



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSGRADO DE HIDROCIENCIAS

**IMPACTO DEL FUEGO SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL
ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL, UTILIZANDO LLUVIA SIMULADA:
CASO DE ESTUDIO VOLCÁN PELADO, DISTRITO FEDERAL, MÉXICO.**

MAIDALI ERIZABETH RAMÍREZ CRUZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO. EDO. DE MÉXICO

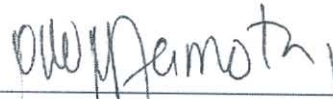
2009

La presente investigación titulada “**Impacto del fuego sobre la erosión hídrica y el escurrimiento superficial, utilizando lluvia simulada: caso de estudio Volcán Pelado, Distrito Federal, México.**”, realizada por la alumna Maidali Erizabeth Ramírez Cruz, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS**

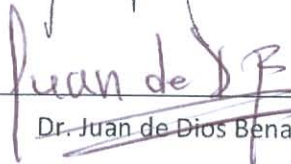
CONSEJO PARTICULAR

Consejero



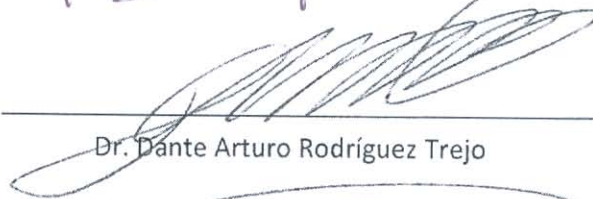
Dr. José Luis Oropeza Mota

Director



Dr. Juan de Dios Benavides Solorio

Asesor



Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

Asesor



Dr. Enrique Mejía Sáenz

Asesor



Dr. Jesús Uresti Gil

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por todo lo que me ha dado

Al Dr José Luis Oropeza Mota, por los consejos que siempre tuvo para mi persona.

Al Dr Juan de Dios Benavides Solorio, por haber aceptado el reto a pesar de la distancia.

Al Dr Dante Arturo Rodríguez Trejo, por sus comentarios siempre positivos sobre este trabajo de investigación, sus sugerencias para mejorarlo y rapidez en las revisiones.

Al Dr Enrique Mejía Sáenz, por la disposición para ser parte de este trabajo.

Al DR Jesús Uresti Gil, por su apoyo incondicional, valiosos comentarios para mejorar este trabajo, pero sobre todo gracias por su tiempo y amistad.

A M. en C. Erasmo Rubio, por su invaluable ayuda para el análisis de la información

A Luis Vargas Nava, por el apoyo en el trabajo de campo y por lo que compartimos durante este tiempo.

A Salustia, Justina, Mariana, porque siempre han estado en las buenas y en las malas conmigo.

A mis amigos Patricio, Pedro, Eugenio, Jesús, Felipe, Juan Carlos y Alejandro, por su amistad y consejos.

A la Familia Torres Benítez, por brindarme su amistad y hacerme sentir como en casa.

Al Colegio de Postgraduados, por el espacio y apoyo que me brindo en mi formación.

DEDICATORIA

A mis padres:

Maria y Felipe

Por todos sus sacrificios, su amor incondicional, por darme la mejor de las herencias y porque la distancia nos ha unido más.

A mis Hermanos:

Mariza, Felipe, Emmanuel y Maricruz

Con quienes he compartido los mejores momentos de mi vida.

A mi amiga:

Elibeth Torres B.

Por su amistad incondicional, valiosos consejos y por todos esos momentos que hemos compartido.

INDICE

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....	3
2.1. Situación actual de los incendios en México.....	3
2.1.1. Causas de los incendios.....	5
2.1.2. Efectos de los incendios.....	6
2.2. Factores que afectan la erosión y el escurrimiento superficial después del incendio.....	11
2.2.1 Severidad del fuego.....	11
2.2.2. Cobertura.....	13
2.2.3. Repelencia al agua.....	14
2.2.4. Longitud y grado de la pendiente.....	16
2.2.5. Características físicas del suelo.....	17
2.2.6 Precipitación.....	18
III.- OBJETIVOS.....	19
3.1. Objetivo general.....	19
3.2. Objetivos particulares.....	20
IV. HIPÓTESIS.....	20
V. MATERIALES Y METODOS.....	21
5.1. Localización y descripción del área de estudio.....	21
5.2. Condiciones del sitio experimental.....	23
5.3. Tratamientos estudiados.....	24
5.3.1 Descripción de tratamientos.....	25
5.3.2. Niveles de quemas (repelencia al agua).....	30
5.3.3. Intensidades de lluvia.....	30
5.4. Variables de respuesta.....	34
5.4.1. Humedad del suelo.....	34
5.4.2. Resistencia a la penetración.....	34

5.4.3. Cobertura del suelo.....	35
5.4.4. infiltración del agua.....	35
5.4.5. Escurrimiento superficial.....	35
5.4.6. Producción de sedimentos.....	36
5.5. Análisis estadístico.....	37
VI. RESULTADOS y DISCUSIÓN.....	38
6.1. Humedad del suelo.....	38
6.2. Resistencia a la penetración.....	40
6.3. Cobertura del suelo.....	42
6.4. Repelencia en función del espesor.....	43
6.5. Infiltración.....	43
6.6. Escurrimiento superficial.....	49
6.7. Producción de sedimentos.....	64
6.8. Relaciones globales entre variables.....	75
VII.- CONCLUSIONES.....	78
VIII. LITERATURA CITADA.....	79

INDICE DE CUADROS

		Pág.
Cuadro 2.1	Número de incendios y superficie afectada (pastizal, arbolado adulto, renuevo, y arbustos y matorrales) de los incendios, por entidad federativa del año 2007.....	4
Cuadro 2.2	Causas de los incendios por regiones en México (Estrada, 2006).....	7
Cuadro 2.3	Efectos de los incendios forestales (SARH, 1994).....	8
Cuadro 2.4	Grados de severidad del fuego y las características de cada una (Rincón, 2002).....	12
Cuadro 5.1	Transecto en el Volcán Pelado (tomado de SMA, 2003).....	23
Cuadro 5.2	Descripción de las condiciones de cada tratamiento.....	27
Cuadro 5.3	Comparación de algunos parámetros después del incendio.....	31
Cuadro 5.4	Características de los 12 lotes, combinando severidad de incendio e intensidad de lluvia.....	36
Cuadro 6.1	Espesor de la capa Hidrofóbica en los cuatro lotes experimentales.....	48
Cuadro 6.2	Tiempos de inicio de escurrimiento, aparición de charcos e infiltración de los acumulados en los cuatro lotes	57
Cuadro 6.3	Humedad, espesor de la capa hidrofóbica, gasto máximo, volumen total y coeficiente de escurrimiento, con una intensidad de 25 mm h ⁻¹ , en cuatro lotes. Volcán pelado, D. F. México.....	58
Cuadro 6.4	Humedad, pendiente, espesor de la capa hidrofóbica, gasto máximo, volumen total y coeficiente de escurrimiento, a una intensidad de 50 mm h ⁻¹ , en tres lotes quemados y el testigo. Volcán pelado D. F., México.....	60
Cuadro 6.5	Tiempos de inicio de escurrimiento, aparición de charcos e infiltración de los acumulados en los tres lotes afectados por el fuego y el testigo....	62
Cuadro 6.6	Humedad, pendiente, gasto máximo, volumen total y coeficiente de escurrimiento, con una intensidad de 80 mm h ⁻¹ , en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán pelado D. F., México.	65
Cuadro 6.7	Tiempos de inicio de escurrimiento, aparición de charcos e infiltración de los acumulados con una intensidad de 80 mm h ⁻¹ , en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F., México.....	65
Cuadro 6.8	Duración e intensidad de la lluvia, concentración máxima de sedimentos y volumen total de sedimentos, en tres lotes afectados por el fuego y le testigo, Volcán Pelado D. F., México.	74
Cuadro 6.9	Correlación entre variables medidas en los cuatro lotes.....	83

INDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	Causas de los incendios forestales en el 2001 (SEMARNAT, 2001)..	5
Figura 2.2	Eliminación de la cubierta vegetal por el fuego.....	9
Figura 5.1	Vista panorámica del Volcán Pelado.....	21
Figura 5.2	Localización del predio Tzozocol,	24
Figura 5.3	Simulador de lluvia automatizado tipo Purdue.....	35
Figura 5.4	TDR TRASE SYSTEM.....	37
Figura 5.5	Medición de resistencia a la penetración en el lote testigo (sin quema).....	38
Figura 6.1	Comportamiento de la humedad a lo largo de las simulaciones de lluvia, en cuatro lotes quemados.....	42
Figura 6.2	Resistencia a la penetración en el lote sin quema, arriba al inicio de la simulación de 25 mm h ⁻¹ y abajo al final de la simulación de 80 mm h ⁻¹	44
Figura 6.3	Resistencia a la penetración en el lote severidad baja, arriba al inicio de la simulación de 25 mm h ⁻¹ y abajo al final de la simulación de 80 mm h ⁻¹	45
Figura 6.4	Resistencia a la penetración en el lote severidad media, arriba al inicio de la simulación de 25 mm h ⁻¹ y abajo al final de la simulación de 80 mm h ⁻¹	46
Figura 6.5	Resistencia a la penetración en el lote severidad media, arriba al inicio de la simulación de 25 mm h ⁻¹ y abajo al final de la simulación de 80 mm h ⁻¹	47
Figura 6.6	Comparación de las tasas de infiltración obtenidos a una intensidad de 25 mm h ⁻¹ , en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado, D. F.....	50
Figura 6.7	Comparación de las tasas de infiltración obtenidos a una intensidad de 50 mm h ⁻¹ , en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F.....	53
Figura 6.8	Comparación de las tasas de infiltración obtenidas a una intensidad de 80 mm h ⁻¹ , en tres lotes quemados y le testigo, en el Volcán Pelado D. F.....	54
Figura 6.9	Comparación de los hidrogramas obtenidos a una intensidad de 25 mm h ⁻¹ en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F.....	56
Figura 6.10	Comparación de los hidrogramas obtenidos a una intensidad de 50 mm h ⁻¹ en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán pelado D.	61

Figura 6.11	Comparación de los hidrogramas obtenidos a una intensidad de 80 mm h ⁻¹ en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F.....	64
Figura 6.12	Comparación del escurrimiento superficial medido en tres lotes quemados y el testigo combinado con tres intensidades de lluvia, a) a los 30 min de simulación y b) al final de la simulación.....	68
Figura 6.13	Comparación de la producción de sedimentos obtenidos a una intensidad de 25 mm h ⁻¹ en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F.....	71
Figura 6.14	Comparación de la producción de sedimentos obtenidos a una intensidad de 50 mm h ⁻¹ en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F.....	72
Figura 6.15	Comparación de la producción de sedimentos obtenidos a una intensidad de 80 mm h ⁻¹ en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado, D. F.....	76
Figura 6.16	Comparación de la producción de sedimentos en tres intensidades de lluvia en tres lotes afectados por el fuego y el testigo, a) a los 30 min de simulación y b) al final de la simulación.	78
Figura 6.17	Correlación existente entre el escurrimiento vs. sedimento, incluidos los datos de los lotes afectados por alguna severidad de quemado.....	81
Figura 6.18	Correlación existente entre el escurrimiento vs. sedimento, incluidos todos los datos.....	82

IMPACTO DEL FUEGO SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL, UTILIZANDO LLUVIA SIMULADA: CASO DE ESTUDIO VOLCÁN PELADO, DISTRITO FEDERAL, MÉXICO

Maidali Erizabeth Ramírez Cruz, Dr

Colegio de Postgraduados, 2009

Los incendios forestales, además de afectar la calidad del aire y la cubierta vegetal, provocan cambios importantes en las propiedades hidrológicas del suelo, aceleran el proceso de erosión y contaminan por sedimentación. Sin embargo, en México, la información relacionada con los incendios esta más enfocada a estudiar y documentar el impacto ambiental sobre la calidad del aire y la cubierta vegetal, sin ahondar en los efectos sobre el suelo, el escurrimiento superficial y la producción de sedimentos. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo fue evaluar la severidad de la quema sobre la infiltración del agua, la producción de escurrimiento superficial y sedimentos. Se evaluaron doce tratamientos derivados de las cuatro severidades de quema alta, media, baja y sin quema, combinados con tres intensidades de lluvia simulada de 25, 50 y 80 mm h⁻¹. Como variables de respuesta se utilizó el escurrimiento superficial, la infiltración y la producción de sedimentos, los cuales fueron medidos en lotes de escurrimiento de 7 m de largo por 1 m de ancho, con pendientes de terreno que variaron de 6 a 9%.

En las severidades de quema baja, media y alta con 80 mm h⁻¹ se presento el mayor gasto que vario de 64.5 a 72.3 mm h⁻¹, con 50 mm h⁻¹ se redujo a 32.7-41.4 mm h⁻¹ y con 25 mm h⁻¹ se redujo a 2.4-11.9 mm h⁻¹. En el lote sin quema el gasto fue de 35.9, 0.40 y 0.0 mm h⁻¹ para las intensidades de 80,50 y 25 mm h⁻¹, respectivamente. La mayor producción de sedimentos (5.8-9.1 t ha⁻¹) se presento en los lotes con severidad de quema baja y alta, con 50 y 80 mm h⁻¹ mientras que la menor producción de sedimentos (0.027-2.54 t ha⁻¹) se presentó en los lotes con severidad de quema media y sin quema con 25 mm h⁻¹. De acuerdo con lo anterior se puede decir independientemente de la severidad de quema, la intensidad de la lluvia fue el factor que más influyo en la producción de escurrimiento y sedimentos.

Palabras clave: severidad de quema, sedimentos, escurrimiento superficial, lluvia simulada.

IMPACT OF THE FIRE ON THE HYDRIC EROSION AND THE SURFACE RUNOFF,
USING SIMULATED RAIN: CASE OF STUDY PELADO VOLCANO, FEDERAL
DISTRICT, MEXICO

Maidali Erizabeth Ramírez Cruz, Dr
Colegio de Postgraduados, 2009

The forest fire besides affecting the air quality and the vegetal cover to cause important changes in the hydrology properties of the ground, they accelerate the erosion process contamination by sedimentation. However, in Mexico, the information link with the forest fire is focus in study and to document the impact in the air quality and the forest cover, without going deep in the effects on the ground, surface runoff and sedimentation production. For this reason the objective of this word was to evaluate the severity of the forest fire on the water infiltration, the production of surface runoff and sediments. Twelve treatments were evaluated derived from four severities of high fire, medium fire, low fire and without fire, combined with tree intensities of rain simulated of 25, 50 y 80 mm h⁻¹. As variable of answer the surface runoff, the infiltration and sediments production were used, which were measured in draining lots of 7 ms of length by 1 m of width, with land slopes which they varied from 6 to 9%.

In severities of low, medium and high fire with 80 mm h⁻¹ I appear the greater cost than vary of 64,5 to 72,3 mm h⁻¹, with 50 mm h⁻¹ it was reduced to 32.7-41.4 mm h⁻¹ and with 25 mm h⁻¹ it was reduced to 2.4-11.9 mm h⁻¹. In the lot without fire the cost was of 35.9, 0.40 and 0.0 mm h⁻¹ for the intensities of 80, 50 and 25 mm h⁻¹, respectively. The greater production of sediments (5.8-9.1 t ha⁻¹) appear in the lots with severity low and high fire, with 50 and 80 mm h⁻¹ while the smaller sediments production (0.027-2.54 t ha⁻¹) appeared in the lots with severity of medium fire and without fire with 25 mm h⁻¹. In agreement with the previous I can say independent of the fire severity, the rain intensity was the factor that influences more in the surface runoff production and sediments.

Key Words: fire severity, sediments, surface runoff and simulated rain.

I.- INTRODUCCIÓN

A pesar de las tendencias de transformación de los ecosistemas forestales en terrenos destinados a usos agropecuarios o urbanos, 69% de la superficie del país (135.1 millones de ha) está cubierta por vegetación natural (Trejo y Hernández 2005). Según las fuentes de información oficial más recientes mencionan que existen aún en México 42.7 millones de ha de áreas arboladas, de las cuales 26.2 corresponden a bosques, 15.2 a selvas, y 1.3 a otras asociaciones forestales como manglares y palmares. La FAO estimó que en México para el periodo de 2000 a 2005, existía una tasa promedio de deforestación de 260,000 ha año⁻¹. (SEMARNAT, 2005).

Una de las principales causas de deforestación, son los desmontes con fines agropecuarios (94 %), y no menos importantes, los incendios forestales que contribuyen con el 2.2% de la deforestación. En México los incendios son principalmente superficiales (90%). La ocurrencia de los incendios forestales en México es una de las principales causas de degradación de las zonas forestales, en particular en ecosistemas sensibles al fuego (como las selvas) pero también cuando se alteran los regímenes de fuego de ecosistemas adaptados a los incendios (como los pinares).

En México 99% de las causas que originan los incendios se atribuyen a la actividad humana y solo el 1% a fenómenos naturales. (CONAFOR, 2008). Tan solo en 2007, la superficie arbolada afectada por los incendios fue de 15, 149 ha (CONAFOR, 2008)

El efecto de los incendios forestales puede ser muy catastrófico en términos de erosión y escurrimiento, particularmente cuando se combinan factores propios del incendio y del ambiente físico (Benavides y Flores, 2006)

El peligro de un incendio forestal esta definido por las circunstancias permanentes (composición del combustible, especie vegetal y topografía) y transitorias (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento y precipitación pluvial) que hacen posible la ocurrencia de un incendio forestal. Con frecuencia el resultado de la deforestación es la erosión del suelo. La erosión del suelo es el proceso físico que degrada

la capa arable del suelo; que reduce la capacidad de agregación, reduce la fertilidad, el contenido de materia orgánica, la actividad biológica, la infiltración, la capacidad de almacenar y retener agua y finalmente disminuye la productividad. La república Mexicana presenta graves problemas de erosión, el diagnóstico actual indica que 80% del territorio nacional muestra algún grado de erosión y que 42.6% de los suelos han perdido del 25 al 75 % de su capa superficial (Nieves, 2001).

En México existen estudios sobre la erosión, pero son muy pocos aquellos en los que se estudia el efecto de los incendios en la erosión. Con este antecedente; la importancia del estudio de erosión en terrenos afectados por el fuego, recobra mayor importancia, debido a que se ve afectada la productividad del bosque, la conservación de la biodiversidad. La erosión de las partes altas constituye el inicio de la sedimentación. En las partes bajas la sedimentación en tierras fértiles puede deteriorar su productividad, causar azolve en las presas y reducir su capacidad de almacenamiento, incrementan el riesgo de inundaciones, así como la reducción en la recarga de acuíferos.

Por lo anterior, surgió el interés de este proyecto para conocer que ocurre en un bosque de pino bajo las condiciones existentes del Volcán Pelado, D. F. En el cual se evaluó la severidad de la quema sobre la infiltración del agua, la producción de escurrimiento superficial y sedimentos. Se evaluaron doce tratamientos derivados de las cuatro severidades de quema alta, media, baja y sin quema, combinados con tres intensidades de lluvia simulada de 25, 50 y 80 mm h⁻¹. Como variables de respuesta se utilizó el escurrimiento superficial, la infiltración y la producción de sedimentos, los cuales fueron medidos en lotes de escurrimiento de 7 m de largo por 1 m de ancho, con pendientes de terreno que variaron de 6 a 9%. Con los resultados de esta investigación se pretende tener los elementos que permitan apoyar la prevención y control de incendios, debido a que año con año estos procesos afectan una gran superficie del país y en muchas ocasiones son recurrentes, impidiendo la regeneración de la cubierta vegetal, la diversidad biológica y faunística, acelerando el proceso erosivo y la producción de sedimentos en la parte alta de las cuencas hidrográficas.

II.- REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

El efecto de los incendios forestales puede ser muy catastrófico en términos de escurrimiento y erosión, particularmente cuando se combinan factores propios del incendio y del ambiente físico (Benavides y Flores, 2006). El fuego desempeña un importante rol dentro del ciclo vital de los ecosistemas forestales que, al igual que otros fenómenos naturales, frecuentemente se convierte en problema a partir de la intervención humana.

2.1.-SITUACIÓN ACTUAL DE LOS INCENDIOS EN MÉXICO

En el cuadro 2.1 se muestran el número de incendios y la superficie afectada, para el año 2008 por entidad federativa. Se observa que el sureste de México, donde se localiza la mayor diversidad biológica del país y los reductos de bosques y selvas, se ha convertido en la zona más afectada por los incendios forestales, tan sólo en Oaxaca se han dañado 14, 677.00 ha, mientras que en Chiapas han sido 9 711.25 ha. Sin embargo el año pasado los estados con mayor superficie de afectación fueron Durango con 27, 691.00 ha y Coahuila 24,428.50 ha.

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) registró a nivel Nacional del 1º de enero al 31 de diciembre de 2008 un total de 9,735 incendios y la superficie total incendiada de 231,645.48 ha. En cuanto a número de casos, el Estado de México encabeza la lista con 1,671 y una superficie afectada de 3,114.91 ha, casi 9 veces menos que Durango.

El número total de incendios en 2008 fue de 9,735 en lo que va de este año 2009 ya van 9,432 (hasta 27 de agosto), con una superficie afectada de 221,252.66 ha. Aunque esta cifra es menor a las afectaciones que dejaron los 14, 274 incendios de 1998, año récord de incendios, cuando en el mismo período se habían dañado 583,227 ha (Cuadro 2.1). La temporada de incendios ocurridos durante 1998 se considera como atípica en la historia, dado que a las condiciones climatológicas que imperaron en México y en diversas partes del mundo; se presentaron condiciones extremas, tales como una sequía prolongada y elevadas temperaturas ambientales que provocaron una cantidad excesiva de incendios con características catastróficas (SEMARNAT, 2001).

Cuadro 2.1.- Numero de incendios y superficie afectada (pastizal, arbolado adulto, renuevo, y arbustos y matorrales) de los incendios, por entidad federativa del año 2008

ENTIDAD FEDERATIVA	Número de incendios acumulados	INCENDIOS Y SUPERFICIE AFECTADA					total
		1° DE ENERO AL 31 DE DICIEMBRE 2008					
		pastizal	arbolado adulto	renuevo	arbustos y matorrales	(hectáreas)	
Aguascalientes	22	1 600.50	108.00		918.50	2 627.00	
Baja California	242	2 537.03	177.96		10 500.05	13 215.04	
Baja California Sur	10	12.50	18.50	2.00	16.00	49.00	
Campeche	42	63.00	1 024.00			1 087.00	
Coahuila	172	9 646.00	478.50		14 304.00	24 428.50	
Colima	59	77.50		50.00	412.50	540.00	
Chiapas	333	7 330.00	182.50	147.75	2 051.00	9 711.25	
Chihuahua	1 153	10 902.90	690.00	1 500.15	4 122.90	17 215.95	
Distrito Federal	1 000	1 424.41	1.30	223.83	72.60	1 722.14	
Durango	138	11 880.00	400.00	39.00	15 372.00	27 691.00	
Guanajuato	45	1 615.00	7.00	2.00	217.00	1 841.00	
Guerrero	251	7 008.00	3.00	1 112.00	4 998.00	13 121.00	
Hidalgo	274	258.34	18.51	203.15	748.25	1 228.25	
Jalisco	625	12 393.80	1 101.50	772.70	9 502.00	23 770.00	
México	1 671	1 863.71	40.00	731.08	3 114.91	5 749.70	
Michoacán	1 236	4 387.50	992.50	1 422.55	6 136.95	12 939.50	
Morelos	219	293.90	3.50	50.50	499.55	847.45	
Nayarit	161	1 465.00		74.00	4 785.00	6 324.00	
Nuevo León	57	292.51	672.50	23.50	3 916.13	4 904.64	
Oaxaca	274	5 401.75	1 059.50	1 666.75	6 549.00	14 677.00	
Puebla	442	1 229.17	130.25	105.56	614.02	2 079.00	
Querétaro	151	1 496.75	8.00	46.50	1 235.00	2 786.25	
Quintana Roo	212	5 060.00	7 298.00	1 131.00	4 341.00	17 830.00	
San Luís Potosí	160	1 189.00	29.00	256.50	2 072.50	3 547.00	
Sinaloa	85	1 889.00	180.00	359.00	1 321.00	3 749.00	
Sonora	45	6 536.00	59.00	21.00		6 616.00	
Tabasco	56	547.70	32.04		450.00	1 029.74	
Tamaulipas	34	644.25	8.00	4.00	525.25	1 181.50	
Tlaxcala	206	465.50	0.50	13.25	140.00	619.25	
Veracruz	253	242.70		42.25	1 449.47	1 734.42	
Yucatán	100	661.75	1 426.00	340.00	3 164.65	5 592.40	
Zacatecas	7	439.00	56.00	41.00	655.50	1 191.50	
RESULTADOS	9 735	100 854.16	26 258.59		104 204.73	231 645.48	
1998	14 274	177 454.00	156 810.00		248 963	583 227.00	

Nota: La información del cuadro 2-1 se obtuvo con base en los reportes de las gerencias regionales y de las coordinaciones estatales de la CONAFOR. Podría haber cambios en el caso de datos que, por alguna causa, se reportaran posteriormente a este período. (CONAFOR, 2009)

2.1.1.- Causas de los incendios forestales

Se ha mostrado el panorama de los incendios en México, pero la gran cuestión que debe plantearse, es que en la mayoría de los casos, estos incendios podrían haber sido evitados debido a que se atribuyen principalmente a la actividad humana.

De acuerdo con la información estadística reportada por las delegaciones federales de la CONAFOR, se calcula que durante el año 2001 a nivel nacional, las actividades agropecuarias causaron el 48% de los incendios, le siguen en importancia, las causas intencionales con un 17%; y las fogatas para luz y calor con un 16%; el resto de las causas de los incendios, aportan en conjunto el 19% del total (Figura 2.1).

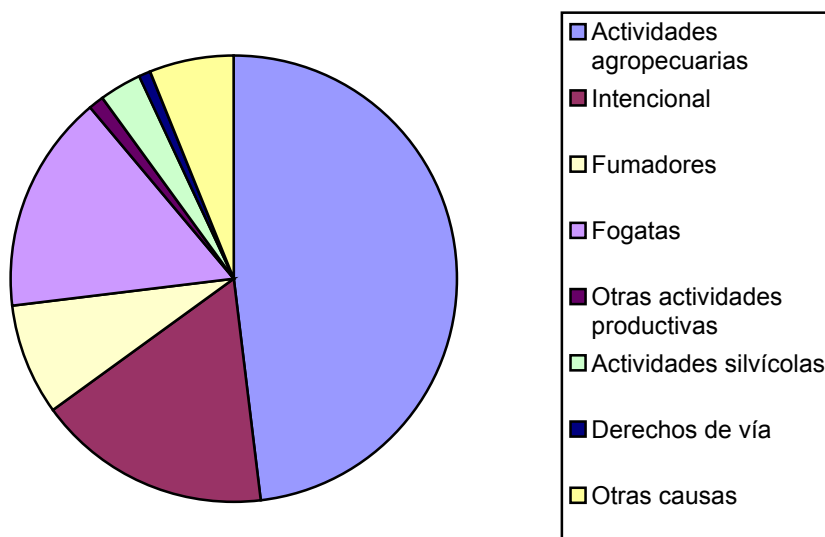


Figura 2.1. Causas de los incendios forestales en el 2001 (SEMARNAT, 2001)

La CONAFOR estima que en nuestro país, estas causales alcanzan 99% del total nacional y sólo 1% tiene como causa fenómenos naturales derivados de eventos meteorológicos, como descargas eléctricas, o erupciones volcánicas. Sin embargo estos datos son más aplicables a la zona centro sur de la República porque para el Norte del país las cifras están sobreestimadas (Cuadro 2.2)

Cuadro 2.2.- Causas de los incendios por regiones en México (Estrada, 2006)

Región	Principales causas de los incendios forestales
Centro	Quema de pastos para la obtención de forraje Fogatas de paseantes
Occidente-sur	Quema de pastos para la obtención de forraje Cambio de uso de suelo para cultivos frutícolas y pecuarios
Norte	Fogatas de paseantes y cazadores Actividades de aprovechamiento forestal (transporte)
Noroeste	Quema de pastos Tormentas eléctricas
Noreste	Tormentas eléctricas Desmontes para cambio de uso de suelo
sureste	Roza-Tumba-Quema Cambio de uso de suelo para cultivos

Una vez que se presenta un incendio en cualquier ecosistema, va a afectar primero a la vegetación, derivado de esto, se afectará la diversidad biológica y por ende desplazará a la diversidad faunística que exista en el lugar, posteriormente su efecto se observará en el suelo.

