



TD

Z599 1

FCF

2007

. D824

ESTADIOS HIDROLÓGICOS
SOLIDOS OTORGADOS
EN ESCOISSIT

EN ESCOISSIT

EN ESCOISSIT

EN ESCOISSIT

EN ESCOISSIT

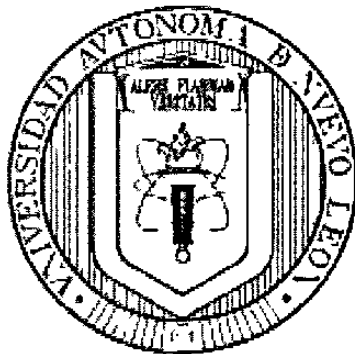
EN ESCOISSIT

EN ESCOISSIT



1020160684

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCION DE POSTGRADO



ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN ECOSISTEMAS
DEL NORTE DE MÉXICO

Por

M. C. JOSÉ DUÉÑEZ ALANÍS

Como requisito parcial para obtener el Grado de
Doctor en Ciencias con especialidad en Manejo de Recursos Naturales

Diciembre, 2007

1470259

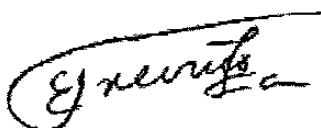


PHILIPINE
UNIVERSITY

TD
Z599
FCF
2007
.D824

**ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN ECOSISTEMAS
DEL NORTE DE MÉXICO**

Aprobación de la Tesis:



Dr. Eduardo Javier Treviño Garza



Dr. Enrique Jurado Ybarra



Dr. Andrés Eduardo Estrada Castellón



Dr. Humberto González Rodríguez



Dr. Miguel Mellado del Bosque

Diciembre, 2007

DEDICATORIA

A MI FAMILIA

JULIÁN†

LALO†

AGRADECIMIENTOS

En ocasiones no se alcanza a dimensionar o expresar el agradecimiento a las Instituciones o a las Personas. Con pocas palabras y sinceridad a:

La Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

El Departamento de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y su Academia y personal administrativo.

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Becario y proyectos que soportan este documento.

Dr. José de Jesús Návar Chaidez. Con Respeto, Lealtad y Honor.

La Academia del Programa de Postgrado de la Facultad de Ciencias Forestales.

Dr. Eduardo J. Treviño Garza. Subdirector de Postgrado, Asesor, Amigo, Maestro, Decisivo y su valiosa colaboración para presentar este escrito.

Dr. Enrique Jurado Ybarra. Amigo, Asesor, Motivador, Orientador, Maestro y Liderazgo.

Dr. Eduardo Estrada Castillón. Amigo, Asesor, Motivador, Disposición, Aprecio y Colaborador.

Dr. Humberto González Rodríguez. Comité Doctoral del Programa, Asesor, Amigo, Colaborador, Valorativo y Objetividad.

Dr. Miguel Mellado del Bosque. Amigo, Asesor, Impulsor, Motivador, Aprecio y Colaborador.

Dr. Ricardo López Aguillón. Amistad y apoyo durante mi estancia.

Drs. Aguirre, González, Pando, Israel, Jiménez, Cantú, Fortunato, Marmolejo, Von Roth, Cotera, Scot, Guevara, Villalón.

Quienes participaron en la toma de datos de campo.

Xanat, Juan, Prieto, Carlos M., Rolando, Carlos C., Rodrigo, Julio, José, Humberto, Raúl, Manuel, Víctor, Jesu, Rafa, Eliud, Dorían, Martín, Jesús L., Jorge, Lalo, Marín, Raúl S., Merlín, Jaime, Aldo, Rafael, Toño y, más.

Lupita, Sandra, Diana, Isabel, Juanis, Nancy, Claudia, Cecilia, Chencho, Chón, Valde, Junior. Lupe, Lázaro, Manuel, Félix, Juan, Pepe, Pedro, Juanito, Alex, Paco y Toño. Aquellos que en su momento mostraron su amistad durante su licenciatura. Mario M. y Santos L.

David, Mario, Jesús, Everardo, Francisco, Kalí, Lulú, Lety, .Omega, Silvia, Norma, Lea, Fina.

Quienes son omitidos involuntariamente.

| | |
|---|----|
| ÍNDICE | |
| ÍNDICE DE TABLAS | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS | v |
| CAPÍTULO I | 1 |
| ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN ECOSISTEMAS DEL NORTE DE MÉXICO | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO II | 5 |
| ESTUDIOS DE CASO | 5 |
| Manejo Silvícola, Capacidad de Infiltración, Escurrimiento Superficial y Erosión | 5 |
| Resumen | 5 |
| Abstract | 6 |
| Introducción | 6 |
| Materiales y Métodos | 9 |
| Resultados y Discusión | 14 |
| Conclusiones | 19 |
| Literatura Citada | 20 |
| Estimación de la Frecuencia y Magnitud de los Escurrimientos Superficiales en Bosques de Coníferas del Estado de Durango. | 22 |
| Introducción | 22 |
| Materiales y Métodos | 23 |
| Resultados y Discusión | 24 |
| Conclusiones | 25 |
| Literatura Citada | 25 |
| Probabilidad del Escurrimiento Superficial en Ecosistemas Forestales del Estado de Durango, México. | 27 |
| Resumen | 27 |
| Abstract | 28 |
| Introducción | 29 |
| Materiales y Métodos | 33 |
| Resultados y Discusión | 38 |
| Conclusiones | 40 |
| Literatura Citada | 41 |
| Frecuencia y Magnitud de los Escurrimientos Superficiales en el Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México | 44 |

| | |
|---|----|
| Resumen | 44 |
| Abstract | 45 |
| Introducción | 46 |
| Materiales y Métodos | 48 |
| Resultados y Discusión | 52 |
| Conclusiones | 58 |
| Literatura Citada | 58 |
| Estimación de la Probabilidad del Flujo de la Escorrentía Superficial en el Sudeste de Nuevo León, México. | 62 |
| Resumen | 62 |
| Abstract | 63 |
| Introducción | 64 |
| Materiales y Métodos | 66 |
| Resultados y Discusión | 70 |
| Conclusiones | 75 |
| Literatura Citada | 75 |
| CAPÍTULO III | 79 |
| CONCLUSIONES | 79 |
| CAPÍTULO IV | 82 |
| ANEXO | 82 |
| Resúmenes de Ponencias en Congresos | 82 |
| Efecto del Uso del Suelo sobre la Infiltración y la Pérdida de Suelo en la Cuenca Paso de Piedra, Durango, México | 83 |
| Recuperación Hidrológica de un Bosque de Coníferas con uso Forestal- Pecuario en Durango, México | 84 |
| Esguerramiento e Infiltración bajo Diferentes Condiciones de Cobertura Forestal e Intensidad de Lluvia en los Bosques de Coníferas del Sur de Durango, México | 87 |
| Hidrología Superficial en el Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México | 88 |
| Infiltrabilidad en la Cuenca del Valle de Saltillo, Coahuila, México | 90 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1. Valores promedio de las características de suelo y vegetación estimadas en los tratamientos silvícolas con uso de pastoreo durante los años 1998 y 1999 en Santa Bárbara, Durango, México. | 13 |
| Tabla 1.2. Valores acumulados totales promedio medidos después de 30 min de las pruebas de infiltración, escorrentía, concentración de sedimentos y erosión en sitios forestales de la Sierra Madre Occidental de Durango, México. | 14 |
| Tabla 3.1. Valor medio de la tasa de escurrimiento estimada (cm hr-1) en los sitios de estudio bajo dosel y diferentes intensidades de lluvia en el sur suroeste de Durango, México. | 38 |
| Tabla 3.2. Valor medio de la tasa de infiltración estimada (cm hr-1) en los sitios de estudio bajo dosel y diferentes intensidades de lluvia en el sur suroeste de Durango, México. | 39 |
| Tabla 3.3. Valores medios de la tasa de escurrimiento e infiltración (cm hr-1) en los sitios de estudio bajo dosel y con diferentes intensidades aplicadas en el sur suroeste del estado de Durango, México. | 39 |
| Tabla 4.1. Unidades hidrológicas determinadas en el área metropolitana de Saltillo, Coahuila, México. | 49 |
| Tabla 4.2. Estadísticos de ajuste a la tasa de infiltración final aplicada a los sitios en el Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México. | 53 |
| Tabla 4.3. Probabilidad de presencia de la escorrentía superficial (%) con eventos máximos con duración de una hora en el Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México. | 55 |
| Tabla 5.1. Estadísticos de ajuste a la tasa de infiltración final (cm hr-1) aplicada a los sitios en el sudeste del estado de Nuevo León, México. | 70 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Tasa de escurrimiento (cm hr-1) en tratamientos silvícolas con uso del pastizal en 1999. | 16 |
| Figura 1.2. Infiltración (cm hr-1) en tratamientos silvícolas con uso del pastizal en 1999. | 16 |
| Figura 1.3. Erosión laminar (kg ha-1) en tratamientos silvícolas con uso del pastizal en 1999. | 17 |
| Figuras 2.1 y 2.2. La distribución Log normal ajustada a las tasas de infiltración modelada por la ecuación de Philip y las curvas de probabilidad de escorrentia-duración-frecuencia para los suelos forestales del sur, sudoeste de Durango, México. | 25 |
| Figura 4.1. Unidades hidrológicas (suelo, pendiente y uso del suelo) del Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México. | 49 |
| Figura 4.2. Tasas de infiltración (mm hr-1) promedio observada y estimada con los modelos de infiltración en zona Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México. | 52 |
| Figuras 4.3. Histograma de los valores observados y la distribución Log normal ajustada a las tasas de infiltración modelada por la ecuación de Horton. | 54 |
| Figura 4.4. Curvas de intensidad-duración-frecuencia para las localidades del Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México. | 56 |
| Figura 5.1. Histograma de los valores observados y la distribución Log normal ajustada a las tasas de infiltración final modelada por la ecuación de Horton. | 71 |

CAPÍTULO I

ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN ECOSISTEMAS DEL NORTE DE MÉXICO

INTRODUCCIÓN

El agua es vital en la satisfacción de necesidades de las poblaciones humanas y el funcionamiento de los ecosistemas. El estudio que sigue en el ciclo hidrológico es de gran importancia para la planeación estratégica de los recursos naturales del País. La ruta crítica y problemática para el recurso agua esta en el conocimiento de los procesos hidrológicos que ocurren en una región, excepto la precipitación. Procesos en los que un manejador de recursos naturales puede influir, sea para prevenir, restaurar o racionar adecuadamente.

En México, la planeación estratégica del agua se requiere para manejar el recurso en las diferentes regiones, sea este abundante, limitado o escaso, es necesario por lo tanto conocer cantidad, ubicación y disponibilidad del mismo para lograr la meta de tener mayor eficiencia de su uso en los ecosistemas. Esto, posibilita la adecuada administración del recurso, el control de los riesgos en eventos de precipitación, la captura del agua *in situ*, reducir la velocidad de flujo de la escorrentía superficial, prevenir las inundaciones y riesgos de erosión, evitar pérdidas de agua, cosecharla y almacenarla, así como minimizar el disturbio por el uso del suelo.

El estudio de procesos hidrológicos es fundamental en las diferentes regiones de Territorio Nacional. Esto considerando que posee una gran diversidad en su relieve altitudinal, florística, tipos de suelos y clima. Estos ambientes distinguen a un ecosistema con comunidades vegetales típicas como son las selvas, bosques, matorrales, pastizales con una amplia gama de variaciones vegetacionales.

La necesidad de conocer la problemática y la demanda del agua, en relación al uso del suelo en diferentes regiones de México, motivó el plantear una investigación de procesos hidrológicos específicos de infiltración, escurrimiento y erosión y la generación del

conocimiento al entorno de comunidades vegetales y poblaciones humanas para ampliar su conocimiento mediante estudios de caso.

El objetivo de la investigación fue obtener una visión integral a través de diferentes casos de estudio del norte del México, que incluyen una problemática por el uso del suelo, la entrada de agua al suelo, los flujos y escurrimientos superficiales e inundaciones, curvas de intensidad-duración-frecuencia de la precipitación y curvas de los escurrimientos superficiales que pueden producir inundaciones. Dichos estudios están comprendidos en un gradiente altitudinal desde la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango en bosques de pino-encino, pasando por el Altiplano Mexicano del estado de Coahuila en áreas de matorral desértico micrófilo (Xerófitos y Rosétofitos) y bosques de pino-encino, en la Sierra Madre Oriental en bosques de pino-encino y en la Planicie Costera en áreas del matorral espinoso Tamaulipeco en del estado de Nuevo León. Todo ello, aunado a los desarrollos y centros poblacionales; lo cual da una complejidad en determinar el uso del suelo más adecuado para satisfacer necesidades y demandas de la sociedad y los factores que afectan a los recursos naturales de los ecosistemas, en especial al recurso agua.

Para estudiar los procesos hidrológicos se empleó la técnica de simulación de lluvias. Esta técnica ha sido empleada por más de 60 años, para evaluar los parámetros hidrológicos tales como infiltración, escurrimiento, erosión y producción de sedimentos. Consistió en aplicar por aspersión controlada una intensidad de agua diferencial sobre microparcels y recolectar el exceso de agua en intervalos de tiempo predefinidos hasta alcanzar una entrada de agua constante. De manera cuantitativa, la diferencia entre la intensidad de lluvia aplicada y la tasa del flujo de agua superficial determina la tasa de infiltración o infiltrabilidad del suelo.

