EFECTO DE INCENDIOS Y CAMINOS EN CUENCAS FORESTALES

EFECTOS DE LOS INCENDIOS Y CAMINOS FORESTALES EN LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS Y LA EROSIÓN EN CUENCAS FORESTALES

Juan de Dios Benavides-Solorio[1]
Carlos E. Ramos-Scharrón[2]

RESUMEN

Los bosques están expuestos a muchos disturbios naturales y antropogénicos, algunos con consecuencias catastróficas para los recursos acuáticos y la erosión. Los incendios forestales y caminos forestales sobresalen por encima de muchos otros tipos de disturbios por su magnitud y potencial de impacto. Tanto los incendios como los caminos tienen efectos a largo plazo pero en ambos casos el efecto más dramático generalmente se presenta durante los primeros tres años después del disturbio. En este trabajo se presenta un resumen del conocimiento actual de los efectos de los incendios y caminos forestales en el aumento del escurrimiento y la erosión, y se discuten los factores que están asociados con estos cambios. Los efectos más directos y evidentes de ambos disturbios son la reducción de las tasas de infiltración en el suelo y el consecuente aumento en la frecuencia y magnitud de escurrimiento superficial a la escala de ladera. El aumento del escurrimiento a la escala de ladera puede causar aumentos en las avenidas máximas en los arroyos a escalas más grandes, pero la falta de disponibilidad de mediciones a largo plazo y la gran variación en las respuestas de escurrimiento a la escala de una cuenca no ha permitido que los investigadores logren un consenso sobre este

[1] **INIFAP-Centro de Investigación Regional Pacífico Centro.**
[2] **Department of Geography and the Environment. The University of Texas at Austin. University Station.**
Juan de Dios Benavides-Solorio <benavides.juandedios@inifap.gob.mx>

asunto. Superficies quemadas y de caminos forestales también pueden elevar las tasas de erosión superficial por un factor de hasta varios órdenes de magnitud por encima de superficies en su estado natural, como consecuencia del aumento en el escurrimiento y por la pérdida de cobertura vegetal.

Palabras clave: escurrimiento, erosión, incendios forestales, caminos forestales.

THE EFFECTS OF FOREST FIRES AND ROADS ON HYDROLOGIC AND SURFACE EROSION PROCESSES OF FORESTED WATERSHEDS

ABSTRACT

Forests are exposed to the effects of both natural and anthropogenic disturbances, which may lead to changes in hydrologic behavior and sediment production, and thus have dramatic effects on aquatic resources. Among the many different types of disturbances, forest fires and roads merit special attention due to the magnitude of their effects on hillslope processes and the potential damage to downstream water resources. Fires and roads may have long term effects on both surface hydrology and sediment production, but the highest effects typically occur within the first three years following disturbance. This article discusses the current state of knowledge in the changes in runoff and surface erosion processes associated to forest fires and roads and the factors associated with these changes. The most direct effects of both forest fires and roads in the hydrologic behavior of forests are to decrease soil infiltration rates and to increase the frequency and magnitude of runoff generation at the hillslope-scale. Although these hillslope-scale effects have the potential for increasing peakflows at larger spatial scales, limited reliable long-term data and the large variability in watershed-scale runoff responses has prevented researchers from reaching a consensus on this issue. Burned and

roaded surfaces may also increase surface erosion rates by several orders of magnitude above undisturbed areas, as a consequence of both the higher runoff rates and the diminished vegetation cover

Keywords: runoff, erosion, forest fires, forest roads

INTRODUCCION

Los bosques en su estado natural funcionan como reguladores del ciclo hidrológico. El bosque intercepta la precipitación tanto en el follaje como en el suelo forestal, facilitando altas tasas de infiltración, recarga de mantos freáticos y produciendo un escurrimiento superficial uniforme. El mantillo forestal también protege al suelo de la erosión porque disipa la energía de las gotas de lluvia e incrementa la resistencia al escurrimiento superficial (DeBano *et al*., 1998). Sin embargo, existen factores de disturbio que ocasionan daños a los bosques y la hidrología forestal de forma temporal o permanente, como son las cortas de árboles, caminos forestales, incendios forestales, el pastoreo, la fertilización, aplicación de herbicidas y pesticidas, actividades de recreación y minería (MacDonald *et al*., 2006). Posiblemente los factores más importantes tanto por su extensión como por su potencial para modificar la hidrología forestal son los incendios forestales y los caminos forestales.

Las áreas carentes de vegetación producidas por la presencia de incendios o los caminos forestales pueden alterar dramáticamente los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos de las áreas de bosques. Los cambios hidrológicos afectan el escurrimiento superficial y la erosión los cuales pueden producir grandes avenidas y movimiento de sedimentos que afectarán la calidad del agua, el ancho y profundidad de los canales y las comunidades acuáticas. La presencia de sedimentos en el cauce tiene otras consecuencias fatales como es el

azolve de presas. Dependiendo de la magnitud y severidad y esiliencia del ecosistema, los efectos de los incendios pueden ser de corta (Prosser y Williams, 1998) o de larga duración (Helvey, 1980). Se conoce que tanto para los incendios forestales como los caminos forestales los mayores impactos se presentan dentro de los primeros años de su ocurrencia (Benavides-Solorio, 2003; Megahan, 1974).

Cuando se presentan incendios severos que eliminan la vegetación y consumen la materia orgánica del suelo forestal, los cambios iniciales se evidencian en la reducción de la intercepción y la infiltración (DeBano *et al*., 1998). Desde un punto de vista hidrológico los cambios más importantes se presentan en el suelo forestal porque afecta directamente las tasas de infiltración y la magnitud del escurrimiento superficial (Beschta, 1990). Los factores más directamente relacionados con incrementos en el escurrimiento superficial son la severidad del fuego (Campbell *et al*., 1977; Benavides-Solorio, 2003), cubierta del suelo (Prosser y Williams, 1998; Benavides-Solorio y MacDonald, 2001; Benavides-Solorio, 2003), intensidad de la lluvia (Moody y Martin, 2001), la formación de una capa repelente al agua (Scott, 1993; Benavides-Solorio y MacDonald, 2001) y la pendiente (Shahlaee *et al*., 1991). El incremento de la erosión superficial es otra consecuencia del escurrimiento superficial, y esta también depende de la severidad del fuego (Campbell *et al*., 1977; Benavides-Solorio y MacDonald, 2005), así como la intensidad de la lluvia (Robichaud y Waldrop, 1994), tiempo de recuperación de la vegetación después del incendio (Morris y Moses,1987; Benavides-Solorio y MacDonald, 2005), capa repelente al agua (Krammes y Osborn, 1969), pendiente del terreno (Robichaud y Brown, 1999) y la erosionabilidad del suelo (Giovannini *et al*., 2001).

Los caminos forestales son un medio efectivo que facilita el transporte y acceso a las áreas de aprovechamiento de los bosques. Pero, por otro lado, los caminos también pueden ser responsables del deterioro de los ecosistemas forestales debido a la sobreexplo-

tación de sus recursos, la fragmentación de ecosistemas por la interrupción de rutas migratorias, o por alteraciones a las condiciones naturales del hábitat asociados a cambios en los procesos hídricos y geomorfológicos (Forman y Alexander, 1998).

A pesar de que los caminos forestales usualmente ocupan una porción muy pequeña de la superficie del bosque, estos pueden influenciar los procesos hidrológicos y geomorfológicos a distintas escalas espaciales, desde las laderas y pequeños tributarios hasta al nivel de cuenca (Luce y Wemple, 2001). Tan grave es la influencia que pueden tener los caminos, que hidrólogos del Servicio Forestal de los Estados Unidos (EE. UU.) han reconocido que los caminos son «la influencia antropogénica más grande en zonas boscosas» (Elliot *et al*., 2000). Los cambios que se pueden esperar en la hidrología a consecuencia de los caminos forestales se representan como una baja capacidad de infiltración producto de superficies muy compactas y una concentración del escurrimiento superficial. También los caminos pueden cambiar la geometría hidráulica del sistema fluvial, aumentando la efectividad para transportar sedimentos, nutrientes y agentes contaminantes. El aumento del sedimento puede ser producto de la erosión superficial o deslizamientos de tierra.

El propósito de este trabajo es conocer el impacto que tienen los incendios forestales y los caminos forestales en los procesos hidrológicos, así como sobre la erosión y la necesidad de investigar con más detalle estos problemas en México. En las siguientes secciones se discute cuál es el papel que juega cada una de los factores de los incendios forestales en el escurrimiento y la erosión; en el área de caminos se resume el conocimiento científico sobre los cambios en los procesos hidrológicos y geomorfológicos asociados a los caminos forestales. Si se desea ampliar este último tema se recomiendan los trabajos de Forman y Alexander (1998) y Gucinski *et al*. (2001). Es necesario aclarar que en este trabajo solamente se discute la erosión superficial y no movimientos de masas ni deslizamientos.

INCENDIOS FORESTALES

Los incendios forestales en todas las partes del mundo ocurren anualmente en la época de sequía y México no es la excepción. En ocasiones los daños observados después de los incendios pasan desapercibidos, pero en otras los daños a las cuencas forestales son muy considerables y lamentables. Para que ocurran desastres de magnitudes importantes deben combinarse varios elementos como son: incendios severos que consuman la vegetación y gran parte del material combustible, incendios que abarquen una alta proporción de una cuenca en particular, incendios seguidos por lluvias intensas o de larga duración, la presencia de una capa repelente al agua y distribuida en gran parte del área quemada, y además que no se haya realizado ninguna labor efectiva de prevención. En México los incendios pueden ocasionar desastres debido a la topografía abrupta en las áreas boscosas y la presencia de lluvias erosivas e intensas. Por las razones anteriores es necesario conocer y estudiar los fundamentos bajo los cuales se pueden presentar y/o prevenir daños de grandes magnitudes a las presas, lagos y ríos y arroyos. A continuación se presentan algunos de los factores más importantes que ocasionan el aumento en el escurrimiento y la erosión después de los incendios forestales.

Severidad del fuego

Los efectos de los incendios y las quemas controladas sobre la vegetación forestal y el suelo no son homogéneos debido a diversas razones, pero probablemente la más importante es la cantidad de material combustible, lo cual resulta de las diferentes tasas derazones, fuego y diferente calor por unidad de área. La severidad del fuego ha sido utilizada para estratificar los efectos de los incendios en el escurrimiento y erosión (Campbell *et al*., 1977; DeBano *et al*., 1998; Inbar *et al*., 1998; Benavides-Solorio, 2003). La severidad del fuego es una clasificación subjetiva de los incendios forestales sobre la

superficie del suelo. Desde el punto de vista hidrológico, el daño que se presenta en el suelo forestal es más importante que el daño a las copas de los árboles debido a que la cubierta forestal influye directamente en las condiciones hidráulicas y erosionabilidad del suelo.