2.1.2.-Efectos de los incendios

Efecto de la eliminación de la vegetación

Con la eliminación de la cubierta se destruye el hábitat de la fauna silvestre.

- Al quemarse la vegetación se eliminan las plantas que generan oxígeno y afectan el clima del lugar.
- El producto de la combustión de la vegetación genera humos que contienen carbono y otros elementos nocivos al ambiente, lo que incrementa el efecto invernadero en la atmósfera terrestre.
- Destrucción de volúmenes de madera con el consecuente impacto en la economía de los propietarios.

Otras pérdidas por incendios forestales de difícil valoración o pérdidas intangibles son:

- Reducción de la cobertura arbórea del terreno.

- Se predispone a las masas forestales al ataque de las plagas y enfermedades.

Los incendios afectan de diferente forma a los ecosistemas forestales (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3.- Efectos de los incendios forestales (SARH, 1994)

Tipos de vegetación	Daños	Beneficios
Bosque de clima templado - frío (pinares, encinares, oyametales)	<ul style="list-style-type: none"> • limitan o destruyen la regeneración natural. • afectan al arbolado comercial y ocasionan pérdidas económicas • predisponen al arbolado adulto al ataque de plagas y enfermedades. • favorecen la invasión de especies no deseables. • ocasionan daños severos a la capa superficial del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Favorecen la apertura de conos y la emisión de semillas. • controla ciertas plagas. • Contribuyen a la renovación del pastizal haciéndolo apetecible para el ganado y para la fauna silvestre. • Abaten el material combustible reduciendo los riesgos de incendios mayores
Selvas	<ul style="list-style-type: none"> • alteran la biodiversidad. • destruyen especies comerciales generando pérdidas económicas. • dañan el suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • mejoran la disponibilidad de nutrimentos. • favorecen la regeneración de ciertas especies.
Vegetación de zonas áridas	<ul style="list-style-type: none"> • ocasionan daños severos a la vegetación. • Reducen fuentes de trabajo de tipo recolección (orégano, lechuguilla, jjoba, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • vuelven comestibles algunas especies para el ganado y la fauna. • Propician la reproducción de algunas especies

Un aspecto poco conocido, es que los incendios forestales también en algunos casos benefician a los recursos naturales. Si bien el fuego puede ser un factor de deterioro de los bosques, la investigación ecológica alrededor del mundo ha demostrado que este factor, originado ya sea por causas naturales o humanas, es y ha sido un proceso ecológico que ha estado presente en la dinámica de los ecosistemas forestales y en el ambiente evolutivo de su biota por millones de años (Whelan, 1995). Incluso en muchos ecosistemas forestales la supresión del fuego puede considerarse como una forma de alteración que genera cambios en la composición de especies, la estructura y funcionamiento de los bosques, favoreciendo la acumulación de combustible y en aumento en la severidad de los efectos del fuego, así como el deterioro de las condiciones sanitarias de la vegetación (Pyne *et al.*, 1996). Con

esto puede decirse que tanto la falta como el exceso de fuego en los ecosistemas forestales puede ser causa de alteración de patrones y procesos ecológicos

Los ecosistemas pueden ser clasificados en términos de su relación con las características del régimen del fuego, como los combustibles, inflamabilidad, igniciones y condiciones de propagación del fuego.

Ecosistemas dependientes, del fuego son aquéllos donde las especies han evolucionado en presencia del fuego y donde el fuego es un proceso esencial para conservar la biodiversidad. Si se excluye el fuego de estos sistemas o si se introduce un fuego ecológicamente inadecuado—con frecuencia, severidad o época del año inadecuadas--- se puede alterar sustancialmente a estos sistemas.

Los ecosistemas sensibles al fuego, son aquellos donde la mayoría de las especies no ha evolucionado grandemente en presencia del fuego. Si bien el fuego puede tener una función secundaria en el tratamiento de la estructura y el funcionamiento natural del ecosistema en sistemas sensibles al fuego, la introducción de un fuego ecológicamente inadecuado puede tener un impacto negativo amplio sobre la biodiversidad.

Efecto en el suelo

Los bosques sin perturbaciones funcionan como reguladores del ciclo hidrológico.

El principal efecto del incendio es la eliminación de la cubierta vegetal (Figura 2.2) con ello deja expuesto al suelo a la erosión. Al no haber vegetación, el agua de lluvia no es retenida, lo que evita su filtración al subsuelo y la recarga de los mantos freáticos (agua subterránea).



Figura 2.2. Eliminación de la cubierta vegetal por el fuego.

Las consecuencias de la eliminación de la cubierta vegetal por efecto del fuego van más allá y en numerosos casos el incremento de la erosión tras el fuego se relaciona con los cambios provocados en las propiedades del suelo. Entre ellos se han sugerido la modificación de la estructura por la mineralización parcial de los horizontes orgánicos (Greene *et al.*, 1990; Giovannini & Lucchesi, 1993; Andreu *et al.*, 1994), debido a que la temperatura deteriora la estabilidad de los agregados por la destrucción de la materia orgánica y las arcillas minerales resultando una reducción de la porosidad y un aumento del escurrimiento y la erosión (Römken *et al.*, 1990; Giovannini & Lucchesi, 1991; Cerdà, 1998; Andreu *et al.*, 2001).

En México son poco los trabajos que se han realizado sobre el efecto de los incendios en la producción de escurrimientos y sedimentos, sin embargo, son inconsistentes debido a la metodología que se ha seguido, a continuación se mencionan, algunos de los resultados.

Biswell (1963) citado por Aguirre (1981), reporta que en áreas donde se utilizaron las quemadas para disminuir el riesgo de ignición, no hubo evidencias de escurrimiento acelerado y erosión debidas a la aplicación de las quemadas controladas.

CENICAFE (1975) realizó importantes investigaciones con el fin de observar el efecto de las quemas en la erosión y la fertilidad del suelo y reportó que el escurrimiento se incrementa con las quemas; en todos los ensayos las pérdidas de suelo por erosión fueron mayores en los terrenos quemados.

Aguirre (1981), obtuvo marcadas diferencias en el escurrimiento superficial entre áreas quemadas y no quemadas, determinando que los pastizales amacollados presentan un mayor escurrimiento y pérdida de suelo, $233 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $1.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (respectivamente) en áreas quemadas y de $176 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $0.687 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en áreas no quemadas, de la estación experimental Zoquiapan, de la Universidad Autónoma Chapingo. Los reportes sobre escurrimientos y pérdida de suelo en áreas quemadas, muestran grandes diferencias en los resultados obtenidos en zonas de quema controlada y en las no quemadas (Aguirre, 1978). Las diferencias que se manifiestan en los resultados se deben a las asociaciones vegetales que se presentan en el área de experimentación.

Jiménez (1999) Comparó la erosión de 4 parcelas en el Ejido Beristain en el norte de Puebla, las parcelas fueron afectadas por fuego prescrito, con diferentes cargas de combustible y el fuego fue en contra y a favor de la pendiente; estas parcelas fueron comparadas con el testigo. Los resultados mostraron que las 4 parcelas comparadas con el testigo presentaron mayor erosión y entre las parcelas la mayor erosión se obtuvo en tratamientos con quema a favor de la pendiente y cuya carga de combustible fue alta, 30.17 t ha^{-1} y 46.75 t ha^{-1} contra 17 t ha^{-1} del testigo.

Díaz *et al.* (2001) evaluaron la influencia de especies arvenses en el control de la erosión hídrica en sitios con diferente tipo de siembra y afectados por quema. La erosión del suelo va de 179.8 kg ha^{-1} a $12,768.8 \text{ kg ha}^{-1}$. El escurrimiento y pérdida de suelo tienen correlación directa positiva. Las correlaciones entre cobertura vegetal, escurrimiento y sedimentos son negativas.

El efecto del fuego en las propiedades físicas y químicas de los suelos forestales puede variar de nulo a profundo dependiendo del tipo de suelo, del contenido de humedad del

mismo, de la intensidad y duración del fuego, de la cantidad de material vegetal consumido y de las condiciones climáticas tras el incendio (Chandler *et al.*, 1983; Sanroque *et al.*, 1985).

2.2.- FACTORES QUE AFECTAN LA EROSIÓN Y EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DESPUÉS DEL INCENDIO

2.2.1.- Severidad del fuego

Algunos de los efectos de los incendios forestales se ven reflejados en el suelo y se evidencian en sus propiedades químicas y físicas, estos efectos dependen de la intensidad y duración del incendio. La severidad es particularmente definida por el grado en que se quema el piso forestal y/o suelo mineral. (Kopra and Fyles, 2005) y la temperatura que se alcanza que puede convertirse en un factor determinante de la evolución erosiva posterior (DE Luis, 2003).

La severidad del fuego va a determinar la cantidad restante de raíces vivas y, por lo tanto, la vegetación resultante. Los tres principales grados de incendios son alto, moderado y bajo (Cuadro 2.4), y estos se definen de acuerdo al consumo de la materia orgánica superficial y a los cambios en la superficie del suelo (Well *et al.*, 1979), los sitios de alta severidad pierden por completo la cobertura.

2.4 Grados de severidad del fuego y las características de cada una (Rincón, 2002).

Grado	Características
Alto	Cuando la afectación a la vegetación es considerable y ésta va del 50 al 80% aproximadamente, corriéndose el riesgo de que mueran la mayoría de los individuos y los sobrevivientes queden muy dañados y susceptibles al ataque de plagas y enfermedades, sobre todo los árboles adultos.
Medio	Cuando la afectación es moderada y ésta va del 25 al 50% aproximadamente; en ésta se corre el riesgo de que se mueran algunos individuos, sobre todo los más débiles y decrepitos

Grado	Características
Bajo	Cuando la afectación a la vegetación es del 1 al 25%. Aproximadamente, contemplando la estructura total de la vegetación: fuste y follaje, por lo general es poco el daño y no pone en riesgo de muerte a los individuos.

La alta severidad de los incendios es de particular interés porque puede acarrear cambios dramáticos en el escurrimiento y erosión y estos afectar a los recursos hídricos. Numerosos estudios han mostrado que el escurrimiento y los porcentajes de erosión después de los incendios pueden incrementarse en una relación de 1 a 3 veces (Helvey, 1980, Morris and Mosee, 1987, DeBano *et al.*, 1996, y Robichaud *et al.*, 2000).

Gimeno-García *et al* (2000) evaluaron dos intensidades de fuego controlando la cantidad de combustible en cada una y observaron que los lotes afectados por el fuego más intenso mostraron mayor pérdida de suelo $4\ 077\ \text{kg ha}^{-1}$, que aquellos de fuego moderado $3\ 280\ \text{kg ha}^{-1}$ y los no quemadas $72.8\ \text{kg ha}^{-1}$.

También los fuegos pueden modificar la rugosidad superficial (Magunda *et al.*, 1997), pero su efecto parece ser distinto, pues los fuegos de moderada severidad producen una estructura superficial heterogénea en mosaico, en la que se combinan restos de materia orgánica y cenizas, mientras que el consumo de la vegetación, hojarasca y materia orgánica en los fuegos severos produce una superficie homogénea mucho más sensible a la erosión.

Se sabe que la erosión del suelo depende de la severidad del fuego (DeBano, 2000b; Robichaud, 2000; Shakesby *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2000; Moody and Martin, 2001; Mataix-Solera y Doerr, 2004). De Luis *et al.*, (2003), observaron que tras el fuego la erosión aumenta de manera notable respecto al suelo no quemado (de 300 a $8420\ \text{Mg ha}^{-1}$) y observaron que en sus resultados existía una relación entre la severidad de la quema experimental y el sedimento producido.

2.2.2.- Cobertura

La precipitación es interceptada tanto en el follaje como en el suelo forestal, facilitando altas tasas de infiltración, recarga de mantos freáticos y produciendo un mínimo de escurrimiento superficial. Cuando se presentan incendios la primera consecuencia es la eliminación de la vegetación y su efecto protector, debido a que ésta disipa la energía de las gotas de lluvia (Díaz-Fierros *et al.*, 1990, DeBano *et al.*, 1998, Hwang, 2007) y aunque la capacidad de regeneración de la vegetación es elevada y relativamente rápida, los primeros meses tras el fuego el suelo queda completamente desprotegido y las gotas de lluvia golpearán directamente el suelo. Este efecto puede verse amortiguado en las zonas de acumulación de cenizas. Las elevadas temperaturas alcanzadas durante los incendios producen la combustión de la materia orgánica con la consiguiente disminución de la estabilidad de los agregados del suelo e incluso su destrucción, así como una reducción de la microporosidad. Este efecto es altamente dependiente de la intensidad alcanzada por el incendio.

Aparte de ser eliminada la cubierta vegetal también se afecta la hojarasca y el mantillo forestal; que deja al descubierto la capa de suelo mineral con características hidrofóbicas del mismo modo que pueden facilitar la creación de costras a partir de los depósitos de cenizas (Wells *et al.*, 1979) se afecta el ciclo hidrológico (Chandler *et al.*, 1983) y los cambios más obvios se refieren a la reducción de la infiltración y la intercepción (DeBano *et al.* 1998), los cuales afectan directamente las tasas de infiltración y al escurrimiento superficial (Beschta, 1990).

También los fuegos pueden modificar la rugosidad superficial (Magunda *et al.*, 1997), pero su efecto parece ser distinto, pues los fuegos de moderada severidad producen una estructura superficial heterogénea en mosaico, en la que se combinan restos de materia orgánica y cenizas, mientras que el consumo de la vegetación, hojarasca y materia orgánica en los fuegos severos produce una superficie homogénea mucho más sensible a la erosión.

Figuroa (1975) indica que los bosques en condiciones naturales pierden desde $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ hasta $111 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de suelo y el escurrimiento superficial es de 0.06% a 3.22% de

la precipitación. Sin embargo, cuando los bosques pierden su capa residual por la quema, las pérdidas aumentan hasta $6.8 \text{ kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, con respecto a los bosques en condiciones naturales en la Cuenca del río Texcoco, Méx.

De Luis *et al.* (2003) observaron que la cubierta vegetal es sumamente efectiva en el control de la erosión del suelo, encontrando valores entre 20 y 60 Mg ha^{-1} en suelos no quemados incluso en condiciones extremas de precipitación torrencial y de 300 Mg ha^{-1} a 8420 Mg ha^{-1} este último valor corresponde a un incendio de alta severidad.

Uresti *et al.*, (2006) indican que la tasa de erosión varía en forma exponencial e inversamente proporcional al porcentaje de cobertura vegetal del suelo ofrecida por el dosel de la vegetación y mantillo y en todo el rango de cobertura del suelo el mantillo es más efectivo que el dosel de los cultivos para reducir la pérdida de suelo. Mencionan que para un suelo predominantemente descubierto; el incremento de su cobertura, aunque sea en un mínimo porcentaje, reduce significativamente la tasa de erosión. En cambio, cuando el suelo esta cubierto en gran parte, un incremento significativo en la cobertura significa una mínima reducción de la tasa de erosión.

2.2.3.- Repelencia al agua (capa hidrofóbica)

Otro efecto de los incendios en el suelo lo constituye la formación de superficies repelentes al agua, debido a la formación de sustancias orgánicas hidrófobas (Scott y Van Wyk, 1990), así como por la modificación de determinados componentes minerales, especialmente minerales amorfos. Algunos factores que potencialmente pueden inducir la repelencia al agua en los suelos son la materia orgánica y las variaciones del contenido de humedad de los suelos. La materia orgánica puede inducir repelencia al agua en los suelos debido a un proceso de desecación (Díaz-Fierros, 1977; Wallis y Horne, 1992), por la presencia de sustancias orgánicas procedentes de residuos vegetales (DeBano, 1981; Moral *et al.*, 2002) y/o de subproductos procedentes de la actividad metabólica de los microorganismos que en ambos casos recubren a las partículas del suelo (Bond, 1969; Chang, 1992).

La repelencia al agua puede manifestarse como una capa discreta, de espesor y continuidad variables, en la superficie del suelo o a unos pocos centímetros de profundidad y paralela a

su superficie. (DeBano 1981, DeBano, 2000) La repelencia es una propiedad del suelo dependiente de la humedad en el mismo, siendo más pronunciada con condiciones secas (Jaramillo 2006) ya que, con humedad alta, se inducen cambios en la conformación molecular de las sustancias orgánicas responsables de la hidrofobia (Dekker y Ritsema, 1994).

La importancia de detectar posibles horizontes hidrófobos en un suelo radica en que éstos pueden afectar a las propiedades hidráulicas de la zona no saturada modificando la curva característica del suelo (DiCarlo *et al.*, 1999; Bauters *et al.*, 2000). Cuando en un suelo determinado se constata la existencia de la capa hidrofóbica, las consecuencias sobre los procesos hidrológicos superficiales son muy notables. Se ha detectado como la velocidad de infiltración del agua en los suelos hidrofóbicos es menor que en los no repelentes (Ritsema *et al.*, 1993, Jaramillo 2003). Debido a ello, frecuentemente se induce la formación de escurrimiento superficial (Jungerius y Dekker, 1990 Inbar *et al.* 1998, Robichaud *et al.* 2000, Shakesby y Doerr 2006) y, junto a este, un aumento de la erosión (Shakesby *et al.*, 1994), lo cual conduce a un incremento del riesgo de contaminación de las aguas superficiales.

Además, en los horizontes someros repelentes al agua, la humedad muestra considerables variaciones espaciales, incluso en intervalos de centímetros, así como patrones de humedecimiento irregulares e incompletos (Dekker y Ritsema, 1996a), dando lugar al característico flujo en dedos o lengua, los dedos reducen el volumen de suelo húmedo de los horizontes más someros, con un mayor crecimiento radical, lo cual a su vez hace que la cantidad de agua disponible para las plantas disminuya. Además, la reducción del agua infiltrada afecta a la germinación de las semillas y al crecimiento de las plantas. Como consecuencia de ello, se produce una cantidad mínima de residuos para proteger a los suelos, lo cual implica que éstos se encuentren predispuestos a la erosión eólica (King, 1981). La repelencia al agua es la causa más importante de la degradación de muchos suelos, principalmente arenosos (Select Committee into Land Conservation, 1990).

DeBano (1971) estudió el efecto de la repelencia sobre el avance del frente de humedecimiento en columnas de suelo de textura gruesa, colocadas horizontalmente; encontró que dicho frente se movió 25 veces más rápido en la columna que contenía suelo humectable que en la que tenía el suelo repelente al agua.

Wallis *et al.* (1990a) también encontraron grandes diferencias entre la tasa de infiltración mostrada por dos sitios con suelos arenosos con diferentes grados de repelencia: el sitio menos repelente tuvo una tasa de infiltración, en una prueba de 10 minutos de duración, equivalente a 204 mm h^{-1} , mientras que en el más repelente dicha tasa fue de sólo 36.6 mm h^{-1} , valores promedio de tres replicaciones por sitio.

Wilkinson & Miller (1978) evaluaron las tasas de infiltración en parches con suelo repelente al agua y en suelo normal en un campo de golf y encontraron que en los parches hidrofóbicos dicha tasa fue sólo el 0% de la tasa observada en el suelo normal adyacente.

Regalado *et al.*, (2003) estudiaron suelos hidrofóbicos y observaron que esta no permanece estable, si no que varía de acuerdo al contenido de humedad, y el contenido crítico de humedad en el cual la hidrofobicidad empieza aparecer es la capacidad de campo de cada suelo y la máxima persistencia de esta es alcanzada próxima al punto de marchites. Por otro lado, Hufman *et al.*, (2001) demostraron que la repelencia al agua disminuye con el aumento de la humedad superficial del suelo..

2.2.4.- Longitud y grado de la pendiente

Las características de la pendiente son también factores importantes en la determinación de la cantidad del escurrimiento y de la erosión (Smith and Wischmeier, 1957). El grado y la longitud de la pendiente son dos características esenciales de la topografía implicados en el escurrimiento y en la erosión. La uniformidad de la pendiente es a menudo importante en la relativa facilidad o dificultad para un control adecuado de la erosión.

La longitud de la pendiente afecta la cantidad de escurrimiento superficial, mientras la pendiente controla la energía y velocidad del escurrimiento superficial (Fox and Bryan,

1999; Chaplot y Bissonnais, 2000). El escurrimiento en una pendiente de 40% tiene dos veces la velocidad de una pendiente de 10%, pero al duplicarse la velocidad, la energía y flujo se incrementa cuatro veces. Velocidades más altas generan mayor fuerza, de tal modo que producen más separación de partículas e incremento de la capacidad del transporte (Fox y Bryan, 1999). Sin embargo, algunos investigadores no encontraron incrementos en el escurrimiento y erosión con el aumento de la longitud y grado de la pendiente, y ellos sugieren que otros factores, tales como tipo del suelo y las grietas, pueden ser importantes (Mah *et al.*, 1992). Inbar *et al.* (1998) no encontró una clara relación entre la pendiente, el escurrimiento y la erosión después del incendio. Shahlaee *et al.* (1991) midieron el incremento del escurrimiento y erosión con el incremento de la pendiente en pequeños lotes, pero solo para eventos de lluvia de alta intensidad.

2.2.5.- Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo influyen en el escurrimiento y erosión. La erosión hídrica es un proceso complejo, comprende la desagregación del suelo por impacto de la gota de lluvia, el desprendimiento por el flujo superficial de agua, y el transporte por salpicado o por escurrimiento (Meyer y Harmon, 1984). La resistencia del suelo a este proceso se relaciona con la textura, la estabilidad de agregados, la cohesividad, la capacidad de infiltración y los contenidos minerales y orgánicos. Los suelos de textura fina generalmente son más resistentes a la desagregación, pero sus sedimentos son fácilmente transportables; mientras, que los suelos de textura gruesa son desagregados rápidamente, pero sus sedimentos son difíciles de transportar. Los suelos francos y franco-limosos son fácilmente desagregados y transportados, por eso se los considera muy erodibles (Wischmeier y Mannering, 1969).

Suelos con bajo contenido de materia orgánica son más propensos a erosionarse (Morgan, 1996). No existe un acuerdo sobre los efectos del fuego en las propiedades del suelo, pero los cambios más aceptados son que los incendios destruyen la materia orgánica que une las partículas de suelo. (Solera *et al.*, 2002) e incrementa la erodabilidad del suelo (Giovannini *et al.*, 2001).

La intensidad y duración de la fuente de calor es importante, ya que ejerce su influencia en determinados factores edáficos, fundamentalmente en el nivel más superficial. En función de la composición química de las cenizas va a tener lugar un incremento temporal del pH, por la formación de óxidos de varios elementos (Nishita y Haug, 1972) y a la liberación de cationes básicos de la materia orgánica durante y después del incendio (Kutiel y Kutiel, 1989). Cuando el incendio es de moderada intensidad, no se modifica la textura de los suelos (Nishita y Haug, 1972). Respecto a la materia orgánica, Wells (1971) indica que el principal efecto del incendio es a menudo una redistribución y no una reducción de la materia orgánica en el perfil.

2.2.6.- Precipitación

Recientemente se reconoció que las tormentas tropicales son más erosivas en las zonas tropicales que las producidas en zonas templadas, la razón de esto, es la mayor frecuencia de lluvias intensas en los trópicos. Lal (1976), menciona que, en estas áreas, las tormentas ocasionalmente llegan a tener intensidades mayores a 200 mm h^{-1} .

Los sucesos extremos de elevada magnitud pero baja frecuencia juegan un papel determinante en la dinámica de la erosión del suelo, lo cual significa que la erosión se concentra en el tiempo (González Hidalgo, 1996; Meyer *et al.*, 2001).

La variabilidad en magnitud y ocurrencia de la lluvia tiene gran influencia en las tasas de la erosión después del fuego y puede conducir a grandes diferencias en la producción del sedimento entre lotes con características físicas similares (Benavides-Solorio, 2003). La erosión severa de eventos de lluvia intensos y fuegos recientes se ha documentado (Moody y Martin, 2001a; Benavides-Solorio, 2003), pero la relación precisa entre la magnitud de la tormenta y la erosión después del fuego es desconocida.

Se ha mencionado que el mayor grado de deterioro del suelo es causado por la erosión hídrica; la falta de cubierta vegetal aumenta la susceptibilidad a ser erosionado por el impacto de las gotas de lluvia y por los escurrimientos superficiales que arrastran

partículas, en este trabajo se simularan lluvias para conocer su efecto en el escurrimiento y erosión.

III.- OBJETIVOS

3.1.- OBJETIVO GENERAL.

Evaluar el efecto del fuego sobre el escurrimiento superficial y la producción de sedimentos, en el Volcán Pelado, Distrito Federal utilizando lluvia simulada.

3.2.- OBJETIVOS PARTICULARES

1. Evaluar la tasa de infiltración derivada de las diferentes severidades de quema e intensidades de lluvia, en el Volcán Pelado D.F., utilizando lluvia simulada
2. Evaluar el escurrimiento superficial derivado de las diferentes severidades de quema e intensidades de lluvia en el Volcán Pelado D. F., utilizando lluvia simulada.
3. Evaluar los cambios en la producción de sedimentos producto de las diferentes severidades de quema e intensidades de lluvia en el Volcán pelado D. F., utilizando lluvia simulada.

IV.- HIPÓTESIS

Los incendios forestales afectan la cobertura vegetal y características del suelo que reducen la tasa de infiltración e incrementa la tasa de escurrimiento superficial y producción de sedimentos; por lo que a mayor severidad del fuego y mayor intensidad de lluvia, el impacto en el suelo es mayor.

V.-MATERIALES Y MÉTODOS

5.1- LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El volcán Pelado se localiza en la porción central del Eje Neovolcánico Transversal a unos 10 km al sur de la ciudad de México (Figura 5.1). La superficie total es de alrededor de 70 km², y la altitud varía entre los 2 800 y los 3 610 m. La topografía es irregular: desde laderas con pendientes casi planas hasta laderas con pendientes muy pronunciadas. Geológicamente este volcán pertenece a la formación Chichinautzin, originada en el periodo Pliocuaternario. El área se encuentra situada en la esquina suroeste del parteaguas de la cuenca de México (Alvarez, 1987).

Existen tres poblados en los alrededores del volcán Pelado: Parres, ubicado en la base de la ladera este; Capulín, sobre la dirección suroeste, a unos 3 km de la base del volcán y Fierro del Toro, localizado a 1.5 km del borde de lava en dirección sur.



