaciones, confirmaron que la humedad penetró varios cm en el suelo en casi el 90% del área.

La forma de los hidrogramas observada en este estudio también sugiere la presencia de una fuerte repelencia al agua en condiciones secas tanto en sitios quemados como no quemados. Si los suelos no son repelentes, la tasa de infiltración debería decrecer y la tasa de escurrimiento debería incrementarse debido al papel menor que fungen las fuerzas capilares (Hillel, 1998). En otras palabras, un incremento en la infiltración y un decremento en el escurrimiento durante la simulación deberían sugerir un progresivo humedecimiento y una ruptura de la capa repelente al agua. Pero debido a que la mayor parte de las simulaciones muestran un escurrimiento constante después de los 5-10 minutos, la repelencia al agua causada por el fuego permanece activa durante todo el periodo de simulación de lluvia. Las excavaciones de los sitios después de cada simulación también muestran que en casi todos los casos, los suelos estaban secos bajo la capa superficial de suelo y en la mayor parte de los sitios, el frente húmedo penetró escasos centímetros en pocos sitios. Estas observaciones también muestran que la mayoría de los sitios tienen una fuerte repelencia al agua en la superficie del suelo o cerca de ella. Debido a que no existe una relación entre porcentaje de cobertura del suelo y tasas de escurrimiento, el taponamiento de poros no parece ser un proceso importante con estas simulaciones, excepto en el caso del primer sitio del incendio Bobcat donde se tenía una alta presencia de ceniza. Lo anterior implica que la repelencia al agua y la humedad del suelo son los controles primarios en la cantidad de escurrimiento al aplicar simulaciones de lluvia.

#### **Efecto de la severidad del fuego y la repelencia al agua en la producción de sedimentos**

Las diferencias en la producción de sedimentos por severidad del fuego fueron mucho más grandes que las diferencias en escurrimiento y las mediciones



del sedimento fueron generalmente más consistentes que las tasas de escurrimiento cuando se estratifican por severidad del fuego (Cuadro 4; Figura 8). La producción media de sedimentos de los sitios de severidad alta en los incendios Bobcat y Lower Flowers fueron respectivamente, 7.1 y 7.7 veces mayor que los sedimentos medidos a severidad moderada en las respectivas quemadas. La media de sedimentos de sitios con severidad moderada en estos dos incendios fue de 2.2 y 4.3 veces mayor que la media de sedimentos de severidad baja o sin quema (Cuadro 4). Lo anterior implica que los sitios de severidad alta en el incendio Bobcat produjeron 16 veces más sedimento que los sitios de severidad baja o no quemados, y las áreas de severidad alta en la quema de Lower Flowers tuvieron 32.7 veces más sedimento que los sitios no quemados.

La media de sedimentos fue de  $1280 \text{ g m}^{-2}$  para los nueve sitios de severidad alta del incendio Bobcat y estos valores son mucho más altos que los reportados en otros estudios. En el sureste de los Estados Unidos la lluvia simulada de  $101.6 \text{ mm h}^{-1}$  produjo  $60 \text{ g m}^{-2}$  en parcelas pequeñas (Shahlaee *et al.*, 1991), mientras que Robichaud y Waldrop (1994) midieron cantidades de sedimento de  $139 \text{ g m}^{-2}$  como resultado de la aplicación de  $100 \text{ mm h}^{-1}$  de lluvia simulada por 30 minutos en sitios de severidad alta. Dada la corta duración del periodo de la simulación utilizado por Robichaud y Waldrop (1994), el valor más alto puede ser comparable con los resultados de este estudio. En arbustos, Artemisa Simanton *et al.* (1990) encontraron que los sitios de severidad alta produjeron cinco veces más sedimento que los sitios no quemados. Asimismo, Prosser (1990) e Inbar *et al.* (1998) encontraron que las tasas de erosión de áreas con severidad alta incrementaron de 2 a 3 órdenes de magnitud mayor que los sitios no quemados con presencia de lluvias naturales.

Los grandes incrementos de erosión en sitios de severidad alta son atribuidos a la pérdida de la cubierta del suelo y al incremento del escurrimiento debido a la repelencia al agua (Osborn, 1954; Morris y Moses, 1987; Inbar *et al.*, 1998). En este estudio al porcentaje de cobertura se le adjudica el 78% de la variabilidad observada en la producción de sedimentos (Figura 9c). Parcelas similares que produjeron menos escurrimiento y tenían menos cobertura,

también produjeron más sedimento (p.e. Sitio 3 vs sitio 6 de Lower Flowers).