La severidad se aprecia después del incendio forestal y se evalúa como un efecto. Las principales clases de severidad del fuego son alta, moderada y baja, y se definen de acuerdo con la materia orgánica u hojarasca consumida y la presencia de cambios superficiales en el suelo (Figura 1). Una severidad alta presenta una pérdida casi completa de la cubierta del suelo así como cambios en el suelo superficial, como son la coloración rojiza ocasionada por la fusión de las arcillas. En áreas de alta severidad el escurrimiento puede incrementarse desde un pequeño porcentaje hasta porcentajes mayores del 100 por ciento que áreas de baja severidad (Campbell *et al*., 1977; Benavides-Solorio y MacDonald, 2001, 2005). El incremento en erosión puede ser de varios órdenes de magnitud más alto que áreas no quemadas o de baja severidad (Campbell *et al*., 1977; Morris y Moses, 1987; Robichaud y Waldrop, 1994; Inbar *et al*., 1998; Benavides-Solorio y MacDonald, 2001, 2005; Pierson *et al*., 2002). En general los valores medios de pérdida de suelo en áreas de alta severidad están entre 8 y 13 t ha^{-1} (Cuadro 1), pero se pueden alcanzar valores extremos mayores de 370 t ha^{-1} (Cuadro 2).

La severidad también puede afectar las tasas de recuperación del escurrimiento y la erosión. Suelos en áreas de severidad moderada o baja pueden recuperarse más rápido que los de alta severidad (DeBano *et al*., 1998; Benavides-Solorio, 2003), debido a que los árboles de las severidades moderada o baja no son consumidos totalmente y están aportando continuamente hojarasca al suelo forestal. Este no es el caso en áreas de severidad alta, en donde generalmente consume toda la vegetación junto con el material combustible del piso forestal.

Cuadro 1. Valores medios de producción de sedimentos en diferentes incendios estratificados por la severidad del fuego.

Vegetación y localidad	Severidad	Producción de sedimento (t ha^{-1})	Escala de medición	Autores
Pino ponderosa, Arizona (EE. UU.)	Baja Media Alta	0.003 0.02 1.6	Ladera	Debano *et. al.,* 1998
Bosque meditrráneo Israel	Sin quema Baja Alta	<0.0001 0.03 8.8	Ladera (Trampas de sedimento)	Inbar *et al*., 1998
Pino ponderosa Colorado (EE. UU.)	Baja Media Alta	0.08 0.05 9.8	Ladera (Trampas de sedimento)	Benavides-Solorio y MacDonald, 2005
Pino ponderosa Colorado (EE. UU.)	Baja Media Alta	0.8 1.8 12.8	Sitio (Simulador de lluvia)	Benavides-Solorio, 2003

Figura 1. Presencia de diferentes severidades en un incendio forestal (Colorado, EE. UU.). Severidad alta consumo total de material combustible y cambios en el suelo, severidad media áreas mezcladas con consumo total o parcial de combustibles sin cambios apreciables en el suelo, severidad baja areas con consumo parcial de material combustible sin cambios en el suelo.

Cobertura del suelo

La severidad del fuego tiene una influencia directa en la pérdida de la cubierta vegetal y por lo tanto en el incremento de la proporción del suelo desprovisto de vegetación. La cubierta del suelo es importante porque protege al suelo del salpicamiento y ofrece resistencia al escurrimiento superficial, lo cual incrementa los encharcamientos y maximiza las tasas de infiltración. La efectividad de la cubierta del piso forestal para prevenir erosión es proporcional

a la cantidad de la energía de la lluvia que es disipada por la vegetación (Osborn, 1954). Después de los incendios forestales se ha observado que el escurrimiento (Marcos *et al*., 2000; Benavides-Solorio y MacDonald, 2001) y la producción de sedimento (Inbar *et al*., 1998; Robichaud y Waldrop, 1994; y Benavides-Solorio y MacDonald, 2001, 2005) decrecen con el incremento de la cubierta vegetal. Otros estudios mencionan que se necesita una cubierta de la superficie del suelo desde 60 a 80 por ciento para tener una protección efectiva de la erosión laminar (Wright *et al*., 1976, 1982; Morris y Moses, 1987; Benavides-Solorio y Mac Donald, 2005) (Figura 2). Mientras que para proteger el suelo de la erosión en canalillos, se requiere de una protección mayor del 70 por ciento (Pannkuk *et al*., 2000; Benavides-Solorio y MacDonald, 2005). La ventaja de la cubierta del suelo es que puede ser fácilmente cuantificada y además correlacionada con otras variables como la severidad del fuego.

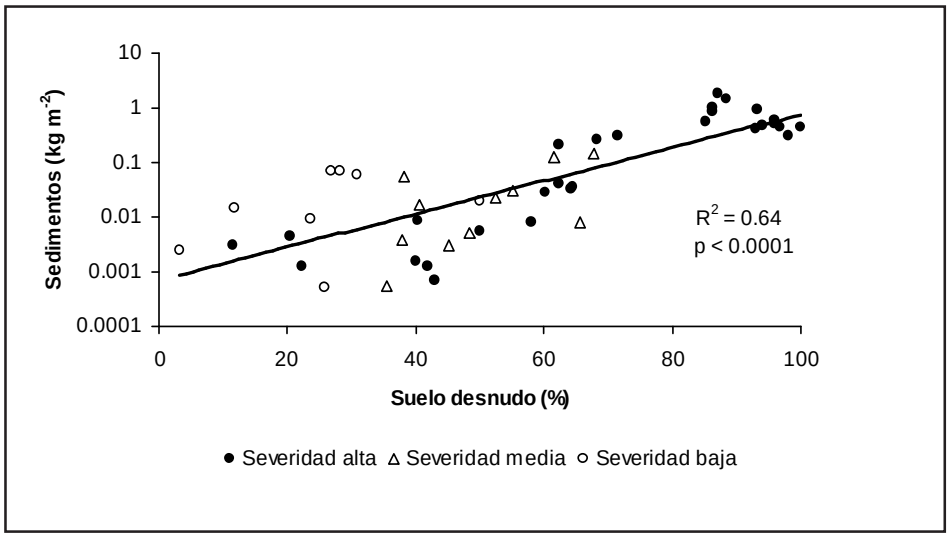

Figura 2. Relación entre la producción de sedimentos superficiales y el suelo desnudo en diferentes incendios de Colorado, USA, en el verano del 2000. (Tomado de Benavides-Solorio y MacDonald, 2005).

Precipitación

La lluvia tiene influencia directa en el escurrimiento y también provee el medio y la energía necesaria para erosionar y transportar sedimento. El efecto de la lluvia está más relacionado con la intensidad que con la cantidad, debido a que la intensidad afecta el tamaño de las gotas de lluvia y la energía cinética que lleva asociada (Wischmeier y Smith, 1958), así como el esfuerzo cortante que se aplica a la superficie del suelo que a su vez está controlado por el espesor del escurrimiento. Las lluvias de baja intensidad producen generalmente poca o nula erosión inclusive en áreas con severidad alta (Striffler y Mogren, 1971), mientras que tormentas de alta intensidad producen incrementos notables en el escurrimiento y la erosión (Hendricks y Johnson, 1944; Moody y Martin, 2001; Benavides-Solorio, 2003). Aunque se ha detectado que aun tormentas de moderada intensidad sobre áreas quemadas de alta severidad producen incrementos substanciales de sedimento en la escala de ladera (Megahan y Molitor, 1975; Prosser y Williams, 1998; Benavides-Solorio, 2003).

En Australia se observó escurrimiento y erosión en intensidades (I_{30})de 7 mm h^{-1}, con incrementos muy notables cuando la lluvia se incrementó a 13 mm h^{-1}, pero hubo poco incremento adicional en intensidades de 30 mm h^{-1} (Prosser y Williams, 1998). En Israel y Colorado solo se presentó erosión y escurrimiento con intensidades (I_{30}) mayores de 10 mm h^{-1} (Inbar *et al*., 1998; Moody y Martín, 2001; Benavides-Solorio, 2003). Intensidades mayores de 70 mm h^{-1} en pequeña y gran escala produjeron grandes cantidades de escurrimiento y erosión en Colorado y dañaron la red de canales y arroyos de forma permanente (Moody y Martin, 2001).

Pendiente y su longitud

Se reconoce que la pendiente y la longitud de la pendiente tienen influencia sobre el escurrimiento superficial y la erosión (Smith y Wischmeier, 1957, Meyer y Monke, 1965; Kilinc y Richardson, 1973). La pendiente y la longitud de una ladera afectan la fuerza tractiva del escurrimiento al controlar la profundidad y la velocidad del flujo, respectivamente (Meyer, 1976; Thornes, 1980; Fox y Bryan, 1999; Chaplot y Bissonnais, 2000). El escurrimiento en una pendiente de 40 por ciento tiene dos veces la velocidad de una pendiente del 10 por ciento, y el doble de la velocidad incrementa la energía cinética del flujo en cuatro veces (Farmer y Van Haveren, 1971). Altas velocidades generan más fuerza tractiva, por lo tanto se produce mayor desprendimiento de partículas (Fox y Bryan, 1999; Battany y Grismer, 2000). Sin embargo, algunos investigadores no encontraron incrementos en escurrimiento y erosión cuando se incrementaba la pendiente y la longitud, y sugieren que otros factores como tipo de suelo, fracturas del suelo, homogeneidad y encharcamiento pueden ser importantes (Bryan, 1979; Evans, 1980; Mah *et al*., 1992; Benavides-Solorio, 2003). El escurrimiento y la erosión después de los incendios forestales se ha visto incrementado con la pendiente en pequeñas parcelas (Shahlaee *et al*., 1991) y en escala de ladera (Hendricks y Jonson, 1944; Wright *et al*., 1976; Robichaud y Brown, 1999) (Cuadro 2), las cuales han sido altamente significativas y han alcanzado valores muy altos, mayores de 300 t ha^{-1} con pendientes de un 66 por ciento. Aunque Benavides-Solorio y MacDonald (2001, 2005) no encontraron influencia de la pendiente en los incrementos en escurrimiento y erosión en pequeña escala y de ladera, debido probablemente a que lo sitios no eran uniformes y que la pendientes estudiadas eran generalmente mayores de 30 por ciento.