Figura 5.1.- Vista panorámica del Volcán Pelado

Clima

Se presentan dos subtipos climáticos en el área según la clasificación de Kóeppen modificada por García (1981). Uno de éstos es el C (w₂) (w) (b')ig, que abarca de los 2800 a los 3 450 m de altitud. Es un clima templado semifrío, con temperatura promedio anual de 13°C; junio es el mes más cálido y febrero el mes más frío. La época de lluvias se presenta en verano con un porcentaje bajo de lluvias en invierno (5%). El otro subtipo es el C (w₂) (w)cig, y se presenta en altitudes por arriba de los 3 450 m. Este último subtipo de clima es descrito como templado subhúmedo, con temperatura promedio anual de 8°C. El periodo de lluvias es muy similar al del clima antes descrito. La precipitación promedio anual para todo el volcán es de aproximadamente 950 mm.

Vegetación

En cuanto a vegetación, se han reportado cuatro tipos principales. El más ampliamente distribuido es el representado por el bosque de pinos. El segundo tipo es el bosque mixto de pinos, aile y algunos encinos. El tercero está representado por el bosque de oyamel, y por último se encuentran los pastizales. En el cuadro 5.1, se presentan los datos de un transecto hecho en el Volcán Pelado

Cuadro 5.1 Transecto en el Volcán Pelado (SMA, 2003)

Parte alta (3600msnm)	Parte media (3200 msnm)	Parte baja (3000 msnm)
Uso del Suelo		
Forestal	Forestal Restringido para el ganado ovino	Forestal Pecuario (pastoreo) extensivo de ganado ovino sin control. Agrícola (cultivo de avena de temporal en pequeñas áreas)
Suelo (Andosol húmico)		
Somero textura media, pendiente mayor al 20%	Somero, textura media y pendiente menor al 8%	Profundidad menor a de 120 cm, pendiente menor al 4%
Vegetación		
Árboles de pino (<i>Pinus</i>)	Árboles de pino (<i>Pinus</i>)	Árboles de pino (<i>Pinus</i>)

<p><i>hartwegii</i>) con alturas de 5 a 15 m de altura, con diámetros pequeños de 20 a 30 cm. Presencia de gramíneas amacolladas (<i>Muhlenbergia</i> sp, <i>Festuca</i> sp y <i>Stipa</i> sp)</p>	<p><i>montezumae, P pseudostrubus</i>) con 20 0 30 m de altura, también existen las siguientes especies: <i>Alnus firmifolia, Quercus</i> sp, <i>Arbutus</i> sp en el estrato arbustivo se encuentran <i>Eupatorium</i> sp, <i>Senecio</i> sp, <i>Arctostaphylos</i> sp, <i>Baccharis</i> sp, <i>Stevia</i> sp, <i>Buddleia</i> sp, en el estrato herbáceo se encuentra <i>Muhlenbergia</i> sp, <i>Stevia</i> sp, <i>Salvia</i> sp.</p>	<p><i>montezumae, P. rudis, P pseudostrubus</i>) con 20 0 30 m de altura, también existen las siguientes especies: <i>Alnus firmifolia, Quercus</i> sp, <i>Arbutus</i> sp en el estrato arbustivo se encuentran <i>Eupatorium</i> sp, <i>Senecio</i> sp, <i>Arctostaphylos</i> sp, <i>Baccharis</i> sp, <i>Stevia</i> sp, <i>Buddleia</i> sp, en el estrato herbáceo se encuentra <i>Muhlenbergia</i> sp, <i>Stevia</i> sp, <i>Salvia</i>.</p> <p>Algunas pequeñas áreas intercaladas en las zonas arboladas se cultivan con avena.</p>
Fauna silvestre		
<p>Teporingo (<i>Romeloragus diazi</i>) Conejo de monte (<i>Sylvilagus floridanus</i>) Aguililla (<i>Buteo</i> sp)</p>	<p>Murcielagos (varias especies), gato montes (<i>Lynx rufus</i>), tlacuache (<i>Didelphis marsupialis</i>), musaraña (<i>Sorex</i> sp), Gallina de monte (<i>Dendrortyx macroura</i>), pájaro carpintero (<i>Melanerpes</i> sp), ranita verde (<i>Hyla eximia</i>), Escorpión (<i>Barisia imbricata</i>), salamandra (Eumeces sp), vibora de cascabel (<i>Crotalus triseriatus</i>)</p>	<p>Ratón de campo (<i>Peromyscus</i> sp), Armadillo (<i>Dasypus novemcinctus</i>), Primavera (<i>Turdus magratorius</i>), Huitlacoche (<i>Toxostoma</i> sp), colibrí (<i>Lampornis</i> sp), camaleón (<i>Phrynosoma orbiculare</i>), lagartija (<i>Sceloporus</i> sp), culebra (<i>Thamnophis</i> sp).</p>

5.2 CONDICIONES DEL SITIO EXPERIMENTAL

Este trabajo se desarrolló en mayo de 2005, en el Volcán Pelado, km 36.5 de la carretera Federal México-Cuernavaca, a una altitud de 3400 msnm.

Con ayuda del personal de la Comisión de Recursos Naturales (CORENA) Regional II, se identificó un predio llamado Tzozocol (Figura 5.2), el cual se incendió el 11 de abril de 2005, este incendio afectó 48 ha de bosque de Pino (*Pinus montezumae*) y pasto (*Muhlenbergia macroura*). A su paso afectó una pequeña área con arbolado joven, la altura de chamuscado se observó a de 3-4 metros y afecto la copa de estos árboles. El incendio fue predominantemente superficial. En la zona existe agricultura y pastoreo, esta ultima posible causa del evento.

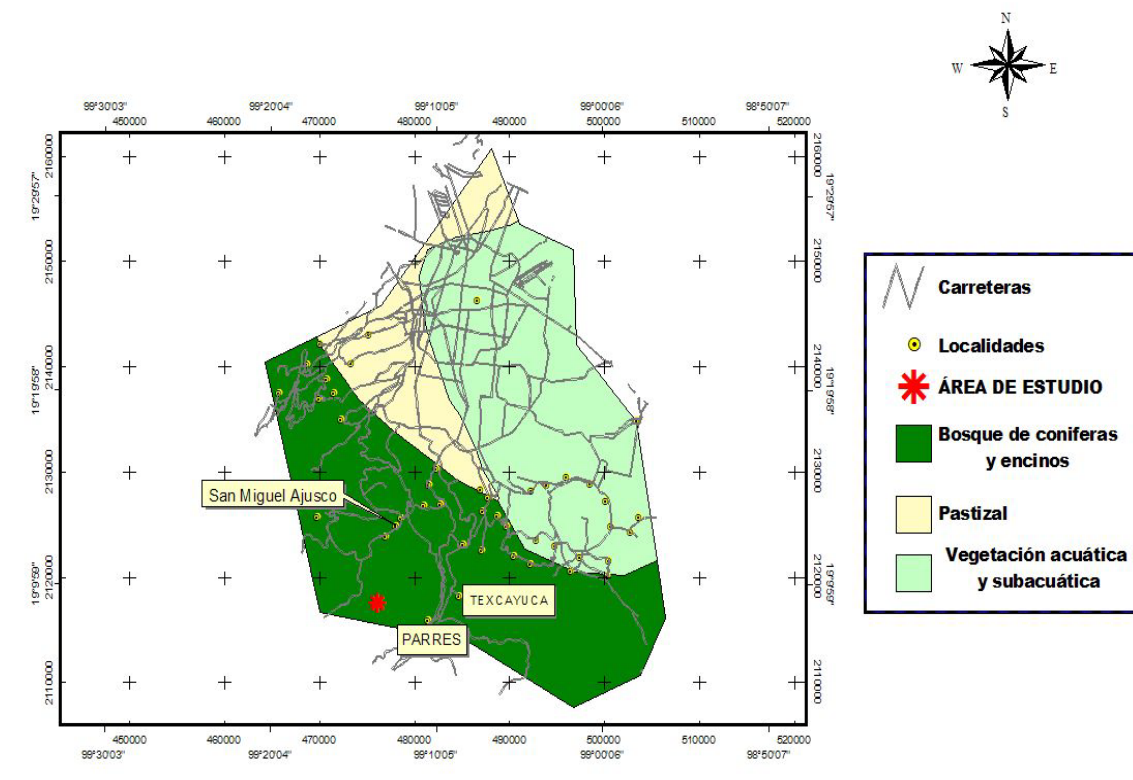


Figura 5.2 Localización del predio Tzozocol, Ajusco, D. F.

5.3- TRATAMIENTOS ESTUDIADOS

Con el fin de cumplir los objetivos e hipótesis planteada, se establecieron cuatro lotes de escurrimiento, tres de ellos ubicados en áreas quemadas con diferente severidad de fuego. Ésta última se determinó de acuerdo a las características observadas en campo, como color de las cenizas (la ceniza blanca implica una combustión más completa) y cantidad relativa de los combustibles forestales residuales. También se estableció un lote testigo (sin quema) para comparar los resultados.



En el área de trabajo se observaron lugares con diferentes características, principalmente color de las cenizas y consumo de la cobertura vegetal. Por lo que para este trabajo se eligieron tres lotes con características diferentes que se denominaron como severidad baja, media y alta (ver subtítulo descripción de tratamientos).


5.3.1 Descripción de los tratamientos

Se instalaron lotes de escurrimiento en cada una de las condiciones que a continuación se describen (Cuadro 5.2), cada lote midió 7m^2 (7 m de largo x 1m de ancho), los cuales se delimitaron en su perímetro con láminas de acero. En la parte baja del lote, se colocó un vertedor para captar el escurrimiento y los sedimentos; con el fin de conocer las pérdidas de éstos después de cada evento de lluvia.


En este apartado se describe las características que presentó cada tratamiento

Cuadro 5.2 Descripción de las condiciones de cada tratamiento

Lote	Simbología	Características	
Testigo Sin quema	SQ	<p>Terreno sin quemar con 8% de pendiente y 50 m de longitud de pendiente, el lote se estableció entre pinos adultos de aproximadamente 30 m de altura, la vegetación del sotobosque era pasto (<i>Muhlenbergia macroura</i>) de aprox. 20 cm de altura. La superficie del suelo no se pudo observar, por la cobertura existente</p>	

Lote	Simbología	Características	
Quemado severidad baja	Q-SB	<p>El lote se estableció al centro de una hondonada, con una pendiente del 6% y longitud de pendiente de 30 metros, la vegetación presente fue pasto (<i>Muhlenbergia macroura</i>). El relieve de terreno era irregular, presentaba pequeñas depresiones.</p>	

Lote	Simbología	Características	
Quemado severidad media	Q-SM	<p>Terreno con 7% de pendiente y 25 m de longitud de pendiente, el lote se estableció en medio de un bosque joven de aprox. 5 m de altura afectado severamente por el incendio, la altura del chamuscado se observó de 3-4 metros, un año después solo el 60% de los árboles se había recuperado, la cobertura vegetal era restos de las acículas de los árboles jóvenes con pocos macollos de pasto quemado (<i>Muhlenbergia macroura</i>). El relieve del terreno era uniforme</p>	

Lote	Simbología	Características	
Quemado severidad alta	Q-SA	<p>Terreno con 9% de pendiente y 15 m de longitud de pendiente, el lote se estableció pendiente abajo de un pinar (<i>Pinus montezumae</i>) de aprox. 25 m de altura, había evidencia que la altura de chamuscado había llegado aproximadamente a tres metros de altura, la vegetación del sotobosque eran macollos grandes de pasto (<i>Muhlenbergia macroura</i>) quemado, con restos gruesos de ramas sobre la superficie producto del quemado de la copa, el tronco también fue afectado por el incendio. El relieve del terreno era irregular, presentaba depresiones pequeñas.</p>	

Como parte de la caracterización del área donde se establecieron los tratamientos se hizo un análisis de suelo, las muestras de suelo se colectaron 34 días después de ocurrido el incendio. Se compararon los resultados de los tratamientos incendiados con el lote testigo, para conocer de qué manera habían sido afectados (Cuadro 5.3).

Cuadro 5.3 Comparación de algunos parámetros después del incendio

Parámetro		Lotes quemados			Sin quema
		Q-SB	Q-SM	Q-SA	S-Q
Humedad inicial (%)		24	20.1	17.6	8.3
pH:		5.8	5.49	5.6	5.81
Densidad aparente: (g cm ⁻³)		0.73	0.78	0.76	0.71
Densidad real: (g cm ⁻³)		1.68	1.83	1.82	1.54
Textura		Franco	Franco	Franco	Franco
	Arena	35	41	43	43
	Limo	44	45	43	43
	arcilla	21	14	14	14
Materia orgánica. (%)		14.5	12.5	13.5	19.3
N total (%)		0.55	0.43	0.48	0.54
Fósforo (mg kg ⁻¹)		1.15	1.72	1.72	2.3
Potasio (cmol kg ⁻¹)		0.65	0.35	0.60	0.57
Ca ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)		10.4	5.76	9.02	8.83
Mg ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)		3	1.15	2.48	3.37
Na ⁺ (cmol kg ⁻¹)		0.09	0.09	0.09	0.13
Espesor capa hidrofóbica (cm)		2	3	5	----

Cuando un incendio es muy intenso, además de producirse la quema del carbono orgánico, se da una reducción del nitrógeno por combustión de sustancias orgánicas nitrogenadas y una mineralización de elementos fertilizantes contenidos en los residuos vegetales (Ortiz, 1990). La pérdida de nutrientes, suelo y agua tras los incendios según algunos autores puede ser alta (Sanroque y Rubio, 1982; Sanroque *et al.* 1985; Cerda *et al.*, 1995)

La literatura menciona que la humedad del suelo después del paso de las llamas disminuye, esto varía en función de la textura y del régimen climático del lugar. En los resultados del cuadro 5.3, se observa que el lote de mayor severidad de quemado (Q-SA) presentó el menor contenido de humedad (17.6%), aunque el lote testigo presentó 8% de humedad, sin embargo esto se debe a que el sistema radicular que se forma en la superficie es tan fuerte que impide la entrada del agua. Hay que considerar que la humedad del suelo sufre constantes cambios en periodos cortos de tiempo y la humedad que aquí se menciona corresponde a lo encontrado 34 días después de ocurrido el incendio.

Con respecto al pH se menciona en la literatura que en cualquier incendio, la acidez del suelo se ve reducida debido al aporte de cationes, fundamentalmente Ca, Mg, K, Si y P (Solera *et al.*, 1996); después de la quema éste aumenta y dicho cambio se manifiesta en los primeros 10 cm (Jiménez, 1999). Sin embargo, el humedecimiento de las mismas produce hidrólisis de los cationes básicos contenidos en ellas, y consecuentemente, la elevación del pH (Fritze *et al.*, 1994), esta aseveración coincide con los datos del lote Q-SB, donde ocurrió un incendio de baja intensidad, existe mayor humedad y existe un pH de 5.8, pero este valor también se asocia a que en este lote ocurrió un incendio de baja intensidad que consumió el 25 % de materia orgánica con respecto al testigo.

Por otro lado, Aguirre (1978) y Aguirre y Rey (1980), quienes refieren a un suelo andosol mólico registraron que el fuego a baja intensidad no provocó cambios significativos en pH, sin embargo en los resultados del cuadro 5.3, se observa que el pH disminuyó en los lotes de intensidad media y alta, con respecto al lote testigo.

Las características físicas están estrechamente relacionadas con el contenido de materia orgánica. Como se esperaba este contenido fue mayor en el lote sin quema (19.3%), por lo tanto los valores de densidad aparente y real son menores.

El fósforo, potasio, calcio y el magnesio, se incrementan después de un incendio, llegando a perdurar hasta 5 o más años (Pritchett, 1986); sin embargo, bajo las condiciones de experimentación, el fósforo y el magnesio no se incrementaron (Cuadro 5.3), se

mantuvieron con valores por debajo de lote testigo y solo el potasio y calcio mostraron incrementos después del incendio, excepto en el lote de mediana intensidad (Q-SM).

El nitrógeno total disminuye, debido a que está altamente ligado a la materia orgánica. La volatilización del nitrógeno está ampliamente relacionada con la intensidad del incendio, dado que es proporcional al peso de la materia seca.

5.3.2 Niveles de Quema

Los niveles de quema (severidad de quema) se definieron por las condiciones del sitio observadas en campo

Se midió la capa hidrofóbica se siguió la prueba Water Drop Penetration Time (WDPT) la cual consiste en situar una gota de agua sobre la superficie de la muestra y cronometrar el tiempo hasta que se infiltra. Se considera que un suelo es hidrófobo si el tiempo de penetración de la gota de agua excede 5 segundos (Dekker y Ritsema, 1994).

El procedimiento que se siguió fue, colocar una gota de agua en un suelo completamente seco, si el agua formaba gotas y tardaba más de cinco segundos en infiltrarse, la capa del suelo era hidrófoba. En este caso fue necesario quitar raspando una capa de suelo de 0.5 cm y repetir la prueba para encontrar el límite superior de la capa impermeable. Una vez que se encuentra la capa impermeable, se continúa quitando las capas adicionales de suelo, repitiendo la prueba de la gota de agua en cada capa hasta que se obtenía una capa no hidrófoba. Este procedimiento indica el espesor de la capa hidrófoba.

5.3.3 Intensidad de la lluvia

Para saber que intensidad de lluvia se aplicaría en este experimento, fue necesario hacer el análisis de las precipitaciones en el área.

De la estación meteorológica el Ajusco, ubicada a 2839 msnm y en las coordenadas geográficas 19°13'00" latitud norte y 99°12'00" longitud oeste; se obtuvieron los datos de precipitación máxima en 24 horas en los últimos 20 años. Los datos se analizaron para un

periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, considerados como lluvias de baja (25 mm h^{-1}), media (50 mm h^{-1}) y alta intensidad (80 mm h^{-1}).

La primer intensidad (25 mmh^{-1}), se aplicó al estado seco del suelo, la duración estuvo en función del momento en que se estabilizó el escurrimiento (cuando se registraron tres muestreos con el mismo tiempo de llenado se consideró que el escurrimiento era estable) y la simulación de lluvia se detuvo. Se dio tiempo a que los acumulados* sobre el lote se infiltraran y se procedió a aplicar la segunda intensidad (50 mm h^{-1}) repitiendo el procedimiento

Debido a que los incendios ocurren fuera de la época de lluvias y trabajar con lluvia natural implica largos períodos de observación, altos costos y mucho trabajo; se trabajó con un simulador de lluvias. El objetivo del simulador de lluvias es la reproducción de la lluvia artificial lo más acercado a la realidad y en forma repetida, cuyos efectos sobre el suelo sean semejantes a la lluvia natural, lo que permitirá conocer el efecto de ésta en el suelo. La aplicación de la lluvia se hizo utilizando un simulador de lluvia tipo Purdue II (Figura 5.3) automatizado.

* Acumulados: se refiere a la cantidad de agua que permanece sobre la superficie del suelo; cuando se detiene la simulación de lluvia.



Figura 5.3 Simulador de lluvia automatizado tipo Purdue

Combinando las tres severidades del incendio y el testigo con las tres intensidades de lluvia que se aplicaron, da un total de 12 tratamientos, los cuales se enumeran en el cuadro 5.4.

Cuadro 5.4 Características de los 12 lotes, combinando severidad de incendio e intensidad de lluvia.

Tratamiento	Nivel de severidad	Descripción	Intensidad de Lluvia (m h ⁻¹)		Humedad Inicial (%)	
1	SQ	Pendiente 8%, cobertura vegetal: 100% pasto <i>Muhlenbergia macroura</i> . Lote sin Quema. No se midió capa hidrofóbica.	25		11.5	
2			50		19.2	
3			80		44.8	
4	Q-SB	Pendiente: 6%. Cobertura vegetal: pasto <i>Muhlenbergia macroura</i> .	25		27.8	
5		(40%). Espesor de la capa repelente 2 cm. Color de cenizas: gris. Observaciones: existían depresiones en el área del lote.	50		30.7	
6			80		40.2	
7	Q-SM	Pendiente 7%, cobertura vegetal acículas de pino (30%). Espesor de la capa repelente 3 cm. Color de cenizas, había solo pocas y de color gris. Observaciones: el área del lote era uniforme y compacta	25		21.9	
8			50		24.8	
9			80		24.8	
10	Q-SA	Pendiente 9%. Cobertura vegetal 20% pasto <i>Muhlenbergia macroura</i> y ramas de pino. Espesor de la capa repelente 5cm. Color de cenizas blancas. Observaciones: el área del lote presentaba restos de ramas, algunas totalmente calcinadas (cenizas color blanco) y otras ramas carbonizadas.	25		18.8	
11			50		29.6	
12			80		33.8	

NOTA: En este cuadro se mencionan los porcentajes de pendiente en cada lote, sin embargo para este trabajo se uniformizo la pendiente de los lotes a 7%. Todos los resultados están expresados para esta pendiente.

5.4.- VARIABLES DE RESPUESTA

5.4.1 Humedad del suelo

La humedad del suelo fue medida con un TDR TRASE SYSTEM I de varillas (Figura 5.4), en tres puntos a lo largo del lote de escurrimiento, parte alta, media y a la salida del mismo, en tres profundidades: 10, 30 y 60 cm. La lectura fue directa y en porcentaje. La medición de la humedad se hizo al inicio de cada simulación y al final de las tres corridas, en total fueron cuatro medidas, por lote de escurrimiento.

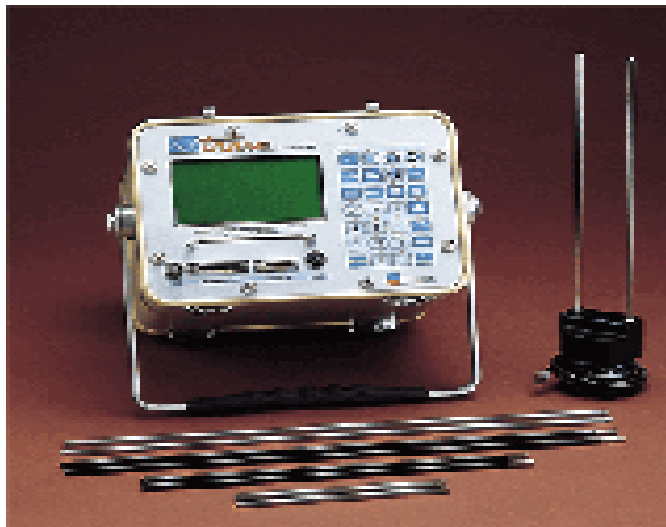


Figura 5.4 TDR TRASE SYSTEM I

5.4.2 Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración del suelo fue medida con un penetrómetro de varilla de un metro (Figura 5.5). Ésta se midió en tres puntos a lo largo del lote de escurrimiento. Las mediciones se hicieron al principio y al final de las tres simulaciones de lluvia.



Figura 5.5 Medición de resistencia al penetración en el lote testigo (sin quema)

5.4.3 Cobertura del suelo

La cobertura vegetal (pastos y restos de plantas) sobre el suelo ofrece un factor protector al mismo. No se midió la cobertura, ésta sólo se estimó por observación en campo.

5.4.4 Infiltración del agua

La infiltración fue la diferencia entre la precipitación y el escurrimiento. Las curvas de velocidad de infiltración de los 12 tratamientos se construyeron con los datos obtenidos hasta el momento en que se detiene la lluvia, tiempo en el cual el escurrimiento se estabilizó; es de suponer que, en el momento en que se estabilizó el escurrimiento, existía un equilibrio entre la tasa de infiltración y la de escurrimiento; de seguir con el muestreo la infiltración sería constante o disminuiría.

5.4.5 Escurrimiento superficial

Por cada simulación de lluvia se obtuvieron muestras de escurrimiento, las cuales se colectaron a intervalos de 5 minutos, a partir de que el escurrimiento inició y durante 60 minutos o antes, dependiendo del momento en que se consideró que éste era estable. Las muestras se colectaron en botes de plástico de un litro de capacidad, registrando el tiempo

de llenado. El muestreo se detuvo cuando el tiempo de llenado se mantuvo constante, momento en que se consideró que el escurrimiento se estabilizaba. En el laboratorio se pesaron los frascos para conocer el volumen colectado en cada simulación, a este peso se le restó el peso de los sedimentos, para obtener el peso del agua y este peso representó el volumen, que fue ajustado a los tiempos de muestreo, para conocer el volumen escurrido. Para esto se usó la siguiente expresión matemática:

$$Es_1 = \frac{(escb) (Im)}{tm} / 1000$$

Donde:

Es_1 = Ecurrimiento en el intervalo 1 (L).

escb = peso del agua en el bote (g) en el tiempo de llenado del bote.

Im = Intervalo de muestreo (cada cuánto tiempo se muestreaba) (min).

tm = tiempo que tardó en llenarse el bote (min)

1000 = para convertirlo a litros

Al final se sumaron los cálculos por cada intervalo ($Es_1, Es_2 \dots Es_x$) y ese fue el escurrimiento superficial en ese tratamiento.

Con los datos obtenidos se construyeron los hidrogramas para conocer el volumen total escurrido en cada simulación de lluvia

5.4.6 Producción de sedimentos

A partir de las muestras tomadas para medir escurrimientos se determinaron los sedimentos. A los botes se les agregó alumbre ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) para decantar el material en suspensión. Después se procedió a filtrarlos al vacío para obtener los sedimentos de cada muestra.

Posteriormente las muestras se colocaron en la estufa para eliminar el exceso de agua, una vez secas fueron pesadas en una balanza analítica, para obtener así el peso de los sedimentos muestreados en cada intervalo de muestreo.

Con esta información se procedió a aplicar la siguiente expresión matemática:

$$Ps_1 = \frac{(psm) (Im)}{tm}$$

Donde:

Ps_1 = Peso de sedimentos en el intervalo 1 ($g\ m^2$)

Psm = Sedimentos (g) en el tiempo de llenado del bote.

Im = Intervalo de muestreo (cada cuanto tiempo se muestreaba (min.)).

tm = tiempo que tardó en llenarse el bote (min)

Al final se sumaron los cálculos por cada intervalo ($Ps_1, Ps_2 \dots Ps_x$) y esa fue la producción de sedimentos en ese tratamiento.

Con los datos obtenidos se construyeron los sedigramas, para conocer el peso total de sedimentos en cada simulación de lluvia.

5.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis realizado a los datos consistió en construir una matriz de correlación, para conocer la relación entre variables y como apoyo para explicar los resultados, el otro análisis solo fue grafico, debido a que no se tienen repeticiones de los tratamientos.

Los datos fueron capturados y analizados en una hoja de cálculo Microsoft Office Excel 2007 y en el paquete estadístico CurveExpert 1.3

VI.- RESULTADOS y DISCUSIÓN

6.1 HUMEDAD DEL SUELO

Cada uno de los datos de contenido de humedad que se presenta corresponde al promedio de tres lecturas tomadas, al inicio, en medio y en la parte baja del lote de escurrimiento. Las diferentes lecturas de contenido de humedad se hicieron al inicio de cada simulación y al final de las tres corridas, en total cuatro lecturas.

En la Figura 6.1 se observa el comportamiento de los contenidos de humedad de las tres severidades de quemado y el lote no quemado.

En la Figura 6.1, se observa como el contenido de humedad del suelo se incrementó durante el proceso de simulación en cada uno de los lotes quemados, la tendencia general fue a aumentar, debido a la cantidad de agua que estaba entrando al lote y saturaba los poros. Sin embargo, se observa en la curva del lote quema a severidad media (Q-SM) que la humedad al inicio de la simulación con 50 mm h^{-1} y 80 mm h^{-1} es el mismo porcentaje. Cabe señalar que cuando existe hidrofobicidad en el suelo la infiltración tiende a presentarse en frentes no continuos como el flujo en “dedos”, de ahí que en el momento de tomar la lectura de humedad ésta se haya realizado en un área que no estaba húmeda y, por lo tanto, en la curva de humedad se ve una disminución, esta situación va a afectar al escurrimiento.