Los valores de infiltración determinada en campo fueron sometidos a los modelos de infiltración de Philip, Kostiakov modificada y Horton, para después determinar el mejor modelo de infiltración para cada región y ajustar la infiltración final a la distribución Log normal.

Los registros de precipitación de lluvias máximas de las estaciones climáticas cercanas a las localidades en estudio fueron analizados y ajustados con las distribuciones probabilísticas Normal, Log normal, Exponencial y de Valores Extremos. Los datos se modelaron con la distribución de Valores Extremos siguiendo la recomendación de literatura especializada en el tema para eventos máximos. Con la diferencia de los valores de intensidad y los datos de la distribución se estimaron las intensidades diarias de las lluvias horarias a 0.5, 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas de duración y en los periodos de retorno de 1, 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Las curvas de escorrentía-duración-frecuencia fueron obtenidas de la resta de los valores de intensidad a las infiltraciones finales ajustadas con la distribución Log normal y estimar la presencia de escurrimientos superficiales en eventos máximos que exceden la entrada de agua al suelo y con frecuencia anual y su probabilidad de presencia de excesos de escorrentía que producen inundaciones.

En este estudio se realizó el ajuste de modelos de infiltración para determinar la infiltración constante y su ajuste en una distribución estadística. El uso de modelos para estimar infiltración, flujos de escurrimiento superficial, subsuperficial y los excesos de infiltración son utilizados en muchos sistemas modernos con énfasis en la generación de modelos probabilísticos y su predicción estadística a largo plazo para ser utilizado en la toma de decisiones del manejo de cuencas y extrapolarlos a diversos escenarios ambientales. Estos han sido aplicados al estudiar la actividad humana y el desarrollo económico en una región donde requieren el uso del enfoque de modelos de los procesos hidrológicos para su predicción ambiental y alcanzar o ir ambos a la par. Al evaluar los procesos hidrológicos para su modelación, local o regional, se presentan diversas condiciones que los influyen, como es la matriz de suelo y las condiciones del estado actual de vegetación y su uso.

De esta manera, en los bosques de la Sierra Madre de Durango, en la localidad de la ex-Hacienda Santa Bárbara, se estudio la infiltrabilidad, los escurrimientos superficiales y

erosión en bosques de pino-encino con un manejo silvícola por el método de Desarrollo Silvícola en rodales con segundo y tercer aclareo y áreas de regeneración con y sin uso pecuario, considerando que las diferentes áreas silvícolas tienen respuesta hidrológica y son influidos de alguna manera por el uso pecuario o silvícola. En siguiente estudio de caso, en diferentes localidades de los municipios de Pueblo Nuevo y San Dimas, Durango, se estudió el efecto de los aprovechamientos maderables en los ecosistemas de bosque templado sobre la infiltración final y la escorrentía superficial; además de generar curvas de intensidad-duración-frecuencia de precipitación, con la finalidad de encontrar diferencias en la infiltración bajo y fuera del dosel en las áreas silvícolas y su respuesta diferencial en el exceso de flujo superficial del agua.

En el estado de Coahuila, en el área Metropolitana de Saltillo (Arteaga, Ramos Arizpe y Saltillo), se estudió la infiltrabilidad de unidades de respuesta hidrológica homogénea, estas se obtuvieron con la digitalización de capas de coberturas de edafología, uso del suelo y pendiente. Se construyeron las curvas de intensidad-duración-frecuencia y se calcularon las curvas de escorrentía-duración-frecuencia. Se realizó el estudio bajo el supuesto de diferencia y señalar eventos que producen inundaciones en el área Metropolitana de Saltillo, Coahuila. También, jerarquizando una infiltrabilidad diferencial por unidades de suelo.

En la Sierra Madre Oriental y en la Planicie Costera, se evaluó las tasas de infiltración, en ambas localidades se ajustaron ecuaciones de proyección de la infiltración y se ajustaron a la distribución Log normal para predecir la infiltración final, desarrollando proyecciones y la probabilidad de escurrimientos mediante las curvas de intensidad y escorrentía, duración-frecuencia, respectivamente, a partir de lluvias máximas con periodos de retorno o frecuencias establecidas, ya que son estas las que abastecen agua a los cauces de ríos y es una zona altamente considerada de recarga a los mantos freáticos o producir grandes volúmenes de flujo de agua que pudieran ocasionar una problemática por inundaciones.

CAPÍTULO II

ESTUDIOS DE CASO

Manejo Silvícola, Capacidad de Infiltración, Escurrimiento Superficial y Erosión

Resumen

La Sierra Madre Occidental del estado de Durango, México es una zona forestal comercialmente importante que sirve de recarga de agua para las cuencas del Océano Pacífico y del interior del centro norte del País. Los bosques se han utilizados para la extracción de trocería y el apacentamiento. En esta investigación, se estudió el efecto de cuatro tratamientos silvícolas en la infiltración, escurrimiento y erosión en un suelo forestal en Santa Bárbara, Durango, México. Estos procesos hidrológicos fueron evaluados en 1998 y 1999 con el uso de un simulador de lluvia portátil, aplicando 10.47 cm hr^{-1} de agua 30 min. En el primer año, se encontró mayor infiltración, menor flujo superficial de agua y mayor concentración de sedimentos en el segundo aclareo en contraste con el tercer aclareo y corta de regeneración ($P=0.0001$). El apacentamiento mostró mayores efectos en los procesos hidrológicos en contraste con los tratamientos silvícolas ($P=0.0001$). Para el segundo año no existieron diferencias significativas entre tratamientos silvícolas pero sí entre el apacentamiento y los tratamientos silvícolas, indicando que la extracción de de la trocería sobre la hidrología superficial es considerado un efecto temporal y espacialmente delimitado a las áreas donde se concentra el aprovechamiento forestal. A partir de estos resultados, se observa que el apacentamiento tiene efectos a largo plazo sobre los procesos hidrológicos. Es pertinente recomendar (i) normar los cambios del uso del suelo y la capacidad de carga en los bosques, (ii) reducir los impactos ambientales provocados por la extracción de trocería y (iii) realizar prácticas de conservación de suelo y agua después de aplicar las actividades silvícolas para mantener el ciclo natural del agua en la Sierra Madre Occidental de Durango, México.

Palabras clave: Silvicultura, bosques templados, zonas de recarga hidrológica.

Abstract

The Sierra Madre Mountain range of Durango, Mexico a forested zone commercially important, is a source of groundwater recharge for the provinces of the Pacific Ocean lowlands and the interior plains of the Chihuahuan Desert. Forests have been traditionally used for timber harvesting and extensive livestock grazing. In this research we measured the effect of four silvicultural treatments on the soil infiltration, surface runoff and soil erosion in Santa Barbara, Durango, México. These hydrological processes were evaluated in 1998 and 1999 by using a portable rainfall simulator, applying 10.47 cm hr^{-1} of intensity during 30 min. During the first year, the largest nitration and sediment rates and smaller runoff rates were observed in the second thinning treatment in contrast to the other silviculture treatments ($P = 0.0001$). Grazing practices in contrast to the silvicultural treatments had the most significant effects on hydrology and soil sedimentation ($P = 0001$). For the second year, none of the treatment silvicultural showed significant differences indicating the short temporal and spatial effect of harvesting on soil and hydrological parameters. However, grazing sites continued to have higher runoff and sediment rates. The recommendations emerging from these results are i) to control land use changes from forests to grasslands and the carrying capacity on forests, ii) to minimize environmental soil impacts by harvesting operations, and iii) to realize soil and water conservation practices on grasslands and on forest soils immediately after harvesting operations to maintain functioning the water cycle in the western Sierra Madre mountain range of Durango, Mexico.

Key words: silviculture, temperate forest, zone of ground water recharge

Introducción

En México, existe poca información y controversia sobre el uso y manejo de los ecosistemas forestales para satisfacer necesidades de la sociedad. Las actividades convencionales de extracción de trocería y apacentamiento conjuntamente con la producción de agua parecen estar contrapuestas. El manejo sustentable de los bosques

debe contemplar la satisfacción de las necesidades de desarrollo económico, estabilidad social y conservación de los componentes y funciones de los ecosistemas forestales. Por esta razón, es esencial que el impacto potencial al suelo y al agua por el manejo de un sitio no persista más allá de los periodos de regeneración y recuperación del arbolado y del bosque, ambos para mantener la productividad del sitio y la producción de agua en cantidad y calidad promedio de la cuenca (Croke *et al.*, 2001). Huang (1998) enfatizó que la compatibilidad de uso forestal y pecuario en sistemas silvícolas esta en la asignación de áreas y tiempos de interacción de uso para cada actividad. Consideró que los beneficios van mas allá desde el punto de vista económico, uso de recursos y reducción de riesgos de plagas e incendios en el bosque. Luo *et al.* (1999) mencionaron que los sistemas silvopastoriles es una actividad tradicional, por ello, es necesario ver esta relación con una visión integral a los aspectos social, económica y cultural más que en términos exclusivos de silvicultura o ciencia animal, al ser poco probable aislar estas actividades.

Desde el punto de vista de la conservación del suelo y el agua, el manejo y las actividades de extracción de trozas son cuestionados cuando, por la alta intensidad de aprovechamiento y las operaciones de extracción, actividades que reducen la vegetación forestal, perturban y exponen el suelo superficial a los efectos de las lluvias, alteran y modifican las propiedades del suelo, reducen la capacidad de infiltración, incrementan la pérdida de suelo por erosión hídrica. Otras actividades forestales, como el tráfico de vehículos, el arrastre de la trocería, las maniobras de carga y transporte, la construcción de caminos de extracción y la remoción y disturbio vegetal de la superficie del suelo, son efectos negativos que reducen la infiltración e incrementa los escurrimientos superficiales y la erosión de suelo (Baharuddin *et al.*, 1996; Croke *et al.*, 2001).

Abeli y Sawe (1999) encontraron que la infiltración se redujo entre 36 y 96 % en bosques de Tanzania perturbados durante las actividades de manejo de las trozas y su extracción. Zang y Zhang (1999) mencionaron que la composición de la hojarasca de diferentes especies de coníferas y latifoliadas mejora las condiciones del suelo para la infiltración, reduce el escurrimiento y la erodabilidad al absorber e interceptar la lluvia y

funcionar como barrera y detención propiciando mayor tiempo al agua para penetrar al suelo. Arifeen y Chaudhry (1988) señalaron que existe menor escurrimiento y menor erosión en cuencas de uso forestal (16% y 158 kg ha⁻¹ año⁻¹), en contraste con cuencas de uso agrícola-forestal (18 % y 332 kg ha⁻¹ año⁻¹), de uso pecuario (21 % y 340 kg ha⁻¹ año⁻¹), y de uso agrícola (26 % y 332 kg ha⁻¹). Belsky y Blumenthal (1997) mencionaron para los bosques y los suelos del oeste de Estados Unidos, cambios estructurales y en composición debido a la supresión del fuego, la corta selectiva y la ganadería, factores que contribuyen en la alteración de la dinámica de la biomasa, la densidad de la vegetación herbácea y la cantidad de combustibles finos. Yates *et al.* (2000) estudiaron los efectos del apacentamiento histórico en terrenos maderables fragmentados de *Eucalyptus salmonophloia*, y encontraron una relación negativa con la declinación de las especies nativas perennes, el incremento de cobertura de exóticas anuales, reducción del mantillo y criptógamas, pérdida de la microtopografía, incremento de la erosión, cambios en la concentración de nutrientes, degradación de la estructura del suelo, disminución de la infiltración y cambios en el microclima cercano al suelo.

Ge *et al.* (2001) reportaron que las variables hidrológicas en los suelo húmedos con manejo forestal son variables, pero se minimizan cuando prácticas de manejo son adoptadas durante el corte del arbolado, la preparación del sitio y el control del drenaje. Spaeth *et al.* (1996) mencionaron que los efectos del pastoreo de la ganadería en las propiedades hidrológicas de las cuencas por remoción de la cubierta vegetal incrementa el impacto de las gotas de lluvia, decrece la materia orgánica y agregados del suelo, incrementa la compactación, decrece las tasas de infiltración e incrementa la erosión. Además, las interacciones de vegetación, suelo, clima, topografía y el manejo del sitio tienen efecto sobre el balance hidrológico en la cuenca. En zonas forestales, Spurr y Barnes (1982) consideraron que la topografía, el suelo cubierto por hojarasca, la vegetación secundaria y altos contenidos de humedad son variables intrínsecas de los bosques; estas variables de suelo y vegetación no limitan tener altas tasas de infiltración dada la alta absorción y transmisibilidad de los suelos forestales (Hewlett, 1982).

A pesar de esta riqueza en las investigaciones tendientes a determinar el efecto de los tratamientos silvícolas y pecuarios sobre variables hidrológicas y edafológicas y su posible tiempo de recuperación, en el estado de Durango, México no se han estudiado intensivamente en los bosques comerciales. A pesar de ocupar 46% de la superficie del estado y la derrama y dependencia económica que deja esta actividad en el estado y a la población de estas zonas (INEGI, 2004); además, es el principal productor de madera y, recientemente el manejo del bosque se ha certificado como sustentable en México. Por otro lado, esta zona boscosa sirve de recarga a las cuencas del Océano Pacífico y del interior del centro norte de México, siendo utilizadas en importantes regiones agrícolas. Se supone que, en los bosques del norte de México, las actividades forestales y pecuarias no tienen efectos negativos en la hidrología y pérdida de suelo a través del tiempo. El trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar el efecto del uso del suelo forestal y pecuario, y los tratamientos silvícolas en los procesos de infiltración, escurrimiento, la concentración de sedimentos y la erosión superficial en bosques comerciales tratados como sistemas silvopastoriles en Durango, México. Se planteó como hipótesis que la escorrentía superficial, la capacidad de infiltración y la erosión del suelo no se modifican por las actividades silvícolas y ganaderas de los suelos forestales.