Cuadro 2. Valores medios de producción de sedimentos en diferentes incendios estratificados por pendiente. (q. c. = quema controlada, t. = testigo)

Vegetación y localidad	Tipo de quema y pendiente	Producción de sedimento (t ha^{-1})	Escala de medición	Autores
Varias Coníferas Arizona (EE. UU.)	testigo Incendio, 43% Incendio, 66%	<0.001 72.0 200.0	Ladera (Diferencia de niveles por transectos)	Hendricks y Johnson, 1994
Junipero y Pasto Texas (EE. UU.)	testigo q.c. plano q.c. 20% q.c. 54%	<0.01 0.03 2.0 8.0	Ladera	Wright *et al.*, 1976
Chaparral California (EE. UU.)	t., leve q.c. leve t., escarpada q.c. escarpada	0.0 3.0 0.002 7.0	Ladera	DeBano y Conrad, 1976
Pino ponderosa y coníferas Oregon (EE. UU.)	Incendio, 20% Incendio 30% Incendio 60%	1.1 2.2 2.5	Ladera (Trampas de sedimento)	Robichaud y Brown, 1999

Propiedades físicas del suelo

Las características físicas del suelo tienen influencia en el escurrimiento y erosión. La erosionabilidad del suelo varía con la textura y porcentaje de materia orgánica, porque ambas afectan el salpicamiento, la fuerza tractiva necesaria para transportar las partículas de suelo y las tasas de infiltración. En general, suelos con bajo contenido de limo son menos erosionables, independientemente

que tengan más arena o más arcilla. Benavides-Solorio (2003) encontró que en seis incendios forestales, los suelos más erosionables eran los que tenían un alto contenido de limo. Suelos con bajos contenidos de materia orgánica también son más susceptibles a ser erosionados (Young, 1976; Morgan, 1996). No existe un acuerdo general sobre los efectos del fuego sobre propiedades individuales del suelo, aunque los cambios más aceptados es que el fuego destruye la materia orgánica que une las partículas y los agregados (Durgin, 1985; Giovannini *et al*., 2001). El fuego también puede producir una capa repelente al agua, particularmente en suelos gruesos, y esto puede reducir las altas tasas de infiltración natural de los bosques (DeBano, 1981, Benavides-Solorio y MacDonald, 2001). Fuegos con temperaturas muy altas también pueden causar la fusión de las partículas de arcilla (Dyrness y Youngberg, 1957). Por su importancia la propiedad física de repelencia al agua se abordará por separado.

Repelencia al agua

La repelencia al agua es un problema porque reduce la infiltración y aumenta el escurrimiento superficial. La propiedad del suelo de repeler al agua se puede encontrar en forma natural, aunque puede incrementarse por los fuegos forestales (DeBano, 1981). Estudios recientes en los incendios forestales de Colorado, indican que la capa repelente al agua se localiza sobre la superficie del suelo o pocos milímetros debajo del mismo o de la capa de ceniza (Huffman *et al*., 2001; Benavides-Solorio y MacDonald, 2001) (Figura 3). Debido al efecto que tiene en reducir la infiltración, varios investigadores sugieren que el incremento al escurrimiento y erosión observado a la escala de sitio se debe exclusivamente a este factor. Otros estudios también reconocen que la capa repelente no es uniforme y tiene una variabilidad espacial y temporal muy alta (Megahan y Molitor, 1975; Morris y Moses, 1987; Prosser y Williams, 1998; Benavides-Solorio, 2003); por lo que algunas tendencias que se observaron a pequeña

escala son difíciles de confirmar a escala de ladera o de microcuenca (Rice y Osborn, 1970; Prosser y Williams, 1998, Benavides-Solorio, 2003; Kunze y Stednick, 2006). Benavides-Solorio (2003) encontró que la presencia de una capa repelente explica el 35 por ciento de la variabilidad en escurrimiento y alrededor de un 50 por ciento en la erosión a pequeña escala (1 m^2) y un 20 por ciento en erosión a escala de ladera.

Figura 3. Capa de repelencia al agua que impide la infiltración al suelo y se comporta como escurrimiento superficial, (Colorado, EE. UU.).

CAMINOS FORESTALES

Para los propósitos de este trabajo es necesario definir cuatro componentes típicos de la estructura de un camino forestal (Figura 4). Hacia el lado más elevado de la pendiente natural se encuentra el talud de corte o simplemente corte. Los taludes de corte consisten en superficies muy empinadas y en ellas se puede encontrar aflorando el suelo y la roca madre en distintos grados de intemperización. En la base del talud de corte típicamente se encuentra la cuneta que generalmente esta cubierta por material que ha sido erosionado del corte y en algunos casos por vegetación. La superficie utilizada por los vehículos se conoce como plantilla, piso firme, lecho, o superficie de rodamiento del camino y puede estar compuesta por distintos tipos de materiales nativos o importados tales como simple tierra, grava, cemento, asfalto, u otros. Dependiendo del diseño y las condiciones locales, la inclinación transversal del camino típicamente no excede un 3 por ciento y puede estar inclinada hacia la cuneta (hacia adentro), hacia el talud (hacia afuera) o hacia dos aguas (ambos lados). La inclinación longitudinal de los caminos es muy variada y depende de su delineación con respecto a la topografía. Con la excepción de algunos tramos cortos la inclinación de los caminos rara vez debería exceder el 20 por ciento. Durante el proceso de construcción de los caminos a veces es necesario añadir material como relleno para obtener el ancho requerido por el piso firme y esto crea una superficie conocida como el terraplén o talud de relleno. El terraplén puede estar compuesto por material que contiene suelo y roca que ha sido removido del talud de corte o por material importado.

Efectos hidrológicos

Reducción de la capacidad de infiltración

El mayor número de referencias relacionadas a los efectos de los caminos en procesos hidrológicos tratan sobre el tema de la reducción en la capacidad de infiltración en la superficie de rodamiento del camino en comparación con los suelos naturales. Dada la natura-

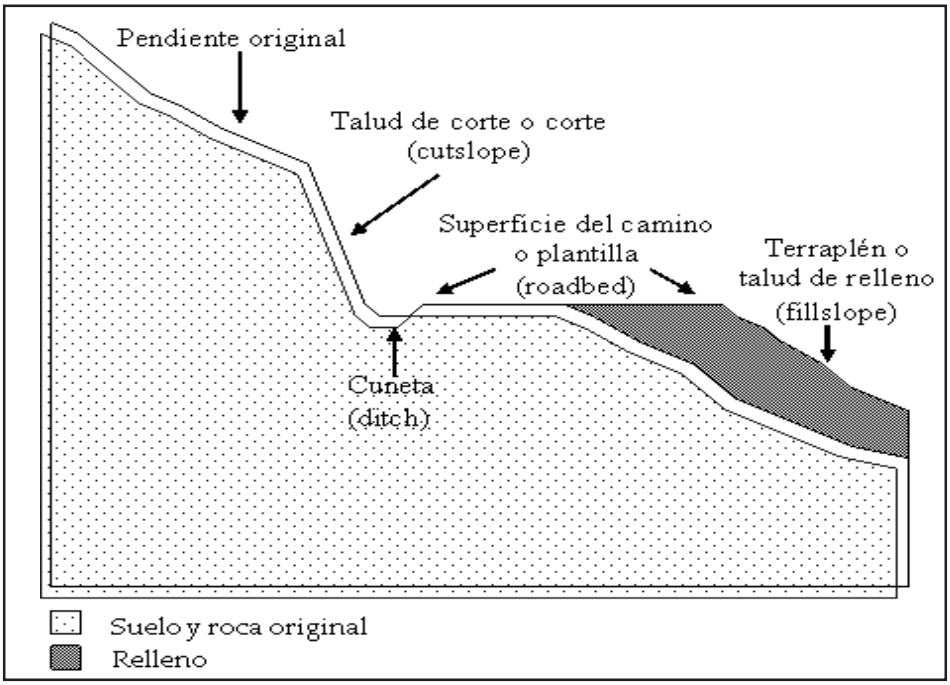

Figura 4. Componentes de un camino forestal del tipo corte y relleno.

leza del problema los estudios empíricos sobre este tema han cuantificado los efectos a escalas espaciales que varían desde muy pequeñas (200 cm^2) hasta la escala de un segmento de camino (~1 000 m^2). Los experimentos a escalas pequeñas se efectúan con el uso de simuladores de lluvia y utilizan distintos tipos de anillos de infiltración (Harden, 1992) o discos permeables (Ziegler y Giambelluca, 1997). Experimentos a esta escala sirven para definir curvas de infiltración y parámetros que definen la capacidad hidráulica del material que compone la superficie de los caminos.

Los experimentos a la escala de segmento de camino se efectúan con la precipitación natural o los simuladores de lluvia y consis-

ten en tomar medidas de escurrimiento con métodos manuales (Reid, 1981; Reid y Dunne, 1984; Ziegler *et al*., 2001), contenedores para atrapar toda la escorrentía (MacDonald *et al*., 2001), y el uso de vertedores pre-calibrados que contienen sistemas automatizados de toma de datos de la altura del tirante de agua del vertedor (Ramos-Scharrón y MacDonald, 2006). A esta escala de medición es muy difícil determinar directamente las curvas de infiltración o los valores de conductividad hidráulica.

La mayor proporción de estudios indican que en la superficie del camino se genera una mayor cantidad de escurrimiento por unidad de área que en otras áreas del bosque (Harden, 1992), superficies utilizadas para la agricultura (Ziegler y Giambelluca, 1997) y otras superficies del cuerpo prismático de los caminos (Croke *et al*., 2006). La falta de cubierta vegetal y un alto grado de compactación son usualmente calificadas como las dos razones principales responsables del aumento en la frecuencia y magnitud de escorrentía superficial sobre los caminos en comparación con los suelos no alterados (Gucinski *et al*., 2001). Los valores de infiltración promedio reportados en la literatura para caminos sin asfaltar varían desde 0.02 hasta 3.8 cm hr^{-1} (Cuadro 3). Para dar perspectiva a estos números, los podemos comparar con medidas en áreas naturales tomados con anillos de infiltración en Linares-México que van de 2 a 10 cm hr^{-1} (Návar y Synnott, 2000).

En comparación con los suelos no alterados los caminos suelen tener material más compactado (Elliot *et al*., 2000). Algunos estudios han comparado la densidad en seco de la superficie de los caminos con la densidad en seco de los suelos naturales con el objetivo de determinar diferencias en la compactación del terreno causadas por la construcción, preparación del camino y el tráfico vehicular. Al comparar las medidas de densidad en seco de los caminos con las de los suelos no alterados en las mismas áreas de estudio, se concluye que los caminos tienen valores que van desde un 4 por ciento hasta

alcanzar valores de casi 900 por ciento más altos que la densidad de los suelos no alterados. Los valores de la superficie del camino se encuentran de un 0.4 t m^{-3} hasta 2.0 t m^{-3} (Harden, 1992; Ziegler y Giambelluca, 1997).

Los coeficientes de escurrimiento reportados en la literatura para la superficie del camino son muy variados y van desde un nulo escurrimiento hasta 0.86 cm cm^{-1} (Cuadro 3). El coeficiente de escurrimiento es la fracción de la precipitación que es convertida en flujo superficial. La gran variabilidad en los valores de coeficientes de escurrimiento reportados en la literatura pueden ser el resultado de diferencias en las características de la superficie del camino (compactación y textura) y de la variabilidad en las condiciones climáticas antes y durante los eventos de lluvia que generaron los datos (grado de saturación al inicio del evento y características del evento relacionadas a su intensidad y duración).