Debido a que la severidad del fuego tuvo un incremento significativo en la producción de sedimentos y poco efecto en el escurrimiento, las grandes diferencias en la producción de sedimentos por severidad del fuego se atribuyen principalmente, a las diferencias en la cubierta del suelo más que a las diferencias en escurrimiento, repelencia al agua o humedad antecedente.

### Tasas de recuperación de la erosión

Los resultados sugieren que la recuperación de la cubierta del suelo es el factor más importante para reducir las tasas de erosión después de los incendios. Los dos sitios de severidad alta del incendio Hourglass se quemaron 6 años antes de la aplicación de las simulaciones y el porcentaje de cobertura del suelo fue de un 79% y un 100%. El sitio de severidad alta en el incendio Hourglass tuvo un 79% de cobertura y produjo cerca de 4.5 veces más sedimento que el sitio con 100% de cobertura del suelo. La producción media de sedimentos en estos dos sitios representó solamente el 6.6% de la producción de sedimentos en sitios de severidad alta del incendio Bobcat y la quema Lower Flowers; el porcentaje de cobertura en estos dos incendios fue menos de 20% con excepción de un sitio (Cuadro 2). Estas comparaciones indican que la baja producción de sedimentos de severidad alta en el incendio Hourglass se debe al incremento de la cubierta vegetal en los 6 años después de la quema. Los resultados preliminares de un estudio con tratamientos de rehabilitación en el incendio Bobcat, muestran que los sitios a los cuales se les aplicó paja de avena, producen menos sedimento que los sitios que no contenían y esto pone énfasis nuevamente, en la importancia de la cobertura del suelo en presencia de erosión.

La reducción de sedimentos observada en el tiempo, es consistente con otros estudios; por ejemplo, las tasas de erosión de sitios de severidad alta, en el incendio de Buffalo Creek en las mismas montañas, se reducen a las tasas anteriores, en un lapso de tres años (Martin y Moody, 2001). Estudios de otras áreas muestran también, que las tasas de erosión decrecen a niveles pre-incendio dentro de los primeros

3 a 9 años después del incendio (Martin y Moody, 2001). En el caso del incendio Hourglass, la tasa media de erosión para los dos sitios de severidad alta es incluso, dos veces mayor que las tasas de los sitios no quemados (Cuadro 4). Debido a que las simulaciones de estos dos sitios se realizaron en condiciones de alta humedad antecedente, el escurrimiento fue más bajo, lo que pudo influir en la baja presencia de sedimentos; así, no se puede concluir totalmente, que las tasas de erosión de este incendio estén completamente recuperadas.

### Representatividad y efecto de escala

Los datos a pequeña escala, muestran un incremento en la erosión de 17 a 33 veces más en los sitios de severidad alta que en sitios de severidad baja o no quemados; en términos absolutos, las tasas de erosión de los sitios de severidad alta promedian  $1280 \text{ g m}^{-2}$  o  $13 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Estos valores son más altos que las tasas de erosión observadas en la mayoría de los estudios de pino ponderosa en el primer año después de la quema (Benavides y Ramos, 2007), y mucho menores que las tasas de erosión en coníferas mezcladas de Arizona (Hendricks y Johnson, 1944) o de pino ponderosa y douglas-fir en Idazo (Megahan y Molitor, 1975).

La producción de sedimentos de este estudio puede considerarse baja en términos absolutos porque la simulación se realizó en sitios de 1 m de largo, por lo tanto el salpicamiento y la erosión laminar fueron los principales procesos (Muthchler *et al.*, 1988). En los sitios de severidad alta el borde del metal y los pluviómetros presentaron evidencia del salpicamiento con partículas de suelo a una altura de al menos, 15 cm. Durante la simulación la mayor parte del sitio generó escurrimiento por flujo laminar y no se observó evidencia de erosión en canalillos.