Materiales y Métodos

El trabajo se realizó durante 1998 y 1999 en la localidad de la Hacienda Santa Bárbara (Durango, México) a 47 km por la carretera federal No. 40, Durango Mazatlán, en la región forestal de la sierra Madre Occidental. La posición geográfica del área de estudio es 23° 43' N y 104° 51' O. El área presenta un clima templado, con una temperatura media anual entre 12 y 18 °C, y oscilaciones mensuales entre 7 y 18 °C. Por su régimen de lluvias el clima se caracteriza como el más húmedo de los templados subhúmedos, con una precipitación media anual de 807 mm, con lluvias de verano y coeficiente precipitación-temperatura de 55.0. El tipo de vegetación dominante es un bosque de coníferas de pino (*Pinus cooperi*, *P. engelmanni*, *P. leiophylla*, *P. teocote*, *P. durangensis*, *P. ayacahuite* y *P. lumholtzii*) y encino (*Quercus intricata*, *Q. arizonica*, *Q. grisea*, *Q. crassifolia* y *Q. rubiacea*), con áreas de pastizal intermontano de especies

nativas e inducidas (*Heteropogon contortus*, *Muhlenbergia monticola*, *Bouteloua gracilis*, *B. curtipendula*, *Sporobolus* sp., *Cynodon plectostachium*, *Poa* sp., *Festuca* sp., *Bromus* sp., *Setaria* sp., *Asistida* sp., *Piptochaetium* sp. y *Eragrostis* sp.). De acuerdo con la FAO-UNESCO, modificada por DETENAL, los tipos de suelos son Cambisol eútrico, Regósol eútrico, Feozem háplico y Litósol (CETENAL, 1976).

Desde el año 1946, el uso del suelo ha tenido como actividad primaria la explotación ganadera bajo un sistema de rotación diferido, para producir becerros al destete. A partir de 1987, se realizaron aprovechamientos forestales, los cuales habían sido suspendidos en 1965. Esta actividad forestal se realiza de manera conjunta con la ganadería en una superficie de 3843 ha de un total de 6560 ha cubierta por bosque de coníferas. El manejo forestal se ha realizado por el Método de Desarrollo Silvícola, en una división dasocrática en rodales, subrodales y series en la aplicación de los tratamientos silvícolas.

En el área de estudio se aplicaron los tratamientos de segundo aclareo (2A), tercer aclareo (3A) y corta de regeneración (CR) en el año de 1997, con un turno de 70 años e intervención de 14 años; la extracción se realizó con malacate montado en un camión grúa, la cual extrae la trocería desde partes altas, arrastrando las trozas del arbolado causando disturbio en la superficie del suelo y la cubierta vegetal. El ganado apacenta en toda el área de manera extensiva con una carga de 16 ha UA⁻¹.

Los tratamientos de estudio se seleccionaron tomando en cuenta el manejo del bosque y del pastizal; el apacentamiento del ganado se realiza mayormente en los espacios abiertos de los sitios con tratamientos silvícolas, utilizando la misma carga animal (16 ha UA⁻¹). El tratamiento silvícola de segundo aclareo con uso del pastizal (2A) consistió de árboles con edades entre 35 y 48 años, eliminando árboles del estrato superior, mal conformados, plagados y enfermos o con alguna característica no deseable, con una superficie de 105.8 ha. El tratamiento de tercer aclareo con uso del pastizal (3A) consistió de árboles entre 49 y 62 años, con arbolado conformado para mejorar el crecimiento y la calidad y cantidad de madera en la siguiente intervención silvícola y con superficie de 129.2 ha. El tratamiento de corta de regeneración con uso del pastizal

(CR) consistió de árboles en una etapa madura con edades mayores de 63 años, donde se extrajo el arbolado, excepto los árboles que producirán la semilla para la regeneración del bosque, con una superficie de 65.8 ha. Debido a que el área de estudio se encuentra bajo manejo silvopastoril, fue seleccionada un área representativa con uso del pastizal y sin vegetación arbórea (PT) para realizar estudios comparativos.

El trabajo de campo se realizó en 1998 y 1999 durante julio y agosto de cada año. Se utilizó un simulador de lluvias por aspersión portátil de boquilla simple (Wilcox *et al.*, 1986) adaptado para pendientes y acceso a las áreas de estudio. Se simuló la lluvia a una altura de 152 cm durante 30 min sobre parcelas circulares de 1 metro de diámetro a una intensidad de 10.47 cm hr^{-1} , previa calibración y considerar los eventos máximos de precipitación registrados, asegurar el exceso de escorrentía y la curva de intensidad duraron frecuencia obtenida para la estación climática “Hacienda Santa Bárbara”, clave 10103. El simulador se abasteció de agua por gravedad. El escurrimiento se recolectó a intervalos de 5 min, con el fin de cuantificar los procesos hidrológicos. El diseño experimental constó de cuatro y seis repeticiones ubicadas al azar en los tratamientos durante 1998 y 1999, respectivamente. El volumen del escurrimiento (cm^3) recolectado se midió y se calculó su tasa de escurrimiento (cm hr^{-1}) considerando el área de la parcela (cm^2). La infiltración (cm hr^{-1}) se calculó por la diferencia entre la intensidad de lluvia aplicada y la tasa de escurrimiento, despreciando el agua interceptada. Del volumen de escurrimiento recolectado en cada periodo de tiempo, se extrajo una muestra de 1 L para ser filtrada en campo, secada en estufa de extracción de aire a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ y pesada en una balanza analítica (precisión 10^{-4} g) para determinar la concentración de sedimentos (g L^{-1}). La erosión superficial (Mg ha^{-1}) se determinó de manera proporcional por la relación del producto de la concentración de sedimentos y el volumen de escurrimiento (L) para cada periodo de tiempo de 5 min, y dividiéndolo entre la superficie de la parcela (ha) (Word *et al.*, 1989).

Con el fin de complementar la información, se estimaron algunas características del suelo y de la vegetación con métodos convencionales. Estas son: humedad del suelo (método gravimétrico), pendiente (clisímetro), densidad aparente (extractor de núcleos),

textura (hidrómetro de Bouyoucos), materia orgánica (titulación), cobertura vegetal (transecto de puntos), biomasa en pie (gravimetría) y variables silvícolas (medición directa) (Tabla 1.1).

Los datos de infiltración, escorrentía y erosión fueron analizados en un análisis de covarianza SAS PROC GLM. Para la infiltración se ajustó preliminarmente el modelo de Kostiakov modificado siguiente:

$$\hat{y} = \alpha x^{\beta_0} + i.c.$$

donde: \hat{y} es el valor estimado de la infiltración, α valor del intercepto, β_0 la pendiente, x el tiempo durante la prueba de simulación de la lluvia, e *i.c.* es la tasa final de infiltración.

Para la tasa de escorrentía superficial y la erosión se ajustó una ecuación de potencia simple, como se describe a continuación:

$$\hat{y} = \alpha x^{\beta_0}$$

donde: \hat{y} es el valor estimado de la tasa de escorrentía, concentración de sedimentos o la tasa de erosión, α valor del intercepto, β_0 la pendiente, x el tiempo de simulación lluvia.

El análisis de covarianza proporciona resultados para las pruebas de hipótesis sobre los parámetros de las ecuaciones en función de los tratamientos. El tiempo de simulación de la lluvia actúa como covariable del modelo. Los dos años de estudio se evaluaron de manera independiente para observar los cambios interanuales en los procesos mencionados. Las variables de suelo y vegetación se relacionaron con los procesos hidrológicos a través del método de regresión múltiple stepwise.

Tabla 1.1. Valores promedio de las características de suelo y vegetación estimadas en los tratamientos silvícolas con uso de pastoreo durante los años 1998 y 1999 en Santa Bárbara, Durango, México.

| Propiedades | 1998 | | | | 1999 | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | 2AC | 3AC | CRC | PTT | 2AC | 3AC | CRC | PTT |
| Humedad del suelo (%) | 25.4 | 24.0 | 19.9 | 30.6 | 22.8 | 24.1 | 22.9 | |
| Pendiente (%) | 6.4 | 16.3 | 8.5 | 5.1 | 5.0 | 7.5 | 7.7 | 5.3 |
| Densidad Aparente (g cm ⁻³) | 1.3 | 1.39 | 1.43 | 1.42 | 1.34 | 1.27 | 1.39 | |
| Arcilla (%) | 26.7 | 21.7 | 22.7 | | 23.5 | 20.2 | 22.8 | |
| Limo (%) | 34.0 | 28.5 | 27.5 | | 31.5 | 28.3 | 31.7 | |
| Arena (%) | 39.3 | 49.8 | 49.8 | | 44.8 | 51.5 | 45.5 | |
| Textura | M | M | MAA | | M | M | M | |
| Materia Orgánica (%) | 4.65 | 2.65 | 3.60 | | 3.82 | 2.90 | 3.30 | |
| Cobertura de gramíneas (%) | 51.8 | 28.8 | 37.3 | 61.5 | 44.8 | 35.5 | 34.2 | 35.6 |
| Cobertura de herbáceas (%) | 12.8 | 15.5 | 44.9 | 20.0 | 13.6 | 13.8 | 24.7 | 38.6 |
| Cobertura de arbustos | 6.8 | 6.8 | 0.3 | 0.1 | 6.0 | 3.2 | 0.5 | 1.3 |
| Cobertura de mantillo (%) | 28.3 | 39.5 | 13.6 | 12.5 | 34.5 | 39.3 | 33.6 | 18.6 |
| Cobertura de microflora (%) | 0.1 | 1.9 | 1.4 | 2.3 | 0.4 | 1.8 | 2.0 | 2.2 |
| Cobertura de pedregosidad (%) | 0.3 | 5.1 | 0.4 | 1.0 | 0.3 | 2.5 | 1.4 | 1.5 |
| Cobertura de rocas (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.0 |
| Suelo desnudo (%) | 0.1 | 2.5 | 2.3 | 2.6 | 0.7 | 3.8 | 3.7 | 2.2 |
| Peso seco de gramíneas (g m ⁻²) | 89.0 | 29.4 | 46.3 | | 74.6 | 27.6 | 23.3 | |
| Peso seco de herbáceas (g m ⁻²) | 3.3 | 15.5 | 38.4 | | 10.4 | 14.2 | 10.0 | |
| Peso seco de arbustos (g m ⁻²) | 10.2 | 21.8 | 0.4 | | 5.8 | 4.4 | 3.0 | |
| Peso seco de mantillo (g m ⁻²) | 755.1 | 446.2 | 335.2 | | 339.4 | 218.1 | 317.1 | |
| Peso seco biomasa total (g m ⁻²) | 857.6 | 512.9 | 420.3 | | 430.2 | 264.3 | 353.4 | |
| Densidad de pinos (ind ha ⁻¹) | 150 | 88 | 43 | 2.5 | 173 | 197 | 53 | 0 |
| Diámetro promedio de pinos (m) | 0.24 | 0.25 | 0.34 | 0.5 | 0.22 | 0.19 | 0.35 | 0 |
| Área basal (m ² ha ⁻¹) | 8.1 | 4.5 | 4.4 | 0.001 | 7.9 | 6.9 | 5.4 | 0 |
| Densidad de renuevos (ind ha ⁻¹) | 238 | 370 | 30 | 23 | 283 | 315 | 62 | 37 |
| Densidad de encinos (ind ha ⁻¹) | 130 | 200 | 50 | 5 | 183 | 88 | 58 | 30 |
| Densidad de tascate (ind ha ⁻¹)* | 0 | 20 | 0 | 5 | 5 | 20 | 0 | 0 |
| Densidad de madroño (ind ha ⁻¹)* | 0 | 230 | 0 | 0 | 0 | 38 | 0 | 0 |
| Densidad de acacia (ind ha ⁻¹)* | 0 | 170 | 0 | 0 | 0 | 32 | 7 | 0 |
| Densidad de arbustos (ind ha ⁻¹)* | 33 | 155 | 13 | 3 | 31 | 30 | 11 | 0 |
| Profundidad (m) | | | | | 0.93 | 0.61 | 0.54 | 0.52 |

*Encino - *Quercus* spp, tascate *Juniperus* sp, madroño *Arbutus* sp y acacia *Acacia* sp

Resultados y Discusión

Los resultados de los valores acumulados totales promedio de las pruebas de infiltración, escorrentía, concentración de sedimentos y la tasa de erosión se presentan en la Tabla 1.2. En el primer año se observó que los pastizales produjeron las mayores tasas de escorrentía y erosión y la tasa menor de infiltración. La mayor concentración de sedimentos se observó en áreas tratadas con segundo aclareo (2A). Sin embargo, estas áreas no registraron las mayores tasas erosivas por sus bajos valores de escorrentía, lo cual es retenido por la cobertura vegetal asociada y que protege al suelo de la suspensión y arrastre de las partículas.