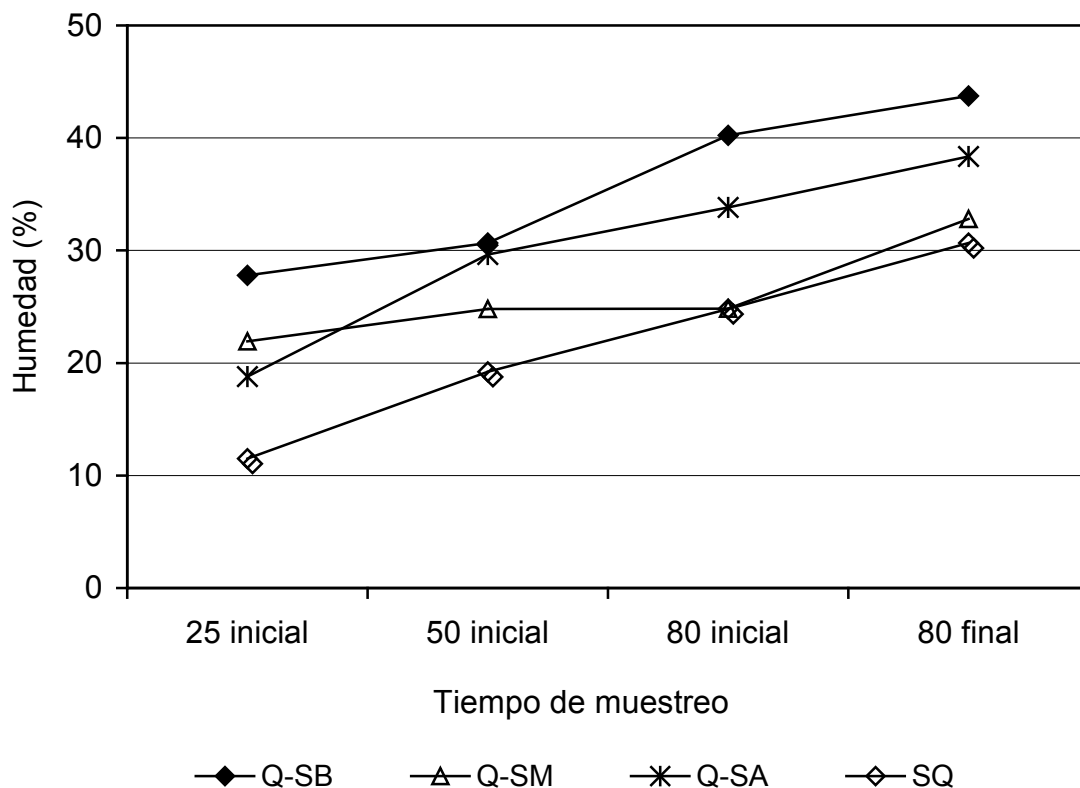


Figura 6.1 Comportamiento de la humedad a lo largo de las simulaciones de lluvia, en cuatro lotes.

25 inicial: Lectura al principio de la simulación de lluvia con intensidad de 25 mm h⁻¹

50 inicial: Lectura al principio de la simulación de lluvia con intensidad de 50 mm h⁻¹

80 inicial: Lectura al principio de la simulación de lluvia con intensidad de 80 mm h⁻¹

80 final: Lectura al final de la simulación de lluvia con intensidad de 80 mm h⁻¹

Al inicio de la simulación, el lote con menor humedad fue el lote testigo (11.5%), esto se debió a que la cobertura del suelo era del 100 %, el agua tiende a quedar retenida en el follaje y poco a poco esta se va infiltrando. Con respecto a los lotes quemados se observó que el lote con alta severidad (Q-SA) presentó menor contenido de humedad (18.8%). En la bibliografía se reporta que cuando la capa de humus disminuye de espesor por efecto de la quema, existen cambios drásticos en el contenido de humedad del suelo.

El lote con severidad de quemado bajo presentó al inicio de las simulaciones el mayor contenido de humedad (27.8%). Cuando se presentan incendios de severidad baja las temperaturas que se alcanzan son bajas por lo tanto la evaporación del agua presente en el suelo al momento del incendio no se evapora por completo, como ocurre en los incendios de alta severidad (esto ocurre de manera general e inmediatamente después de ocurrido el incendio). Cabe recordar que la humedad se midió 34 días después de la quema, por lo tanto ya hubo cambios en los diferentes lotes.

6.2 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

Como ya se mencionó la resistencia a la penetración se midió con un penetrómetro de varilla, a continuación se muestran las graficas obtenidas en cada lote al inicio y final de las tres simulaciones de lluvia aplicadas. Las Graficas se obtuvieron directamente de software del aparato, se presentan dos graficas por lote, la primera corresponde la inicio de la simulación (25 mm h^{-1}) y la segunda es la grafica que se obtuvo al final de las tres simulaciones, se observan tres inserciones, parte alta, media y baja del lote, en orden ascendente.

El valor crítico de resistencia mecánica a la penetración que impide la elongación radical de los cultivos es muy discutida, variando entre 0.9 y 3 MPa, aunque en general se asume el valor de 2 MPa, dependiendo del penetrómetro utilizado. Rangeon (2008) existen efectos sobre la vegetación con presiones superiores a 0.2 MPa y limitantes al crecimiento con 0.8 a 5 MPa.

Con lo anterior se tiene que ni uno de los lotes trabajados tiene problemas para la penetración de raíces, sin embargo, comparando los cuatro lotes, los valores más altos los presentó el lote sin quema, esto como resultado de las abundantes raíces que existían en el lugar las cuales sirven de soporte para el suelo.

Lote testigo sin quema (S-Q)

Al inicio del proceso de simulación el valor más alto se observó en la parte media del lote con un valor de 2650 kPa, y la sección con menos resistencia se presentó en al parte alta del lote con un valor aproximado de 500 kPa. Para el final del proceso, la sección con mayor resistencia fue la parte alta del lote.

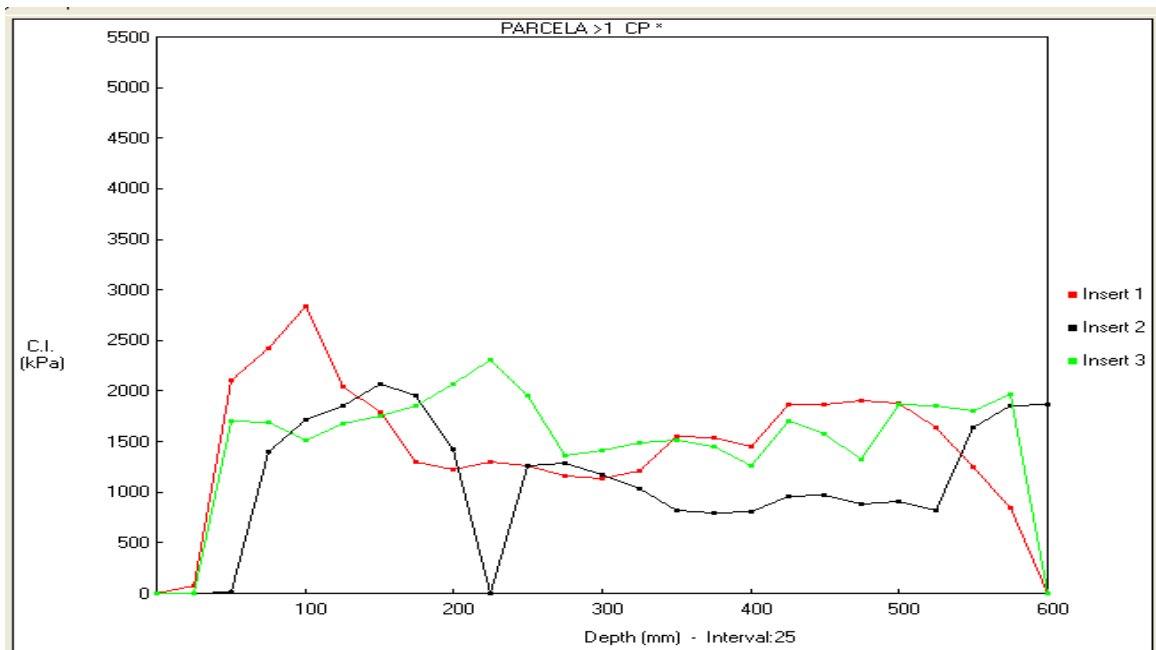
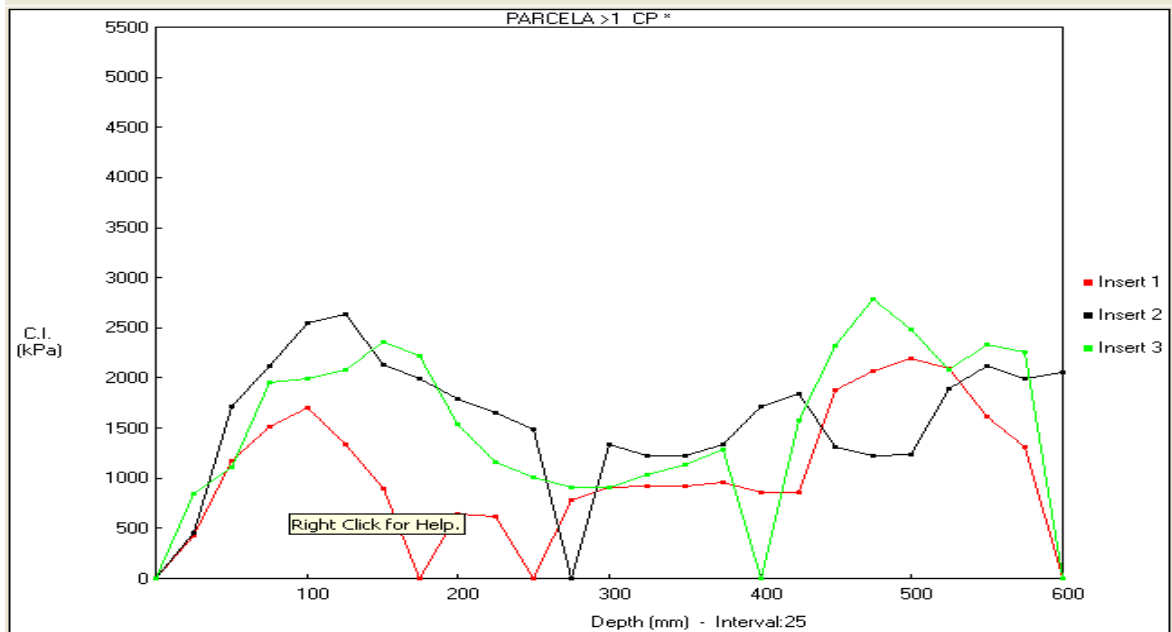


Figura 6.2 Resistencia a la penetración en el lote sin quema, arriba al inicio de la simulación de 25 mm h⁻¹ y abajo al final de la simulación de 80 mm h⁻¹.

Lote de severidad baja (Q-SB)

Este lote presento la menor resistencia a la penetración, sus valores máximos al inicio de la simulación fueron de 1000 kPa en al parte alta, 1650 y 1600 en al parte media y baja del lote, respectivamente. Después de humedecer el suelo la parte baja ofreció el menor valor, esto como resultado del incremento de la humedad.

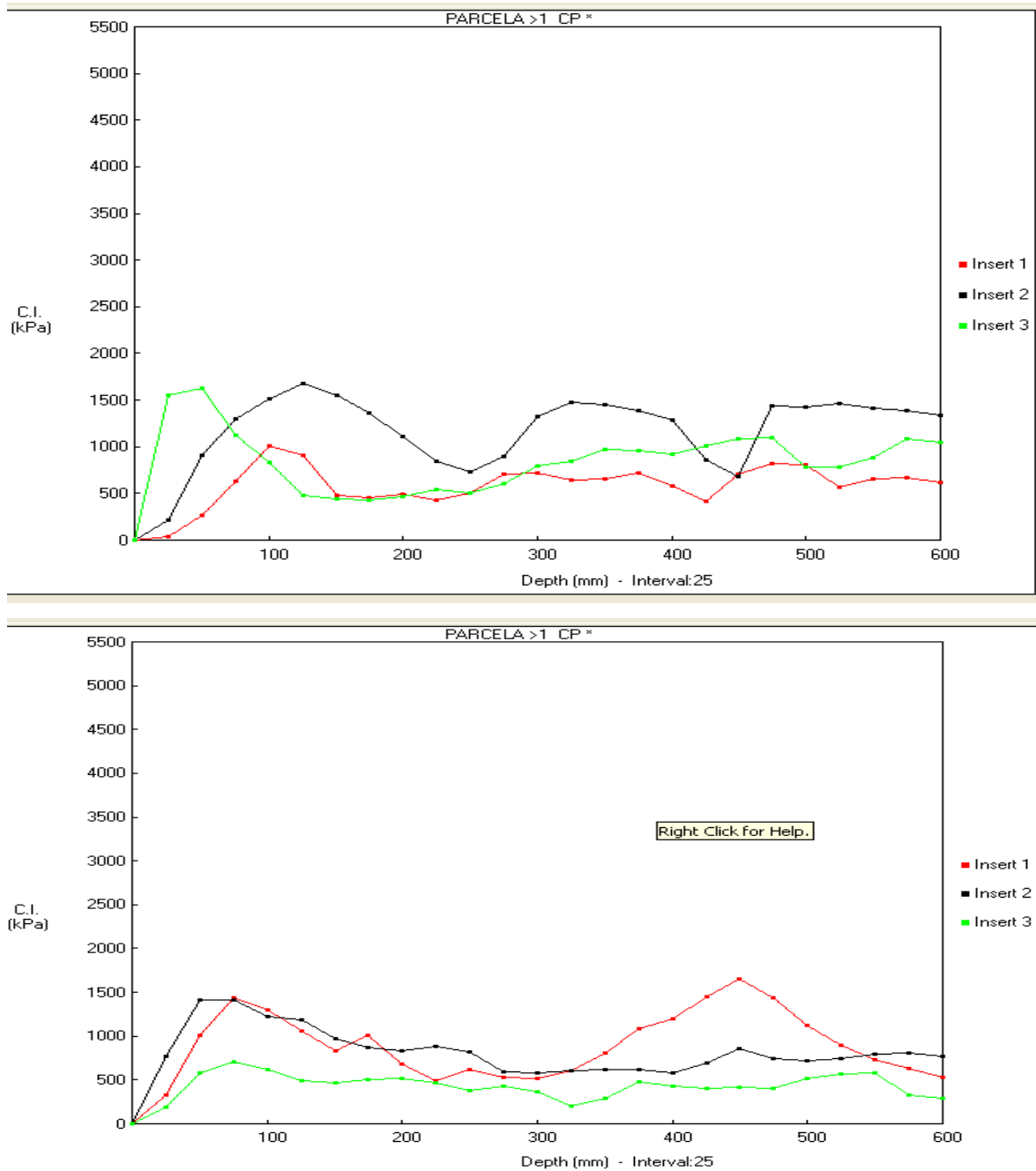


Figura 6.3 Resistencia a la penetración en el lote severidad baja, arriba al inicio de la simulación de 25 mm h⁻¹ y abajo al final de la simulación de 80 mm h⁻¹.

Severidad de quemado medio (S-QM)

Los valores máximos de resistencia al inicio de la simulación fueron de 1500 kPa y en la parte alta del lote. Para final de la simulación el valor máximo fue de 1700 kPa y este se presentó en la parte baja del lote. Cabe resaltar que los valores de resistencia en la parte alta del lote disminuyeron hacia el final de la simulación.

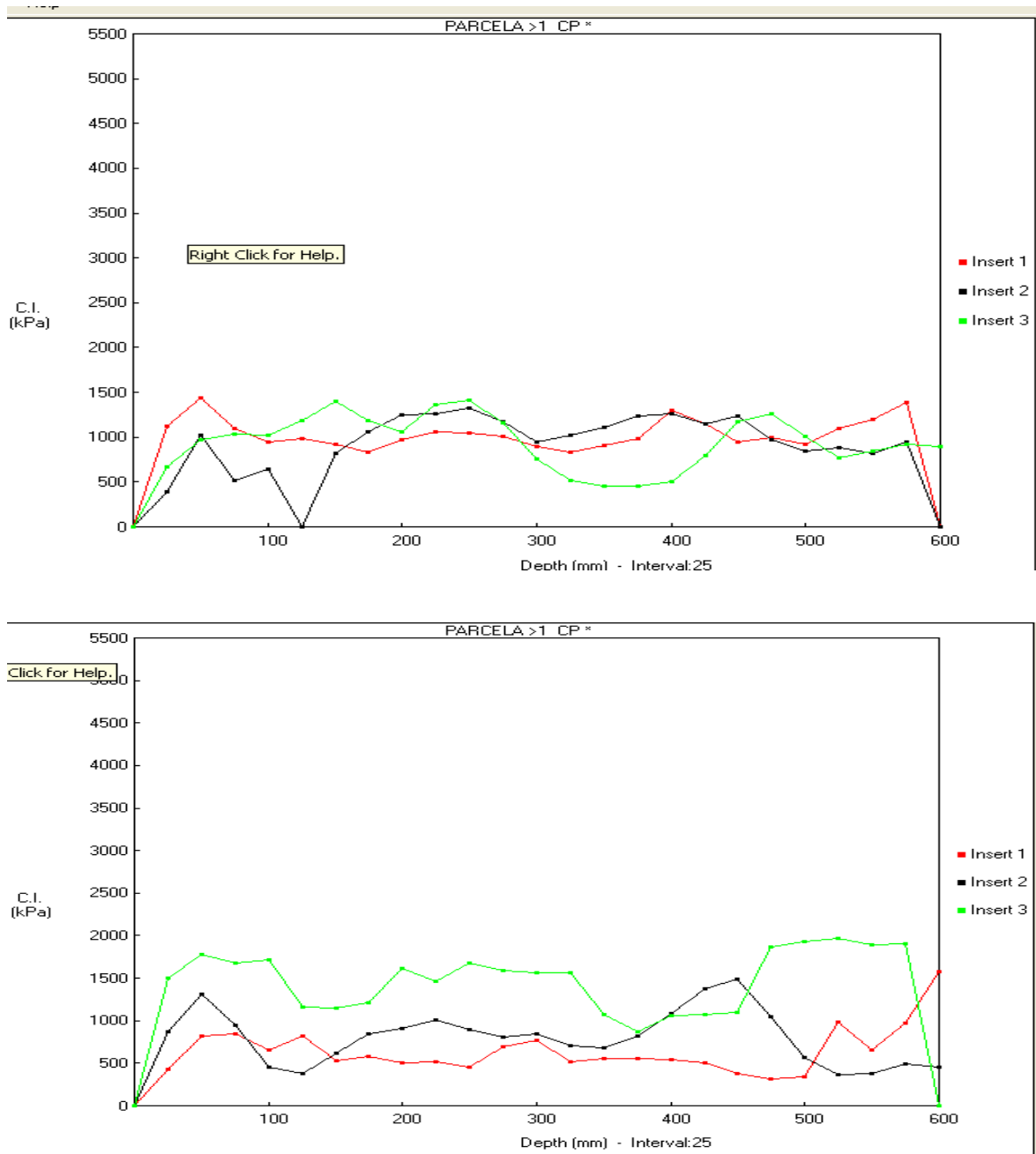


Figura 6.4 Resistencia a la penetración en el lote severidad media, arriba al inicio de la simulación de 25 mm h⁻¹ y abajo al final de la simulación de 80 mm h⁻¹.

Severidad de quemado alta (S-QA)

Comparando los primero 10 cm, se observo que la parte que ofreció mayor resistencia a la penetración fue la parte baja del lote, con un valor máximo de 1600 kPa, relación que se mantiene hacia e final de las tres simulaciones, pero notándose que los primero cm de suelo ya no ofrecen la misma resistencia comparado con el inicio de la simulación.

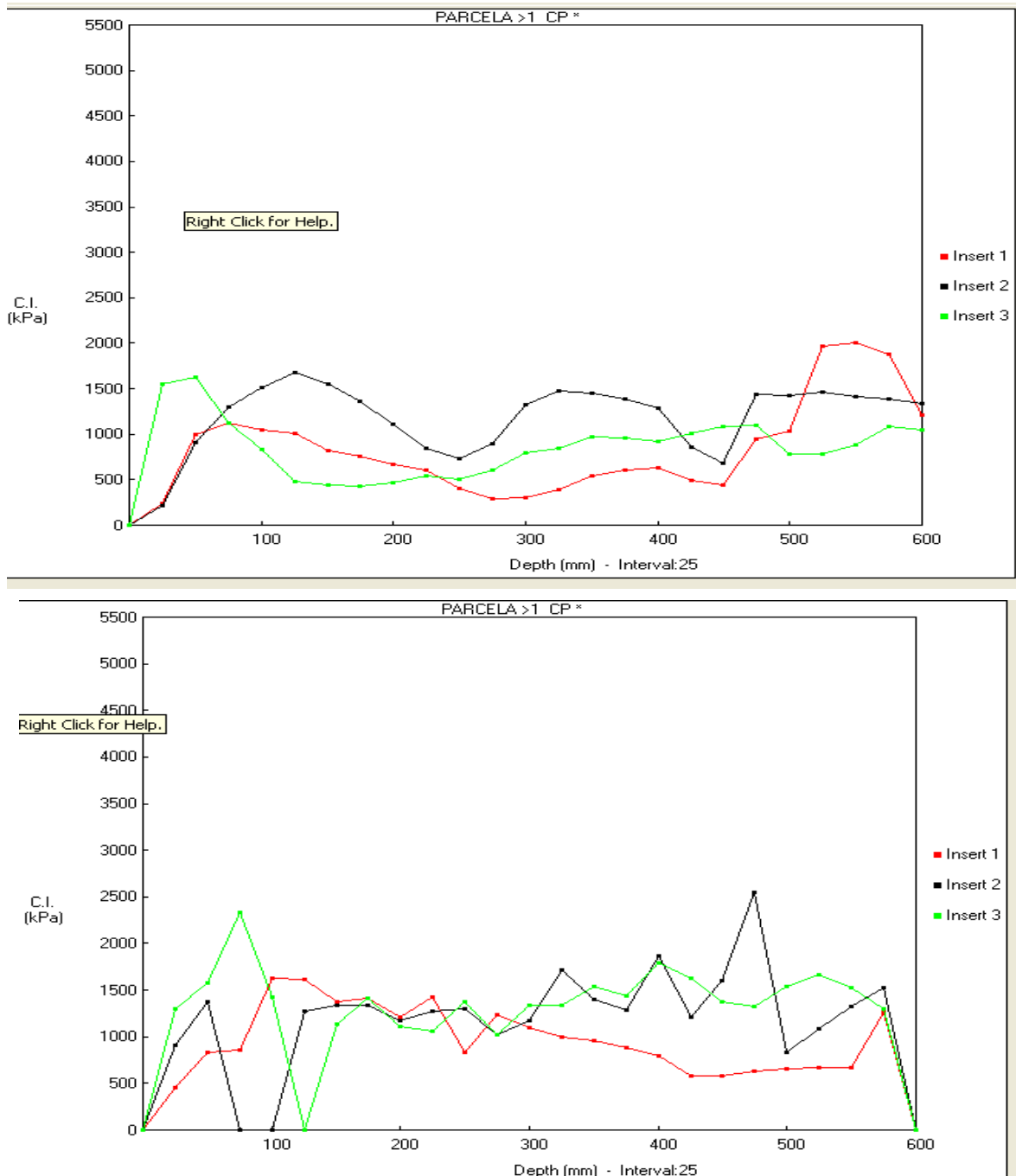


Figura 6.5 Resistencia a la penetración en el lote severidad media, arriba al inicio de la simulación de 25 mm h⁻¹ y abajo al final de la simulación de 80 mm h⁻¹.

6.3 COBERTURA DEL SUELO

La cobertura vegetal es lo primero que se pierde tras un incendio forestal, la destrucción de ésta, puede dejar parcial o totalmente expuesta la superficie del suelo y por consiguiente, sometida al riesgo de erosión. En este caso la cobertura vegetal no se midió directamente, sí bien fue estimada porcentualmente, obteniendo lo siguiente.

SQ: Vegetación: pinos adultos (30 m altura), pasto *Mulhlenbergia macroura*. Cobertura de 100%.

Q-SB: Vegetación: pasto *Mulhlenbergia macroura*. Cobertura de 40%. Color de cenizas: gris.

Q-SM: Vegetación: Árboles jóvenes de pino de aproximadamente 5 m de altura. Cobertura: acículas de pino. Color de cenizas, había sólo pocas y de color gris, cobertura igual a 30%

Q-SA: Cobertura de 20%, pasto *Muhlenbergia macroura* y ramas de pino sobre la superficie totalmente calcinadas. Color de cenizas blancas.

Los macollos de pasto presentes en los diferentes lotes ya mostraban rebrote

6.4 REPELENCIA AL AGUA

Después de haber aplicado el método de WDPT, los resultados encontrados es los lotes de tratamientos fueron:

Cuadro 6.1 Espesor de la capa hidrófoba en los cuatro lotes experimentales.

Lote	Espesor (cm)
Sin quema (S-Q)	---
Quema Severidad baja (Q-SB)	2
Quema Severidad media (Q-SM)	3
Quema Severidad alta (Q-SA)	5
Promedio de los lotes quemados	3.3

Tal y como se observa en el cuadro 6.1 a mayor severidad de quema mayor es el espesor de la capa hidrófoba

6.5 VARIACIÓN EN LA TASA DE INFILTRACIÓN

La tasa de infiltración se determinó para cada tratamiento; a partir de la diferencia entre la precipitación (mm) y el escurrimiento superficial (mm) muestreado en cada intervalo de tiempo.

Debido a que el objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de los incendios en el suelo, en este caso la severidad del mismo, el análisis se realizará comparando las diferentes condiciones de quema en una misma intensidad de lluvia.

Comparación de los lotes con un intensidad de 25 mm h⁻¹

En la figura 6.6, se observan las curvas de infiltración para las diferentes condiciones de severidad del incendio cuando se aplicó una lluvia de baja intensidad (25 mm h⁻¹).

Con la intensidad de 25 mm h⁻¹, se observa no se tienen datos de infiltración debido a que no hubo escurrimiento en el lote sin quema (cabe recordar que la diferencia entre lo que precipito y lo que escurrió fue lo que se tomo como infiltración, al no haber escurrimiento no se tenía la cuantificación). Esto debido a la existencia de una cobertura vegetal que intercepta el agua, disipa la energía de las gotas de lluvia y ofrece resistencia al flujo superficial; como ya ha sido ampliamente documentado en otros trabajos (Ríos y

Martínez, 1990, Ramírez, 2000, DeBano, 1998) y también a que los restos muertos del material vegetal absorben agua. Sin embargo, cuando se presentan incendios severos que eliminan la vegetación y consumen la materia orgánica en el piso forestal, los cambios más obvios en el ciclo hidrológico, son la reducción de la interceptación e infiltración y por lo tanto aumenta el escurrimiento superficial (Beschta, 1990, DeBano, *et al.*, 1998, James and Lynn, 2000) y hay mayor pérdida de humedad debido a procesos de evaporación (Regalado *et al.*, 2003).