Tanto los estudios de campo como los modelos basados en procesos físicos, sugieren que las parcelas de medición deben tener varios metros de longitud para que la erosión en canalillos se convierta en un proceso de erosión importante (Muthchler *et al.*, 1988). La investigación realizada para apoyar al modelo WEPP indica que la erosión en canalillos es el proceso dominante a escala de ladera (Nearing *et al.*, 1989). La ausencia de erosión en canalillos mos-

trada en este estudio, indica que los sedimentos por unidad de área probablemente, se incrementarían si la misma cantidad de lluvia es aplicada a parcelas más grandes. La importancia de la erosión en canalillos a escalas más grandes, también puede afectar la relevancia de los factores del sitio como la pendiente por ejemplo, que se puede convertir en un factor importante que se pudo observar escasamente, en la escala pequeña de este estudio.

La representatividad de las tasas de erosión también es afectada por la cantidad y la intensidad de la lluvia simulada. La lluvia simulada de  $79 \text{ mm h}^{-1}$  es mayor que la de  $56 \text{ mm h}^{-1}$  estimada en una tormenta de 100 años de retorno de una hora de duración (Miller *et al.*, 1973), pero comparable con la tormenta más grande observada en el área. En 1976 por ejemplo, cayeron  $75 \text{ mm h}^{-1}$  por aproximadamente, 3 horas en un área similar al incendio Bobcat y en 1997 cayeron  $89 \text{ mm h}^{-1}$  en una hora en la ciudad de Fort Collins, Colorado. El 16 de agosto del 2000 una tormenta convectiva en el incendio Bobcat arrojó 61 mm de lluvia con una intensidad pico de  $29 \text{ mm h}^{-1}$ . Después del incendio de Buffalo Creek en 1996, una tormenta convectiva también produjo 63 mm de lluvia en dos horas, y esto origino una severa inundación y erosión en la parte alta (Agnew *et al.*, 1997). Estos datos muestran que la lluvia simulada en este estudio es un evento de gran periodo de retorno pero con posibilidades de presentarse en las montañas de Colorado.

La erosividad media de la lluvia de las simulaciones de este estudio fue cercana a los  $1790 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , cifra aproximadamente cinco veces más alta que el promedio de lluvia anual de erosividad de  $340 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (Renard *et al.*, 1997). La energía de una lluvia de 10 años de retorno en el área del incendio Bobcat es de casi  $700 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , o cercana al 40% de la erosividad de las simulaciones del presente estudio. La erosividad de este trabajo asume que la energía cinética simulada es similar a la de lluvias naturales con la misma intensidad y esta aseveración se soporta en el trabajo de Meyer y Harmon (1979). Los valores de ambos, intensidad y erosividad de la lluvia utilizadas en este estudio, indican la presencia de un evento extremo de lluvia, por lo que se pueden esperar altas tasas de erosión. Los sitios con severidad alta generan de 16 a 32 veces más sedimento que los

sitios con severidad baja o no quemados y los valores medidos de  $1280 \text{ g m}^{-2}$  parecen representar un número alto aunque se debe considerar también, que esta erosión no cuenta con erosión en canalillos.

Para cualquier intento de extrapolar los resultados a una escala mayor se requiere considerar los cambios en los procesos erosivos de una escala pequeña como salpicamiento y erosión laminar a la erosión en canalillos que se presenta en la escala de ladera. El problema para identificar una tormenta representativa, los cambios en los procesos de erosión de un salpicamiento a una erosión laminar o de cárcavas, junto con el cambio de escala significa que la erosión debería ser tomada en cuenta más como un índice de diferencias relativas, que de valores absolutos extrapolables a una ladera o a una cuenca entera. Las simulaciones a más grande escala junto con las mediciones repetidas en el tiempo, son necesarias para ayudar a predecir los efectos de futuros incendios y para el diseño de prácticas efectivas de rehabilitación de incendios.

### CONCLUSIONES

Las tasas de escurrimiento con la aplicación de lluvia simulada en los sitios de severidad alta, fueron ligeramente superiores a los sitios de severidad moderada. Las tasas de escurrimiento de los sitios con severidad moderada fueron estadísticamente diferentes a las de los sitios de severidad baja o no quemados. La repelencia al agua natural e inducida por el fuego, se presentó entre los 1-3 cm de profundidad del suelo en el incendio Bobcat y en la quema prescrita Lower Flowers. Lo anterior, sumado a la alta intensidad de la lluvia aplicada, puede explicar las pequeñas diferencias en escurrimiento, cuando se comparan las severidades. Los dos sitios de severidad alta en el incendio Hourglass produjeron la cantidad más baja de escurrimiento, debido posiblemente, a las condiciones húmedas del suelo antes de la simulación y a la nula presencia de la repelencia al agua. El porcentaje de cobertura del suelo y la pendiente tuvieron poca influencia en las tasas de escurrimiento.