Tabla 1.2. Valores acumulados totales promedio medidos después de 30 min de las pruebas de infiltración, escorrentía, concentración de sedimentos y erosión en sitios forestales de la Sierra Madre Occidental de Durango, México.

| Año | Tratamiento | Escurrimien (cm h ⁻¹) | Infiltración (cm h ⁻¹) | Sedimentos (g l ⁻¹) | Erosión (ton ha ⁻¹) |
|------|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1998 | Segundo aclareo | 37.52 a | 213.69 a | 2.55 a | 38.72 a |
| | Tercer aclareo | 106.88 bc | 144.33 bc | 2.16 ab | 122.59 b |
| | Corta Regeneración | 92.88 ab | 158.33 ab | 1.60 b | 134.54 bc |
| | Pastizal | 155.91 c | 95.30 c | 2.45 a | 208.68 c |
| 1999 | Segundo aclareo | 120.84 a | 255.97 a | 1.19 a | 27.18 a |
| | Tercer aclareo | 109.17 ab | 267.64 a | 1.79 ab | 113.06 bc |
| | Corta Regeneración | 133.12 b | 243.69 a | 1.33 ab | 63.20 ab |
| | Pastizal | 217.68 c | 147.77 b | 2.12 b | 121.48 c |

Para el segundo año, las tendencias fueron similares, aunque en general la sedimentación disminuyó entre 13 y 50%, mientras que la escorrentía disminuyó y la infiltración incrementó en casi 150%, y la tasa erosiva se redujo en hasta 53%. Los valores de la tasa erosiva se disminuyeron en mayor grado en la corta de regeneración y en el pastizal. Lo anterior se debe a la recuperación en vegetación, tanto asociada, como la protectora, del suelo (Abeli y Sawe, 1999; Návar y Synnot, 2000; Croke *et al.*, 2001).

El análisis de covarianza mostró que, en 1998, el escurrimiento superficial fue estadísticamente mayor ($P = 0.0001$) en el pastizal que en el rodal tratado con un segundo aclareo (2A). Los rodales tratados con tercer aclareo (3A) y corta de

regeneración (CR) tuvieron menores tasas de escurrimiento que el pastizal (PT), aunque no estadísticamente significantes.

En los valores promedio de la tasa de escurrimiento en el segundo año (Figura 1.1), los rodales tratados con CR y PT se recuperaron en cuanto al flujo superficial y se aproximaron más a los Tratamientos 2A y 3A, aunque el PT continuó siendo estadísticamente diferente al Tratamiento 2A ($P = 0.0001$).

En 1998, los valores promedio de la tasa de infiltración fue estadísticamente mayor ($P = 0.0001$) en el rodal 2A que el pastizal. Los sitios tratados con 3A y CR también tuvieron mayores tasas de infiltración que PT, pero sin tener diferencias estadísticas. En 1999, los rodales tratados con 3A y CR tuvieron una infiltración comparable al año anterior (Figura 1.2) y similar al del tratamiento de 2A ($P = 0.21$) comparable con el sitio PT, el cual continuó teniendo la menor infiltración ($P = 0.0001$).

En 1998, la erosión superficial fue estadísticamente mayor ($P = 0.0028$) en el pastizal que el Rodal 2A, aunque no al inicio en los primeros minutos. Los rodales tratados con 3A y CR mostraron menor pérdida de suelo que el sitio PT, aunque no son estadísticamente diferentes. En el segundo año de evaluación, los Rodales 2A y PT difirieron significativamente ($P = 0.0026$) en su relación dinámica con el tiempo (covariable) ($P = 0.0486$) pero no al inicio en los primeros minutos ($P = 0.1179$). Los sitios silvícolas 3A y CR no difirieron estadísticamente ($P = 0.4693$) y fueron semejantes al sitio de PT [($P = 0.273$ y $P = 0.174$, respectivamente) (Figura 1.3)].

En forma generalizada, el sitio del pastizal exhibió los mayores valores, siendo más significativas sus diferencias en escurrimiento, infiltración y erosión superficial con respecto a los rodales con segundo aclareo, tercer aclareo y corta de regeneración.

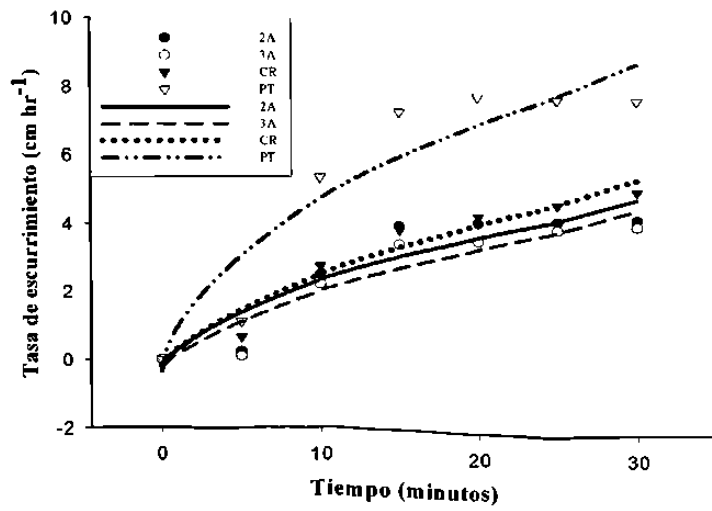


Figura 1.1. Tasa de escurrimiento (cm hr⁻¹) en tratamientos silvícolas con uso del pastizal en 1999.

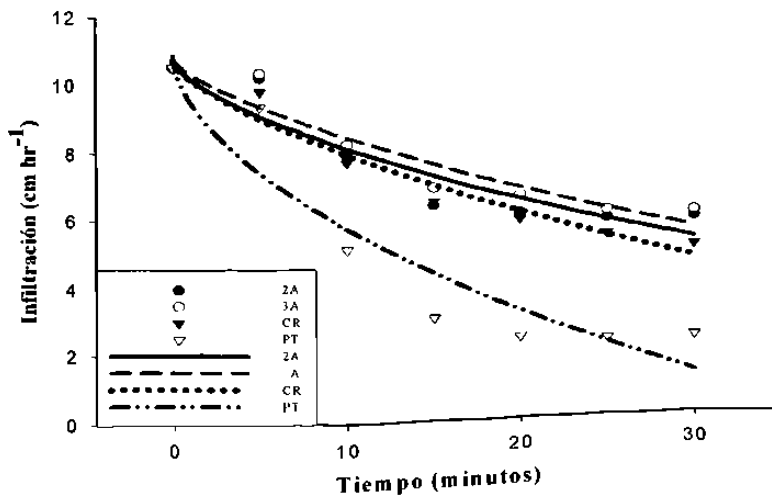


Figura 1.2. Infiltración (cm hr⁻¹) en tratamientos silvícolas con uso del pastizal en 1999.

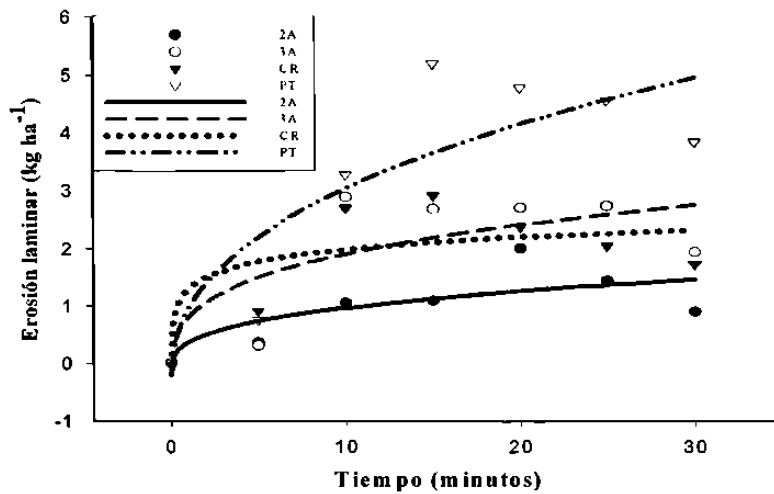


Figura 1.3. Erosión laminar (kg ha^{-1}) en tratamientos silvícolas con uso del pastizal en 1999.

En esta investigación, se observan efectos de las variaciones interanuales en los tratamientos silvícolas a los procesos hidrológico-erosivos. La variación temporal pudo haber sido explicada por las condiciones meteorológicas de un año a otro, como puede ser la precipitación anual y las tormentas de alta intensidad que se presentan en estas zonas de manera recurrente, cuales producen diferentes grados de degradación o desgaste del suelo en los tratamientos silvícolas, como se observó en los parámetros hidrológico-erosivos en los dos años consecutivos. Otros factores asociados con el tiempo pueden deberse al lavado del suelo disgregado por el disturbio durante el primer año y este fue un factor limitativo para el segundo año para su recuperación, como se observa en la mayoría de los tratamientos. Croke *et al.* (2001) señalaron que los sitios forestales australianos se recuperan a las condiciones iniciales antes del aprovechamiento después de cinco años de haber sido intervenidos. Startsev y McNabb (2000) observaron que este efecto mismo efecto de recuperación de la superficie del suelo después de tres años en bosques boreales canadienses.

Las características de suelo y vegetación en los sitios de estudio en ambos años de estudio (Tabla 1.1) relacionadas positivamente con los procesos hidrológicos fueron referidas a la cobertura vegetal y biomasa de gramíneas, herbáceas y mantillo y, de

forma inversa, al suelo desnudo. Es probable que, en los sitios con altas tasas de infiltración, bajas tasas de escurrimiento y menor erosión, los efectos negativos debido a la densidad aparente (aun cuando presenta valores altos), la textura y la materia orgánica sean minimizados con la protección del suelo por vegetación y el mantillo (Spaeth *et al.*, 1996; Zang y Zang, 1999). Las variables silvícolas de mayor influencia fueron la densidad de arbustos y renuevos. Esto se atribuye a su presencia después del aprovechamiento forestal y el pastoreo continuo en el área. Además, es de considerar el tiempo posterior a las actividades del uso forestal-pecuario que el bosque ha recobrado sus condiciones hidrológicas.

Las áreas silvícolas y de pastizal no muestran interacción entre tratamientos, dada su diferenciación estadística desde la intercepta y las pendientes, esto es, que desde el inicio y su tendencia de los valores de los procesos a través del tiempo no muestran semejanza estadística. Esta diferencia parece estar asociada con el tipo de cobertura y con el tipo de disturbio en el bosque y en el pastizal. Es decir, los efectos de perturbación del suelo son diferentes en los tipos de cobertura y los efectos del pisoteo por el ganado son, en general, amortiguados por el mantillo orgánico que se presenta en los bosques. En este sentido, Zang y Zhang (1999) mencionan que la hojarasca de diferentes especies (coníferas y latifoliadas) mejora las condiciones del suelo para la infiltración y reduce el escurrimiento y la erodabilidad del suelo al absorber la energía de la lluvia, de igual manera, absorbe la energía del pisoteo.

El efecto del pastoreo en agostaderos cercanos a bosques de coníferas fue estudiado por Wood *et al.* (1989). Estos investigadores observaron que los tratamientos silvícolas extensivos y sin pastorear la infiltración fue más alta y la erosión fue menor que en las áreas con silvicultura intensiva o con pastoreo. Esto se atribuyó a la exposición del suelo desnudo causado por la remoción y perturbación de la vegetación y del suelo en los sitios con mayor extracción de madera y en las áreas de pastizal por el apacentamiento de ganado bovino; a la remoción del mantillo y de la cobertura de biomasa total de la vegetación en los tratamientos silvícolas intensivos; y a la remoción de la cobertura y biomasa de zacates en los tratamientos pastoreados.

La erosión superficial mostrada en los sitios silvícolas de ambos años se reduce durante el segundo año. Esto puede atribuirse a la recuperación de la cobertura vegetal en los tratamientos que protegen al suelo del efecto de las gotas de lluvia y a la remoción de partículas de suelo. En contraste con el área de pastizal que, a través de los años, es sometido al uso pecuario, a los efectos del pisoteo y a la remoción de partículas que desprende suelo y que son lavadas con el flujo superficial, lo cual concuerda con lo señalado por Belsky y Blumenthal (1997), Abeli y Sawe (1999) y Bellenger (2001). Además, esta menor erosión está relacionada con la recuperación que exhibió la tasa de escurrimiento y su asociación directa al flujo de sedimentos en el escurrimiento colectada en los sitios de estudio.

Conclusiones

Los suelos que pasan de uso forestal a uso pecuario poseen las características de incrementar la escorrentía superficial, la erosión del suelo y reducir la capacidad de infiltración en contraste con los suelos forestales sujetos a aclareos o cortas de regeneración. Los tratamientos tercer aclareo y corta de regeneración mostraron tasas de infiltración bajas y tasas altas de erosión y escorrentía superficial en contraste con el segundo aclareo pero solo para el año inmediatamente después del disturbio forestal. Para el segundo año, las variables hidrológicas y la erosión fueron similares en los suelos con diferentes tratamientos silvícolas. Éstas fueron diferentes que aquellas de los suelos dedicados a ganadería. Las actividades silvícolas, aunque solo modifican temporalmente la capacidad de infiltración, escorrentía y erosión de los suelos, deberían de ejecutarse, además se deben realizar las prácticas de conservación de suelo y agua necesarias inmediatamente después de la aplicación del aclareo. Los cambios de uso del suelo de forestales a ganaderos podrían alterar significativamente el régimen hidrológico y la erosión en las cuencas forestales con repercusiones en la recarga de los mantos acuíferos y la regulación del ciclo hidrológico. En los pastizales dentro de los bosques, se recomienda aplicar las cargas animales adecuadas al sitio, como el reducir 50% la

carga animal en sitios con uso combinado, para evitar sobrepastoreo y compactación del suelo, lo cual se ha demostrado en diversos estudios en áreas forestales con ganado.