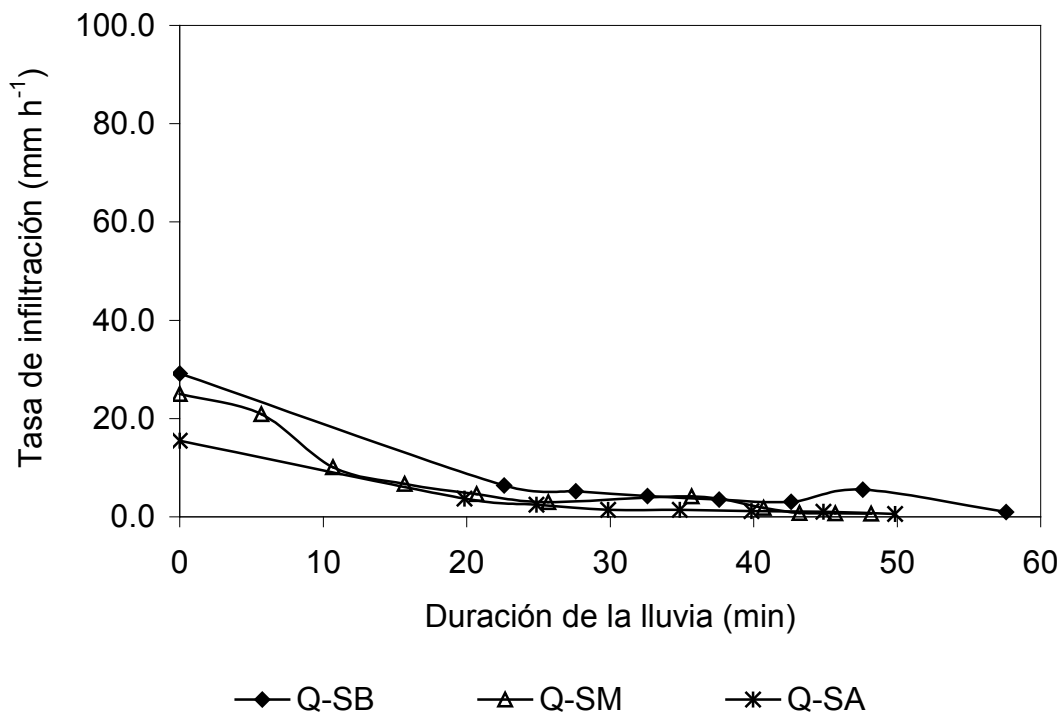


Figura 6.6. Comparación de las tasas de infiltración obtenidos a una intensidad de 25 mm h⁻¹, en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado, D. F.

El lote Q-SB de menor intensidad de quemado, alcanzó la mayor tasa de infiltración (29.2 mm h⁻¹) al inicio de la simulación toda el agua que precipitaba se infiltró, por eso los valores altos. Cabe recordar que la infiltración máxima corresponde a la cantidad de agua que se este aplicando en ese momento sin embargo, los datos se expresaron en términos del 7% de pendiente, por lo que algunos valores se incrementaron. Se menciona en la literatura que en suelos quemados al principio la infiltración es baja y conforme transcurre

el tiempo ésta se incrementa. Sin embargo, eso no sucedió en este caso y es que probablemente porque la repelencia al agua inducida por quemas prescritas de baja-moderada severidad, usualmente es de corta duración (Robichaud, 2000), la capa hidrofóbica de este lote fue de sólo 2 cm de espesor; lo que indica que la hidrofobicidad pudo perderse durante los primeros minutos de simulación, debido a que el primer dato se obtiene hasta que se inició el escurrimiento 22 minutos después de iniciada la simulación. Aunque la humedad presente fue mayor (27.8%) comparada con los otros lotes, cabe recordar que la humedad no fue uniforme a lo largo de lotes de escurrimiento. El hecho de presentar mayor infiltración se puede atribuir al alto porcentaje de cobertura vegetal al momento de la simulación, en este caso fue del 40%, y éste fue el tratamiento con mayor cobertura

El lote Q-SA (Figura 6.6), presentó al inicio la menor infiltración 15.5 mm h^{-1} (hasta el min 40), aunque en este lote se esperaba la infiltración fuera mayor, debido al bajo contenido de humedad al inicio de la simulación (18.8%), lo que significa que era 22% menos húmedo que el lote Q-SB que fue el más húmedo (27.8%). Sin embargo, como mencionó Gilmour (1968) citado por DeBano (2000), en suelos repelentes al agua, existen mayores tasas de infiltración en suelos húmedos comparados con suelos secos. Situación que se presentó en este lote combinado con el espesor de 5 cm de la capa hidrofóbica, y el bajo porcentaje de cobertura vegetal del suelo (20%)

El lote Q-SM fluctuó entre los lotes de baja y alta severidad y después del minuto 40 se observó que éste presentó la menor tasa de infiltración de los tres lotes evaluados; posiblemente en este momento se alcanzó una mayor condición de saturación, en comparación con los otros lotes, considerando que después de detenida la simulación los acumulados sobre el lote tardaron 40 min en infiltrarse; en cambio en el lote Q-SB tardaron 27.4 min y 16.3 min en el lote Q-SA.

Las diferencias entre las tasas de infiltración en los lotes quemados se debieron a la severidad del fuego y las condiciones que lo precedieron. Robichaud (2000) trabajó con dos parcelas bajo fuego prescrito, en ambas se produjeron diferentes tasas de infiltración, relacionadas con la severidad de fuego.

Comparación de los lotes con un intensidad de 50 mm h⁻¹

En la figura 6.7 se analizan las curvas de infiltración obtenidas al aplicar una intensidad de lluvia de 50 mm h⁻¹. Es notorio que conforme se incrementó la intensidad de lluvia la tasa de infiltración también aumentó, alcanzando valores de 58.3 mm h⁻¹. Lo anterior como resultado del incremento en la intensidad de lluvia, reflejado en una mayor cantidad de agua en el lote.

Las curvas de infiltración reflejan el incremento en la humectabilidad con el tiempo, una vez que el suelo es puesto en contacto con el agua. La infiltración aumenta con el tiempo porque las sustancias hidrófobas responsables de la repelencia al agua son ligeramente solubles en agua y se disuelven lentamente, por eso se incrementa la humectabilidad (DeBano, 1981, citado por Robichaud, 2000).

En la figura 6.7 se observa que el lote con Q-SM presentó las mayores tasas de infiltración durante los primeros minutos de simulación; su tasa de infiltración máxima fue de 50.0 mm h⁻¹. Este lote presentó el menor porcentaje de humedad (24.8%) de entre los lotes quemados, al inicio de la simulación con 50 mm h⁻¹, por lo que a esta intensidad sí se cumple que suelos más secos presentan mayores tasas de infiltración cuando existen condiciones de hidrofobicidad. En este lote la capa hidrofóbica era de 3 cm; por lo que con esta intensidad de lluvia (50 mm h⁻¹) y las condiciones presentes en el lote, los poros aun no se saturaban. La cobertura vegetal de este lote era mayor que en los otros lotes quemados. En seguida se presentó la curva para el lote quemado con severidad alta, cuya capa hidrofóbica era más gruesa (5 cm), lo que sugiere que poco a poco el agua se iba infiltrando y que aun existían lugares en los cuales se favorecía la infiltración. Con respecto al contenido de humedad, comparado con los lotes quemados, éste presentó el valor intermedio (29.6%) y por lo tanto presenta una curva de infiltración intermedia entre los lotes quemados.

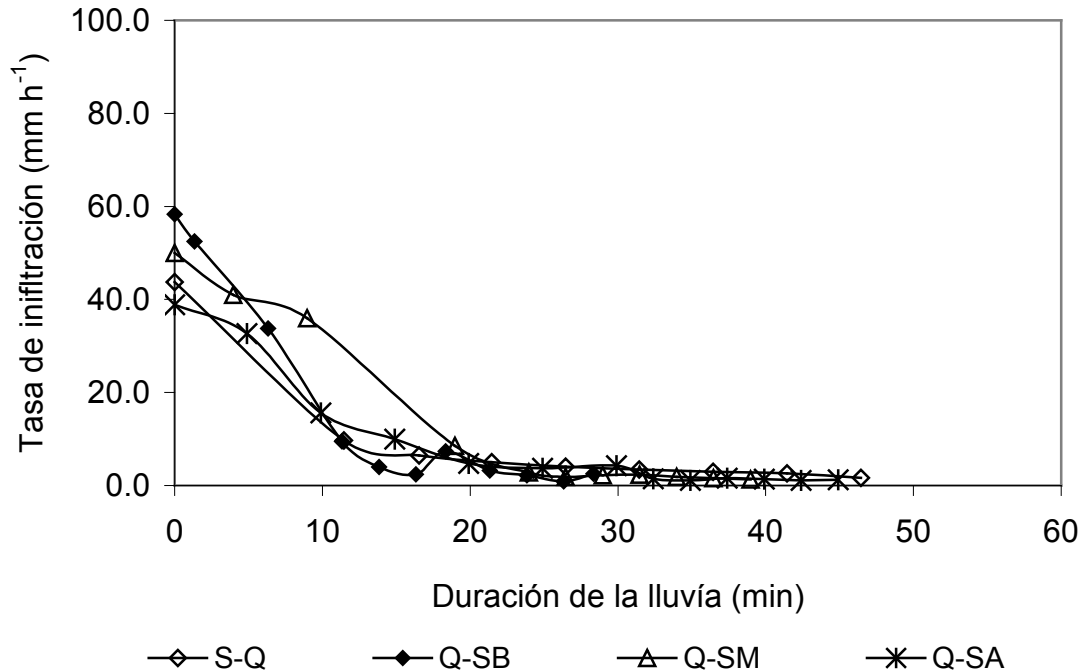


Figura 6.7 Comparación de las tasas de infiltración obtenidos a una intensidad de 50 mm h⁻¹, en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F.

Al inicio de la simulación la menor curva de infiltración fue para el lote S-Q iniciando en 43.7 mm h⁻¹ y descendiendo al min 11 de simulación hasta 9.7 mm h⁻¹. Este valor de infiltración hace suponer que la mayor cantidad de agua escurrió sin embargo en este lote la cobertura vegetal era del 100 % y parte del agua que entró al lote quedó interceptada en el follaje del pasto y la mayor curva de infiltración se obtuvo en el lote Q-SB, este lote fue el más húmedo al inicio de la simulación (30.7%) razón por la cual se puede decir que los poros estaban ya saturados y no permitían que se infiltrara más agua y suponiendo que la capa hidrofóbica (2 cm de espesor) se saturó rápidamente; se permitió el contacto con el suelo, el cual se saturó rápidamente para impedir al agua continuar infiltrándose.

Comparación de los lotes con una intensidad de 80 mm h⁻¹

Cuando se aplicó la simulación de lluvia con 80 mm h⁻¹ (Figura 6.8) se observó que la tasa de infiltración aumentó, alcanzando un máximo de 93 mm h⁻¹ (lote Q-SB).

En general las cuatro curvas presentaron el mismo comportamiento, sin embargo, en los primeros 5 min de simulación se observó que el lote de severidad baja presentó la mayor tasa de infiltración 93 mm h^{-1} (los datos se expresaron en relación al 7% de ahí que haya datos que se incrementen) y el lote sin quema la menor tasa de infiltración. Después de los primeros diez minutos, el comportamiento de estas curvas cambio, siendo ahora que el lote Q-SM tenía la mayor tasa y el lote Q-SA, la menor tasa y las variaciones continuaron a lo largo de la simulación.

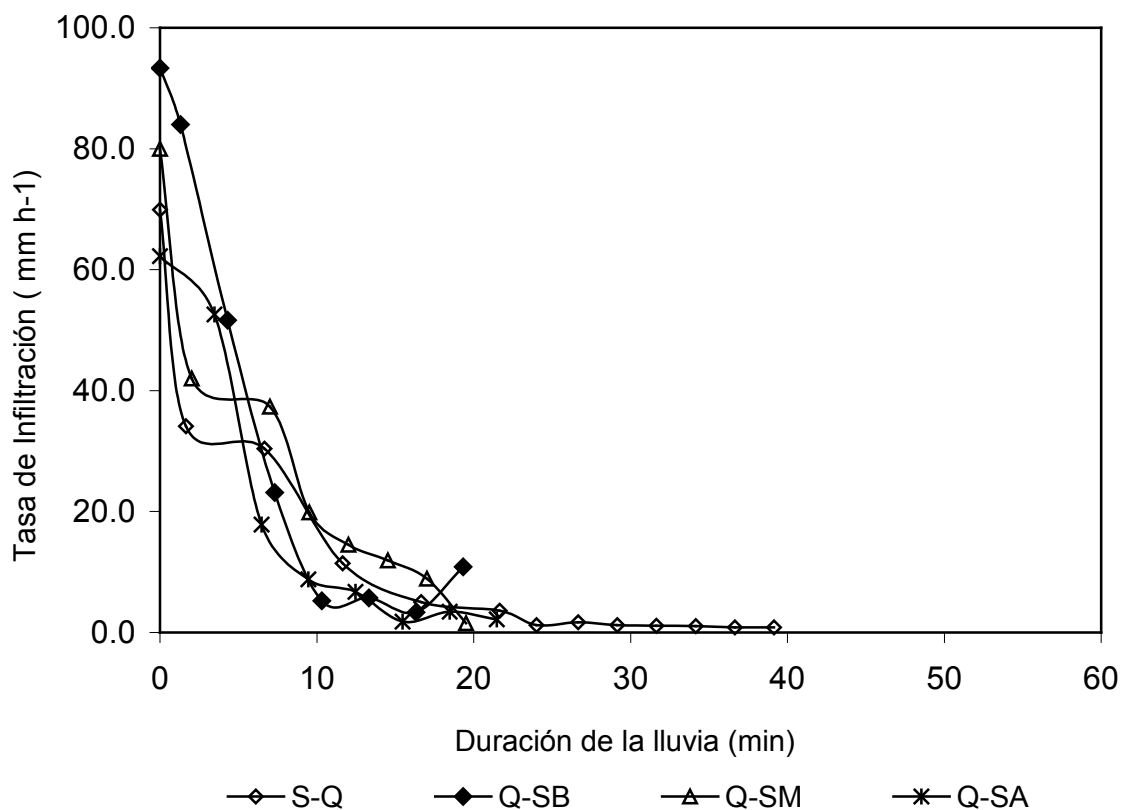


Figura 6.8 Comparación de las tasas de infiltración obtenidas a una intensidad de 80 mm h^{-1} , en tres lotes quemados y le testigo, en el Volcán Pelado D. F.

Otra posible razón de este comportamiento es que la capa hidrofóbica disminuyó por efecto del golpeteo de las gotas de lluvia y al escurrimiento que se generó con la anterior intensidad, permitiendo de esta manera que una mayor cantidad de agua se infiltrara y la tasa fuera mayor a 70 mm h^{-1} . A este respecto, DeBano and Rice (1973) explicaron que la

repelencia al agua restringe severamente la infiltración cuando el suelo está seco. Conforme aumenta la cantidad de agua, la resistencia al humedecimiento disminuye, y cuando el suelo está húmedo transmite el agua rápido. Por esta razón, a mayor entrada de agua mayor humedad en el suelo y la infiltración en estas condiciones aumentó.

Shahlaee *et al.* (1991) encontraron que existe una resistencia a la infiltración, la cual disminuye gradualmente conforme la superficie fue humedecida con la lluvia continua y que bajo condiciones secas el material orgánico, que cubre el suelo mineral de la parcela, desarrolló temporalmente una condición no humectable entre los 5-10 min de iniciada la simulación de lluvia. En general, la hidrofobicidad se rompe o es lo suficientemente lavada, durante el primer o segundo año después del fuego (Robichaud, 2000).

6.6 ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

Se analizó el gasto de los diferentes tratamientos por intensidad de lluvia para poder comparar el efecto de la severidad del incendio en el escurrimiento superficial.

Comparación de los cuatro lotes a una intensidad de 25 mm h⁻¹

En la figura 6.9 se muestra la comparación de los hidrogramas obtenidos en tres lotes afectados por el fuego y el lote testigo (sin quema), después de aplicar una lluvia de 25 mm h⁻¹ de intensidad.

Lote S-Q

Se observa que en el lote S-Q (lote testigo), no hubo escurrimiento, debido a la presencia de una cobertura vegetal (100%) de *Muhlenbergia macrora* de aproximadamente 30 cm de altura el cual ha sido pastoreado, la cual propició que porcentaje de la precipitación quedara interceptada en la vegetación, y otro porcentaje llegara a la superficie del suelo, pero sin ser suficiente para saturar al mismo e iniciar el escurrimiento superficial. Benavides-Solorio (2003) menciona que la cubierta vegetal ofrece resistencia al escurrimiento superficial, maximizando los porcentajes de infiltración.

Con respecto a la humedad del suelo este lote presentó el menor porcentaje de humedad (11.5%) al inicio de la simulación con 25 mm h^{-1} , este porcentaje representa 59% menos que el lote más húmedo (Q-SB). Razón por la cual el agua que llegó al suelo se infiltró sin permitir la saturación de los poros, para que diera inicio el escurrimiento.

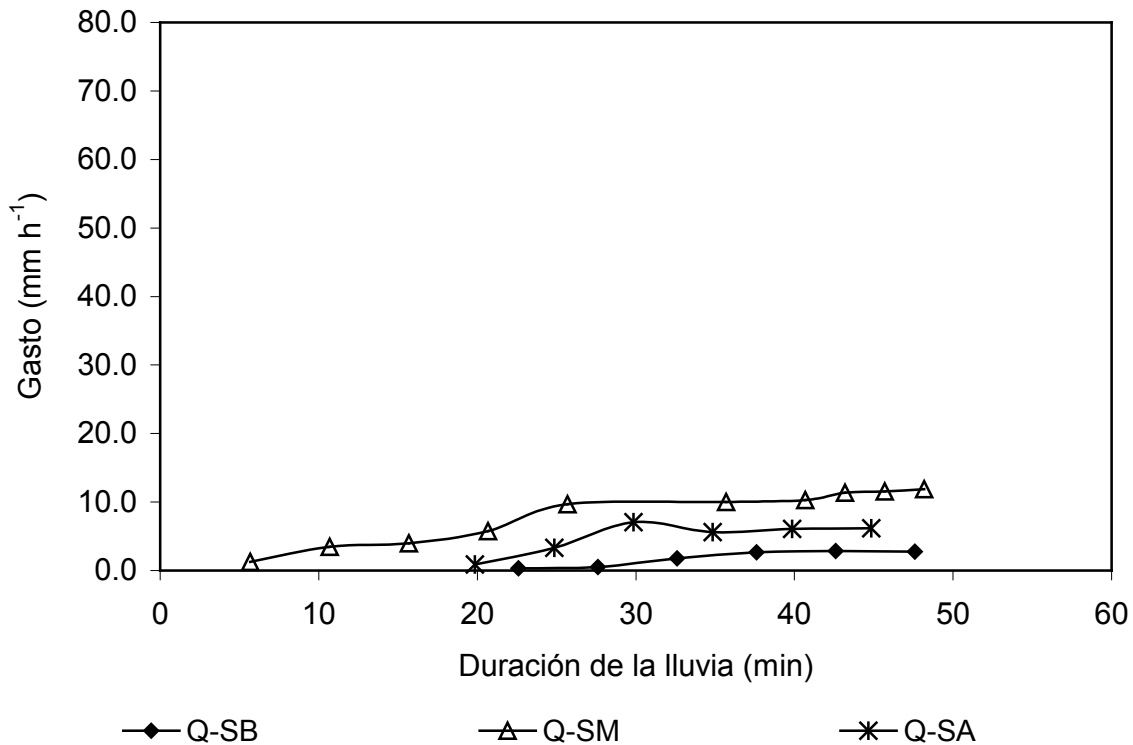


Figura 6.9 Comparación de los hidrogramas obtenidos a una intensidad de 25 mm h^{-1} en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F.

Lote Q-SB

La curva de gasto muestra claramente como éste se fue estabilizando a lo largo de la simulación, hasta permanecer casi constante.

El lote Q-SB (Figura 6.9) presentó la menor curva de escurrimiento, lo que indica que el volumen por unidad de tiempo fue menor. El gasto máximo fue de 2.83 mm h^{-1} . El comportamiento de esta curva sugiere que en este tratamiento se presentó la mayor tasa de infiltración, tal y como ocurrió.

Otro factor asociado al poco escurrimiento que se presentó fue el alto porcentaje de cobertura que había en este lote, 40%, esta cobertura permitió retener el agua en el mismo y por lo tanto, el escurrimiento fue menor.

La humedad que presentó este lote fue la mayor (27.8%) de los cuatro lotes comparados en esta intensidad. Este dato sugiere que no fue la humedad el factor que determinó la cantidad de escurrimiento en al menos la condición que este lote presentó, y aquí la cobertura vegetal tuvo un papel importante al igual que la rugosidad de terreno; esta afirmación es apoyada por el dato de inicio del escurrimiento, el cual fue hasta el minuto 22 después de iniciada la simulación (Cuadro 6.2), lo que indica que el agua precipitada durante este tiempo se infiltró, por lo tanto, el volumen al final de la simulación tuvo que ser menor (Cuadro 6.3)

La capa hidrofóbica en este tratamiento tenía un espesor de 2 cm, comparada con los lotes quemados, esta capa era delgada, lo que sugiere que se saturó lentamente y posteriormente el agua se infiltró en el suelo.

Cuadro 6.2 Tiempos de inicio de escurrimiento, aparición de charcos e infiltración de los acumulados en los cuatro lotes.

Lote	Inicio	Aparición	Tiempo de	Tiempo de
	escurrimiento	de espejo	encharcamiento	infiltración de acumulados
	minutos			
S-Q	--	--	---	---
Q-SB	22.6	4.39	6.15	27.40
Q-SM	5.6	0.18	1.59	40.53
Q-SA	19.8	3.20	4.45	16.35
Promedio de quemados	16	2.59	4.06	28.09

Características como la humedad, la pendiente del suelo, el espesor de la capa hidrofóbica, y la resistencia a la penetración (impedimento mecánico que tendrán las raíces para crecer), influyen en el escurrimiento. Evidentemente otra variable que influye en el escurrimiento es la cobertura vegetal, sin embargo esta solo se estimó, por lo que se calculó el coeficiente de escurrimiento, el cual integra las características del suelo y la vegetación. Los valores muestran que el menor coeficiente (0.08) se tuvo en el lote con la

menor curva (Q-SB) y el mayor coeficiente (0.31) se presentó en el lote Q-SM. Lo anterior explica el orden de las curvas de gasto obtenidas a una intensidad de 25 mm h⁻¹.

Cuadro 6.3. Humedad, espesor de la capa hidrofóbica, gasto máximo, volumen total y coeficiente de escurrimiento, con una intensidad de 25 mm h⁻¹, en cuatro lotes. Volcán Pelado, D. F. México.

Lote	Humedad (%)	Espesor (cm)	Gasto máximo (mm h ⁻¹)	Vol. Total (L)	Coef. Esc.
S-Q	11.5	--	--	--	--
Q-SB	27.8	2	3.29	13.81	0.08
Q-SM	21.9	3	11.84	49.04	0.31
Q-SA	18.8	5	5.46	14.21	0.29
Promedio de quemados	22.83	3.33	6.86	25.69	0.23

Lote Q-SM

Desde que se inicio el escurrimiento la curva de gasto del lote Q-SM fue mayor que las otras condiciones (Figura 6.9). En primer lugar este lote presentó una humedad de 21.9%, que no fue el lote más húmedo (Cuadro 6.3)

El lote Q-SM presentó mayor resistencia a la penetración, presentó una densidad aparente de 0.78 g cm⁻³, que fue mayor a los otros lotes, incluyendo el testigo. Lo anterior sugiere que de los cuatro lotes, este último era el más compactado, este dato es apoyado por lo observado en campo; se registró el tiempo de infiltración de los acumulados, en este lote tardó 40 min en infiltrarse el agua acumulada en la superficie del lote de escurrimiento (Cuadro 6.2).

Por otro lado, aunque el espesor de la capa hidrofóbica fue de solo 3 cm, aquí el factor que determinó la cantidad de escurrimiento fue la forma del relieve, este era muy uniforme, casi plano, en este lote no habían macollos de pasto que sirvieran de barrera al escurrimiento o funcionaran como un almacén temporal del escurrimiento. Por lo tanto, en este lote se presentó el mayor volumen escurrido (49.04 L) (Cuadro 6-3).

Lote Q-SA

En la figura 6.9 se observó que el lote Q-SA presentó la curva de gasto intermedia entre el lote Q-SB y Q-SM, el valor máximo fue 7.04 mm h^{-1} para después estabilizarse aproximadamente en 6.5 mm h^{-1} , tal y como se observa.

La capa hidrofóbica de mayor espesor (5 cm) se presentó en éste, por lo tanto se esperaba presentara mayor escurrimiento aún con una intensidad de lluvia baja. Sin embargo, como se ve en el cuadro 6-3, el volumen total escurrido fue de 14.21 L.

Con respecto a la cobertura vegetal, este lote presentó el menor porcentaje (20%). Lo cual propiciaría mayor escurrimiento, sin embargo como se mencionó en la descripción de los tratamientos. En este lote había sobre la superficie del suelo trozos de ramas calcinadas, lo cual funcionó como barreras en el flujo del agua, retardando la velocidad de mismo y dando mayor oportunidad a que se infiltrara el agua.

Por otro lado, la humedad al inicio de la simulación de 25 mm h^{-1} fue de 18.8%, lo que significa que de los lotes quemados era el más seco, pero el lote con mayor humedad fue el que presentó la menor curva, lo que significa que bajo condiciones de incendio la humedad por sí sola, no es el factor que determina el escurrimiento.

Lo anterior implica que a mayor espesor de la capa hidrofóbica, no necesariamente conlleva a un mayor escurrimiento. En este caso (intensidad de 25 mm h^{-1}) se esperaba mayor escurrimiento en estas condiciones; sin embargo, el factor vegetación que no fue medido, sólo estimado, está reflejado en el coeficiente de escurrimiento y con lo observado en campo, queda claro, que es el factor que está influyendo en el volumen escurrido. Un problema para determinar la causa del incremento del escurrimiento después del fuego, es la alta variabilidad de la hidrofobicidad en espacio y tiempo (Morris y Moses, 1987; Prosser y Williams, 1998).

Comparación de los cuatro lotes a una intensidad de 50 mm h⁻¹

En la figura 6.10, se observan claramente dos grupos: uno, el del lote testigo y otro el de los lotes quemados.

Lote S-Q

La humedad presente en el lote testigo se incrementó 60.66% con respecto a la humedad inicial (a 25 mm h⁻¹), registrando un valor de 19.2%, aun así este porcentaje fue el menor contenido de humedad de los cuatro lotes. Sin embargo el incremento en humedad permitió, con la aplicación de 50 mm h⁻¹ se presentara el escurrimiento, el gasto máximo fue 0.351 mmh⁻¹ que corresponde 1% del gasto máximo registrado en los cuatro lotes.

La cantidad de escurrimiento que se presentó en ese lote S-Q, correspondió al 12 % de la precipitación, lo que significa que 88 % se infiltró o quedó interceptada en el follaje de la cubierta vegetal. El volumen total escurrido fue de 6.1 L (Cuadro 6.4).

Cuadro 6.4. Humedad, pendiente, espesor de la capa hidrofóbica, gasto máximo, volumen total y coeficiente de escurrimiento, a una intensidad de 50 mm h⁻¹, en tres lotes quemados y el testigo. Volcán pelado D. F., México.

Lote	Humedad (%)	Pendiente (%)	Espesor (cm)	Gasto máximo (mm h⁻¹)	Vol. Total (L)	Coef. esc.
S-Q	19.2	8	0	0.40	6.1	0.005
Q-SB	30.7	6	2	38.2	99.0	0.53
Q-SM	24.8	7	3	41.4	122.6	0.50
Q-SA	29.6	9	5	32.2	121.3	0.49
Promedio de quemados	28.37	7.33	3.33	37.27	114.30	0.51

Con respecto a los lotes quemados, la fluctuación del gasto a lo largo de la simulación es diversa (Figura 6.10) por lo que solo se mencionara como cambio la humedad, cual fue le el gasto máximo de cada lote y el volumen total escurrido.