La textura del camino puede ejercer una importante influencia en la capacidad de infiltración. Los estudios sugieren que mientras más gruesa es la composición de la superficie del camino menos escorrentía se produce (Coker *et al*., 1993). El tamaño de los granos que componen cualquier material granular controla en gran manera la porosidad del material. Una abundancia de material grueso implica altos valores de porosidad y una alta capacidad de infiltración. El estudio de Flerchinger y Watts (1987) retomó este argumento y determinó que el porcentaje de material fino (limo y arcilla) en el camino tiene un rol principal en la conductividad hidráulica. Utilizando datos de cinco diversas fuentes estos investigadores desarrollaron ecuaciones empíricas de conductividad hidráulica en función de la porosidad y la fracción del material compuesta por limo y arcilla.

Cuadro 3. Resumen de valores de coeficientes de escurrimiento, infiltración promedio y conductividad hidráulica para caminos forestales.

Referencia	Escala del experimento (m^2)	Coeficiente de escurrimiento ($cm\ cm^{-1}$)	Infiltración promedio ($cm\ h^{-1}$)	Conductividad hidráulica ($cm\ h^{-1}$)
Arnáez *et al*., 2004	0.13	0.46	—	—
Bren y Leitch, 1985	2 100	0.04 - 0.80	—	—
Coker *et al*., 1993	35-60	0.42 - 0.66	1.2 -2.2	—
Fahey y Coker, 1992	100	—	0.3	—
Flerchinger y Watts, 1987	122	—	—	0.25 – 0.79
Grayson *et al*., 1993	~1 100	—	—	—
Harden, 1992	0.02	0.00 - 1.00	0.4 -3.6	—
Kahklen, 1993	100-250	—	0.09	—
Luce, 1990	1	—	—	0.17 - 0.60
Luce y Cundy, 1992				
Luce y Cundy, 1994	1-5	—	—	0.21 – 0.50
Ramos-Scharrón y MacDonald, 2006	1 200	0.00 –0.72	0.25 – 3.8	0.23*
Reid, 1981	250-920	0.44 - 0.58	0.05	—
Reid y Dunne, 1984				
Sampson, 1999	35-60	0.04 - 0.13	—	—
MacDonald *et al*., 2001				
Simons *et al*., 1982	—	—	—	0.13 – 2.29
Sundberg, 1981	—	—	—	0.46
Vincent, 1979	110-160	0.37 - 0.80	0.02 - 0.05	—
Wald, 1975	400-800	—	—	—
Ward y Seiger, 1983	—	—	—	0.05 – 2.29
Watts, 1981	—	—	—	0.05 – 0.61
Ziegler y Giambelluca, 1997	<1	—	—	0.02 -- 0.50
Ziegler *et al*., 2000	~3	0.62 - 0.84	0.62 - 3.7	—
Ziegler *et al*., 2001b	~3-5	0.60 - 0.86	0.62 - 1.6	—

*** Indica valores promedio.**

Los valores de infiltración de cualquier material granular también dependen de su nivel de saturación (la fracción del volumen de poros que contiene agua). Mientras más saturado esté el material más baja va a ser su capacidad de infiltración debido a una disminución en la influencia de las fuerzas capilares para poder absorber agua (Aparicio-Mijares, 2003). Durante un evento de lluvia el agua que se va infiltrando por las cavidades porosas causa una disminución exponencial en la tasa de infiltración. La disminución de la infiltración en los caminos puede alcanzar valores de hasta 10 veces menores que durante el inicio del evento (Ramos-Scharrón y MacDonald, 2006). El aumento en la capacidad de infiltración entre distintos eventos de lluvia depende de la capacidad del suelo en drenar el agua por gravedad o por procesos de evaporación, pero hasta la actualidad ningún estudio ha podido evaluar con profundidad este efecto en los caminos. Estudios empíricos han determinado que las condiciones de humedad del terreno al inicio de un evento de lluvia pueden tener grandes efectos en la cantidad total de escurrimiento producido por un camino (Harden, 1992), y que esto es particularmente importante para eventos de corta duración (~ 30 minutos o menos) (Ramos-Scharrón y MacDonald, 2006). La gran variabilidad en las tasas de infiltración al inicio de eventos de lluvia crea muchas dificultades al momento de tratar de utilizar datos empíricos para calibrar y validar modelos físicos de infiltración (Simons *et al*., 1978; Luce, 1990; Luce and Cundy, 1994). En un estudio efectuado en un clima tropical se estimó que estos problemas tienen un efecto mínimo en la capacidad de predecir escurrimiento a largo plazo dada la tendencia general a que la mayor parte de la precipitación y el escurrimiento superficial ocurre durante eventos de lluvia de larga duración y no durante eventos cortos (Ramos-Scharrón y MacDonald, 2006).

Intercepción del flujo superficial

En las últimas dos décadas han surgido un gran número de estudios que han avanzado grandemente nuestra apreciación cuantitativa de

los flujos sub-superficiales. Estos estudios sugieren que, en áreas no alteradas por caminos, el agua que es transportada como flujo sub-superficial puede constituir una parte substancial del escurrimiento directo que ocurre a partir de eventos de lluvia (Sidle *et al*., 1995; Tromp-van Meerveld y McDonnell, 2006a, 2006b). Los caminos de tipo corte y relleno (Figura 4) en las partes medias de las laderas tienen la capacidad de interceptar estos flujos sub-superficiales. La capacidad de intercepción de estos flujos y el aumento en la conectividad son comúnmente mencionados en la literatura como los más importantes efectos que tienen los caminos forestales en la alteración del escurrimiento de cuencas (Jones y Grant, 1996), pero desafortunadamente estas aseveraciones no han sido comprobadas con datos empíricos. El único estudio conocido que compara el papel de la intercepción sub-superficial con el escurrimiento superficial generado en la superficie del camino es el de Megahan (1972) en el estado de Idaho (EE. UU.). En este estudio el flujo interceptado por un segmento de camino durante un periodo de un año fue 7.3 veces más alto que un estimado del escurrimiento generado por la superficie del camino. Dada la potencial importancia de la intercepción de flujo sub-superficial en el comportamiento hidrológico de laderas y cuencas este tema debe ser estudiado con más detalle en investigaciones futuras.

Redistribución del escurrimiento superficial

El efecto de los caminos en la redistribución de agua en la superficie del terreno es difícil de medir directamente. Los métodos utilizados para estudiar este efecto consisten en hacer observaciones cualitativas del grado de conectividad entre el sistema de caminos con el sistema fluvial, analizar cambios en los patrones de escurrimiento a la escala de sub-cuenca o cuenca, o aplicar modelos hidrológicos con capacidad para integrar los caminos en sus predicciones. Como parte de un estudio efectuado en el Estado de

Oregón (EE. UU.) se prepararon mapas con sistemas de información geográfica (SIG) para determinar el nivel de conectividad entre los caminos forestales y el sistema fluvial (Wemple, 1994). Estos mapas identificaron puntos de drenaje y los caracterizaron con respecto al tipo de conectividad con el sistema fluvial de acuerdo a las siguientes cuatro categorías: 1) conexión directa al sistema fluvial; 2) conexión indirecta a través de surcos y zanjas continuas entre el camino y el sistema fluvial; 3) conexión indirecta por medio de zanjas que pierden la integridad de su forma entre el camino y el drenaje natural; y 4) falta de conexión por procesos de escurrimiento superficial. El estudio determinó que un 35 por ciento del sistema de caminos estaba conectado directamente con el sistema fluvial, mientras que un 23 por ciento estaba indirectamente conectado y un 42 por ciento carecía de alguna conexión superficial (Wemple, 1994; Wemple *et al*., 1996). Un estudio muy similar efectuado en el sureste de Australia determinó que un 44 por ciento del sistema de carreteras estaba directa o indirectamente conectado con el sistema fluvial (Croke y Mockler, 2001). Este estudio también determinó que el tipo y el grado de conectividad están relacionados con la distancia desde la carretera hasta el sistema fluvial y con el tipo de estructura utilizada para drenar la carretera, el área de captación de la superficie de la carretera y la pendiente de la ladera que recibe el drenaje del camino.

Estudios empíricos sobre los efectos de caminos en el escurrimiento a la escala de sub-cuenca y cuenca usualmente se han enfocado en cambios en el flujo pico y en el tiempo para alcanzar el pico (el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el flujo pico de un hidrograma) (Figura 5). Varios estudios han tratado este tema, pero entre los de más influencia se debe mencionar el estudio de Jones y Grant (1996), el cual intentó cuantificar los efectos combinados de los caminos y la tala de árboles en los flujos picos de cuencas pequeñas (0.6-1.0 km^2) y de cuencas grandes (60-640 km^2). Este estudio generó una serie de discusiones sobre la calidad de los

datos y la metodología estadística utilizada para determinar cambios en el escurrimiento (Thomas y Megahan, 1998; Jones y Grant, 2001; Thomas y Megahan, 2001). Con el propósito de simplificar esta disputa se limitará la discusión de estos trabajos a una presentación breve de sus argumentos y de sus conclusiones más importantes.

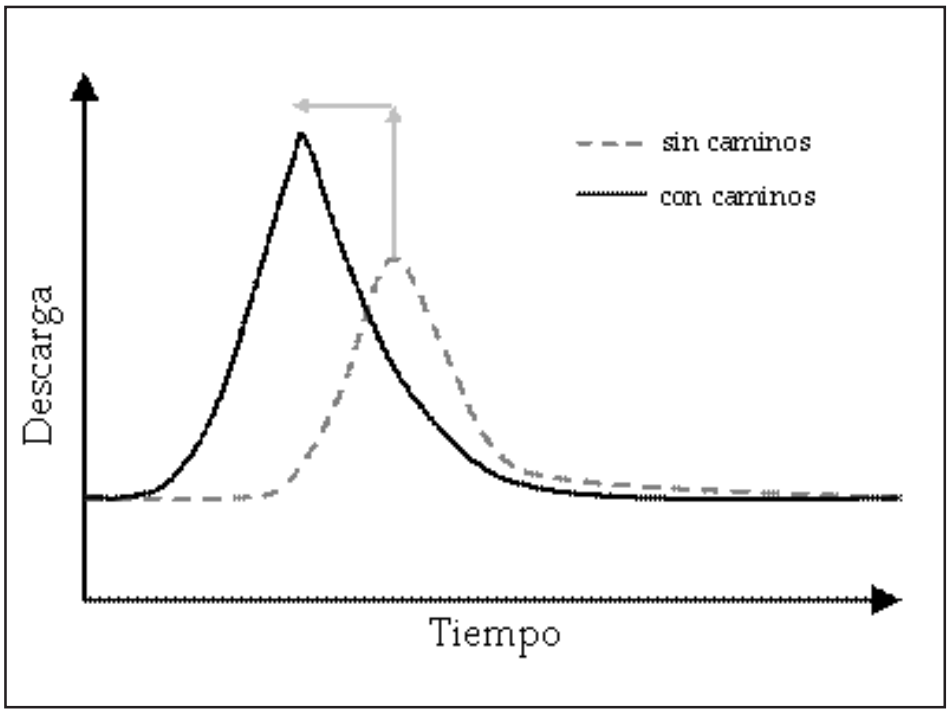

Figura 5. Modificación teórica en los picos de un hidrograma por efecto de los caminos en la escala de cuenca.