Literatura Citada

- Abeli, W. S. y C. T. Sawe. 1999. The influence of logging and animal grazing on the litter layer and water infiltration rate of soils in plantation forests. *Journal of Tropical Forest Science*. 11: 438-445.
- Arifeen, S. Z. y A. K. Chaudhry. 1998. Effect of different land uses on surface runoff and sediment yield in moist temperate zone. *Pakistan Journal of Forestry*. 48: 97-101.
- Baharuddin, K., A. M. Mokhtaruddin y M. Nik-Muhamad. 1996. Effects of logging on soil physical properties in Peninsular Malaysia. *Land-Husbandry*. 1: 33-41
- Ballenger, C. 2001. The impact of grazing on soil physical properties in sandy open woodland, Central Australia. *Technical-Bulletin -Department-of-Primary-Industry-and-Fisheries, Northern Territory of Australia*. No. 289. 17 pp.
- Belsky, A. J. y D. M. Blumenthal. 1997. Effects of livestock grazing on stand dynamics and soils in upland forests of the interior west. *Conservation-Biology*. 11: 315-327.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976. Presa Guadalupe Victoria. Carta de Uso del Suelo. 1:50000. F13B11. Secretaría de la Presidencia. México, D F. México.
- Croke, J., P. Hairsine, P. Fogarty and, R. T. Brooks. 2001. Soil recovery from track construction and harvesting changes in surface infiltration, erosion and delivery rates with time. *Forest Ecology and Management*. 143: 3-12.
- Ge, S., S. G. McNulty, P. Shepard, D. M. Amatya, H. Riekerk, N. B. Comerford, W. Skaggs y L. Swift. 2001. Effects of timber management on hydrology of wetland forest in the southern United States. *Forest Ecology Management*. 143: 227-236.
- Hewlett, J. D. 1982. Principles of forest hydrology. University of Georgia Press. Athens, GA. USA. 183 p.
- Huang, M. D. 1998. Forest grazing match to silvicultural system. *Journal of Animal Industry Research*. 4: 21-26.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2004. Anuario estadístico del estado de Durango. INEGI-Gobierno del estado de Durango. Aguascalientes, México.
- Luo, X. P., Z. P. Jiang, W. F. Xiao and, D. H. Zhang. 1999. Forest grazing for sustainable forest management in arid zones. *World Forestry Research*. 12: 29-33.
- Navar, J. y T. J. Synnott. 2000. Soil infiltration and land use in Linares, N. L., Mexico. *Terra* 18: 255-262.
- Spaeth, K. E., T. L. Thurow, W. H. Blackburn y F. B. Pierson. 1996. Ecological dynamics and management effects on rangelands hydrologic processes. pp. 25-51. *In: Spaeth, K. E., F. B. Pierson, M. A. Weltz y R. G. Hendricks. Society for Range Management. Denver, CO. USA.*
- Spurr, S. H. y B. V. Barnes. 1982. *Ecología forestal*. AGT Editor. Mexico, D. F. 690 p.
- Startsev, A. D. y D. H. McNabb. 2000. Effects of skidding on forest soil infiltration in west-central Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*. 80(4):617-624.
- Wilcox, B. P., M. K. Wood, J. M. Tromble y T. J. Ward. 1986. A hand portable single nozzle rainfall simulator designed for use on steep slopes. *Journal of Range Management*. 39: 375-379.
- Wood, J. C., W. H. Blackburn, H. A. Pearson y T. K. Hunter. 1989. Infiltration and runoff water quality response to silvicultural and grazing treatments on a longleaf pine forest. *Journal of Range Management*. 42: 378-381.
- Yates, C. J., D. A. Norton y R. J. Hobbs. 2000. Grazing effects on plant cover, soil and microclimate in fragmented woodlands in south-western Australia: implications for restoration. *Australian Ecology*. 25: 36-47.
- Zang, T. L. and, J. C. Zhang. 1999. Function of forest litter in soil and water conservation. *Journal of Nanjing Forestry University*. 23: 81-84.

Estimación de la Frecuencia y Magnitud de los Esgurrimientos Superficiales en Bosques de Coníferas del Estado de Durango.

Introducción

Esta investigación esta enfocada a determinar si se presenta el escurrimiento superficial en los suelos de los ecosistemas forestales de Durango, México. Bajo condiciones naturales y sin disturbio antropogénico, los suelos de los bosques de coníferas no presentan escurrimientos superficiales (Satterlund y Adams, 1992). La lluvia se infiltra en el suelo a tasas muy altas y transita hacia los cauces vía subsuperficial y subterránea. El movimiento del agua desde dentro del suelo hacia los cauces se ha explicado por el concepto del área variable. Este mecanismo aun continua debatiéndose en numerosos estudios científicos (McDonnell, 2003). Este concepto se fundamenta en la ausencia del escurrimiento Hortoniano (Dunne y Leopold, 1978). Establece que hay un área de recarga, dinámica y de saturación donde el flujo de agua proveniente de la precipitación abastece los mantos freáticos, el flujo en los cauces y la humedad del suelo (Harr, 1976; Dunne y Leopold, 1978; Satterlund y Adams, 1992). En las cuencas altas, los arroyos responden rápido a la precipitación, aun en ausencia de escurrimiento superficial, debido al flujo por desplazamiento. Esto se explica por el agua entrante que desplaza al agua encontrada en el suelo. El agua antecedente desplazada emerge como escurrimiento subsuperficial (McDonnell, 2003) desplazada por varios mecanismos, donde las estructuras porosas o macroporos activos juegan un papel importante (Satterlund y Adams, 1992; Nívar *et al.*, 1995; 1996). A pesar de la evidencia del movimiento del flujo subsuperficial que sigue varias direcciones en el suelo (McDonnell, 2003), existen pocos estudios para entender las variaciones espaciales que controlan el movimiento rápido del agua dentro del suelo. Dunkerly (2002) encontró que la infiltración se reduce rápidamente en un patrón radial alrededor del fuste y entre sus espacios, y es explicada en una función de potencia. El presente estudio tuvo por objetivos: a) medir las tasas de infiltración, b) ajustar ecuaciones de proyección de la infiltración, c) predecir la tasa de infiltración final. d) ajustar la distribución probabilística Log normal a la tasa final de

infiltración, d) desarrollar las curvas de intensidad-duración-frecuencia a las precipitaciones diarias de la estación climática de referencia, y e) determinar la frecuencia y magnitud de escorrentía superficial que se producirá a partir de lluvias máximas con periodos de retorno o frecuencias establecidas.

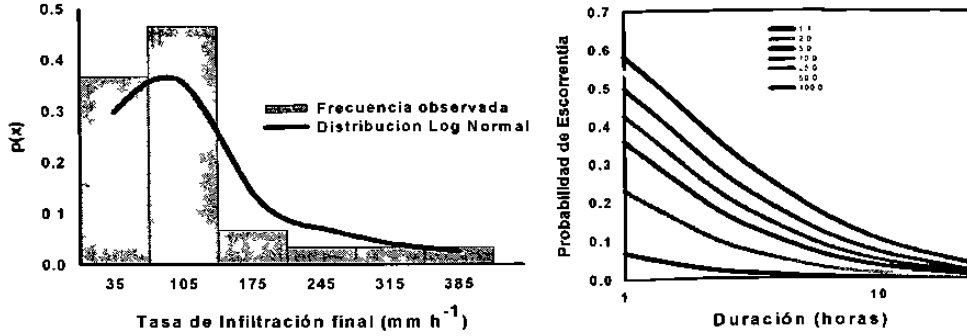
Materiales y Métodos

Este estudio se realizó en los meses de enero a abril del año 2004 en sitios con aprovechamiento forestal de la región montañosa del sur-suroeste del estado de Durango, México. La infiltración se midió en ocho localidades: Los Bancos, La Escondida, El Quemado y La Victoria, en el municipio de Pueblo Nuevo; y Cielito Azul, Casa Blanca y Mesa del Burro, del municipio de San Dimas, Durango. El clima que presenta el área es semifrío subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 11.1 °C y una precipitación promedio anual de 887.4 mm. El suelo que predomina es Regosol dístico. La vegetación está dominada por bosques de pino-encino. Se realizan aprovechamientos maderables por diversos métodos dentro de los cuales predomina el método de desarrollo silvícola. Para medir las tasas de infiltración se construyeron cuatro simuladores de lluvia portátiles de boquilla simple (Wilcox *et al.*, 1986), aplicando intensidades diferenciales dadas por las presiones diferenciales del sistema de bombeo. Se aplicó lluvia durante 40 minutos sobre 32 microparcels de 0.1444 m² de superficie. Se midió la escorrentía y la precipitación en intervalos de cada cinco minutos y la diferencia entre estos dos componentes generó la infiltración por unidad de tiempo. Se ajustaron los modelos de infiltración de Green and Ampt, $i=ic+b/I$, Kostiakov modificado, $i=Bt^{-n}+ic$, Horton, $i=(i_0-ic)e^{-kt}+ic$, y Philip, $i=ic+s/2t^{1/2}$, donde b , B , n , k y s son constantes de los modelos, ic es la infiltración final, i_0 es la infiltración inicial, I es la infiltración acumulada, y t es el tiempo (Hillel, 1982; Návar y Synnott, 2000) Solo dos constantes fueron estimadas usando regresión no lineal para realizar las comparaciones apropiadas entre las cuatro ecuaciones. además, se utilizó el coeficiente de determinación, el error estándar y el coeficiente de variación para seleccionar la mejor ajuste de ecuación. El parámetro i_0 se estimó con el modelo de Philip a 40 minutos y se corrieron análisis de varianza para determinar las principales fuentes de variación

sobre este parámetro. Se ajustó la distribución Log normal a los valores de i_0 , estimados por la mejor ecuación de ajuste de infiltración, cuya función matemática es: $p_x(i_0) = (1/(\sqrt{2\pi} \sigma_x^2 i_0^2)) * (e^{-(y_i - \bar{y})^2 / (2\sigma_y^2)})$ (Haan, 1977). Las curvas IDF para las estaciones climáticas de la región con registros de 20 años o más, se estimaron a partir de los datos de las lluvias máximas registradas en 24 horas, aplicando la distribución de valores extremos, cuya ecuación es: $f(x) = q(e^{-q(x-w)} - e^{-q(x-w)})$, donde $q = \pi/\sigma\sqrt{6}$, y $w = x - 0.5572/q$ (Haan, 1977).

Resultados y Discusión

Los valores promedio, desviación estándar e intervalos de confianza de la tasa final de infiltración fueron 12.7 cm hr^{-1} , 86.99 y 3.06 cm hr^{-1} , respectivamente. Al observar los parámetros de ajuste de los modelos de infiltración se encontró que el modelo de mejor ajuste fue el de Philip ($r^2 = 0.75$, $s_x = 4.62$ y $CV = 0.22$). La infiltración final modelada no tuvo diferencias estadísticamente significativas entre localidades, posición e intensidad. Esto es, se presenta una alta variación espacial en la infiltración final. La distribución Log normal mostró que la tasa final estimada en el estudio se distribuye en un 83 % en un rango de 0.18 a 13.5 cmhr^{-1} . La resta de los valores de intensidad a las infiltraciones finales muestran las curvas de IDF para la presencia de escurrimientos superficiales indicando que eventos máximos puede exceder la entrada de agua al suelo con frecuencia anual, con probabilidades de presencia desde un 6.9 hasta un 11%. La probabilidad de la presencia de escurrimientos aumenta desde un 6.9 hasta 62% con lluvias con una frecuencia de 1 en cada 100 años. En periodos bianuales, las lluvias producirán escorrentía superficial en el 30% de la superficie estudiada.



Figuras 2.1 y 2.2. La distribución Log normal ajustada a las tasas de infiltración modelada por la ecuación de Philip y las curvas de probabilidad de escorrentía-duración-frecuencia para los suelos forestales del sur, sudoeste de Durango, México.

Conclusiones

Los suelos forestales de la región sur sudoeste presentan disturbios importantes al demostrar matemáticamente y con mediciones de campo que se presentan escurrimientos superficiales. Este disturbio debe de ser controlado con la finalidad de facilitar la entrada del agua al suelo, facilitar la recarga de acuíferos someros, regular el ciclo hidrológico, mantener la perennialidad del agua en los cauces, y proveer con este servicio ambiental a los pobladores de las partes bajas de las cuencas forestales.

Literatura Citada

- Dunkerly, D L. 2002. Infiltration rates and soil moisture in grove mulga community near Alice Springs. Arid Central Australia: evidence for complex internal rain water redistribution in a runoff-run on landscape. *Journal of Arid Environments*. 51: 199-219.
- Dunne, T. y L. B. Leopold. 1978. *Water in environmental planning*. W. H. Freeman and Company. New York, USA. 818 p.
- Haan, C. T. 1977. *Statistical Methods in hydrology*. The Iowa State University Press. USA. 378 p.