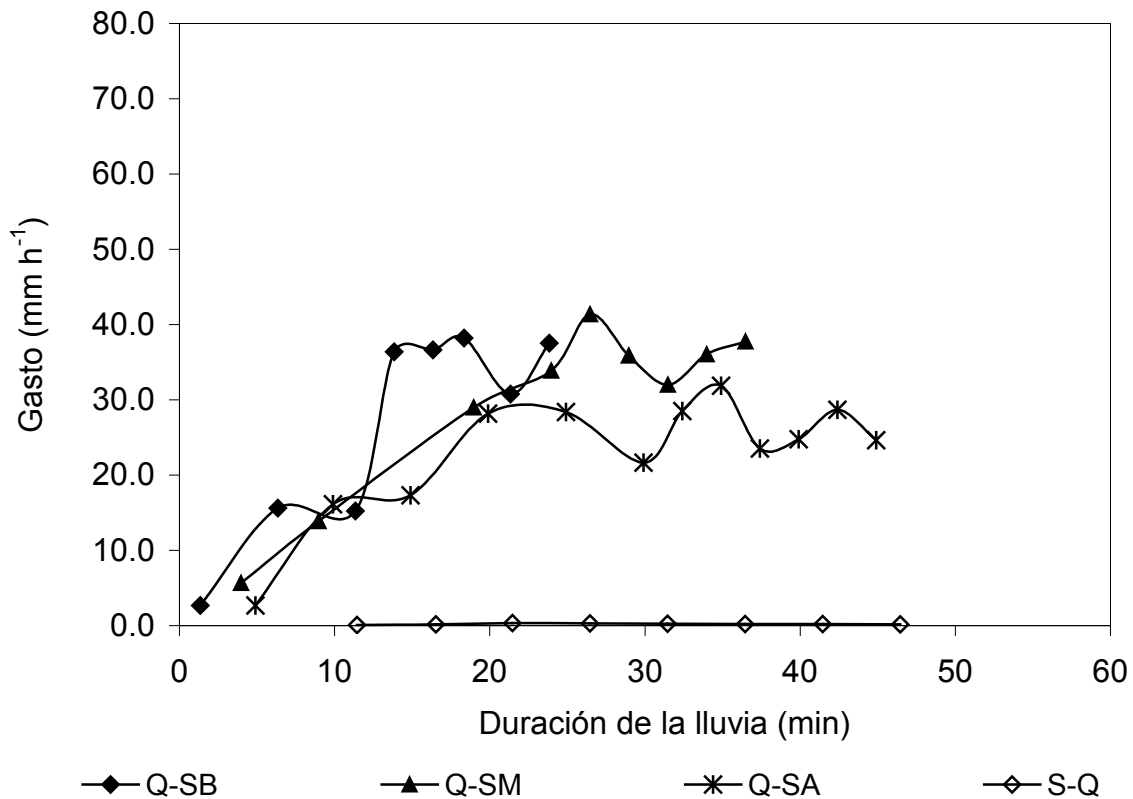


Figura 6.10. Comparación de los hidrogramas obtenidos a una intensidad de 50 mm h^{-1} en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán pelado D. F.

Q-SB

La humedad presente en este lote fue 10.5% mas que al inicio de la primer simulación, este lote fue el más húmedo (de la segunda simulación) comparado con los otros lotes (Cuadro 6-4). Siendo el más húmedo se esperaba que el escurrimiento diera inicio más rápido (1.33 min) (Cuadro 6.5), en ese momento el gasto fue de 2.68 mm h^{-1} , el gasto máximo que se registró fue de 38.20 mm h^{-1} , sin embargo, aunque fue el lote donde empezó a escurrir más rápido no fue el lote en donde escurrió más como se ve en el cuadro 6.4.

Cuadro 6.5 Tiempos de inicio de escurrimiento, aparición de charcos e infiltración de los acumulados en los tres lotes afectados por el fuego y el testigo.

Lote	Inicio	Aparición	Tiempo de	Tiempo de
	escurrimiento	de espejo	encharcamiento	infiltración de acumulados
	minutos			
S-Q	11.45	-	-	-
Q-SB	1.33	0.40	0.29	28.40
Q-SM	3.90	0.29	1.03	45.32
Q-SA	4.90	0.25	0.56	28.00
Promedio de los quemados	3.38	0.31	0.63	33.91

Q-SM

El lote Q-SM presentó una humedad de 24.8%, es decir, 30% menos húmedo que el lote Q-SB.

El escurrimiento en este lote dio inicio al minuto 3.9, en este momento el gasto fue de 5.64 mm h⁻¹ alcanzando un máximo de 41.35 mm h⁻¹, y el volumen total escurrido en este lote fue de 122.6 L (Cuadro 6.4).

Q-SA

La humedad presente en este lote fue de 29.6% (no fue el más húmedo durante esta simulación), sin embargo, cabe resaltar que el incremento de humedad con respecto a la primer simulación fue 57.44%. En este lote el escurrimiento se presentó al minuto 4.9 después de iniciada la simulación en este momento el gasto fue de 2.68 mm h⁻¹. Alcanzando un máximo de 28.67 mm h⁻¹ y un volumen total de escurrimiento de 121.3 L.

Cabe recordar que algunos efectos del fuego en la hidrología son la reducción de las tasas de infiltración y el incremento del flujo superficial, así como el incremento de la descarga total y los flujos máximos (Brown, 1972; Lavabre *et al.*, 1993; citados por Batalla, 2001

Con la lluvia con intensidad de 50 mm h⁻¹, se cumple que a mayor humedad en el lote y espesor de la capa hidrofóbica; existe un mayor gasto y volumen total (Cuadro 6.4). Aunque el coeficiente de escurrimiento no haya sido el mayor de los cuatro lotes.

Comparación de los cuatro lotes a una intensidad de 80 mm h⁻¹

En la figura 6.11 se presentan los hidrogramas obtenidos a un intensidad de 80 mm h⁻¹. Resalta el comportamiento de los lotes afectados por el fuego, los cuales forman un grupo en donde el escurrimiento se inicia antes de los 5 min de simulación y se incrementa rápidamente en los primeros 10 min; en cambio, en el lote S-Q este incremento acelerado se da a partir del minuto 7 y empieza a estabilizarse aproximadamente al minuto 19.

Estos incremento se dieron en un periodo muy corto de tiempo después de iniciada la simulación y la razón fue que los poros se encontraban totalmente saturados por eso el agua que podía infiltrarse fue mínima y el escurrimiento mayor llegando rápido al periodo de estabilización del mismo.

El lote S-Q

El gasto presentó un comportamiento uniforme, al principio lento, después viene un incremento rápido hasta que alcanza la estabilización a partir del min 30.

Apartado de este grupo se observa el lote sin quema (testigo), donde el escurrimiento inicia después del minuto 5 de simulación y el escurrimiento va aumentando en forma paulatina después del minuto 10 de simulación; esto como efecto de la cubierta vegetal, la cual modifica los procesos de intercepción y evapotranspiración, que aunque aquí no fueron medidos se ha documentado; que afectan seriamente el ciclo hidrológico (Batalla, 2001), además la eliminación de la cubierta vegetal va a permitir el contacto directo con las gotas de lluvia.

El gasto máximo en este lote fue de 35.88 mm h⁻¹ al minuto 24 de simulación, el volumen total escurrido fue de 117 L.

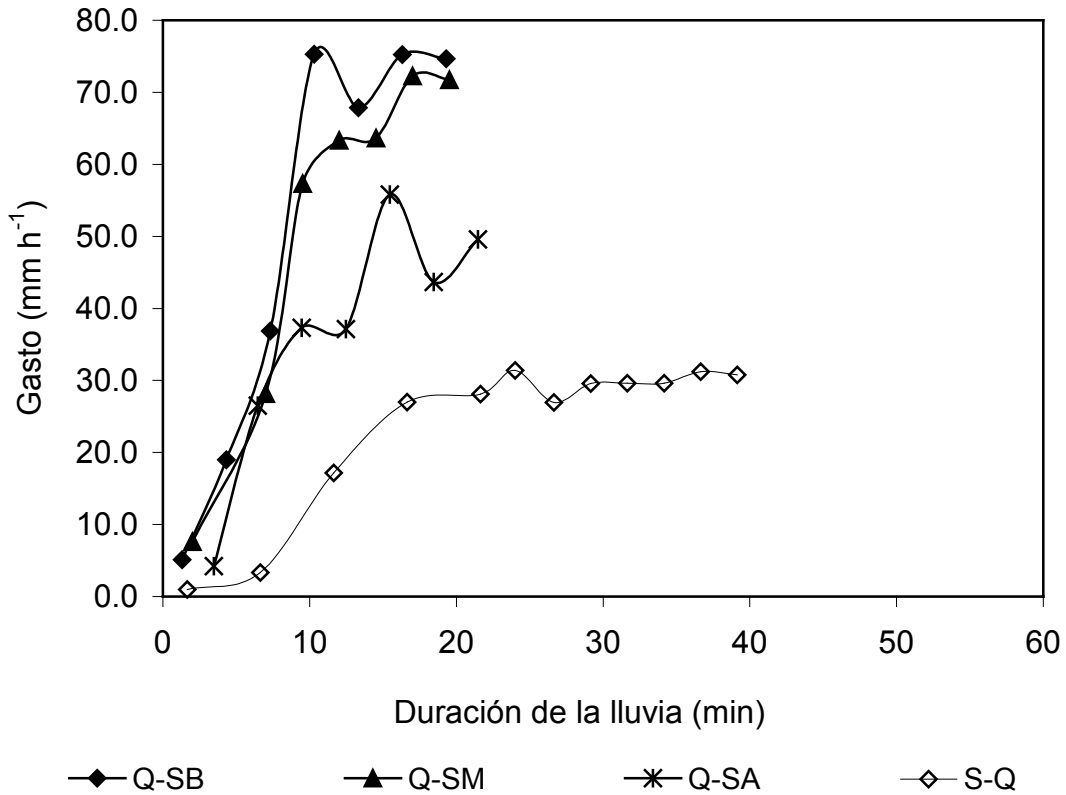


Figura 6.11. Comparación de los hidrogramas obtenidos a una intensidad de 80 mm h^{-1} en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F.

Lote Q-SB

El lote de severidad de quemado bajo, presento al inicio de esta simulación una humedad del 40%, fue el más húmedo de los lotes experimentales. Este porcentaje de humedad ya se había incrementado en un 45% con respecto a la humedad registrada al inicio del proceso de simulación. Este contenido de humedad propició que el escurrimiento apareciera en los primeros minutos de haberse iniciado la simulación en este caso al minuto 1.31 (Cuadro 6.7).

Con respecto al gasto máximo este fue de 75.3 mm h^{-1} y correspondió al gasto máximo de los cuatro lotes; en este lote fue donde se presentó el mayor volumen escurrido 212.45 L. (Cuadro 6.6) Este volumen es resultado de la humedad existente en el suelo y capa hidrofóbica de a penas 3 cm de espesor.

Cuadro 6.6 Humedad, pendiente, gasto máximo, volumen total y coeficiente de escurrimiento, con una intensidad de 80 mm h⁻¹, en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán pelado D. F., México.

Lote	Humedad (%)	Pendiente (%)	Gasto máximo (mm h ⁻¹)	Vol. Total (L)	Coef. Esc.
S-Q	24.8	8	31.39	102.72	0.34
Q-SB	40.2	6	75.26	212.45	0.54
Q-SM	24.8	7	72.28	95.63	0.39
Q-SA	33.8	9	55.79	93.33	0.55
Promedio de quemados	32.93	7.33	67.78	133.80	0.49

Lote Q-SM

En el lote Q-SM se presentó el mayor gasto (72.28 mm h⁻¹) al min 17 de simulación (Figura 6.11) aunque haya presentado el mayor gasto no presentó el mayor volumen total de escurrimiento (Cuadro 6.6). Como se observa en la figura el gasto máximo se presentó al final de la simulación esto probablemente se deba a que en este momento se alcanzó la saturación de los poros y el escurrimiento e infiltración se equilibraron otro resultado que apoya la saturación total de los poros en este lote es el tiempo que tardaron en infiltrarse los acumulados en el mismo, este tiempo fue el mayor de los cuatro lotes y correspondió a 97.1 min. (Cuadro 6.7).

Cuadro 6.7 Tiempos de inicio de escurrimiento, aparición de charcos e infiltración de los acumulados con una intensidad de 80 mm h⁻¹, en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F., México.

Lote	Inicio escurrimiento	Aparición de espejo	Tiempo de encharcamiento	Tiempo de infiltración de acumulados
	minutos			
S-Q	-	-	-	-
Q-SB	1.31	0.2	0.28	28.05
Q-SM	2.01	0.15	0.28	97.18
Q-SA	3.4	0.12	0.19	25.58
Promedio de quemados	2.24	0.16	0.25	50.27

Lote Q-SA

El lote de quema severidad alta presento al inicio de la simulación con intensidad de 80 mm h⁻¹ una humedad del 33.8%, que comparada con la humedad inicial (cuando se aplico la lluvia de menor intensidad) es 80% mayor. Esto es reflejo de la cantidad de agua que se estuvo infiltrando y que conforme humedecía más el suelo el agua que escurría era mayor. De este dato se deriva que la aparición de los primeros charcos se diera de manera rápida apareciendo los primeros a los 18 seg de iniciada la simulación (Cuadro 6.7)

En este lote el volumen total escurrido fue 93.33 L en 25 min. Por lo que si la simulación hubiera durado la hora el volumen de escurrimiento hubiera sido mayor. Campbell *et al.* (1977), citado por Batalla (2001), menciona que en un suelo afectado por el fuego la reducción de la infiltración puede ser de hasta un 66% en el suelo de un área del bosque de pino en Arizona, dando por resultado un aumento del 800% en flujo de la corriente de la captación quemada en la primer estación húmeda que sigue al fuego.

Después de analizar los hidrogramas obtenidos en los 4 lotes de escurrimiento, se observó que efectivamente un suelo que ha sido afectado por el fuego presenta mayor escurrimiento comparado con un suelo sin afectación, los porcentajes de incremento son hasta del 127% como ocurrió en la severidad baja de quemado. Una vez que el fuego ha afectado al suelo, las condiciones de éste determinarán la cantidad de escurrimiento presente, como se analizó en el apartado de resultados, cuando existen restos de la vegetación (ramas gruesas y finas) sobre la superficie se crea una superficie rugosa que disminuye la velocidad de escurrimiento y aunque esté presente la hidrofobicidad en el suelo, el agua se infiltra en ciertas áreas incrementando la humedad del mismo. Por otro lado, entre más finos queden los restos vegetales después del incendio, los escurrimientos fluyen libremente sobre la superficie del suelo, sin que exista una barrera para disminuirlos.

6.6.1 Comparación de los escurrimientos obtenidos en cuatro lotes de escurrimiento

Se compara la cantidad de escurrimiento superficial obtenido en tres lotes afectados por diferente severidad de fuego y el lote testigo, al aplicar tres intensidades de lluvia simulada

(25, 50 y 80 mm h⁻¹). Cabe recordar que la duración de cada simulación fue diferente, este tiempo fue determinado por el momento en el cual el escurrimiento se estabilizó. Por esta razón, se hace una comparación a los 30 min para las intensidades de 25 y 50 mm h⁻¹ y a los 20 min para la intensidad de 80 mm h⁻¹ a efecto de tener tiempos iguales de simulación.

Se observa en la figura 6.12 a y b, que con una intensidad de 25 mm h⁻¹, no hubo escurrimiento superficial en el lote sin quema (testigo), como resultado del efecto de la cubierta vegetal en el suelo, la cual interceptó el agua que entró al lote y el agua que llegó a la superficie del suelo se infiltró en el mismo, debido a la escasa humedad que existió al inicio de la simulación (8.3%).

Comparando los tres lotes que fueron afectados por el fuego, se observó (Figura 6.12 a) que el menor volumen escurrido se presentó en el lote Q-SB (0.9 L). En los lotes Q-SA y Q-SM escurrió 7.3 y 21.1 veces más, respectivamente comparado con el lote Q-SB.

Cuando la comparación se hizo considerando el tiempo total de simulación (Figura 6.12 b) el comportamiento fue el mismo, en el lote de menor severidad escurrió 11.8 L y en el lote Q-SA 18.3 L, escurriendo más en el lote Q-SA (49 L), que representa 4 veces más del volumen escurrido en el lote Q-SB

Cuando se aplicó la intensidad de 50 mm h⁻¹ si hubo escurrimiento en el lote que no fue quemado (testigo), la humedad inicial había cambiado de 11.5 % a 19.2 %, lo que indica que en este momento se cumplieron las condiciones para dar inicio al escurrimiento superficial. El escurrimiento en el lote testigo fue de 0.6 L a los 30 minutos los incrementos en porcentaje de los lotes afectados por algún grado de severidad fueron 111, 120 y 164 para Q-SA, Q-SM y Q-SB, respectivamente. Este resultado sigue resaltando la importancia de que exista una cubierta vegetal en el suelo, la cual va a crear cierta porosidad en el mismo creando mayor infiltración, además de interceptar el agua que posteriormente llega a la superficie del mismo; esto ha sido ampliamente investigado en otras regiones (Ríos y Martínez, 1990, DeBano, 1998)

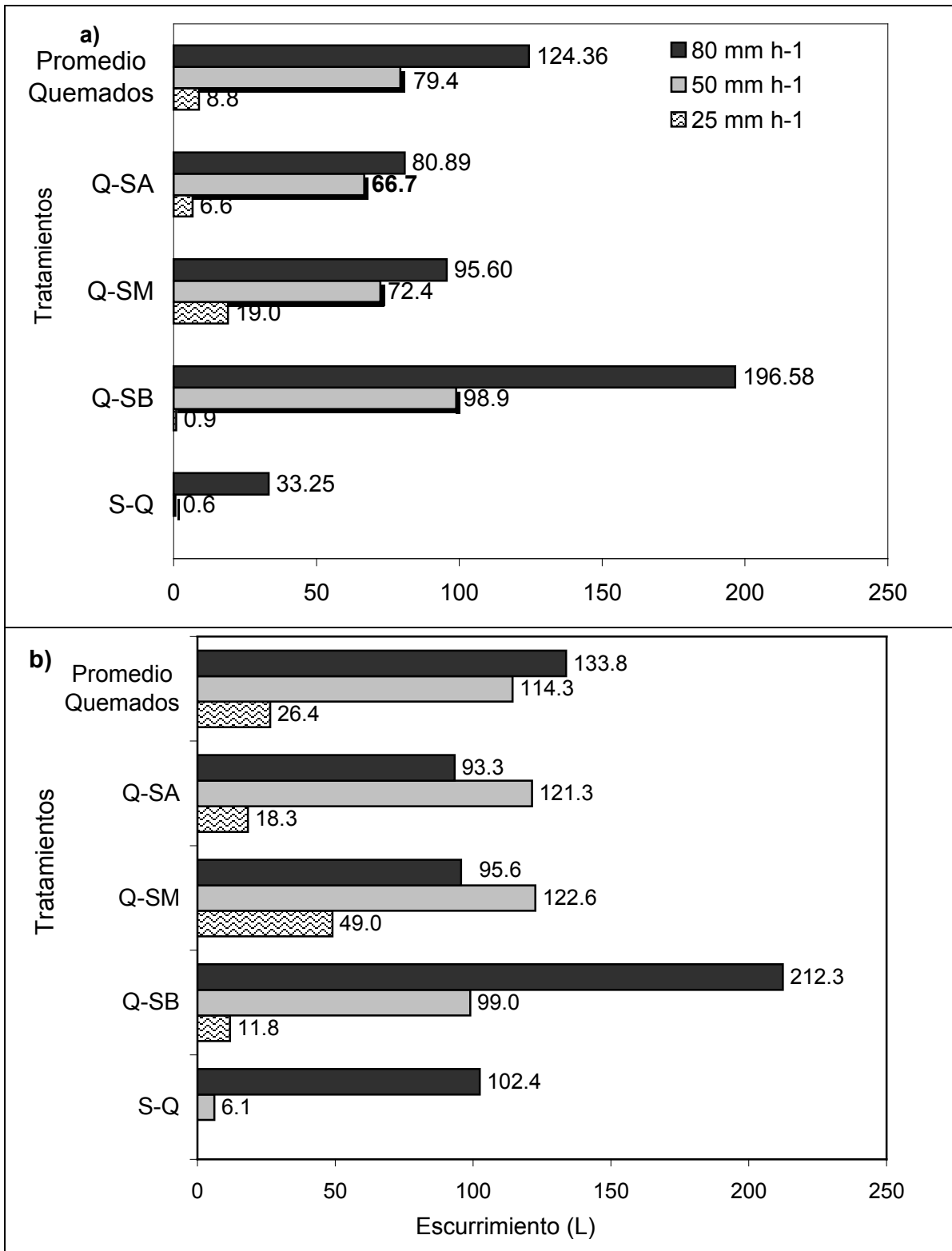


Figura 6.12 Comparación del escurrimiento superficial medido en tres lotes quemados y el testigo combinado con tres intensidades de lluvia, a) a los 30 min de simulación y b) al final de la simulación.

Al comparar el volumen escurrido en los cuatro lotes al final de la simulación de 50 mm h^{-1} se encontraron incrementos de 16, 20 y 19 veces para los lotes Q-SB, Q-SM y Q-SA, estos incrementos se dieron con respecto al lote sin quema. Al final de la simulación los valores se invierten, en el lote que a los 30 min había escurrido más al final escurre menos y viceversa.

Con una intensidad de lluvia de 80 mm h^{-1} y comparando los cuatro lotes con diferente severidad de quema los 30 minutos de simulación, se observó (Figura 6.12 a) que considerando al lote S-Q como referencia y con un volumen escurrido de 33.25 L, el escurrimiento aumento 5.9 veces en el lote Q-SB, 2.8 en el lote Q-SM y 2.4 en el lote Q-SA.

Los volúmenes al final de la simulación de 80 mm h^{-1} se dieron de la siguiente manera, el El lote testigo (S-Q) presentó un volumen de escurrido de 102.4 L el cuales fue similar a los lotes Q-SA y Q-SM. Con volúmenes de 93.3 L y 95.6 L, respectivamente. El incremento significativo del volumen escurrido en el lote sin quema, puede deberse a la cantidad de agua que quedo retenida en el follaje de a cobertura vegetal y con la intensidad de 80 mm h^{-1} escurrió pero a través de la cobertura sin que este haya penetrado en el suelo. El mayor volumen escurrido se presento en e l lote Q-SB 212.3 L.

El tiempo de inicio del escurrimiento se correlacionó negativamente, con la humedad (-40%) y el volumen total de escurrimiento (-73%).

Los resultados obtenidos en las tres simulaciones de lluvia resalta la importancia de la cubierta vegetal la cual es afectada por el fuego dejando al descubierto el suelo, afectando la condición de humedad en el mismo, además de propiciar la creación de la capa hidrofóbica que va a impedir que el agua se infiltre de manera uniforme o simplemente no se infiltre dependiendo del grosor de la misma.

Al comparar los lotes afectados por el fuego se esperaba que al igual que en la intensidad de lluvia intermedia el lote Q-SA presentara el mayor escurrimiento. Sin embargo, el mayor escurrimiento se registró en el lote Q-SB, este resultado coincide con la humedad

presente al inicio de esta simulación la cual era de 40.2%, siendo el lote más húmedo al inicio de la simulación de mayor intensidad.

6.7 PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

A continuación se muestra la producción de sedimentos durante la simulación de lluvia en los cuatro lotes afectados por el fuego en combinación con la intensidad de la lluvia. Las curvas de producción de sedimentos se construyeron con los datos obtenidos hasta el momento en que se detiene la lluvia.

Los sedimentos transportados por el escurrimiento superficial son el producto de la erosión hídrica y al colectarse en la salida del lote se consideró, como la producción de sedimentos. Éstos se midieron en el mismo muestreo de escurrimientos, como ya se mencionó en la metodología.

El análisis se realizó por intensidad de lluvia aplicada para ver el efecto que tienen las condiciones de cada lote en la producción de sedimentos.

En la figura 6.13, donde se compara la producción de sedimentos de los tres lotes afectados por alguna severidad de quemado, a una intensidad de 25 mm h^{-1} , se observa que el lote con la menor producción de sedimentos fue el lote Q-SB 540.2 k ha^{-1} , y una concentración de sedimentos de 39.9 g L^{-1} , posteriormente se observa la curva del lote Q-SA, la producción de sedimentos en este lote fue de 620.6 kg ha^{-1} y una concentración máxima de 27.05 g L^{-1} (Cuadro 6.8).

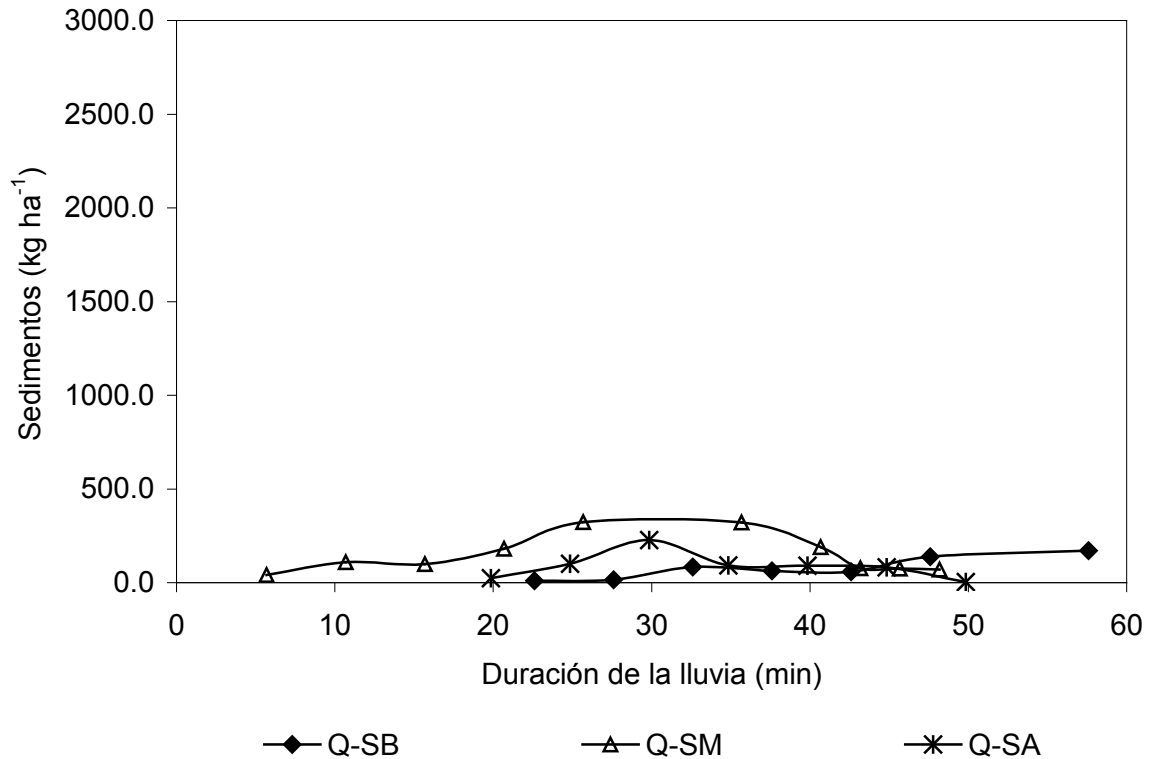


Figura 6.13. Comparación de la producción de sedimentos obtenidos a una intensidad de 25 mm h^{-1} en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F.