El análisis de los efectos de caminos en el escurrimiento de cuencas pequeñas consistió en determinar si habían ocurrido cambios en los flujos pico posterior a la construcción de caminos (Jones y Grant, 1996). El análisis se basó en comparaciones entre una cuenca sin caminos y sin áreas de corta (control) con otra que contaba con un camino que ocupaba un 6 por ciento del área total de la cuenca. Los

datos de escurrimiento para ambas cuencas se extendían por un período de 34 años. Para la cuenca con el camino esto incluye tan solo cuatro años de datos antes de construido el camino y cuatro años antes de que el 25 por ciento de la cuenca fuera talada. El análisis original sugirió un aumento de un 25 por ciento en la magnitud de los flujos pico y una reducción promedio de 10 horas en el tiempo de pico, pero ninguna de estas dos diferencias fueron estadísticamente significativas. Durante los primeros cinco años posteriores a la tala de árboles la cuenca experimentó un aumento de hasta un 50 por ciento en la magnitud de flujos pico y una disminución en el tiempo de pico que promedió unas seis horas. De acuerdo con el análisis de Jones y Grant (1996) la magnitud de flujo pico disminuyó gradualmente, pero 25 años después de la tala de árboles todavía se podía distinguir el efecto de la tala de árboles y del camino.

Basados en la misma fuente de datos de escurrimiento pero utilizando otros métodos estadísticos de análisis, Thomas y Megahan (1998) sugieren que los datos no sostienen las conclusiones de Jones y Grant (1996). Thomas y Megahan (1998) indicaron que el cambio en la magnitud del flujo pico posterior a la construcción del camino y a la tala de árboles fue estadísticamente diferente por sólo diez años y que los mayores cambios (un 40 por ciento de incremento) en los flujos pico ocurrieron durante los eventos más pequeños mientras que los eventos más grandes sugerían tan solo un 15 por ciento de aumento en los flujos picos. La incapacidad de los datos en demostrar un efecto en los flujos picos a largo plazo fue, entre otras razones, uno de los argumentos que utilizaron Thomas y Megahan (1998) para concluir que el camino no tuvo ningún efecto en las diferencias en el flujo pico de la cuenca y que el aumento en el escurrimiento pico fue consecuencia de la tala de árboles.

El análisis de escurrimiento de las cuencas grandes fue mucho más complicado que para las cuencas pequeñas ya que no se encontró

ninguna cuenca que no tuviera caminos ni áreas cortadas (cuenca testigo), y que los sistemas de caminos y las áreas de tala de árboles continuaron creciendo progresivamente a través del tiempo (Jones y Grant, 1996). Los análisis se hicieron comparando los flujos pico de tres pares de cuencas con distintas intensidades de uso. Los datos utilizados correspondían a 50 años de comportamiento hidrológico de las cuencas. El análisis de Jones y Grant (1996) sugiere que los aumentos en flujos pico estaban relacionados al área total talada en la cuenca y a las recientes cortas de árboles. Entre varios argumentos Thomas y Megahan (1998) mencionan que la falta de cuencas que actúen como control niega la posibilidad de que los datos usados en el estudio puedan evaluar estadísticamente si los caminos y la tala de árboles han causado cambios en el comportamiento hidrológico de las cuencas estudiadas. Thomas y Megahan (1998) reiteran que ellos no rechazan la posibilidad de que los caminos y la tala de árboles tengan un efecto en los flujos pico de las cuencas grandes, pero rechazan la posibilidad de que los datos usados en el estudio sostengan las conclusiones de Jones y Grant (1996).

El tema de los efectos de los caminos en el comportamiento hidrológico de cuencas también ha sido explorado con la calibración y aplicación de modelos matemáticos. Los modelos que han sido desarrollados en los últimos años aprovechan los recientes avances de SIG para desarrollar patrones espaciales de flujo que sean consistentes con la topografía del área de estudio y con los patrones de drenaje impuestos por los caminos. Los modelos generalmente utilizan conceptos de conservación de masa y energía para simular ciertos procesos del ciclo hidrológico como son la infiltración, el escurrimiento superficial, el flujo sub-superficial y la evapo-transpiración, entre otros. La integración de los caminos en estos modelos hidrológicos es un tema innovador en la investigación y por lo tanto estas aplicaciones se encuentran todavía en etapa de desarrollo. Los modelos incorporan las tres posibles alteraciones en

los procesos hidrológicos que clásicamente son aludidos a los caminos: 1) el aumento en la frecuencia y magnitud del escurrimiento superficial; 2) la intercepción del flujo sub-superficial en el talud de corte del camino; y 3) el incremento en la conectividad de las laderas con el sistema fluvial por procesos de escurrimiento superficial. Dos ejemplos de estos modelos son el DHSVM (La Marche y Lettenmaier, 2001. Distributed Hydrologic Soil Vegetation Model) y el HM (Loague y VanderKwaak, 2002. New Integrated Hydrology Model).

Erosión superficial

Erosión en taludes y terraplenes (cortes y rellenos)

Los taludes de cortes y terraplenes de los caminos forestales han sido objeto de un gran número de estudios. Estos estudios han tenido como propósito el cuantificar las tasas de producción de sedimento de los taludes para compararlos con la producción de otras fuentes de sedimento, y para identificar los factores más importantes que controlan los procesos de erosión superficial. Los métodos utilizados para medir tasas de producción de sedimento son generalmente de dos tipos: 1) métodos que determinan la masa de sedimento producido por la superficie; y 2) métodos indirectos que miden cambios en la forma y la elevación de la superficie causados por la erosión. Entre los métodos que miden la masa de material erosionado se incluyen a las trampas de recolección de sedimento (Kelley, 1968; Ramos-Scharrón, en prensa) (Figura 5). Entre los métodos que miden los cambios en la superficie causados por la erosión se menciona el uso de clavos y rondanas, técnicas de medición del nivel del terreno para detectar cambios en la superficie a través del tiempo, y el uso de las raíces expuestas a lo largo de los taludes como puntos de referencia para estimar la ubicación original de la superficie del talud (Reid, 1981; Megahan *et al*., 1983). Los métodos que determinan cambios en la elevación de la superficie poseen un

menor grado de precisión que los métodos que cuantifican la masa de sedimento producida (Kelley, 1968).

Los valores de producción de sedimento anual para los taludes de corte de los caminos van desde 0.2-1.0 kg m^{-2} $año^{-1}$ para superficies que han recibido aplicaciones de métodos de control de erosión, hasta 105 kg m^{-2} $año^{-1}$ para taludes de corte desnudos. Algunos estudios han determinado que los taludes de corte son las superficies de más alta producción de sedimento en comparación con otras superficies del cuerpo prismático de los caminos (Swift, 1984 a). Otros estudios argumentan que a pesar de que la producción de sedimento de los taludes puede ser más alta que las de otras superficies, la mayor parte del sedimento permanece almacenado en la base de los taludes y no es exportado al piso de los caminos (Reid, 1981; Ramos-Scharrón, en prensa).

En el caso de los terraplenes la variabilidad de los valores reportados es un poco menor que para los taludes de corte ya que estos permanecen entre 0.1 y 11 kg m^{-2} $año^{-1}$. En general, los terraplenes tienden a producir sedimento a una tasa más baja que los taludes de corte y las superficies del camino. En algunos casos, el potencial de contribución de sedimento de los terraplenes puede ser más alto que el de otras superficies cuando el escurrimiento proveniente de los caminos crea canales y cárcavas que se extienden hasta los ríos.

Si se excluyen los procesos de deslizamientos de tierra y la formación de canales y cárcavas, se pueden definir algunos de los factores que controlan la producción de sedimento tanto de taludes como de los terraplenes. Entre los factores más importantes se mencionan los siguientes:

- ***Lluvia***. La frecuencia y la magnitud de la lluvia son factores que generalmente tienen un papel principal en la cantidad de sedimento producido por salpicamiento y por erosión

- ***Roca madre***. El tipo de roca madre expuesta en el talud también tiene un papel principal en las tasas de erosión. En general,mientras más fino e intemperizado el material, mayor es su tasa de erosión. Materiales con un alto contenido de arcilla son generalmente la excepción a esta regla, ya que son más resistentes a los procesos de erosión que otros materiales.

- ***Pendiente***. La inclinación de la superficie del talud o terraplén también influye en la producción de sedimento. Mientras más alta la pendiente, más efectivos son los procesos de erosiónen remover el material y más alta es la producción de sedimento.

- ***Edad***. En general, las tasas más altas de erosión ocurren durante los primeros dos años posteriores a la construcción de los caminos (Megahan, 1974).

Erosión en la superficie de rodamiento

La erosión de la superficie de rodamiento o plantilla ha sido tema de estudio de un gran número de especialistas. La plantilla de los caminos forestales ha sido identificada como una fuente principal de sedimento en áreas forestales en distintas regiones del mundo incluyendo Polonia (Froehlich y Walling, 1997), Australia y Nueva Zelanda (Grayson *et al*., 1993; Fahey y Coker, 1989), Malasia (Douglas *et al*., 1993), las Islas Vírgenes de EE. UU. (Ramos-Scharrón y MacDonald, 2005, en prensa) y zonas forestales de los EE. UU. (Burroughs *et al*., 1991). La falta de una

cobertura vegetal, el alto grado de compactación, y las alteraciones a la superficie causadas por el uso vehicular y obras de mantenimiento son las causas principales por las cuales las superficies tienden a tener una alta tasa de producción de sedimento (Figura 6). Los métodos tradicionalmente usados para medir la producción de sedimento de la plantilla incluyen el uso de trampas de sedimento, contenedores de sedimento, y el uso de vertedores para medir escurrimiento superficial, entre muchos otros. Tanto el método del contenedor como el del vertedor requieren tomar muestras de agua para determinar la cantidad de sedimento suspendido.

Figura 6. Superficie de un camino forestal con escurrimiento superficial (St. John, Islas Vírgenes EE. UU.)

Las tasas de erosión anual de la superficie del camino pueden ser muy variables. La selección de valores de erosión presentados en el Cuadro 4 indican valores que van desde 0.03 kg m^{-2} $año^{-1}$ hasta 700 kg m^{-2} $año^{-1}$. La variabilidad se debe al gran número de factores que controlan los procesos de erosión en estas superficies. Entre los factores más importantes se encuentran:

- ***Lluvia.*** La frecuencia y la magnitud de los procesos de salpicamiento y erosión por escurrimiento superficial están altamente relacionados con la intensidad de la lluvia. Estudios sobre el particular han determinado un alto grado de correlación entre tasas de erosión de la superficie del camino y la intensidad de la lluvia (Reid, 1981; Kahklen, 1993).