- Harr, R. D. 1976. Hydrology of small forest streams in western Oregon. General Technical Report PNW-55. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Portland, Oregon. USA. 15 p.
- Hewlett, J. D. 1981. Principles of forest hydrology. Second edition. Universidad of Georgia Press., USA. 183 p.
- Hillel, D. 1982. Introduction to soil physics. Second edition. Academic Press, Inc. USA. 364 p.
- McDonnell, J. J. 2003. Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. *Hydrological Processes*. 17: 1869-1875.
- Navar, J., E. Miller y D. Turton. 1996. Subsurface flow generation in an experimental forest plot in the Ouachita Mountains of Arkansas. *Geofisica International*. 35: 595-605.
- Navar, J. and Synnott, T. 2000. Soil infiltration and land use in northeastern Mexico. *Terra* 18: 255-262.
- Navar, J., Turton, D. y E. Miller. 1995. Estimating macropore and matrix flow using the hydrograph separation procedure in an experimental forest plot. *Hydrological Processes* 9: 743-753.
- Satterlund, D. R. y P. W. Adams. 1992. Wildland watershed management. Second edition. John Wiley and Sons, Inc. USA. 436 p.
- Wilcox, B. P., M. K. Wood, J. M. Tromble y T. J. Ward. 1986. A hand portable single nozzle rainfall simulator designed for use on steep slopes. *Journal of Range Management*. 39: 375-379.

Probabilidad del Escurrimiento Superficial en Ecosistemas Forestales del Estado de Durango, México.

Resumen

Se estudió el efecto de los ecosistemas de bosque templado sobre la infiltración final y la escorrentía superficial; también, se generaron curvas de probabilidad de excedencia del escurrimiento superficial a partir de las curvas intensidad, duración y frecuencia (IDF) de precipitación de las estaciones climáticas, en la región montañosa del sur-suroeste del Estado de Durango, México. Estos procesos hidrológicos se evaluaron de enero a abril de 2004, con el uso de cuatro simuladores de lluvia portátiles, aplicando diferente intensidad de precipitación dentro y fuera del dosel del arbolado, durante 40 minutos sobre microparcels de 0.1444 m². El procedimiento anterior se realizó en 30 localidades, para evaluar los procesos descritos. Los componentes hidrológicos medidos están en función de los parámetros de la infiltración constante durante el tiempo de simulación, por esta razón se utilizó un análisis de varianza sobre las constantes de las ecuaciones de Green y Amp, Kostiakov modificada, Horton y Philip y se ajustó el mejor modelo a los datos. El análisis de precipitación para las curvas de IDF se obtuvo de estaciones meteorológicas con información de más de 20 años, ubicadas en la zona de estudio. Se usó la distribución de valores extremos (Haan, 1977) para obtener la probabilidad del ajuste de los datos para aplicar el método de intensidad de períodos de retorno (Aparicio, 2005), y así estimar las curvas de IDF. La excedencia de escorrentía se determinó al estandarizar, con la distribución Log normal, las constantes de la infiltración final y los valores de IDF. Los resultados muestran que aún con diferente intensidad de lluvia dentro y fuera del dosel del bosque, no se encontraron diferencias estadísticas en la tasa final de infiltración. La cantidad de escorrentía superficial determinada para los diferentes tiempos en intensidades máximas de una hora, muestra que los valores escurridos variaron de 6 a 18% anualmente en lluvias de una hora, y cada 25 años se producirán escurrimientos con mas del 50% de eventos que rebasan la tasa final de infiltración. La entrada de agua al suelo no tiene diferencias notables para la

región de Pueblo Nuevo y San Dimas, Durango, siendo similar en cualquier posición que se evalúe e intensidad de lluvia que se aplique, para determinar la tasa de infiltración final del suelo., Existen pocas referencias en la literatura que señalen las excedencias en IDF del escurrimiento superficial, por esto la generación de la presente información permitirá normar y reglamentar las actividades del manejo forestal, evitar el disturbio y degradación de los ecosistemas forestales, incrementar la infraestructura y prácticas de conservación de suelo para la recarga de agua y abastecimiento perenne del flujo de agua en los cauces de arroyos y ríos de las cuencas forestales en las diferentes regiones del Estado de Durango.

Palabras Clave: Hidrología Forestal, Escorrentía Superficial, Erosión de Suelos.

Abstract

The impact of temperate forest ecosystems on final infiltration and superficial runoff was studied. Also, probability curves of excess runoff, based upon curves of intensity, length, and frequency of precipitation were calculated using data from climatic stations from the south and south-east mountainous region of the state of Durango, Mexico. These hydrological processes were evaluated from January to April 2004, using four portable rain simulators, applying different rainfall intensities inside and outside of the forest canopy, during 40 minutes, on 0.1444 m² micro paddocks. This procedure was carried out in 30 locations in order to evaluate the described processes. The hydrologic components measured are functions of the parameters of the constant infiltration during the simulation event, for this reason, an analysis of variance was carried out on the Green and Amp, modified Kostiaikov, and Horton y Philip equation constants, and a model that best fitted the data was chosen. The precipitation analysis for the IDF curves was based on information obtained from data collected from climatic stations (records of more than 20 year), distributed in the study area. The extreme values distribution (Haan 1977) was used to obtain the adjustment probability of data, in order to apply the intensity of periods of returns (Aparicio 2005) to estimate the IDF curves. The excess of runoff was determined by standardizing, with the normal Log distribution, the constants

of the final infiltration and the values of IDF. The results showed that, even with different rainfall intensities inside and outside the forest canopy, there were no statistical differences in final infiltration rates between the inside and outside forest canopy. The superficial runoff for different times with maximum intensities of one-hour, showed that the runoff values ranged from 6 to 18% annually with one-hour-rain, and it would be expected that runoffs exceeding the final infiltration rates would occur in 50% of the events, every 25 years. Water penetration into the ground, which was reflected in final infiltration rate, did not differ between Pueblo Nuevo and San Dimas, Durango, regardless of position of water application or intensity of rain. There are few studies on excess of IDF in superficial runoff; thus, the information generated in the present study provides insights to norm forest activity, and to avoid disturb and degradation of forest ecosystems. This data also will allow planning of infrastructure and management practices for soil conservation and ground-water recharge, as well as the perennial flux of water in creeks and rivers in forest basins in different areas of the State of Durango.

Key word: Forest hydrology, superficial runoff, soil erosion.

Introducción

Los ecosistemas naturales del sistema montañoso mexicano son caracterizados por la riqueza forestal de sus recursos naturales, condiciones climáticas y geológicas diversas. La Sierra Madre Occidental del estado de Durango, México, es una zona forestal comercialmente importante que esta sometida a la extracción de madera desde hace varias décadas. La superficie forestal del estado de Durango ocupa el 46.56 % de su territorio. Por su vocación forestal, la actividad principal es la extracción de madera comercial. Además de la riqueza de su paisaje y recursos naturales y minerales, las aguas superficiales de sus cuencas son derivadas a importantes zonas agrícolas y posteriormente a la vertiente del Pacífico por los estados de Sinaloa y Nayarit y a la vertiente interior del estado de Coahuila.

El manejo de las tierras forestales de México requiere de la atención en la toma de decisiones de considerar su manejo económicamente viable y ecológica y socialmente responsable (Thoms y Betters, 1997). Dentro de las funciones ecológicas, la regulación del ciclo hidrológico se convierte en un tema central de importancia presente y futura. Por esta razón, estas zonas sometidas al aprovechamiento forestal han tenido gran atención en los últimos años dado que se tiene la percepción del cambio hidrológico por la extracción de recursos maderables y no maderables. Es decir, se percibe que la continuidad en los aprovechamientos de estos ecosistemas esta influyendo en la disminución de la recarga de acuíferos, la producción de agua en los cauces y en general en la distribución del agua en los componentes del balance hidrológico de las cuencas.

A este respecto, existe evidencia científica de las interacciones en las áreas del balance hidrológico y el aprovechamiento de los recursos maderables. Desde el punto de vista ecológico en la conservación del suelo y agua, el manejo y las actividades de extracción de recursos en ambientes forestales son cuestionados por la intensidad en el aprovechamiento y las operaciones de extracción; actividades que reducen la vegetación forestal, disturba y expone el suelo superficial a los efectos de las lluvias, altera y modifica las propiedades del suelo, reduce la infiltrabilidad, incrementa y remueve las partículas del suelo disponibles por los escurrimientos que ocasionan la pérdida de suelo por erosión. Otras actividades forestales como son el tráfico de vehículos, el arrastre de la trocería o cosecha de productos, las maniobras de carga y transporte, la falta de planeación y construcción de caminos y la remoción del suelo superficial son efectos negativos que reducen las tasas de infiltración e incrementan los escurrimientos superficiales y pérdida de suelo (Baharuddin *et al.*, 1996; Winn y Putz, 1996; Mamad-Farid y Putz, 1996; Croke *et al.*, 2001).

Efectos por manejo forestal y cambios de uso del suelo forestal a agricultura o ganadería en sitios no propios, modifican la circulación natural del agua en los procesos de escurrimiento superficial e infiltración. Ramírez-Marcial *et al.* (2001) encontraron que en bosques de *Quercus-Podocarpus*, *Pinus-Quercus-Liquidambar* y de *Pinus* en Chiapas los escurrimientos superficiales se relaciona con las especies con dosel y de crecimiento

asociado, la densidad y área basal de árboles y la intensidad de los disturbios antropogénicos (por extracción de madera, pastoreo de bovinos e incendios forestales) en un 62% de los sitios; mientras los incendios modifican la humedad del suelo por el incremento de la evaporación del suelo y la disminución de la transpiración desde la zona de las raíces, la reducción de biomasa en pie y el incremento de agua libre sin interceptar y afectan más a los escurrimientos subsuperficiales y profundos. Soto y Díaz-Fierro (1997) concluyen que la deforestación afecta la hidrología de los escurrimientos más que al proceso de interceptación. Efectos son similares cuando se ha estudiado los aclareos en bosques de coníferas y en la correlación de área foliar y cobertura forestal. En los ecosistemas en situaciones de estrés, son dominados por variables climáticas, al igual que por diferencias fisiológicas de las especies en el uso de la extracción de la humedad del suelo, debido a la diferentes respuestas al estrés de árboles y zacates en la que coexisten en los ecosistemas. En sitios con suelos forestales con alto contenido de arena y arcilla y una vegetación leñosa de 4.5 m de altura, la infiltración se reduce rápidamente en un patrón radial al alejarse del tallo o fuste y entre los espacios de la vegetación, siguiendo una función de potencia en su mejor ajuste que un exponencial o logarítmico (Dunkerly, 2002). En el presente estudio, los objetivos planteados fueron ajustar cuatro modelos no lineales a las estimaciones de infiltración por efecto del árbol y la degradación de los sitios de estudio y determinar la cantidad de escorrentía superficial que se producirá a partir de eventos de lluvia con diferente intensidad, duración y frecuencia.

Listera *et al.* (2004) al evaluar la efectividad de recuperación de suelos con *Pinus taeda* por la preparación del terreno después de tres clases de disturbio de los suelos (sin disturbar, compactación por tráfico y disturbado) encontraron que los suelos compactados incrementaron su densidad aparente (14%) y disminuyeron la macroporosidad (25%) y la conductividad hidráulica (69%) en relación a los sitios sin disturbio. Los sitios disturbados o removidos no tuvieron efectos significantes en las propiedades señaladas.

Existe evidencia que la baja cobertura vegetal y la presión del apacentamiento disminuyen la entrada de agua al suelo, lo que permite que se presenten los escurrimientos. Cerda *et al.* (1998) al estudiar la respuesta hidrológica en dehesas de Extremadura, España, encontraron reducciones del 40 al 70% (aplicando 53.6 cm hr^{-1} , igual a un periodo de retorno de 10 años) de la tasa de infiltración de las lluvias simuladas bajo cobertura de encinos y sitios con pastoreo intensivo. La presencia de escurrimientos superficiales se encontró en respuesta al contenido de humedad inicial (2 a 8%) (Ceballos y Schnabel, 1998; Cerda *et al.*, 1998), las propiedades del suelo, la cobertura del mantillo y la presencia del pastoreo. Los encharcamientos superficiales se presentaron después de 3 min 2 seg bajo dosel de encinos, en los demás sitios promedio de 5 min 22 seg hasta 7 min 30 seg, empezando a escurrir después de 1 a 2 min en promedio en los sitios. La respuesta para empezar a escurrir solamente requirió una precipitación de 3.8 mm bajo dosel de encino, 5.0 mm entre veredas pastoreo, 6 mm en los sitios con zacates y 7 mm en los sitios con arbustivas.

Otro efecto negativo en la salud del bosque ha sido la presencia de incendios forestales, ya que ocasionan reducciones en la infiltración y se encuentran presentes en los municipios de estas regiones en más de un 73.2% (INEGI, 2003). No obstante, los programas de reforestación y restauración no alcanzan a cubrir estas zonas incendiadas anualmente o aquellas con algún grado de degradación a través de los años.

A pesar de una riqueza de información científica, no existe evidencia cuantitativa de la relación que tienen los ecosistemas forestales de la infiltración final y la cantidad de esorrentía superficial de los suelos forestales con eventos máximos de precipitación de la región de Durango. Por lo anterior, este estudio tiene como objetivo evaluar los ecosistemas forestales y su relación con la tasa final de infiltración y la cantidad de esorrentía superficial en los suelos que se producirá en eventos máximos de lluvia de la región montañosa del sur-suroeste del estado de Durango, México.

Materiales y Métodos

El trabajo se realizó durante el periodo de enero a abril de 2004, en cinco y tres localidades de los municipios de Pueblo Nuevo y San Dimas, Durango, respectivamente. Los sitios de medición se localizan en la región forestal de la Sierra Madre Occidental; la posición geográfica aproximada de las áreas de estudio es de 23° 45' y 105° 34' y 24° 21' y 105° 31' de latitud Norte y de longitud Oeste, respectivamente para cada localidad. Por su fisiografía se encuentra en la subprovincia de Gran Meseta y Cañones Duranguenses (INEGI, 2003).