El lote con la mayor producción de sedimentos a lo largo de la simulación fue el lote con severidad de quemado medio, en total se pierde $1\,494.7 \text{ kg ha}^{-1}$ y la mayor concentración de sedimentos 28.05 g L^{-1} (Cuadro 6.8) se dio al min 25 de iniciada la simulación. En ese momento se pueden perder 322.8 kg ha^{-1} . La curva de producción de sedimentos sigue el mismo comportamiento que la curva de gasto debido a que estas dos variables están altamente correlacionadas. La magnitud de la producción de sedimentos se da de la siguiente manera menor producción en el lote Q-SB, posteriormente el lote Q-SA y el lote en donde más se pierden sedimentos fue el Q-SM, esto debido a que este lote se presentó el mayor volumen escurrido. Con la intensidad de 25 mm h^{-1} , la producción de sedimentos es mínima si se considera que la SEMARNAT y UACH (2002), señalaron que las pérdidas permisibles de suelo en México están en torno a $4.6 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

En la figura 6.14 se observan las curvas de producción de sedimentos cuando se aplicó una intensidad de lluvia de 50 mm h^{-1} . La mayor producción de sedimentos se dio en el lote Q-

SB ($7,755.7 \text{ kg ha}^{-1}$), alcanzando un máximo que correspondió a la mayor concentración de sedimentos (98.43 g L^{-1}). Esto sugiere que al finalizar la primer simulación, muchos de los sedimentos quedaron cerca de la salida del vertedor y al presentarse las condiciones, estos fueron arrastrados a la salida, y de ahí que la concentración fuera alta. Posteriormente a parece la curva para el lote Q-SA, alcanzando el punto máximo de pérdida en 806 kg ha^{-1} y con una producción total de sedimentos de $4,529.5 \text{ kg ha}^{-1}$

El lote sin quema presentó producción de sedimentos, la concentración de sedimentos fue tan sólo de 4.7 g L^{-1} y la máxima concentración a esta intensidad se presentó en el lote Q-SB (98.43 g L^{-1}) que es igual a 4.1 veces más que la concentración en lote S-Q.

Las fluctuaciones que se observan en las curvas corresponden al cambio de escurrimiento que se observó.

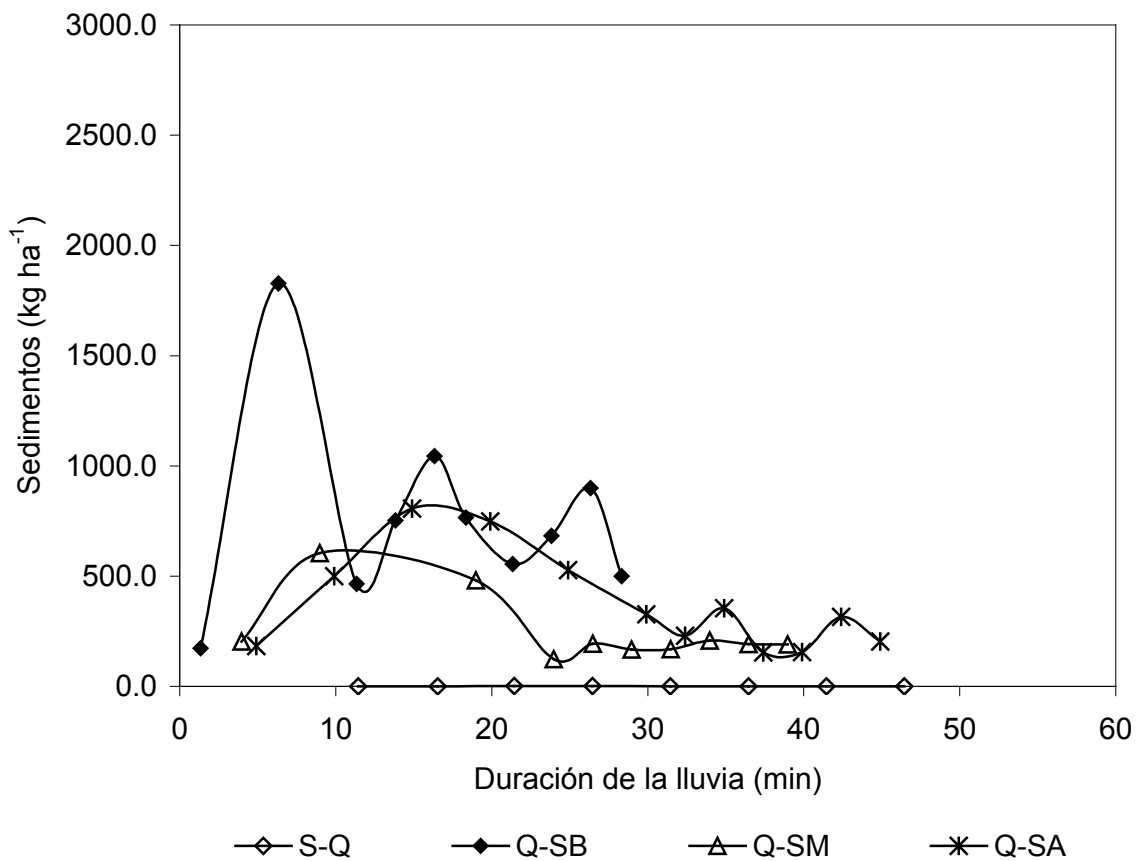


Figura 6.14. Comparación de la producción de sedimentos obtenidos a una intensidad de 50 mm h^{-1} en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado D. F.

Al aplicar la intensidad de lluvia de 50 mm h^{-1} , se observó que con respecto al lote testigo los incrementos en los lotes Q-SM, Q-SA y Q-SB, fueron de 107, 191 y 323.2 veces más que lo registrado en el lote S-Q y a diferencia de la simulación con baja intensidad, en las condiciones de intensidad de 50 mm h^{-1} se rebasa el límite permisible que menciona la SEMANAT y UACH (2002).

En el cuadro 6.8, se observa la concentración máxima de sedimentos registrados en cada uno de los lotes y en cada intensidad. La mayor concentración de sedimentos se presentó en el lote Q-SB (98.43 g L^{-1}) se registró con la intensidad de 50 mm h^{-1} .

Se observa también en este cuadro, el volumen total de sedimentos que se perdieron en una hectárea. Con la intensidad de 80 mm h^{-1} , la mayor producción de sedimentos se presentó en el lote Q-SB ($10,632.65 \text{ kg ha}^{-1}$), Con la intensidad de 50 mm h^{-1} hay mayor producción de sedimentos en el lote Q-SB, y con la menor intensidad la mayor pérdida está en el lote Q-SM 1494 kg ha^{-1} .

El incremento de la producción de sedimentos es una consecuencia del aumento del escurrimiento superficial y que a su vez va a depender de la intensidad de la lluvia (Robichaud y Waldrop, 1994)

Cuadro 6.8 Duración e intensidad de la lluvia, concentración máxima de sedimentos y volumen total de sedimentos, en tres lotes afectados por el fuego y le testigo, Volcán Pelado D. F., México.

Lote	Intensidad lluvia (mm h ⁻¹)	Duración de la lluvia (min)	Concentración máxima de sedimentos (g L ⁻¹)	Volumen total de sedimentos (kg ha ⁻¹)
S-Q	25	60	-----	-----
	50	50	4.7	23.70
	80	40	5.8	253.14
Q-SB	25	60	39.94	540.28
	50	30	98.43	7755.77
	80	20	61.52	10632.65
Q-SM	25	50	28.05	1494.6
	50	40	30.27	2544.7
	80	20	30.48	2271.4
Q-SA	25	50	27.05	620.67
	50	47	57.41	4529.54
	80	25	61.74	7064.77
Promedio de quemados	51.67	38.00	48.32	4161.60

S-Q= lotes in quema, testigo Q-SB= Quema severidad baja, Q-SM= Quema severidad media y Q-SA= quema severidad alta.

En el cuadro 6.8, se observa la concentración de sedimentos de los 12 tratamientos probados, se ve claramente que la concentración de sedimentos es pequeña a una baja intensidad de lluvia y conforme ésta aumenta la concentración de sedimentos también. Lo anterior como consecuencia del arrastre de partículas por el escurrimiento superficial. A menor cantidad de agua el arrastre es menor y más tratándose de partículas tan finas como las cenizas.

En la figura 6.15, se observan la producción de sedimentos en las cuatro severidades de quema cuando se aplicó la intensidad de lluvia de 80 mm h⁻¹, se observa como fluctúa esta producción de sedimentos a lo largo de la simulación, Se mencionó que los sedimentos actuaron como un tapón a la salida del lote y cuando la cantidad de agua fue suficiente este tapón se rompió, provocando mayor escurrimiento y sedimentos en la salida, reflejado en

una mayor concentración. Figueroa *et al*, (1991), mencionaron que el flujo superficial actúa junto con el poder de desprendimiento de las lluvias para erosionar el suelo y transportarlo ladera abajo.

La mayor producción de sedimentos se observó en el lote Q-SA, (Figura 6.15). Hacia el final de la simulación se presentó el pico máximo de producción de sedimentos el cual corresponde al min 15 y fue de 2460 kg ha⁻¹ y la concentración en ese momento fue de 61.74 g l⁻¹. Este pico corresponde al momento en que se dio el gasto máximo para estas condiciones. Al final de la simulación la producción de sedimentos fue de 7,064.77 kg ha⁻¹, lo cual es superior a las pérdidas permisibles de suelo.

Posteriormente aparece la curva Q-SB, observándose un pico máximo de producción de sedimentos, a los 10 min en ese momento se perdían 1930 kg ha⁻¹, la concentración máxima de sedimentos fue de 61.74 g L⁻¹ y la producción total de sedimentos fue de 10,632.65 kg ha⁻¹.

Los lotes Q-SA y Q-SB presentan pérdidas de suelo superiores a las pérdidas permisibles de suelo, mencionadas por la SEMARNAT y UACH (2002).

Benavides y Flores (2006) mencionan que en general los valores medios de pérdida de suelo en áreas de alta severidad están entre los 8 y 13 Mg ha⁻¹, pero se pueden alcanzar valores extremos de 300 Mg ha⁻¹.

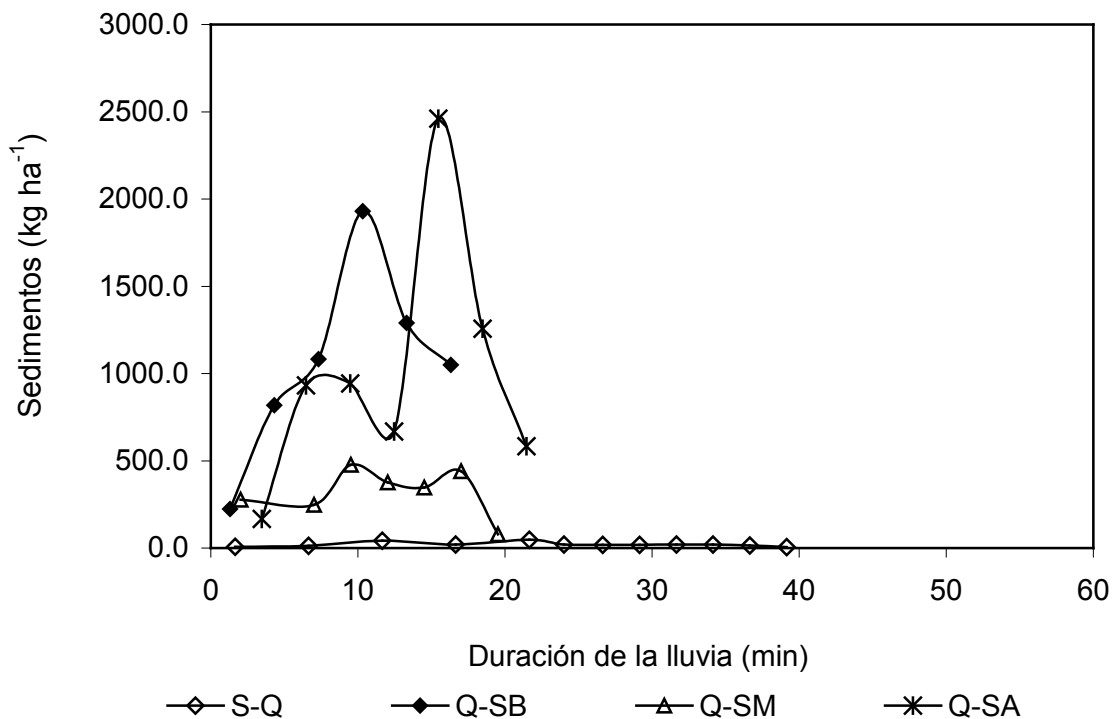


Figura 6.15. Comparación de la producción de sedimentos obtenidos a una intensidad de 80 mm h^{-1} en tres lotes afectados por el fuego y el testigo. Volcán Pelado, D. F.

En la figura 6.15 se observa la curva de producción de sedimentos para el lote testigo, esta curva fue mucho menor que cualquiera de los lotes afectados por el incendio. La producción máxima de sedimentos fue de 47.7 kg ha^{-1} , y la concentración de sedimentos fue de 5.8 g L^{-1} , de ahí que la producción total de sedimentos haya sido de $253.14 \text{ kg ha}^{-1}$.

En las intensidades de $50 \text{ y } 80 \text{ mm h}^{-1}$, es muy importante la presencia de la cubierta vegetal a diferencia de aquellos lotes donde ésta fue removida y la lluvia se impacta directamente en el suelo, está ampliamente documentado como la cobertura protege al suelo del impacto de las gotas de lluvia y del mismo escurrimiento. En las áreas afectadas por el fuego la mayoría de los sedimentos están compuestos por restos vegetales (hojas, ramas y raíces) y dependiendo de la cantidad de éstos en la superficie y, sobre todo de la severidad de fuego, será la producción de sedimentos.

Johansen *et al.*, (2001) encontraron que lotes quemados generaban 25 veces más sedimento que lotes no quemados, 76 kg ha^{-1} y 3 kg ha^{-1} , respectivamente, por milímetro de lluvia.

6.7.1 Comparación de la producción de sedimentos, obtenidos en cuatro lotes de escurrimiento

Se compara la cantidad de sedimentos obtenido en tres lotes afectados por diferente intensidad de fuego y el lote testigo, al aplicar tres intensidades de lluvia simulada (25, 50 y 80 mm h^{-1}). Los tiempos de simulación fueron diferentes, por esta razón, se hace una comparación a los 30 minutos para las intensidades de 25 y 50 mm h^{-1} y a los 20 min para la intensidad de 80 mm h^{-1} , para tener tiempos iguales de simulación.

Se observa en la figura 6.16 a y b, que con una intensidad de 25 mm h^{-1} , no hubo escurrimiento, por lo tanto, no hubo producción de sedimentos, en el lote testigo.

Comparando los tres lotes que fueron afectados por el fuego, se observó (Figura 6.16 a), sí se considera al lote Q-SM como el 100% (900 kg ha^{-1}), entonces se puede decir que en el lote Q-SB, la producción de sedimentos fue de solo el 6% y en el lotes Q-SA del 38%.

Este comportamiento se debe principalmente al volumen de escurrimiento, esta variable se correlaciono en un 97% con la producción de sedimentos.

Cuando la comparación se hizo considerando el tiempo total de simulación (Figura 6.16b) el comportamiento fue el mismo, en el lote de menor severidad de quemado Q-SM la producción de sedimentos fue de 1494 kg ha^{-1} , si se considera esta como el 100%, entonces en el lote Q-SB se perdió solo el 36.1% y en el lote Q-SA la producción de sedimentos fue del 41.5%

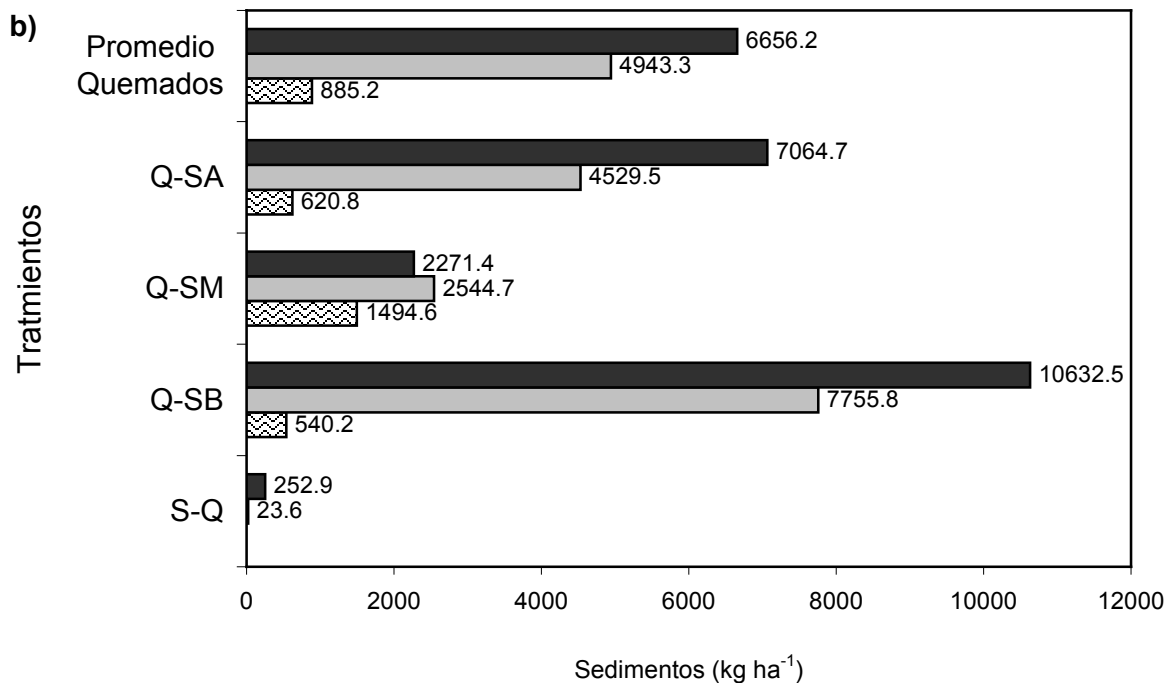
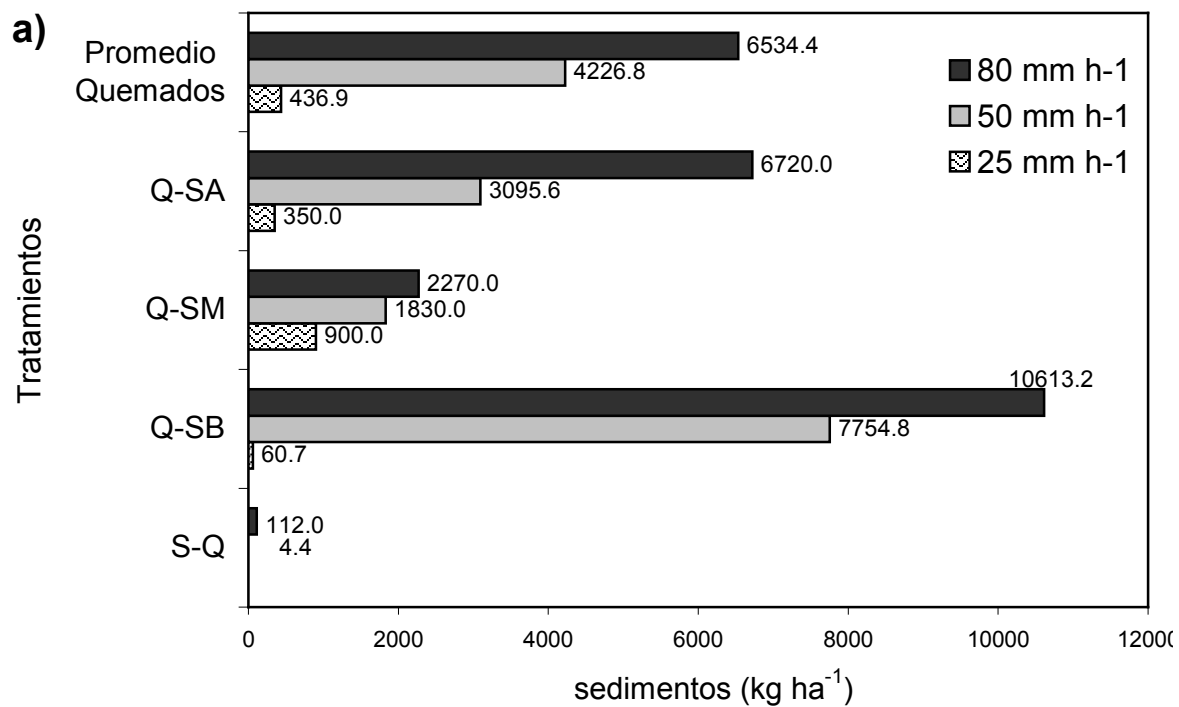


Figura 6.16. Comparación de la producción de sedimentos en tres intensidades de lluvia en tres lotes afectados por el fuego y el testigo, a) a los 30 min de simulación y b) al final de la simulación.

Cuando se aplicó la intensidad de 50 mm h⁻¹ la mayor producción de sedimentos se presentó en el lote Q-SB 7754 kg ha⁻¹, considerando esta producción máxima como el 100% se tiene entonces que en el lote testigo la producción fue solo del 0.1 %, posteriormente el lote Q-SM la producción de sedimentos fue del 23.6% y finalmente el lote Q-SA con un producción del 39.9%.

Al comparar la producción de sedimentos al final de la simulación se encontró que el comportamiento es el mismo, la mayor producción de sedimentos se presentó en el lote Q-SB 7755.8 kg ha⁻¹, considerando este como el 100 % se tuvo que la producción de sedimentos de los lotes S-Q, Q-SM y Q-SA, fueron de 0.30%, 32.8% y 58.4%, respectivamente.

Por otro lado, cuando se aplicó la intensidad de 80 mm h⁻¹ (Figura 6.16 a) el lote testigo presentó una producción del 1.1%, el lote Q-SM del 21.4% y Q-SA del 63.3%, estos porcentajes son si se considera al lote Q-SB como el 100%, en este lote se tuvo la mayor producción de sedimentos (10,613.2 kg ha⁻¹). Morris y Mosses (1987) encontraron que el flujo de sedimentos en laderas se incrementaba 3 veces después de que ocurría un incendio en *Pinus ponderosa*, y atribuyeron esta a la reducción de la cubierta vegetal así como a la formación de la capa repelente al agua.

Al comparar la producción total de sedimentos al final de la simulación se observaron pequeños incrementos en la producción (Figura 6.16 b) el lote testigo S-Q presentó producción del 2.38%, el lote Q-SM del 21.36% y Q-SA del 66.4%, estos porcentajes son si se considera la producción de sedimentos del lote Q-SB (10632.5 kg ha⁻¹) como el 100%. Benavides (2003) comparó sitios de alta intensidad de quemado y observó que estos incrementan en 16 y 33 veces la producción de sedimentos con respecto a sitios no quemados y quemados en baja intensidad.

En los lotes afectados por el fuego se tiene que cuando ocurren lluvias de menor intensidad, como 25 mm h⁻¹, se va a presentar un menor escurrimiento y producción de sedimentos en los lugares de menor intensidad de fuego. Cuando ocurran lluvias de mayor

magnitud como 50 y 80 mm h⁻¹, el mayor escurrimiento y producción de sedimentos se presentará en los lotes denominados como severidad baja

6.8.-RELACIONES GLOBALES ENTRE VARIABLES

A continuación se muestran las correlaciones existentes entre las variables escurrimiento (L) y la producción de sedimentos en kg ha^{-1} .

En la Figura 6.17 se observa la correlación existente entre el escurrimiento y sedimentos incluyendo los datos únicamente de los lotes afectados por el fuego, se observa como el coeficiente de correlación es de 0.95.

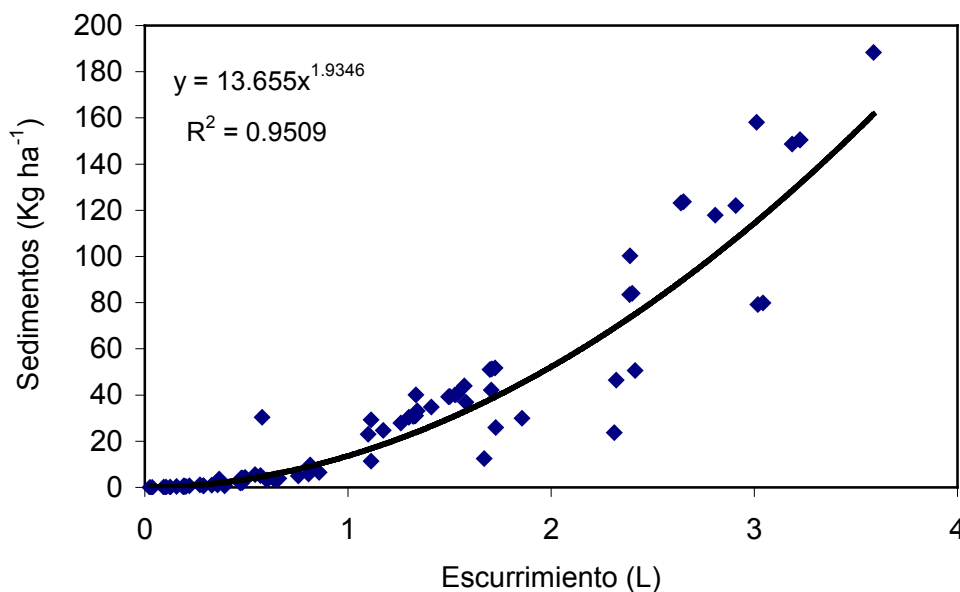


Figura 6.17. Correlación existente entre el escurrimiento vs. sedimento, incluidos los datos de los lotes afectados por alguna severidad de quemado.

En la Figura 6.18 se observa la correlación existente entre el escurrimiento y sedimentos incluyendo los datos de los tres lotes afectados por el fuego y el lote testigo, se observa como el coeficiente de correlación es de 0.97.

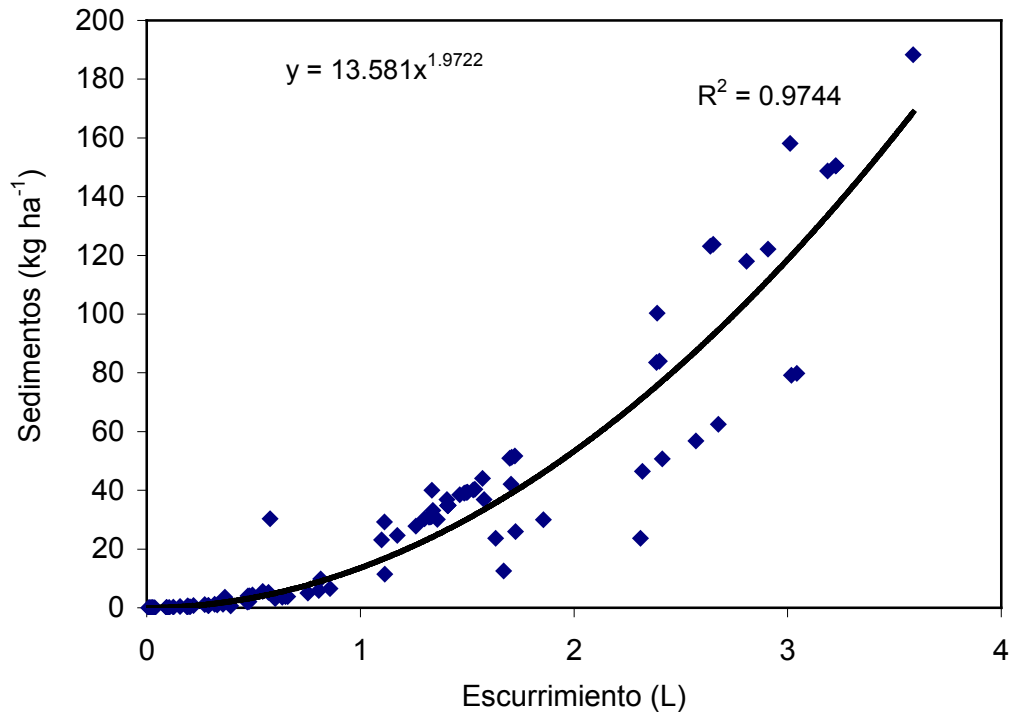


Figura 6.18. Correlación existente entre el escurrimiento vs. sedimento, incluidos todos los datos.