- ***Edad.*** El tiempo transcurrido desde que el camino fue construido es uno de los factores más importantes que controlan las tasas de erosión. Algunos estudios indican que más del 90 por ciento del material erosionado de un camino se produce durante los primeros dos años posteriores a la construcción del camino (Megahan, 1975). A través del tiempo la tasa de erosión se reduce exponen--cialmente hasta que, varios años después, alcanza valores similares a los valores de erosión de laderas en su estado natural (Megahan, 1974). En las superficies de caminos recientemente construidos hay una abundancia de material fino (limo, y arena fina) que es fácilmente erosionado por el salpicamiento y el escurrimiento superficial. La expor--tación rápida de este material fino, da lugar a la formación de una superficie dominada por partículas gruesas (arenas gruesas y grava). El material grueso es más resistente a la erosión que el material fino, y esta es la razón principal de la baja en las tasas de erosión. Estudios recientes han

mostrado un patrón similar como resultado de actividades asociadas al mantenimiento de las superficies de los caminos en que tasas de altas de producción de sedimento similares a plantillas recién construidas se pueden observar inmediatamente después de que las superficies de rodamiento son niveladas o inclinadas con maquinaria pesada (Ramos-Scharrón y MacDonald, 2005).

- ***Patrones de drenaje.*** Los patrones de drenaje de un camino controlan la cantidad de agua que fluye sobre la superficie de rodamiento, y tienen un efecto similar al de la longitud de la ladera discutido anteriormente para los efectos de los incendios. Mientras más escurrimiento se presente sobre la plantilla, más alta sería su tasa de erosión. Estudios empíricos han mostrado una correlación entre las tasas de erosión y la distancia entre diferentes puntos de drenaje a lo largo de los caminos (Luce y Black, 2001). Aunque nunca ha sido formalmente estudiado, se presume que el tipo de inclinación transversal (hacia la cuneta, hacia el talud, o a dos aguas) también debe de tener efectos en las tasas de erosión al controlar la cantidad de escurrimiento en la plantilla del camino.

- ***Tráfico vehicular.*** El tráfico vehicular también puede aumentar las tasas de producción de sedimento en tres formas diferentes. Primero, durante periodos de lluvia la compactación del material expulsa el material fino hacia la superficie de rodamiento donde puede ser transportado fácilmente por el escurrimiento (Reid, 1981). Segundo, el tráfico entre períodos de lluvia puede romper granos gruesos en granos más finos que pueden ser erosionados por el escurrimiento superficial (Ziegler *et al.*, 2000, 2001).Tercero, las pequeñas áreas cóncavas creadas por

laslas llantas de los vehículos aumentan los encharcmientos y por consecuencia los puntos donde el escurrimiento es expulsado de la plantilla y esto puede causar un incremento en la producción de sedimento. Los estudios sobre el particular han determinado que la actividad de vehículos pesados es un factor importante en las tasas de erosión de los caminos (Reid y Dunne, 1984).

- ***Pendiente.*** La pendiente longitudinal controla la efectividad con la que el escurrimiento puede transportar sedimento. Algunos estudios empíricos sugieren que el aumento en la producción de sedimento se incrementa exponencialmente con la pendiente del camino (Luce y Black, 2001; Ramos-Scharrón y MacDonald, 2005).

- ***Métodos de control de erosión.*** A pesar de la existencia de un gran número de métodos para controlar la erosión de las superficies de los caminos, tan solo el método de aplicación de grava ha sido estudiado exhaustivamente. Los resultados indican que para que la aplicación de grava reduzca la erosión, la capa de grava debe de exceder una profundidad de 10 cm (Swift, 1984 b; Grayson *et al.,* 1993). Aunque la grava ha demostrado que puede reducir la erosión hasta en un 95 por ciento, su efectividad estará de acuerdo con el tipo de material que compone la plantilla de la superficie del camino y al peso de los vehículos que trafican por el camino.

Cuadro 4. Selección de valores anuales de producción de sedimento para superficies de rodamiento de caminos forestales.

Referencia	Área de estudio	Condiciones de tráfico e inclinación	Tasa anual de de producción de sedimento (kg m^{-2} $año^{-1}$)
Lieberman y Hoover, 1948	Carolina del Norte, EE. UU.	Vehículos pesados	114
Huber, 1952	Carolina del Norte, EE. UU.	Vehículos pesados	711
Megahan y Kidd, 1972	Idaho, EE. UU.	Tráfico variado	7.3
Megahan (1975)	Idaho, EE. UU.	Tráfico variado	2.0
Wald (1975)	Washington, EE. UU.	Poco uso vehículos pesados (6%)	6.6
		Vehículos livianos (3%)	0.48
Dissmeyer, 1976	Sureste, EE. UU.	—	0.8-12.0
Simons *et al*., 1978	Carolina del Nort, EE. UU.	---	3.7
Buckhouse y Gaither, 1982	Oregon, EE. UU.	—	0.7
Reid y Dunne, 1984	Washington, EE. UU.	Vehículos pesados (10%)	101
		Poco uso v. p. (10%)	8.5
		Vehículos livianos (10%)	0.77
		Camino abandonado (10%)	0.10
Swift, 1984a	Carolina del Norte, EE. UU.	Tráfico variado (5-7%)	0.03-5.2
Bilby, 1985	Washington, EE. UU.	Vehículos pesados (1%)	6.3
Vincent, 1979	Idaho, EE. UU.	Vehículos livianos, 6.3-13.4%	2.3-7.6
Fahey y Coker, 1989	Nueva Zelandia	Vehículos livianos, 4%	1.6-11
Bilby *et al*. ,1989	Washington (EE. UU.)	Vehículos pesados, 2-14%	2.0–2.7
Froehlich, 1991	Polonia	—	9.8
Grayson *et al*., 1993	Australia	Tráfico variado, 12-18%	5.0-9.0
Kahklen, 1993	Alaska, EE. UU.	7-10%	2.0
Black y Luce, 1999	Oregon, EE. UU.	Tráfico variado, 4-13%	0.24-2.6
			0.07-0.79
MacDonald *et al*., 2001	St. John, Islas Vírgenes, EE. UU.	Vehículos livianos, 7-18%	0.08-2.7
		Tráfico variado 0.7-14%	0.05-7.4
Ramos-Scharrón y MacDonald, 2005	St. John, Islas Vírgenes, EE. UU.	Tráfico variado, 1-21%	0.6-58

CONCLUSIONES

El efecto de los incendios forestales sobre el escurrimiento y la erosión puede tener repercusiones desastrosas en el paisaje, la geomorfología y los recursos de acuáticos de áreas de bosque. La destrucción de la vegetación a nivel de piso, estimada indirectamente con la severidad del fuego es un buen indicador inicial del riesgo de un área incendiada. La severidad alta tiene un riesgo potencial para generar avenidas, más alto que cualquiera de las otras severidades. El escurrimiento puede ser aumentado varias veces más que en áreas no quemadas o de baja severidad. La erosión alcanza niveles más altos comparados con el escurrimiento. En severidades altas el incremento en erosión puede ser varios órdenes de magnitud mayor que áreas no quemadas. Diversas investigaciones muestran que los valores medios de erosión a escala de ladera alcanzan 10 t ha^{-1}, mientras que algunos valores extremos pueden llegar hasta 370 t ha^{-1}.

Los factores más importantes que propician aumento en escurrimiento y erosión son la severidad del fuego, la intensidad de la lluvia, la pendiente y la longitud de la ladera, la repelencia al agua, y el tipo de suelo. La severidad tiene influencia en la destrucción de la materia orgánica, hojarasca y mantillo que protegen el suelo forestal. La intensidad de la lluvia es importante porque es la fuerza activa que propicia la erosión, a mayor intensidad las gotas de lluvia son más erosivas e influyen en el taponamiento de poros disminuyendo la infiltración y aumentando el escurrimiento superficial. La pendiente influye en la energía cinética porque al aumentar la pendiente se incrementa velocidad del flujo. La repelencia al agua tiene influencia en la reducción de las tasas de infiltración con el consecuente aumento del escurrimiento y capacidad erosiva del agua. Los suelos limosos generalmente son los más susceptibles para producir erosión. Cuando todos estos factores se combinan en un solo lugar los resultados pueden ser catastróficos.

La recuperación de la vegetación después de un incendio es un factor atenuante para los cambios acelerados que se presentan en el escurrimiento y la erosión. A mayor tiempo después del incendio se presenta mayor recuperación de la vegetación. La vegetación influye en la rugosidad del terreno, retardo del escurrimiento y protección contra el salpicamiento.

Los caminos forestales al igual que los incendios forestales pueden aumentar considerablemente el escurrimiento y la erosión, por lo cual es necesario conocer estos cambios para buscar la manera de mitigar sus efectos. Los factores más importantes en estos cambios están en los diseños y materiales de construcción del camino, la edad del camino, la pendiente, el tráfico vehicular y la precipitación. Se considera que hasta un 90 por ciento del sedimento que produce un camino durante su vida útil ocurre dentro de los dos primeros años después de su construcción, al menos que las tasas de erosión no se mantengan altas por los efectos del tráfico vehicular y actividades de mantenimiento.

Se aprecia que los sedimentos producto de los caminos en algunos casos pueden alcanzar valores de hasta de 700 kg m^{-2} $año^{-1}$, aunque los valores más comunes se encuentran alrededor de los 3 kg m^{-2} $año^{-1}$. Aun así los efectos de los caminos deben ser considerados plenamente al planificar un nuevo camino o para evaluar los efectos de redes de caminos ya existentes.

LITERATURA CITADA

Aparicio-Mijares, F. J. 2003. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial LIMUSA, México D.F.

Arnáez, J. V. Larrea, and L. Ortigosa . 2004. Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from rainfall simulation tests in northeastern Spain. Catena. 57: 1-14.

Battany, M. C., and M. E.Grismer . 2000. Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards: effects of slope, cover and surface roughness. Hydrological Processes. 14: 1289-1304.

Benavides-Solorio, J. de D. 2003. Post-fire runoff and erosion at the plot and hillslope scale, Colorado Front Range. Ph D. Dissertation. Colorado State University. Fort Collins, CO. 210 p.

Benavides-Solorio, J. de D., and L. H. MacDonald. 2001. Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plots, Colorado Front Range. Hydrological Processes. 15:2931-2952.

Benavides-Solorio, J. de D., and L. H. MacDonald. 2005. Measurement and prediction of post-fire erosion at the hillslope scale, Colorado Front Range. Int. J. Wildland Fire. 14:457-474.

Beschta, R. L. 1990. Effects of fire on water quality and quality. In Natural and Prescribed Fire in Pacific Northwest Forests, Walstad, J.D., Radosevich S.R., Sandberg DV, (eds.), Oregon State University Press, Corvallis, Oregon. pp. 219-232.

Bilby, R. E., K. Sullivan, and S. Duncan. 1989. The generation and fate of road-surface sediment in forested watersheds in southwestern Washington. Forest Science. 35: 453-468.

Bilby, R. E. 1985. Contributions of road surface sediment to a western Washington stream. Forest Science. 31: 827-838.