La severidad del fuego tuvo una gran influencia en la producción de sedimentos en los dos incendios más recientes. Los sitios de severidad alta en el incendio Bobcat y en la quema prescrita Lower Flowers

produjeron casi ocho veces más sedimento que en los sitios de severidad moderada y de 16 a 33 veces más sedimento que en los sitios de severidad baja y no quemados. La media del sedimento que proviene de los dos sitios quemados a severidad alta en el incendio Hourglass fue solamente, dos veces más alto que en los sitios que no fueron quemados y esto sugiere que la erosión está próxima a los niveles pre-incendio de los seis años después del incendio. La producción de sedimentos estuvo altamente correlacionada con el porcentaje de suelo desnudo ( $R^2 = 0.78$ ) y débilmente correlacionada con la cantidad de escurrimiento y con el porcentaje de la pendiente. El promedio de sedimentos de los sitios recientemente quemados a severidad alta, fue de aproximadamente  $1.3 \text{ kg m}^{-2}$ . Este valor es considerado relativamente alto cuando es comparado con otros estudios, aún con la ausencia de la erosión en canalillos.

Las erosiones laminar y por salpicamiento, fueron los procesos dominantes en la escala del presente estudio. La fuerte relación observada con el porcentaje de cobertura del suelo y la producción de sedimentos, indica que la declinación de las tasas de erosión a las condiciones pre-incendios se deben principalmente, al incremento de la cubierta del suelo. Debido a que el escurrimiento y las tasas de erosión dependen más de la severidad del fuego que del tipo de incendio, los manejadores del fuego deberían minimizar las áreas de severidad alta en las quemas prescritas. Las técnicas de rehabilitación utilizadas después de los incendios forestales deberían dirigirse a maximizar la cantidad de cobertura del suelo. Más estudios a las escalas de ladera y de cuenca son necesarios para evaluar los cambios en las tasas de erosión e identificar los procesos que se presentan con el incremento de la escala.

### Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de las siguientes personas: al Dr. Jim Dobrowolski por facilitar el simulador de lluvia, a Dave Gloss y Carl Chambers del Servicio Forestal de los Estados Unidos por facilitar el trabajo de campo, al Dr. Pete Robichaud por transmitir su experiencia y conocimientos en el área de incendios y uso del simulador de lluvia. Por el apoyo en el trabajo de campo se agradece principalmente, a Jason Ingenthron, "Ted" Huffman, Carlos Ramos y Joe Wagenbrenner, así como al U.S. Environmen-

ral Protection Agency y el USDA Forest Service por apoyar esta investigación (Apoyo No. PSW-99-0008CA). También se agradece el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyar la estancia del primer autor en Colorado State University.