En la Figura 6.19 se observa la correlación existente entre el escurrimiento y sedimentos incluidos sólo los datos del lote sin quema, se observa como el coeficiente de correlación (0.98) se incremento con relación a la figura 6.17 y 6.18.

Otras variables que se correlacionaron fueron (Cuadro 6.9):

El tiempo de inicio del escurrimiento se correlacionó negativamente, con la humedad (-40) y el volumen total de escurrimiento (-72%), esto significa que si el escurrimiento iniciaba en el corto tiempo mayor sería el volumen escurrido en ese lote, puesto que la relación que guarda es negativa.

Otras variables que se correlacionaron (59%) fueron la humedad y el volumen total escurrido

Cuadro 6.9 Correlación entre variables medidas en los cuatro lotes.

	Lamina precipitada	Humedad	Inicio del escurrimiento	Tiempo de infiltración de los acumulados
Lamina infiltrada	0.73			
Escurrimiento máximo				0.86
Volumen total escurrido		0.59	-0.72	
Duración de la lluvia			0.80	-0.50
Volumen de recesión			-0.61	
Densidad aparente				0.53
Materia orgánica				-0.58
limo				0.66

Las variables Tiempo de inicio de infiltración de los acumulados y la materia orgánica se correlacionaron negativamente en un 58%, esto significa que a mayor contenido de materia orgánica, menor será el tiempo en que se infiltre el agua acumulada en la superficie y esto se debe a las características que la materia orgánica proporciona al suelo, entre más materia orgánica exista la porosidad del suelo será mejor

VII. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones presentadas en este experimento se observa que el factor que más influyo en la presencia de escurrimiento fue la cantidad de lluvia aplicada, independientemente de las tres severidades de quema observadas en campo.

La capa repelente al agua observada en los lotes de quema muestra que no fue factor importante para la presencia de escurrimiento, por lo cual debe estudiarse más este factor que en otros trabajos si se muestra que es un factor principal.

Las diferentes severidades observadas en campo no tuvieron los resultados esperados debido posiblemente a que en el mismo lote hubo variaciones en la severidad y que el incendio presente en el sitio no fue lo suficientemente intenso para presentar todas las variaciones en severidad observadas en otros incendios

En las severidades de quema baja, media y alta con 80 mm h^{-1} se presentó el mayor gasto que vario de 64.5 a 72.3 mm h^{-1} , con 50 mm h^{-1} se redujo a 32.7 - 41.4 mm h^{-1} y con 25 mm h^{-1} se redujo a 2.4 - 11.9 mm h^{-1} . En el lote sin quema el gasto fue de 35.9 , 0.40 y 0.0 mm h^{-1} para las intensidades de 80 , 50 y 25 mm h^{-1} , respectivamente.

Los lotes quemados incrementan en un 93.1 veces y 2.1 veces el gasto máximo con respecto al lote testigo, cuando se aplicó la intensidad de 50 mm h^{-1} y 80 mm h^{-1} de lluvia respectivamente.

Los lotes quemados incrementan 18.7 y 1.3 veces más el volumen total escurrido en el lote testigo, cuando se aplicó la lluvia de intensidad 50 mm h^{-1} y 80 mm h^{-1} , respectivamente.

Las mayor producción de sedimentos (5.8 - 9.1 t ha^{-1}) se presento en los lotes con severidad de quema baja y alta, con 50 y 80 mm h^{-1} mientras que la menor producción de sedimentos (0.027 - 2.54 t ha^{-1}) se presentó en los lotes con severidad de quema media y sin quema con

25 mm h⁻¹ De acuerdo con lo anterior se puede decir independientemente de la severidad de quema, la intensidad de la lluvia fue el factor que más influyó en la producción de escurrimiento y sedimentos.

Los lotes quemados incrementan la producción de sedimentos en 208 veces y 26 veces con respecto al testigo, cuando se aplicó una lluvia con intensidad de 50 mm h⁻¹ y 80 mm h⁻¹, respectivamente

VIII. LITERATURA CITADA

- Afif K. E. y J. A. Oliveira P. 2006. Efectos del fuego prescrito sobre matorral en las propiedades del suelo. *Invest Agrar: Sist Recur For* 15(3), 262-270
- Aguirre B., C. 1978. Efecto del fuego en algunas características y propiedades de suelos forestales. Tesis profesional, Chapingo, México. 98 p
- Aguirre B., C. 1981. Efectos del fuego en algunas propiedades físicas de suelos forestales. Publicación especial no 5. Universidad Autónoma Chapingo. 75 p
- López Alonso R, A. Pérez Gispert y R. J. Batalla. (2004) Efectos de un incendio forestal sobre la respuesta hidrológica de la cuenca mediterránea de Arbúcies (cordilleras costeras catalanas, NE España) *Invest Agrar: Sist Recur For* 13 (2), 305-316
- Álvarez, C. 1989. La vegetación en la Sierra del Ajusco. Cuaderno de trabajo número 33. Departamento de Prehistoria. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D.F. 74 páginas.
- Andreu V.; Rubio J. L. And Cerni R. 1994. Long term effects of forest fires on soil erosion and nutrient losses. In: soil erosion and degradation as Consequence Forest Fires (eds. M. Sala and J. L. Rubio), pp 79-89. Geoforma. Ediciones Logroño.
- Andreu, V., Imeson, A.C. and Rubio, J.L. 2001. Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest. *Catena*, 44, 69-8.
- Aparicio M. F. J. 2006. Fundamentos de hidrología de superficie. Ed Limusa. México. 303 p.
- Batalla R.J. 2001. Hydrological implications firest fires. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida. Onlile: at <http://insma.udg.es/isse2001/papers/Batalla.html>.
- Bauters, T.W.J., T.S. Steenhuis, D.A. DiCarlo, J.L. Nieber, L.W. Dekker, C.J. Ritsema, J.-Y. Parlange and R. Haverkamp. 2000. Physics of water repellent soils. *J. Hydrol.*, 231-232: 233-243.
- Benavides, S. J. de D. 2003. Post-fire runoff and erosion at the plot and hillslope scale, Colorado Front Range. Ph D. Dissertation. Colorado State Univertisty. Fort Collins. Co. 210 p

- Benavides, S. J. de D. y J. G. Flores G. 2006. Efecto de los incendios Forestales en el escurrimiento y la erosión. En Incendios Forestales: definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación. Flores G. J. G. y Rodríguez T. D. A. (eds). Mundi Prensa, México. 59-67 p
- Beschta, R.L. 1990. Effects of fire on water quantity and quality. En J. D. Walstad, S.R. Radosevich y D.V. Sandberg (Eds). Natural and prescribed fire in Pacific Northwest forests. Oregon State University Press. Oregon. p.p. 45-61.
- Bond, R.D. 1969. The occurrence of water-repellent soils in Australia. Proc. Symp. Water Rep. Soils, Univ. Calif, Riverside.
- Bryan R., B. 1981. Soil erosion under simulated rainfall on the field and laboratory: variability of erosion under controlled conditions. Erosion and sediment transport measure. In proceeding of Florence Symposium. IAHS N° 133: 391-403.
- CENICAFE. 1975. Manual de conservación de suelos de ladera. Ministerio de agricultura. Bogotá, Colombia.
- Cerdà, A. 1998. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. *Catena*, 32, 73-86.
- Chang, K.Y. 1992. Development of seasonal water repellency under direct drilling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:326-329.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L. and Williams, D. 1983. Fire in forestry Vol 1: Forest Fire Behavior and effects. John Wiley and Sons. New York.
- Chaplot V., Bissonnais L. E. 2000. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 145-153.
- CONAFOR. 2008 Incendios Forestales: reporte. En línea.. <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php?l1=3&l2=4>
- CONAFOR. 2009 Incendios Forestales: reporte. En línea. <http://www.conafor.gob.mx>
- De Bano, L. F., D. G. Neary, and P.F. Ffolliot, 1998. Fire's effects on ecosystems. John Wiley & Sons, New York. N. Y; 333 p
- DeBano, L.F., L.D. Mann and D.A. Hamilton. 1970. Translocation of hydrophobic substances into soil by burning organic litter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34: 130-133.

- DeBano, L. F. 1973. Water repellent soils: their implications in forestry. *Journal Forestry* 71, 220-223.
- DeBano, L. F. 1998. Fire's effects on ecosystems. John Wiley & Sons. New York. N. Y. 333 p
- 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 LF. 2000a. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology* 231-232: 4-32.
- DeBano, L.F., P. F. Ffolliott, and M. B. Baker. 1996. Fire severity effects on water resources. In: Ffolliott, P. F., L. F. DeBano, M. B. Baker, Jr., G. J. Gottfried, G. Solis-Garza, C. B. Edminster, D. G. Neary, L. S. Allen, and R. H. Hamer, technical coordinators. Effects of fire on Madrean province ecosystems- A symposium proceedings. General Technical Report RM-289. USDA Forest Service Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins,
- DeBano, L. F., Osborne, J. F., Krammes J. F. and Letey, J. 1967. Soil wettability and wetting agents. Our Current Knowledge of the problem. Usda, Forest Service Resources, Pap. PSW.43, Berkeley, USA.
- DeBano LF. 1981. Water repellent soils: a state of the art . GTR-PSW-46. USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Berkeley, CA.
- DeBano, L.F., and R.M. Rice. 1973. Water-repellent soils: Their implications in forestry. *Journal of Forestry* 71:220-223.
- DeBano L. F. 2000a. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology* 231-232: 4-32.
- Dekker, L. W. and Ritsema C. J. 1996. Uneven moisture patterns in water repellent soils. *Geoderma*. 70: 87-99.
- De Luis, M. J. C. González-Hidalgo, y J. Raventós 2003 Efectos erosivos de una lluvia torrencial en suelos afectados por quemas experimentales de diferente severidad. *Rev. C&G.*, 17 (3-4), 57-67.
- Díaz-Fierros, F. 1977. Efectos del almacenaje sobre las propiedades físicas y biológicas de muestras tamizadas de suelos orgánicos, p. 69-79 *Anales de edafología y agrobiología*, Vol. 36.

- Díaz Fierros F.; Benito E.; Vega J. A.; Castelao A; Soto B.; Pérez R. and Tabeada T. 1990. Solote loss and soil erosion in burned soil from Galicia. In: Fire ecosystem Dynamics: Mediterranean and northern perspective (eds J. G. Goldammer and M. J. Jenkins), pp 103-116. SPB Academic Publishing. The Hague.
- Dirección General de Conservación del suelo y del Agua (DGCSA).1981. Informe técnico del capo experimental “Las Ollas”. Chiapas reporte interno.
- Doerr, S.H., W.H. Blake, G.S. Humphreys, R.A. Shakesby, F. Stagnitti, S.H. Vuurens and P. Wallbrink. 2004. Heating effects on water repellency in Australian eucalypt forest soils and their value in estimating wildfire soil temperatures. *Int. J. Wildland Fire*, 13: 157-163.
- Estrada, M. O. 2006. Sistema Nacional de protección contra los incendios forestales. En *Incendios Forestales: definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación*. Flores G. J. G. y Rodríguez T. D. A. (eds). Mundi Prensa, México. 185-213 p
- Figuroa S., B. 1975. Pérdidas de suelo nutrientes y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Texcoco. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo. México. 209 p.
- Figuroa S., B., A. Amante o., G. H., Cortés T., J. Pimentel, L., E. S., Osuna C., J. M., Rodríguez O. y F. J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelos por erosión. Colegio de Postgraduados. SARH. Montecillo Méx. 273 p.
- Fox D. M., and Bryan R. B. 1999. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena* 38:211-222.
- Fritze, H.; Smolander, A.; Levula, T.; Kitunene, V.; Malkonen, E. 1994. Wood-ash fertilization and fire treatments in a scots pine forest stand: effects on the organic layer, microbial biomass, and microbial activity. *Biology and Fertility of Soils*. 17: 57–63.
- Gimeno-García. E.; Andreu V. and J. L. Rubio. 2000. Changes in organic matter, nitrogen, phosphorus and cations in soil as result of fire and water erosion in a Mediterranean Landscape. *European Journal of soil Science*. 51:201-210.
- Giovannini, G. and S. Lucchesi. 1991. Is the vegetative cover the primary factor controlling erosion in burned soils?. En: M. Sala and J.L. Rubio (Eds.) *Soil Erosion and Degradation as a Consequence of Forest Fires*. Geofoma, Logroño, 1-16

- Giovannini, G., Vallejo R., Lucchesi, S., Ciompi S., and Llovet J. 2001. Efects of land use and eventual fire on soil erodability in dry Mediterranean conditions. *Forest Ecology and Management* 147:15-23.
- Gómez-Pompa, A. 1985a. Los recursos bióticos de México: reflexiones, México. Ed Alambra. 122p.
- González-Hidalgo, J.C. (1996). Los índices de agresividad de la lluvia y su aplicación en la valoración de la erosión del suelo. *Sociedad Española de Geomorfología, Geoforma, Logroño*, 37 pp.
- Greene, R. S. B., Chartres, C.J. and J. M. Hodgkinson. (1990) The effects of fire on the soil in a degraded semi-arid woodland. 1. Cryptogam cover and physical and microbiological properties. *Australian Journal of Soil Research*, 28, 755-779.
- Helvey, J. D. 1980. Effects of north central Washington wildfire on runoff and sediment production. *Water Resources Bulletin* 16:627-634.
- Hudson, N. 1995. Soil conservation. Redwood Books. London, Great Britain. 391
- 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. *Hydrol. Proc.* 15:2877–2892.
- Hwang, T-H, Lee K. S., Park S. D. and Y Choung. 2007. Effects of Different Restoration Practices on Nutrient Loss from Sediments after a Forest Fire in Two Watersheds *J. Ecol. Field Biol.* 30 (3): 265 269,
- Inbar, M., Tamir, M. and Wittenberg, L. (1998): Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area, *Geomorphology*. 24, 17-33.
- James D. M. and Lynn S. E. (tech eds). 2000. Environmental effects of postfire logging literature review and annotated bibliography. Gen Tech. Rep. PNW-GTR-486. Portland, OR: US. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 72 p.
- Jaramillo J. D. F., Dekker L. W., Ritsema C. J. and J. M. H. Hendrichkx. 2000. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal Hydrology*. 231-232: 105-111.
- Jaramillo J. D. F. 2006 Repelencia al agua en suelos: una síntesis ciencias de la tierra. *Rev. Acad. Coloma. Cienc.* 30 (115) 215-232. 2006. ISSN 0370-3908.

- Jiménez C., P. A. 1999. Efectos del fuego en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en bosque natural de *Pinus patula* schlechtet. Cham. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 67 p
- Johansen, M. P., T. E. Hakonson. and Breshears D. D. 2001. Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forest with shrublands and grasslands. *Hidrological Processes*. 15:2953-2965.
- Jungerius, P. D. y L. W. Decker. 1990. Water erosion in the dunes. *Catena supplement*. 18:185-193
- King, P.M. 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. *Aust. J. Soil Res.* 19:275–285.
- Kopra K. and Fyles J. 2005. Fire Severity y Fire and Stand Nutrition in Canadian Boreal Forests Note Series. No. 1. SFMN Research
- Kutiel, P. and Kutiel, H. 1989: Effects of a wildfire on soil nutrients and vegetation in a Aleppo pine
- Lal, R., 1976. Soil erosion on alfisols in western Nigeria, The changes in physical properties and the response of crops. *Geoderma* 16:419-431.
- Mah M. G. C., Douglas L. A. and Rigrose-Voase A. J. 1992. Effects of crust development and surface slope on erosion by rainfall. *Soil Science* 154: 37-43
- Magunda, M. K., Larson, W. E., Linden, D.R. and Nater, E. A. 1997. Changes in microrelief and their effects on infiltration and erosion during simulated rainfall. *Soil Technology*, 10, 57-67.
- Mataix-Solera J, Doerr SH. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain. *Geoderma* 118: 77–88.
- Meyer, L. D and W. C Harmon. 1984. Susceptibility of Agricultural Soils to Interrill Erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol.48 1152-1157.
- Meyer, G. A., Pierce, J. L., Wood, S. H. and A. J. T. Jull. 2001. Fire, storms, and erosional events in the Idaho batholith. *Hydrological Processes*, 15, 3025-3038.
- Moral, F. J., J. V. Giráldez, y A. M. Laguna. 2002. La hidrofobia en los suelos arenosos del Parque Natural de Doñana: Caracterización y distribución. *Ingeniería del agua*. Vol. 9 nº1.

- Moody J. A, and D. A. Martin 2001a. Initial hydrologic and geomorphic response following a wildfire in the Colorado Front Range. *Earth Surface Processes and Landforms* **26**: 1049–1070.
- Moody J. A, and D. A. Martin. 2001b. Post fire, rainfall intensity-peak discharge relations for three mountainous watersheds in the western USA. *Hydrological Processes* **15**:2981-2993.
- Morgan R. C. P. 1996. *Soil erosion and conservation*. Longman, New York, N. Y. 198 p.
- Morris S. E. and T. A. Mosses. 1987. Forest fire and the natural soil erosion regime in the Colorado Front Range. *Annals of American Geographers* **77**:245.
- Nieves, J. García L. y R. Cardoza. 2001. “La degradación de suelos en México”, en Palacio J. L., González L. L., Vázquez-Selem; L., Bocco, G., McClung, E., Alcántara, I., invar., M. y M. Sala (Organizing Committee) *Proceedings of the International Symposium on Land Degradation and Desertification*. May 7-14. IGV. Commission on Land Degradation and Desert of Geography (Comland). Institute of Anthropology, and National Autonomous University of Mexico (UNAM), México.
- Nishita, H. and R. M. Haug,. (1972): Some physical and chemical characteristics of heated soils. *Plant and*
- Oropeza, M. J. L. 1996. *Dinámica de sedimentos en cuencas hidrográficas. Apuntes de clases*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Pierson, F. B., D. H. Carlson, and K. E. Spaethe. 2000. Impacts of wildfire on soil hydrological properties of steep sagebrush-steppe rangeland. *International Journal of wildland fire* **11**:145-151.
- Pierson F. B., Robichaud. P. R., and K. E. Spaeth. 2001. Spatial and temporal effects of wildfire on the hydrology of a steep rangeland watershed. *Hydrological Processes* **15**, 2905–2916.
- Pritchett, L.W. 1986. *Suelos forestales, propiedades, conservación y mejoramiento*. Ed. Limusa. México. 638 p.
- Prosser I. P. and L. Williams, 1998. The effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus forest. *Hidrological processes* **12**: 251-265.
- Pyne S. J., P. L. Andrews and R. D. Laven (1996) *Introduction to wildland fire*. Second edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, New York, USA. 769 pp.

- Ramírez C., M. E. 2000. Eficiencia de dos prácticas productivo-conservacionistas para controlar erosión en laderas. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx. 133p.
- Rangeon N.I; L.M Aciar; R. Osinaga; J.L. Arzeno; C. Sánchez 2008. Análisis de la resistencia a la penetración y humedad de suelo como indicadores de calidad en distintos sistemas de labranza. Semiárido: un desafío para la Ciencia del Suelo 13 al 16 de mayo de 2008 Potrero de los Funes (SL), Argentina
- Regalado, C. M. G. García S. Hernández M. J. M., Pérez B- A- y A. R. Socorro 2003. Caracterización de la zona no saturada de un bosque maduro de Laurisilva en el parque nacional de Garajonay: hidrofobicidad e implicaciones hidrológicas. Estudios de la zona no saturada del suelo. Vol VI. 193-199 p.
- Reyes, Alfonso H. 1981. Ajusco Mirador de México, Departamento del Distrito Federal, Comisión Coordinadora para el Desarrollo Agropecuario del Distrito Federal,
- Rincón R., F. 2002. Metodología propuesta para estimar el valor económico y ecológico de los daños causados por los incendios forestales. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 20 p.
- Ríos, B. J. D. y M. R. Martínez M. 1990. Efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo. *Agrociencia* 1(1):61-73.
- Ritsema, C. J. and L. W. Dekker. 1996. Water repellency and its role in forming preferred flow path in soils. *Aust J. Soil Res.* 34:475-487.
- Ríos B., J. D. (1987). Efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo.
- Rivera, R., P. 1996. Determinación del potencial hidrológico en tepetates tipo T3 con lluvia simulada, Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 165p.
- Robichaud P. R. 2000. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forest, USA. *Journal of hidrology* 231-232; 220-229.
- Robichaud P. R. and T. A. Waldrop. 1994. A comparison of surface runoff and sediments yields from low-and-high severity site preparation burns. *Water Resources Bulletin.* (AWRA) 30:27-34.
- Robichaud P.R., Beyers J. L., and Neary D. G. 2000 Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. Fort Collins: U.S. Department of Agriculture,

Forest Service, Rocky Mountain Research Station. General Technical Report RMRS-GTR-63.

Robichaud, P. R. 2000. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain Forest, USA. *Journal Of Hydrology* 231-323, 220-229.

Robichaud, P. R., Beyers J. L., and Neary. D. G. 2000. A comparison of surface runoff and sediment yield from low-and-high severity site preparation burns, *Water Resources Bulletin* 30:27-34

Römken, M. J. M., Prasad, S.N. and F. D Whisler. 1990. Surface sealing and infiltration. In: M.G. Anderson and T. P. Burt (Eds.) *Process Studies in Hillslope Hydrology*. John Wiley & Son, New York, 127-172.

Rowe, J.S. 1983. Concepts of fire effects on plant individuals and species. In: R.W.Wein and D.A. MacLean (Eds.), *The role of fire in northern circumpolar ecosystems*. John Wiley & Son, New York, 135-154

Rubio, J. L., Forteza, J., Andreu, V. and R. Cerni. 1997. Soil profile characteristics influencing runoff and soil erosion after forest fire: A case study (Valencia, Spain). *Soil Technology*, 11, 67-78.

SEMARNAT, 2001. Cruzada Nacional de los bosques y el agua. <http://www.semarnat.gob.mx>

SEMARNAT, 2005. Informe de la situación del medio ambiente en México, compendio de estadísticas ambientales. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/index.html

SEMARNAT y UACH. 2002. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana a escala 1: 1000 000. SEMARNAT. México.

Shakesby, R.A., S. H. Doerr and R. P. D. Walsh. 2000. The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *J. Hydrol.* 231-232:178-191.

Shakesby, R.A. and S. H Doerr. 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth Science Reviews* 74, 269-307.

Sanroque, P., Rubio, J. L., and J.Mansanet. 1985. Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo, el la composición florística y en la erosión hídrica de zonas forestales de Valencia, España. *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol* 22(2), 131-147.

- SARH. 1994. Diagnóstico del Parque Nacional Cumbres del Ajusco, Distrito Federal. Subsecretaría Forestal y de la Fauna. Pausa.
- Shaxon, T., Hudson, N., Sanders, D., Roosee and Moldenhauer, W. 1989. Land husbandry. A frame work for soil and water conservation. Soil and Water Conservation Society. Iowa, USA. 64 p.
- Scout, D. F. and Van Wyk, D, B., 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behavior of on afforested catchment: Journal of hydrology 121, 239-256.
- Select Committee into Land Conservation. 1990. Discussion paper No. 2. Agricultural Region of western Australia. Western Australia Legislative Assembly. Perth
- SEMARNAT. 2001. Incendios forestales resultados 2001. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Federalización y descentralización de Servicios Forestales y de Suelos. 26 p.
- Shahlaee, A. K., W. L. Nutter., Burroughs E. R. Jr., and L. A. Morris. 1991. Runoff and sediment production from burned forest sites in the Georgia Piedmont. Water Resource Bulletin AWRB. Vol. 27 NO. 485-493.
- SMA. 2003 Plan rector de producción y conservación de la microcuenca Ocopiaco, comunidad de San Miguel Topilejo, Delegación Tlalpan. Secretaría del Medio Ambiente, Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural Dirección Ejecutiva de Coordinación Regional, SAGARPA, FIRCO.
- Smith D. D. and W. H Wischmeier. 1957. Factors affecting sheet and rill erosion. Transactions. American Geophysical Union 38:889-896.
- Solera, M., Sala, M. and J. L. Rubio. (1994). Post fire evolution of runoff and erosion during an eighteen month period. En: M. Sala & J.L. Rubio (Eds.) Soil Erosion and Degradation as a Consequence of Forest Fire s. Geofoma, Logroño, 1 4 9 - 1 6
- Swanson, F. J. 1981. Fire and geomorphic processes. In: Mooney, H. A., T. M. Bonnicksen, N. L. Christiansen, J. E. Lotan and W.A. Reiners (Eds.) Fire Regime and Ecosystem Properties. United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report WO-26, United States Government Planning Office, Washington DC, pp. 401-421.
- Trejo, I.; Hernández, J. 2005. Vegetación y uso del suelo. Informe técnico del proyecto Diagnóstico funcional del territorio nacional. SEDESOL - Instituto de Geografía, UNAM. 100 -109pp

- Uresti G. J., Figueroa S. B. y C. A. Ortiz S. 2006. Cobertura vegetal: principio natural y universal para la conservación del suelo y agua. XIX Reunión Científica-Tecnológica Forestal y agropecuaria Veracruz. 159-170 pp
- Wang Z, Wu Q. J, Ritsema C. J, Dekker L. W, and J. Feyen. 2000. Effects of soil water repellency on infiltration rate and flow instability. *Journal of Hydrology* 231–232: 265–276.
- Wallis, M. G. and D. J. Horne. 1992. Soil water repellency. *Advances in Soil Science* 20, 91-146.
- Wells, C. G. 1971: Effects of prescribed burning on soil chemical properties and nutrient availability, pp. 86-99. En Prescribed burning symposium, Proceedings of the Southeastern Forest Experimental
- Wells, C. G., Campbell, R. E., Debano, L. F., Lewis, C. E., Fredriksen, R. L., Franklin, E. C., Froelich, R. C. and P. H. Dunn. (1979). Effects of fire on soils. A state-of-knowledge review. U.S.D.A. For. Serv. Gen. Tech. Rep. WO-7.
- Whelan, R. J. 1995. The ecology of fire. Cambridge England: Cambridge University Press. 346 p. Whisenant, S. G. 1990. Changing fire
- Wilkinson, J. F. and R. H. Miller. 1978. Investigation and treatment of localized dry spots on sand golf greens. *Agron. J.* **70**: 299-304.
- Wischmeier, W. H. and J. V. Mannering. 1969. Relation of Soil Properties to its Erodibility. *Soil Sci. Soc. Proc.*, Vol. 33, pag 131-136
- Wallis, M. G.; D. J. Horne & K. W. McAuliffe. 1990a. A study of water repellency and its amelioration in a yellow-brown sand. I: Severity of water repellency and the effects of wetting and abrasion. *New Zealand J. Agric. Res.* **33**: 139-144.