Black, T., and C. H.Luce. 1999. Changes in erosion from gravel surfaced forest roads through time. pp. 204-218. *In* Proceedings of the International Mountain Logging and 10th Pacific Northwest Skyline Symposium, Corvallis, OR.

Boise State University. 1984. Project completion report- Sediment yield from cut and fill slopes, Silver Creek research road, Boise National Forest, Idaho. U.S.D.A. Forest Service Report, INT-80-003-CA.

Bren, L. J., and C. J. Leitch. 1985. Hydrologic effects of a stretch of forest road. Australian Forest Research .15: 183-194.

Bryan, R. B. 1979. The influence of slope angle on soil entrainment by sheetwash and rain splash. Earth Surface Processes. 4: 43-54.

Buckhouse, J. C., and R. E.Gaither. 1982. Potential sediment production within vegetative communities in Oregon's Blue Mountains. Journal of Soil and Water Conservation. 37: 120-122.

Burroughs, E. R. J., R. B. Foltz, and P. R. Robichaud. 1991. United States Forest Service research on sediment production from forest roads and timber harvest areas. pp. 187-193. *In* Proceedings of the 10th World Forestry Congress.

Campbell, R. E., M. B.Baker Jr., P. F. Ffolliot , F. R.Larson, and C. C. Avery. 1977. Wildfire effects on a ponderosa pine ecosystem: An Arizona case study. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station, Research Paper RM-191, Fort Collins, CO. 12 p.

Chaplot, V., and L. E. Bissonnais. 2000. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. Earth Surface Processes and Landforms. 25: 145-153.

Coker, R. J., B. D. Fahey, and, J. J. Payne. 1993. Fine sediment production from truck traffic, Queen Charlotte Forest, Marlborough Sounds, New Zealand. Journal of Hydrology (N. Z.).31: 56-64.

Croke, J., S. Mockler, P. Hairsine, and P. Fogarty. 2006. Relative contributions of runoff and sediment from sources within a road prism and implications for total sediment delivery. Earth Surface Processes and Landforms. 31: 457-468.

Croke, J., and S. Mockler. 2001. Gully initiation and road-to-stream linkage in a forested catchment, southeastern Australia. Earth Surface Processes and Landforms. 26: 205-217.

DeBano, L. F. 1981. Water repellent soils: a state-of-the-art. Gen. Tech. Rep. PSW-46, 21 p., illus. Pacific Southwest Forest and Range Exp. Station, Forest Service, U. S. Dept. Agriculture, Berkeley, CA. 21.

DeBano, L. F., P. F. Folliot, and M. B. Baker Jr.1996. Fire severity effects on water resources. pp. 77-84. *In* Effects of fire on Madrean Province Ecosystems, a symposium proceedings. Ffolliott P.F. et al. (coords.). Gen. Tech. Rep. RM-GTR-289, USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Exp. Station, Tucson, AZ.,

DeBano, L. F., D. G. Neary, and P. F. Folliot.1998. Fire's effects on ecosystems. John Wiley & Sons. New York.

DeBano, L. F., and C. E. Conrad.1976. Nutrient lost in debris and runoff water from a burned chaparral watershed. pp. 3-13, 3-27. I*n* Proceedings of the Third Federal Interagency Sedimentation Conference; 1976, March 22-25, Denver Co. Water Resources Council, Washington, D.C.

Dissmeyer, G. E. 1976. Erosion and sediment from forest land uses, management practices and disturbances in the southeastern United States. pp. 140–48. *In* Proc. Third Inter-Agency Sedimentation Conference, Water Resources Council, Washington, D.C.

Douglas, I., T. Greer, K. Bidin, and W. Sinun. 1993. Impact of roads and compacted ground on post-logging sediment yield in a small drainage basin, Sabah, Malaysia. pp. 216: 213-218. *In* Hydrology of Warm Humid Regions, Gladwell J. S. (ed.). IAHS Publication.

Dunne T., and L. B. Leopold. 1978. Water in environmental planning, W. H. Freeman and Co., San Francisco, CA. 818 p.

Durgin, P. B. 1985. Burning changes the erodibility of forest soils. Journal of Soil and Water Conservation.40:299-301.

Dyrness, C. T., and C. T. Youngberg. 1957. The effect of logging and slash-buning on soil structure. Soil Science Society of America Proceedings. 21: 444-447.

Elliot, W. J., R. B. Foltz, and P. R. Robichaud. 2000. Measuring and modelling soil erosion processes in forests. Landwards 55: 18-25.

Evans, R. 1980. Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint. pp. 109-128. *In* Soil Erosion. Kirkby, M. J., P. C. Morgan (eds.). John Wiley and Sons.

Fahey, B. D., and R. J.Coker.1989. Forest road erosion in the granite terrain of southwest Nelson, New Zealand. Journal of Hydrology (N. Z.). 28:123-141.

Fahey, B. D., and R. J. Coker.1992. Sediment production from forest roads in Queen Charlotte Forest and potential impact on marine water quality, Marlborough Sounds, New Zealand. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research. 26: 187-195.

FAO. 1990. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Diseño y construcción de caminos en cuencas hidrográficas frágiles. Guía FAO Conservación 13/5. Roma, Italia.

Farmer, E. E., and D. P. van Haveren.1971. Soil erosion by overland flow and raindrop splash on three mountain soils. USDA Forest Service. Res. Paper INT-100. Intermountain Forest and Range Exp. Station. Ogden, UT. 14.

Flerchinger, G. N., and F. J. Watts.1987.Predicting infiltration parameters for a road sediment model. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 30:1700-1705.

Forman, R. T. T., and L. E. Alexander.1998.Roads and their major ecological effects. Annual Review of Ecology and Systematics.29: 207-231.

Fox, D. M., and R. B. Bryan.1999.The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. Catena. 38:211-222.

Froehlich, W.1991. Sediment production from unmetalled road surfaces. In: Proceedings Sediment and Stream Water Quality in a Changing Environment: Trends and Explanation, IAHS Publication. 203. pp. 21-29.

Froehlich, W., and D. E. Walling.1997. The role of unmetalled roads as a sediment source in the fluvial systems of the Polish Flysch Carpathians. In: Human Impact on Erosion and Sedimentation. IAHS Publication. 245:159-168.

Giovannini, G., R. Vallejo R., S. Lucchesi, S. Bautista, S. Ciompi, and J. Llovet. 2001. Effects of land use and eventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean conditions. Forest Ecology and Management. 147:15-23.

Grayson, R. B., S. R. Haydon, M. D. A. Jayasuriya, and B. L. Finlayson.1993. Water quality in mountain ash forests- separating the impacts of roads from those of logging operation. Journal of Hydrology. 150:459-480.

Gucinski, H., M. J. Furniss, R. R.Ziemer, and M. H.Brookes (eds.). 2001. Forest roads: A synthesis of scientific information. General Technical Report, PNW-GTR-509. U.S. Dept. of Agriculture, Portland, Oregon.

Harden, C. P. 1992. Incorporating roads and footpaths in watershed-scale hydrologic and soil erosion models. Physical Geography. 13:368-385.

Helvey,J.D.1980. Effects of a North central Washington wildfire on runoff and sediment production. Water Resources Bulletin.16:627-634.

Hendricks, B. A., and J. M. Johnson.1944. Effects of fire on steep mountain slopes in Central Arizona. Journal of Forestry. 42:568-571.

Hoover, M. D. 1952. Water and timber management. Journal of Soil and Water Conservation. 7:75-78.

Huffman, E. L., L. H. MacDonald , and J. D. Stednick. 2001.Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine, Colorado Front Range. Hydrological Processes.15: 2877-2892.

Inbar, M., M. Tamir, and L. Wittenberg.1998. Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. Geomorphology. 24: 17-33.

Jones, J. A., and G. E. Grant.1996. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. Water Resources Research.32: 959-974.

Jones, J. A., and G. E.Grant. 2001.Comment on «Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: A second opinion» by R.B. Thomas, and W. F. Megahan. Water Resources Research. 37: 175-178.

Kahklen, K. F. 1993. Surface erosion from a forest road, Polk Inlet, Prince of Wales Island, Alaska. M. S. Thesis, Oregon State University, Corvallis, OR. 95 p.

Kelly, G. D. 1968. A comparison of several methods for erosion measurement on cut and fill slopes of a logging road in the Oregon Coast Range. M.S. Thesis, Oregon State University, Corvallis, Oregon.

Kilinc, M., and E. V. Richardson.1973. Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. Hydrology Papers Colorado State University. 63: 54.

Krammes, J. S., and J. Osborn.1969. Water repellent soils and wetting agents as factors influencing erosion. pp. 177-187. *In* Proceedings of Symposium on Water-repellent Soils, University of California, Riverside CA.

Kunze, M. D., and J. D. Stednick. 2006. Streamflow and suspended sediment yield following the 2000 Bobcat fire, Colorado. Hydrological Processes. 20:1661-1681.

La Marche, J. L., and D. P. Lettenmaier. 2001.Effects of forest roads on flood flows in the Deschutes River, Washington. Earth Surface Processes and Landforms. 26: 115-134.

Lieberman, J. A., and M. D. Hoover.1948. Protecting quality of streamflow by better logging. Southern Lumberman.177: 236-240.

Loague, K., and J. E. Vander Kwaak. 2002. Simulating hydrological response for the R-5 catchment: comparison of two models and the impact of the roads. Hydrological Processes.16: 1015-1032.

Luce, C. H., and T. A. Black. 2001. Spatial and temporal patterns in erosion from forest roads. pp. 165-178. *In* Land Use and Watersheds-Human Influence on Hydrology and Geomorphology in Urban and Forest Areas, Wigmosta, M.S., and S. J. Burges (eds.). American Geophysical Union, Water Science and Application 2, Washington, DC.

Luce, C. H., and T. W. Cundy.1992.Modification of the kinematic wave-Phillip infiltration overland flow model. Water Resources Research. 28: 1179-1186.

Luce, C. H., and T. W. Cundy.1994. Parameter identification for a runoff model for forest roads. Water Resources Research. 30: 1057-1069.

Luce, C. H., and B. C. Wemple. 2001. Introduction to special issue on hydrologic and geomorphic effects of forest roads. Earth Surface Processes and Landforms. 26:111-113.

Luce, C. H. 990. Analysis of infiltration and overland flow from small plots on forest roads. M.S. Thesis, University of Washington, Seattle, WA. 64 p.

MacDonald, L. H., A. W. Smart, and R. C. Wissmar.1991.Monitoring guidelines to evaluate effects of forestry activities on streams in the Pacific Northwest and Alaska. EPA 910/9-91-001. U. S. Environmental Protection Agency, Seattle, WA. 166 p.

MacDonald, L. H., R. W.Sampson, and D. M. Anderson. 2001.Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, St. John, US Virgin Islands. Earth Surface Processes and Landforms. 26: 251-272.

Mah, M. G. C., L. A.Douglas, and A. J. Ringrose-Voase. 1992. Effects of crust development and surface slope on erosion by rainfall.Soil Science. 154: 37-43.