## LITERATURA CITADA

- Agnew, W., Labn, R. E., Harding, M. V. 1997. Buffalo Creek, Colorado, fire and flood of 1996. *Land and Water* 41: 27-29.
- Barrer, G., and Slaymaker, O. 1989. Identification, characterization, and hydrological implications of water repellency in Mountain Soils, Southern British Columbia. *Catena* 16: 477-489.
- Benavides S., J. de D., and MacDonald, L. H. 2001. Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plots, Colorado Front Range. *Hydrological Processes*, 15: 2931-2952.
- Benavides S., J. de D., and MacDonald, L. H. 2005. Measurement and prediction of post-fire erosion at the hillslope scale, Colorado Front Range. *Int. J. Wildland Fire*, 14: 457-474.
- Benavides S., J. de D., y Ramos S. C. E. 2007. Impactos potenciales de los incendios y caminos forestales en los procesos hidrológicos y la erosión en cuencas forestales. In: Sánchez B., C. *et al.* (eds). *Avances de investigación en agricultura sostenible IV: Bases metodológicas para el manejo integral de cuencas hidrológicas*. INIFAP CIRPAC. C. E. Uruapan, Michoacán. México. pp: 333-386.
- Burch, G. J., Moore, I. D., Burns, J. 1989. Soil hydrophobic effects on infiltration and catchment runoff. *Hydrological Processes* 3: 211-222.
- Campbell, R. E., Baker, M. B. Jr., Ffolliot, P. E., Larson, F. R., Avery, C. C. 1977. Wildfire effects on a ponderosa pine ecosystem: An Arizona case study. USDA For. Serv. Res. Pap. RM-191. Rocky Mt. For. and Range Exp. Sta. Fort Collins: CO. 12 p.
- DeBano, L. F. 1981. Water repellent soils: a state-of-the-art. Gen. Tech. Rep. PSW-46, illus. Pacific Southwest Forest and Range Exp. Station, Forest Service, U.S. Dept. Agriculture, Berkeley, CA. 21 p.
- DeBano, L. F. 2000a. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology* 231-232: 4-32.
- DeBano, L. F. 2000b. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology* 231-232: 195-206.
- DeBano, L. F., Mann, L. D., Hamilton, D. A. 1970. Translocation of hydrophobic substances into soil by burning organic litter. *Soil Science Society of America Proceedings* 34: 130-133.
- DeBano, L. F., Ffolliot, P. T., Baker, M. B. Jr. 1996. Fire severity effects on water resources. In: *Effects of Fire on Madrean Province Ecosystems: a symposium proceedings*. Ffolliot P.E. *et al.* (eds). U.S.D.A. Forest Service Gen. Tech. Report RM-GTR-289. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Coronado National Forest, Tucson, AZ. 77-84.
- Delp, P. G. 1968. Soil movement following an intense burn. M. S. thesis, Dept. of Recreation and Watershed Resources, Colorado State University: Fort Collins CO. 91 p.
- Disameyer G. E., (ed). 2000. Drinking water from forests and grasslands: a synthesis of the scientific literature. Gen. Tech. Rep. SRS-39. U. S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, N. C. 246 p.
- Doerr, S. H., and Thomas, A. D. 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology* 231-232: 134-147.
- Gardner, W. H. 1986. Water content. In: *Methods of soil analysis: Part 1*. Klute, A. (ed). American Society of Agronomy, Madison Wisc. pp: 493-507.
- Hendricks, B. A., and Johnson, J. M. 1944. Effects of fire on steep mountain slopes in central Arizona. *Journal of Forestry* 42: 568-571.
- Helvey, J. D. 1980. Effects of a north central Washington wildfire on runoff and sediment production. *Water Resources Bulletin*, 16: 627-634.
- Hewlett, J. D. 1982. *Principles of Forest Hydrology*. The University of Georgia Press: Athens. 183 p.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press: San Diego; 771 p.
- Huffman, E. L., MacDonald, L. H., Stednick, J. D. 2001. Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine, Colorado Front Range. *Hydrological Process* (In press).
- Inbar, M., Tamir, M., Wittenberg, L. 1998. Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology* 24: 17-33.
- Jarrett, R. 2000. Comunicación personal. USGS.
- MacDonald, L. H. 2000. Evaluating and managing cumulative effects: process and constraints. *Environmental Management* 26: 299-315.
- MacDonald, L. H., Sampson, R., Brady, D., Juarros, L., Martin, D. 2000. Predicting post-fire erosion and sedimentation risk on a landscape scale: a case study from Colorado. In: *Mapping Wildfire Hazards and Risks*. Sampson RN, Atkinson RD, Lewis JW (eds). Haworth Press: New York. pp: 57-87.
- Martin, D. A. and Moody, J. A. 2001. The flux and particle size distribution of sediment collected in hillslope traps after a Colorado wildfire. In: *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference*, Reno Nevada; III-40 to III-47.
- Mast, J. N. 1993. Climatic and disturbance factors influencing *Pinus ponderosa* stand structure near the forest/grassland ecotone in the Colorado Front Range. Ph. D. dissertation. University of Colorado at Boulder. Boulder CO.
- Megahan, W. F., and Molitor, D. C. 1975. Erosion effects of wildfire and logging in Idaho. In: *Watershed Management symposium: 1975 August*, Logan UT. American Society of Civil Engineers Irrigation and Drainage Division: New York; 423-444.
- Meyer, L. D. 1988. Rainfall simulators for soil conservation research. In: *Soil Erosion Research Methods*, Lal L (ed). Soil and Water Conservation Society: Iowa; pp: 75-95.
- Meyer, L. D., and Harmon, W. C. 1979. Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 22: 100-103.
- Miller, J. F., Frederick, R. H., Tracey, R. J. 1973. *Precipitation-frequency atlas of the Western United States; Volume*