El área presenta un clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 11.1 °C, con oscilaciones mensuales entre 6.2 y 14.3 °C y por su régimen de lluvias tiene un promedio anual de 887.4 mm. El asiento geológico es del periodo Cenozoico Terciario. El suelo es derivado de rocas ígneas extrusivas, con profundidad media de 25 a 50 cm, de color castaño oscuro, textura de franco a franco-arcillo-arenoso, con estructura de bloques angulares de fino a granular, consistencia moderadamente dura a dura, pH de 5.8 a 6.5, alto contenido de materia orgánica en diversos grados de humificación. De acuerdo a la clasificación FAO-UNESCO-ISRIC, el suelo en los sitios de estudio es principalmente Regosol distrito; en la región se presentan algunas inclusiones de suelos Alisol háplico y Leptosol dístrico. La región forestal de la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, está dominada por bosques de coníferas de pino-encino (*Pinus-Quercus*), las principales especies de pino y encino comerciales en esta región son *Pinus ayacahuite*, *P. durangensis*, *P. leiophylla*, *P. engelmanni*, *P. cooperi*, *P. teocote*, *Quercus chihuahuensis* y *Q. sideroxyla*.

Los cauces que drenan el área pertenecen a las cuencas del Río Presidio, Río Acaponeta y Río Baluarte, correspondientes a la región hidrológica 11 Presidio-San Pedro, perteneciente a la vertiente del Pacífico. La vertiente Interior o de la Altiplanicie Mexicana es drenada por cauces del Río Santiago Papasquiari, perteneciente a la cuenca Presa Lázaro Cárdenas y de la región hidrológica 36 Nazas-Aguanaval.

Por su vocación forestal, esta región está sometida al aprovechamiento y extracción de madera, limitados para el uso potencial de la ganadería y la agricultura. En las localidades estudiadas el manejo forestal es utilizado el método de Desarrollo silvícola, el cual consiste en aplicar pre-aclareos, cortas selectivas, cortas de regeneración y cortas de liberación. La extracción y arrime de la trocería es mediante malacates montados en camiones grúa desde las partes altas; durante la extracción de las trozas la superficie del suelo y la cubierta vegetal son alterados y disturbados por la construcción de caminos, el uso de maquinaria pesada y el arrastre de los trozos.

Las localidades y sitios de estudio donde se realizó el estudio fueron Los Bancos, El Quemado, La Escondida I y II y La Victoria del Municipio de Pueblo Nuevo y, Cielito Azul, Casa Blanca y Mesa del Burro, Municipio de San Dimas, Durango, México.

Los Bancos se localiza en los 23° 41' 39.5" de latitud Norte y a los 105° 36' de longitud Oeste, su altitud es de 2,696 msnm; la principal especie es *Pinus cooperi*. Los suelos son Leptosol líticos. El Quemado se localiza en los 23° 45' 11.0" de latitud Norte y en los 105° 34' 18.1" de longitud Oeste, su altitud es de 2,734 msnm; la principal especie es *Pinus cooperi*. La Escondida I se localiza en los 23°46'56.1" de latitud Norte y a los 105° 32' 23.7" de longitud Oeste, su altitud es de 2,772 msnm; las principales especies son *Pinus cooperi*, *P. arizonica* y *P. durangensis*. La Escondida II se localiza en los 23°46'50.9" de latitud Norte y a los 105°30'55.45" de longitud Oeste, su altitud es de 2,849 msnm; la principal especie es *P. cooperi*. La edafología del suelo es principalmente de Regosol eútrico y algunos sitios con suelos de Leptosol lítico. La Victoria se localiza a los 23° 41' 28.4" de latitud Norte y a los 105° 25' 28.3" de longitud Oeste, su altitud es de 1,803 msnm; las principales especies son *Pinus cooperi* y *P. durangensis*. El suelo edafológicamente pertenece a los Regosoles eútrico.

Cielito Azul se localiza a los 24° 22' 15.7" de latitud Norte y a 105° 53' 3.5" de longitud Oeste, su altitud es de 2,772 msnm; las principales especies son *Pinus cooperi*, *P. leiophylla*, *P. teocote* y *P. ayacahuite*. El sitio Casa Blanca se localiza a los 24° 21' 15.7" de la latitud Norte y a los 105° 43' 47.8" de longitud Oeste, con altitud de 2,610 msnm;

las principales especies son *Pinus cooperi* y *P. arizonica*. Mesa del Burro se localiza a los 24° 20' 45.4" de latitud Norte y a 105° 30' 27.8" de longitud Oeste, su altitud es de 2,525 msnm; las especies son *Pinus ayacahuite* y *P. teocote*. El suelo dominante es un Regosol eútrico.

Por su geología, los municipios de Pueblo Nuevo y San Dimas, Durango, los suelos son del periodo Cenozoico (C) terciario (T) entre el periodo superior (Ts) e inferior (Ti) del mioceno (Tm) y oligoceno (To). Son de rocas ígneas extrusivas y de toba Tom (Ta). Esta constituido por vidrio, cuarzo y fragmentos de feldespatos potásicos, presenta colores rosa con tonos rojos y morados; poseen textura piroclástica, incluye tobas riolíticas y brechas constituidas por fragmentos esferulítica, andesita vidrio y cuarzo; tienen pseudo estratificación paralela en capas horizontales, en una secuencia gradada en areniscas, limonitas y lutitas volcánicas con esporádicos derrames de vidrio. Las rocas son fuertemente compactas o deleznales por alteración hidrotermal o por desvitrificación. La unidad de suelo subyace discordante a las rocas metasedimentarias y metavolcánicas del Jurásico-Cretácico, andesitas y calizas del Cretácico Inferior, cuerpos intrusivos del Cretácico Superior y Volcano Clásticos del Terciario inferior. Por su posición estratigráfica y por datos radiométricos se determinó la edad entre 34 y 27 millones de años. Forma una meseta de amplia distribución, orientada de noroeste al sureste, con espesor aproximado de 2,500 m. La unidad es aprovechada con fines comerciales en la industria de la construcción.

Las unidades de suelo que dominan son el Regosol eútrico y el Leptosol líptico. Los Regosoles eútricos (RGe) (reghos=manto; connotativo de un manto de material suelto sobrepuesto a la capa dura de la tierra), son suelos formados de materiales no consolidados, excluyendo materiales de textura gruesa o que presentan propiedades flúvicas. No tienen horizontes de diagnostico mas que un horizonte A ocrico o úmbrico; carecen de propiedades gleyicas en los 50 cm superficiales, de características que son de diagnostico para los Vertisoles y Andosoles y de propiedades salicas. Se considera suelo poco desarrollado y en general esta constituido por material suelto, semejante a la roca de la cual se forma. Se localiza en cualquier tipo de clima y generalmente sobre

topografía accidentada. Después de los Leptosoles, son el tipo de suelo más dominante en la República Mexicana. Ocupa una superficie de 362,462 Km² (18.5%). Se distribuye en Chihuahua, Sonora, Sinaloa, Oaxaca y Durango.

Los Leptosoles (del griego leptos, delgado débilmente desarrollados) se caracterizan por su escasa profundidad (menor a 25 cm). Una proporción importante de estos suelos se clasifica como Leptosoles líticos, con una profundidad de 10 centímetros o menos. Otro componente destacado de este grupo son los Leptosoles réndzicos, que se desarrollan sobre rocas calizas y son muy ricos en materia orgánica. En algunos casos son excelentes para la producción agrícola, pero en otros pueden resultar muy poco útiles por dos razones: su escasa profundidad los vuelve muy áridos y el calcio que contienen puede llegar a inmovilizar los nutrientes minerales. Los Leptosoles dominan la península de Yucatán, territorio que emergió del fondo oceánico en fecha relativamente reciente, por lo que sus suelos no han tenido ocasión de desarrollarse. En los principales sistemas montañosos también se encuentran Leptosoles, allí donde las pendientes y la consecuente erosión imponen una restricción a la formación del suelo. La evolución lenta y la productividad reducida de los desiertos ocasionan igualmente que el suelo sea delgado. Ésta es la razón por la que los Leptosoles son comunes en la Sierra Madre Oriental, Occidental y del Sur, así como en la vasta extensión del Desierto Chihuahuense.

Los sitios de estudio fueron seleccionados tomando en cuenta primero que presentaran manejo silvícola y aprovechamiento forestal reciente, segundo, que exhibieran un grado de disturbio o deterioro entre el dosel de pinos, y tercero localizar áreas sin cobertura vegetal entre el dosel del arbolado. Para seleccionar los sitios, se consideraron áreas desnudas y suelos expuestos a la erosión por escurrimientos superficiales, la presencia de ganadería, suelos con pedregosidad, compactados o meteorizados (intemperismo) y con vestigios de aprovechamiento forestal con maquinaria pesada y de labores postcosecha.

Para realizar el estudio se utilizaron cuatro simuladores de lluvia portátiles de boquilla simple, similares al descrito por Wilcox *et al.* (1986), adaptados para su aplicación simultánea en las áreas de estudio. En línea perpendicular a la pendiente y paralelo a los árboles se ubicaron de forma alterna los simuladores de baja y alta intensidad de lluvia dentro y fuera del dosel de los árboles, de tal forma que se tenía bajo dosel simulaciones de lluvia de alta y baja intensidad, al igual que fuera del dosel de los pinos.

Se simuló la lluvia a una altura de 152 cm sobre parcelas de 0.1444 m², las intensidades aplicadas fueron de 22.995, 36.700, 24.359 y 47.895 cm h⁻¹, previa calibración. El simulador se alimentó de agua por dos pony bombas de 12 volts. Los escurrimientos se recolectaron a intervalos de cinco minutos, con el fin de evaluar su tendencia de los procesos hidrológicos. Las altas intensidades de la lluvia obedecieron a tratar de observar la escorrentía en todos los sitios o suelos durante la simulación de la lluvia para tener información de las infiltraciones máximas que pueden ocurrir bajo las variaciones del dosel descritas.

El volumen del escurrimiento (cm³) recolectado fue medido y calculado su tasa de escurrimiento (cm h⁻¹) considerando el área de la parcela (cm²). La infiltración (cm h⁻¹) fue calculada por la diferencia entre la intensidad de lluvia aplicada y la tasa de escurrimiento.

Los datos de infiltración y escorrentía fueron analizados en un análisis de covarianza SAS PROC GLM. Para la infiltración se ajustó preliminarmente el modelo de Kostiaikov modificado siguiente (Hillel, 1982; Návar y Synnott, 2000):

$$\hat{y} = \alpha x^{\beta_0} + i.c.$$

Donde \hat{y} es el valor estimado de la infiltración, α valor del intercepto, β_0 la pendiente, x el tiempo de simulación de la lluvia y *i.c.* es la tasa final de infiltración.

Para la tasa de escorrentía superficial se ajustó un modelo de potencia simple, como se describe a continuación (Hillel, 1982; Návar y Synnott, 2000):

$$\hat{y} = \alpha x^{\beta_0}$$

Donde \hat{y} es el valor estimado de la tasa de escorrentía, α valor del intercepto, β_0 la pendiente, x el tiempo de simulación de la lluvia.

El análisis de covarianza proporciona pruebas de hipótesis sobre los parámetros del modelo en función de los tratamientos. El tiempo de simulación de la lluvia actúa como covariable del modelo. En total se realizaron 32 pruebas de simulación de lluvia y 16 pruebas por tratamiento para alta y baja intensidad de lluvia y bajo y fuera del dosel, respectivamente. Para conocer las diferencias entre los sitios de estudio se realizara la comparación de sus medias mediante la prueba de Tukey (Haan, 1977).

Resultados y Discusión

Los valores medios obtenidos de la tasa de escurrimiento y la infiltración en el área de estudio son mostrados en las Tablas 3.1 y 3.2.

La menor tasa de escorrentía superficial generada de los sitios de estudio se presentó donde fue aplicada una baja intensidad, dentro de estos los que estuvieron bajo dosel, 128.85 y 137.19 cm h^{-1} , seguido de los sitios sin dosel y alta intensidad.

Tabla 3.1. Valor medio de la tasa de escurrimiento estimada (cm hr^{-1}) en los sitios de estudio bajo dosel y diferentes intensidades de lluvia en el sur suroeste de Durango, México.

| Tiempo (min) | Baja Intensidad | | Alta Intensidad | |
|-----------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| | Sin Dosel | Con Dosel | Sin Dosel | Con Dosel |
| 5 | 12.41 | 9.46 | 18.36 | 15.80 |
| 10 | 15.85 | 14.24 | 25.90 | 15.80 |
| 15 | 16.06 | 16.07 | 28.69 | 19.36 |
| 20 | 16.66 | 16.15 | 29.66 | 20.11 |
| 25 | 17.64 | 16.97 | 29.94 | 20.64 |
| 30 | 18.59 | 17.98 | 31.64 | 22.35 |
| 35 | 19.58 | 18.28 | 31.16 | 23.65 |
| 40 | 20.40 | 19.70 | 31.41 | 24.33 |

Tabla 3.2. Valor medio de la tasa de infiltración estimada (cm hr^{-1}) en los sitios de estudio bajo dosel y diferentes intensidades de lluvia en el sur suroeste de Durango, México.

| Tiempo (min) | Baja Intensidad | | Alta Intensidad | |
|--------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| | Sin Dosel | Con Dosel | Sin Dosel | Con Dosel |
| 5.00 | 17.31 | 15.76 | 19.60 | 26.79 |
| 10.00 | 14.29 | 10.98 | 12.05 | 24.09 |
| 15.00 | 12.10 | 9.85 | 9.26 | 21.25 |
| 20.00 | 11.50 | 9.07 | 8.30 | 20.50 |
| 25.00 | 10.52 | 8.25 | 8.02 | 19.98 |
| 30.00 | 9.58 | 7.24 | 6.31 | 18.26 |
| 35.00 | 8.58 | 6.94 | 6.79 | 16.96 |
| 40.00 | 7.76 | 5.52 | 6.54 | 16.28 |

De acuerdo al análisis realizado, el efecto de la interacción simulación y tiempo no presentó una significancia estadística, teniendo diferencias entre simulaciones y la presencia de escurrimientos en el tiempo de evaluación. La Tabla 3.3 muestra las diferencias obtenidas con la comparación de medias por la prueba de Tukey ($P = 0.05$), en el se observa que el sitio sin dosel y alta intensidad tiene las diferencias mas notables, mientras el sitio con dosel y baja intensidad tiene los menores valores (28.345 y 16.019 cm h^{-1} , respectivamente).