Marcos, E., R. Tarrega, and E. Luis-Calabuig. 2000. Comparative analysis of runoff and sediment yield with a rainfall simulator after experimental fire. Arid Soil Research and Rehabilitation. 14: 293-307.

Megahan, W. F., and W. J. Kidd.1972. Effects of logging and logging roads on erosion and sediment deposition from steep terrain. Journal of Forestry. 70: 136-141.

Megahan, W. F., and D. C.Molitor. 1975. Erosional effects of wildfire and logging in Idaho. pp. 423-444. *In* Watershed Management Symposium, American Society of Civil Engineers, Irrigation and Drainage Division, New York.

Megahan, W. F., K. A. Seyedbagheri, and P. C. Dodson.1983.Long-term erosion on granitic roadcuts based on exposed tree roots. Earth Surface Processes and Landforms. 8: 19-28.

Megahan, W. F. 1972. Subsurface flow interception by a logging road in mountains of central Idaho. pp. 350-356. *In* National Symposium on Watersheds in Transition. American Water Resources Association and Colorado State University.

Megahan, W. F. 1974. Erosion over time on severely disturbed granitic soils: A model. Research Paper INT-156, USDA Forest Service.

Megahan, W. F. 1975. Sedimentation in relation to logging activities in the mountains of central Idaho. pp. 74-82. *In* Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, Proc. Of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Lab.

Megahan, W. F.1984. Road effects and impacts. pp. 57-97. *In* Proceedings of the Forest Transportation Symposium. USDA Forest Service, Casper, Wyoming.

Meyer, L. D.1976. Soil erosion concepts and misconceptions. *In* Proceedings of the third federal inter-agency sedimentation conference. Water Resources Council. Denver CO. 2-1,2-12.

Meyer, L. D., and E. J. Monke. 1965.Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 8: 572-580.

Moody, J. A., and D. A. Martin. 2001. Initial hydrologic and geomorphic response following a wildfire in the Colorado Front Range. Earth Surface Processes and Landforms. 26: 1049-1070.

Morgan, R. P. C.1996. Soil erosion and conservation. Longman. New York.198 p.

Morris, S. E., and T. A. Moses. 1987. Forest fire and the natural soil erosion regime in the Colorado Front Range. Annals of the Association of American Geographers. 77: 245-254.

Návar, J., and T. J. Synnott.2000. Soil infiltration and land use in Linares, N.L., Mexico. Terra. 18: 255-262.

Osborn, B. 1954. Effectiveness of cover in reducing soil splash by raindrop impact. Journal of Soil and Water Conservation. 9: 70-76.

Pannkuk, C. D., P. R. Robichaud, and R. E. Brown. 2000. Effectiveness of needle cast from burnt conifer trees on reducing erosion. *In* 2000 ASAE Annual International Meeting, Milwaukee, Wisconsin. Paper No: 005018. 15 p.

Pierson, F. B., D. H. Carlson, and K. E. Spaeth 2002. Impacts of wildfire on soil hydrological properties of steep sagebrush-steppe rangeland. International Journal of Wildland Fire.11: 145-151.

Prosser, I. P., and L.Williams. 1998. The effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus forest. Hydrological. Processes.12: 251-265.

Ramos-Scharrón, C. E. 1997. Surface erosion from roads: A literature review and general recommendations for the development of a sediment monitoring strategy. Northwest Indian Fisheries Commission, Olympia, Washington. 66 p.

Ramos-Scharrón, C. E., and L. H. MacDonald. Measurement and prediction of sediment production from natural and road-related sediment sources in St. John, U.S. Virgin Islands. Catena. In press.

Ramos-Scharrón, C. E., and L. H.MacDonald. 2006. Runoff and suspended sediment yields from an unpaved road segment, St. John, U.S. Virgin Islands, Hydrological Processes.20.

Ramos-Scharrón, C. E., and L. H. MacDonald. 2005. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St. John, US Virgin Islands. Earth Surface Processes and Landforms. 30: 1283-1304.

Reid,L. M., and T. Dunne.1984.Sediment production from forest road surfaces. Water Resources Research.20: 1753-1761.

Reid, L. M. 1981. Sediment production from gravel-surfaced roads, Clearwater Basin, Washington. Publication FRI-UW-8108, University of Washington Fisheries Research Institute, Seattle, WA. 247 p.

Renard. K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, and D. C. Yoder.1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). US Department of Agricultre, Agriculture Handbook No. 703, Washington, D.C.

Rice, R. M., and J. Osborn.1970. Wetting agent fails to curb erosion from burned watershed. Res. Note PSW-219. USDA, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Exp. Station. 5 p.

Robichaud, P. R., and R. E. Brown.1999.What happened after the smoke cleared: onsite erosion rates after a wildfire in eastern Oregon. pp. 419-426. *In* Proceedings Wildland Hydrology Conference, Olsen D, Potyondy JP (eds.), American Water Resources Association, Herndon, VA.

Robichaud, P. R., and T. A. Waldrop.1994. A comparison of surface runoff and sediment yields from low-and-high severity site preparation burns. Water Resources Bulletin. 30: 27-34.

Sampson, R. W. 1999. Road runoff and erosion at the plot and road segment scales on St. John, US Virgin Islands. M.S. Thesis. Department of Earth Resources, Colorado State University, Fort Collins, CO. 189 p.

Scott, D. F. 1993.The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. Journal of Hydrology.150:409-432.

Shahlaee, A. K., W. L. Nutter, E. R. Burroughs Jr., and L. A.Morris.199.Runoff and sediment production from burned forest sites in the Georgia Piedmont. Water Resources Bulletin. 27:485-493.

Sidle, R. C., Y. Tsuboyama, S. Noguchi, I. Hosoda, M. Fujieda, and T. Shimizu.1995. Seasonal hydrologic response at various spatial scales in a small forested catchment, Hitachi Ohta, Japan. Journal of Hydrology. 168: 227-250.

Simons, D. B, R. M. Li., and B. A. Anderson. 1982.Soil erosion and sedimentation analysis of forest roads in Northern California. Civil Engineering Department, Engineering Research Center, Colorado State University, Fort Collins, CER81-82DBS-RML-BAA74.

Simons, D. B., R. M. Li, T. J. Ward, and L. Y. Shiao.1978. Application of road sediment models to natural and simulated rainfall-runoff sites. Report CER79-80DBS-RML-TJW66. Colorado State University, Fort Collins.40 p.

Smith, D. D., and W. H. Wischmeier. 1957. Factors affecting sheet and rill erosion. Transactions, American Geophysical Union. 38: 889-896.

Striffler, W. D., and E. W. Mogren.1971. Erosion, soil properties, and revegetation following a severe burn in the Colorado Rockies. pp. 25-36. *In* Fire in the Northern Environment; a Symposium Proceedings. Slaughter CW, Barney RJ, Hansen GM (eds.). USDA. Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. Portland Oregon.

Sundberg, E. S.198. Effects of mine haul roads on the water resources, a final report. Dept. of Civil Engineering and Engineering Hydraulics, MSU, Bozeman.

Swift, L. W. Jr. 1984a. Soil losses from roadbeds and cut and fill slopes in the southern Appalachian Mountains. Southern Journal of Applied Forestry. 8: 209-216.

Swift, L. W. Jr. 1984b. Gravel and grass surfacing reduces soil loss from mountain roads. Forest Science. 30: 657-670.

Thomas, R. B., and W. F. Megahan.1998. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: A second opinion. Water Resources Research. 34: 3393-3403.

Thomas, R. B., and W. F. Megahan. 2001. Reply to «Comment on Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: A second opinion» by JA Jones and GE Grant. Water Resources Research. 37: 181-183.

Thornes, J. B. 1980. Erosional processes of running water and their spatial and temporal controls: a theoretical viewpoint. pp.129-182. *In* Soil Erosion. Kirkby, M. J., and P. C. Morgan (eds.). John Wiley and Sons.

Tromp-van Meerveld, H. J., and J. J. McDonnell. 2006a.Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope. Water Resources Research. 42. W02410.

Tromp-van Meerveld, H. J., and J. J. McDonnell. 2006 b. Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. Water Resources Research.42, W02411.

Vincent, K. R. 1979. Runoff and erosion from a logging road in response to snowmelt and rainfall. M.S. Thesis, Univ. of California-Berkeley.

Wald, A. R. 1975. The impact of truck traffic and road maintenance on suspended-sediment yield from a 14' standard forest road. M.S. Thesis, University of Washington. 38 p.

Wells,C. G., R. E. Campbell, L. F. DeBano, C. E. Lewis, R. L. Fredriksen, E.C.Franklin, R. C. Froelich, and P. H.Dunn. 1979.Effects of fire on soil.A state-of-knowledge review.Gen. Tech. Rep. WO-7. Forest Service, US

Ward, T. J., and A. D. Seiger.1983. Adaptation and application of a surface erosion model for New Mexican forest roadways. Technical Completion Report Proj. Nos. 14236669 and 1345667, New Mexico Water Resources Research Institute.

Watts, F. J. 1981. Unpublished infiltrometer data taken at Silver Creek, ID.

Wells, C. G., R. E. Campbell, L. F. DeBano, C. E. Lewis, R. L. Fredriksen, E. C. Franklin, R. C. Froelich, and P. H.Dunn. 1979.Effects of fire on soil.A state-of-knowledge review.Gen. Tech. Rep. WO-7. Forest Service, U.S.

Wemple, B. C., J. A. Jones, and G. E.Grant.1996.Channel network extension by logging roads in two basins, Western Cascades, Oregon. Water Resources Bulletin. 32: 1195-1207.

Wemple, B. C. 1994. Potential hydrologic effects of logging-access roads in forested landscapes of the western Cascades, Oregon. M.S. Thesis, Oregon State University, Corvallis, Oregon.

Wischmeier, W. H., and D. D. Smith.1958.Rainfall energy and its relationship to soil loss. Transactions, American Geophysical Union.39: 285-291.

Wright, H. A., F. M. Churchill, and W. C. Stevens.1976. Effect of prescribed burning on sediment, water yield, and water quality from dozed juniper lands in central Texas. Journal of Range Management. 29: 294-298.

Wright, H. A., F. M. Churchill, and W. C. Stevens.1982. Soil loss, runoff, and water quality of seeded and unseeded steep watersheds following prescribed burning. Journal of Range Management. 35: 382-385.

Young, K. K. 1976. Erosion potentials of soils. pp. 1-1, 1-10. *In* Proceedings of the third federal inter-agency sedimentation conference; Water Resources Council. Denver CO.

Ziegler, A. D., and T. W.Giambelluca.1997 Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. Journal of Hydrology. 196: 204-229.

Ziegler, A. D., R. A. Sutherland, and T. W. Giambelluca. 2000. Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. Water Resources Research. 36: 2787-2791.

Ziegler, A. D., T. W. Giambelluca, and R. A. Sutherland. 2001.Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand: validation of dynamic erodibility modelling using KINEROS2. Hydrological Processes.15: 337-358.