- III-Colorado. National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce: Silver Spring Maryland; 67 p.
- Morris, S. E. and Moses, T. A. 1987. Forest fire and the natural soil erosion regime in the Colorado Front Range. *Annals of the Association of American Geographers* 77: 245-254.
- Mutchler, C. K., Murphree, C. E., McGregor, K. C. 1988. Laboratory and field plots for soil erosion studies. *In: Soil Erosion Research Methods*, Lal L. (ed). Soil and Water Conservation Society: Iowa; 9-36.
- Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., Finkner, S. C. 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 32: 1587-1593.
- Nelly, E. 2001. Comunicación personal, Colorado State University.
- Omi, P. 1994. Hourglass Fire. Pingree Park Vicinity. July 1-July 7, 1994. WESFIRE, Department of Forest Sciences, Colorado State University, <http://www.cnr.colostate.edu/fs/wesfire/hourglass.html>.
- Osborn, B. 1954. Effectiveness of cover in reducing soil splash by raindrop impact. *Journal of Soil and Water Conservation* 9: 70-76.
- Peterson, F. D. Jr., Spaeth, K. F., Carlson, D. H. 2001. Fire effects on sediment and runoff in steep rangeland watersheds. *In: Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference*, Reno Nevada; X-33 to X-40.
- Prosser, I. P. 1990. Fire, humans and denudation at Wangrah Creek, southern Tablelands, N.S.W. *Australian Geographical Studies* 28: 77-95.
- Prosser, I. P. and Williams, L. 1998. The effect of wildfire on runoff and erosion in native *Eucalyptus* forest. *Hydrological Processes* 12: 251-265.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., Yoder, D. C. (coords). 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703: 404.
- Robichaud, P. R., Hungerford, R. D. 2000. Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forest soils. *Journal of Hydrology* 231-232: 207-219.
- Robichaud, P. R., Waldrop, T. A. 1994. A comparison of surface runoff and sediment yields from low-and-high severity site preparation burns. *Water Resources Bulletin* 30: 27-34.
- Robichaud, P. R., Beyers, J. L., Neary, D. G. 2000. Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-63*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins CO; 85 p.
- SAS Institute, Inc. 1999. The SAS system for Windows, release 8.01. Cary, North Carolina.
- Scott, D. F., and Van Wyk, D. B. 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment. *Journal of Hydrology* 121: 239-256.
- Shahlaee, A. K., Nutter, W. L., Burroughs, E. R. Jr., Morris, L. A. 1991. Runoff and sediment production from burned forest sites in the Georgia Piedmont. *Water Resources Bulletin* 27: 485-493.
- Simanton, J. R., Wingate, G. D., Weltz, M. A. 1990. Runoff and sediment from a burned sagebrush community. *In: Effects of Fire Management of Southwestern Natural Resources, Proceedings of the Symposium*; November 14-17, 1988; Tucson, AZ. Krammes J. S. (coord). Gen. Tech. Rep. RM-191. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: Fort Collins CO. pp: 180-185.
- Tiedemann, A. R., Conrad, C. E., Dieterich, J. H., Hornbeck, J. W., Megahan, W. E. 1979. Effects of fire on water. A state-of-knowledge review. USDA Forest Service, General Technical Report WO-10: Washington D.C. 28 p.
- USDA Forest Service. 1995. Burned-area emergency rehabilitation handbook. FSH 2509.13-95-6. Washington DC. Chapter 20; 8 p.
- Veblen, T. T., and Lorenz, D. C. 1991. The Colorado Front Range: a century of ecological change. University of Utah Press. Salt Lake City, UT. 186 p.
- Wells, C. G., Campbell, R. E., DeBano, L. F., Lewis, C. E., Fredriksen, R. L., Frankin, E. C., Froelich, R. C., Dunn, P. H. 1979. Effects of fire on soil. A state-of-knowledge review. Gen. Tech. Rep. WO-7. Forest Serv., U. S. Department of Agriculture: Washington D.C. 34 p.
- Williams, J. D., Dobrowolski, J. P., West, N. E. 1995. Microphytic crust influence on interrill erosion and infiltration capacity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 38: 139-146.
- Zwolinski, M. J. 1971. Effects of fire on water infiltration rates at ponderosa pine stand. *In: Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest, Proceedings of the 1971 Meetings of the Arizona Section - American Water Resources ASSN. And the Hydrology Section - Arizona Academy of Science: Tempe AZ; 1: 107-112.*