Tabla 3.3. Valores medios de la tasa de escurrimiento e infiltración (cm hr^{-1}) en los sitios de estudio bajo dosel y con diferentes intensidades aplicadas en el sur suroeste del estado de Durango, México.

| Sitios de Estudio | | Escurrimiento | Infiltración |
|-------------------|-----------|---------------|--------------|
| Alta Intensidad | Sin Dosel | 28.35 a | 20.52 a |
| | Con Dosel | 20.41 b | 11.45 b |
| Baja Intensidad | Sin Dosel | 17.25 b | 9.61 b |
| | Con Dosel | 16.02 bc | 9.20 b |

La tasa de entrada de agua al suelo en los diferentes tiempos de evaluación y con la aplicación de intensidades mostraron ser mayores en los sitios bajo dosel, seguido de los sitios donde se aplicó una baja intensidad de lluvia. Esto fue observado al realizar el análisis de covarianza, donde fueron altamente significativos estadísticamente ($P < 0.0001$) ambas fuentes de variación, no así su interacción entre cobertura de dosel e intensidad aplicada, indicando la falta de interacción entre los tratamientos con y sin dosel y con alta y baja intensidad.

La diferencia encontrada en la prueba de Tukey muestra dos diferencias en el grupo de datos ($P = 0.05$), siendo el sitio con alta intensidad y con dosel el sitio con mayor entrada de agua al suelo por unidad de tiempo (tasa final de infiltración de 120 mm h^{-1}), mientras los siguientes sitios fueron similares estadísticamente entre ellos (tasa final de infiltración de 60 mm h^{-1}).

Estas diferencias encontradas muestran que el efecto de protección del árbol y de la cobertura vegetal asociada y adyacente a la vegetación arbórea de estas regiones, juega un papel muy importante en la hidrología de las cuencas forestales. Por otro lado, la protección ejercida por la vegetación arbórea y asociada de los efectos erosivos, define la importancia en el agua que penetrara al suelo y de aquella que seguirá como escorrentía superficial

Conclusiones

En este estudio se demostró que la cobertura forestal posee una importancia hidrológica al poseer mantillo orgánico, raíces, suelos protegidos al pastoreo, al intemperismo y a otros factores de disturbio. Las altas tasas de infiltración se explican por la presencia de amortiguamiento de la lluvia por el mantillo orgánico, y la transferencia del agua infiltrada hacia la zona de las rocas fracturadas para entrar hacia los acuíferos someros existentes. La transferencia se dá parcialmente por la presencia de macroporos formados por un sin-numero de condiciones que originan la vida misma en el ecosistema, desde raíces vivas o descompuestas, perforaciones formadas por nematodos, insectos, hormigas, etc. que originan movimiento turbulento del agua dentro de los suelos (Beven y Germann, 1982; Navar *et al.*, 1996). Estas altas tasas de infiltración mostradas raramente son sobrepasadas por la intensidad de la lluvia y por consiguiente tampoco o rara vez presentan escorrentía superficial.

En los sitios sin cobertura vegetal, donde existe falta de mantillo orgánico, la infiltración final no sobrepasa los 60 mm h^{-1} , indicando que para la región, la intensidad de la lluvia puede sin problemas ocasionar escorrentía superficial con frecuencias menores a un año.

Por esta razón, se recomienda la conservación de la cobertura vegetal de los bosques de la Sierra Madre para poder continuar propiciando altas tasas de infiltración y mejorando la recarga de acuíferos durante las lluvias importantes en estos procesos.

Literatura Citada

- Aparicio, M., F. J. 2005. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. México. 303 p.
- Baharuddin, K., A. M. Mokhtaruddin y M. Nik-Muhamad. 1996. Effects of logging on soil physical properties in Peninsular Malaysia. *Land-Husbandry*. 1: 33-41.
- Beven, K. y P. Germann. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*. 18: 1311-1325.
- Ceballos, A. y S. Schnabel. 1998. Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain). *Journal of Hydrology*. 210: 146-160.
- Cerda, A., S. Schnabel, A. Ceballos y D. Gomez-Amelia. 1998. Soil hydrological response under simulated rainfall in the Dehesa Land System (Extremadura, SW Spain) under drought conditions. *Earth Surface Process and Landforms*. Volume 23: 195-209.
- Croke, J., P. Hairsine, P. Fogarty y R. T. Brooks. 2001. Soil recovery from track construction and harvesting changes in surface infiltration, erosion and delivery rates with time. *Forest Ecology and Management*. 143: 3-12.
- Dunkerly, D. L. 2002. Infiltration rates and soil moisture in grove mulga community near Alice Springs. *Arid Central Australia: evidence for complex internal rain water redistribution in a runoff-runon landscape*. *Journal of Arid Environments*. 51: 199-219.
- Haan, C. T. 1977. *Statistical methods in hydrology*. The Iowa State University Press. USA. 378 p.
- Hillel, D. 1982. *Introduction to soil physics*. Second edition. Academic Press, Inc. USA. 364 p.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2003. Anuario estadístico del estado de Durango. INEGI-Gobierno del Estado de Durango. Aguascalientes, México. 491 p.
- Listera, T. W., J. A. Burger y S. C. Pattersonb. 2004. Role of vegetation in mitigating soil quality impacted by forest harvesting. *Soil Science Society American Journal*. 68: 263-271.
- Mamad-Farid, A. R. y F. E. Putz. 1996. Water infiltration rates on a skidtrail and in adjacent residual forest 20 years after logging in East Kalimantan, Indonesia. Research methods for reduced-impact logging: workshop results. A report on the International Training Seminar on Reduced-Impact Timber Harvesting and Natural Forest Management, Bogor and East Kalimantan, Indonesia, 14-27 July 1996. Pp 3-6.
- Navar, J., E. L. Miller y D. J. Turton. 1996. Subsurface flow generation in an experimental plot during applied rainfalls in the Ouachita Mountains of Arkansas. *Geofísica Internacional*. 35: 175-188.
- Návar, J. y T. Synnott. 2000. Soil infiltration and land use in northeastern Mexico. *Terra* 18(3): 255-262.
- Soto, B. y F. Diaz-Fierro. 1997. Soil water Balance as affected by throughfall in gorse (*Ulex europaeus* L.) shrubland after burning. *Journal of Hydrology*. 195: 218-231.
- Ramírez-Marcial N., M. González-Espinosa, and G. Williams-Linera. 2001. Anthropogenic disturbance and tree diversity in Mountain Rain Forest in Chiapas, Mexico. *Forest Ecology and Management*. 154: 311-326.
- Thoms, C. A. y D. R. Betters. 1997. The potential for ecosystems management in Mexico's forest ejidos. *Forest Ecology and Management*. 103: 149-157.
- Viessman, W., G. L. Lewis y J. W. Knapp. 1989. Introduction to hydrology. Third edition. Harper and Row, Inc. USA. 780 p.
- Wilcox, B. P., M. K. Wood, J. M. Tromble y T. J. Ward. 1986. A hand portable single nozzle rainfall simulator designed for use on steep slopes. *Journal of Range Management*. 39: 375-379.
- Winn, O. y F. E. Putz. 1996. Effect of skidtrail slope on infiltration rates in a forest logged 20 years ago in East Kalimantan, Indonesia. Research methods for reduced-

impact logging: workshop results. A report on the International Training Seminar on Reduced-Impact Timber Harvesting and Natural Forest Management, Bogor and East Kalimantan, Indonesia, 14-27 July. Pp 11-13.

Frecuencia y Magnitud de los Esguurrimientos Superficiales en el Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México

Resumen

Los flujos de esguurrimientos en las regiones áridas y semiáridas son influenciados por las características a la vegetación, suelo, topografía y uso del suelo. La respuesta hidrológica de microcuencas en áreas urbanas varía con el desarrollo y el crecimiento de la población. Este estudio tiene los siguientes objetivos: a) medir la tasa de infiltración final en unidades hidrológicas de respuesta homogénea de suelos, vegetación y fisiografía y ajustarla a modelos de estimación y distribución probabilística, b) determinar curvas de esguorréntía-duración-frecuencia para predecir los problemas de inundación. Para estimar la infiltración se utilizó cuatro simuladores portátiles con aplicación diferencial de intensidad de lluvia durante 40 min, en unidades de respuesta hidrológicas (suelo, vegetación y fisiografía) del área metropolitana de Saltillo, Coahuila, México en el año de 2004. El ajuste de la infiltración fue con los modelos de Green and Amp, Kostiaikov modificado, Horton y Philip. El modelo de Horton tuvo el mejor ajuste en su coeficiente de determinación, desviación estándar y coeficiente de variación, siendo el modelo por el cual la infiltración final se ajustó a la distribución Log normal. La infiltración final modelada tuvo diferencias estadísticas por suelo y vegetación; esto es, la tasa final tiene una alta variación espacial en las unidades de respuesta hidrológica. La infiltración final estimada se distribuye en un 0.01 a 33.51 cm h⁻¹. Las curvas de IDF para la región de influencia son presentadas para las estaciones climáticas de Saltillo, Ramos Arizpe y Arteaga, Coahuila, México. La frecuencia y magnitud de la esguorréntía superficial muestra que eventos máximos exceden la infiltración final de los suelos con diferente tipo de vegetación y posición fisiográfica en periodos de frecuencia anual, con una probabilidad desde un 2.4 a un 64 % para el área metropolitana. La probabilidad de la presencia de esguurrimientos con problemas de inundación se incrementa con eventos de precipitación de una frecuencia de 1 en cada 25 años. En periodos bianuales, las lluvias producirán esguorréntía superficial con

problemas de inundación en el 41.4 % de la superficie del área metropolitana de Saltillo, Coahuila, México.

Palabras clave: Infiltración final, modelos de infiltración, distribuciones probabilísticas, curvas de IDF, frecuencia y magnitud de escorrentía superficial.

Abstract

Metropolitan areas they have the need of know the hydrological response around them due at differential behavior those produce floods. In this study the objectives are a) estimate final infiltration at URH and, b) determine runoff-duration-frequency curves and prediction of floods in Saltillo Metropolitan area, Coahuila, Mexico. Saltillo Metropolitan area it was digitizing at URH by vegetation, soils and slope covers, identification sites for study of superficial hydrology. The superficial runoff was estimated from the final infiltration fit on Horton's model, previously evaluate. With extreme rains data from climate stations of Arteaga, Ramos Arizpe and Saltillo, its make intensitivity-duration-frequency curves (IDF), data's fits to extreme value distribution. From the IDF curves and infiltration final it was estimate the runoff-duration-frequency curves (IFE). Final infiltration it's a range of 0.01 to 33.5 cm hr⁻¹. The IFE curves shows that maxim events in Saltillo Metropolitan area exceed the infiltration constant in the URH on annual periods with probability of 2.4 to 64 %. The flood's probabilities in biannual events increment in rains from 1 to 25 years. In biannual periods, the precipitations producing superficial runoff that generate floods problems in the 41.4 % of the Saltillo Metropolitan Area.

Key words: final infiltration, infiltration models, probabilistic distributions, IDF curves, frequency and magnitude of overland flow.

Introducción

Diversos estudios en las regiones áridas sobre procesos hidrológicos se han enfocado en evaluar indicadores hidrológicos que permitan identificar los problemas por eventos de precipitación que producen escorrentía superficial y ocasionan problemas de inundación. La precipitación en zonas áridas y semiáridas es muy variable, en la que una lluvia de pocos milímetros puede generar escurrimiento superficial y ocasionar flujos de inundación (Dunne y Leopold, 1978). Las interacciones de vegetación, suelo, topografía y uso del suelo tienen una influencia determinante en la hidrología de un sitio (Spaeth *et al.*, 1996). Estos problemas son acentuados cuando se establecen poblaciones urbanas o rurales en los valles y sobre los alrededores producen disturbios antropogénicos que ocasionan la degradación de los recursos y desertificación de los suelos y causan severos cambios en el balance hidrológico (Leopold, 1968). Con frecuencia de inundaciones y la mínima tasa de infiltración reducen la recarga de acuíferos; además, modifican los cauces naturales, reducen su flujo normal y el agua disponible para abastecimiento a las ciudades debido a que afectan la calidad del agua con los desechos arrojados por los habitantes y que son desprendidos y removidos por el flujo superficial. Las causas de la degradación del suelo y de los recursos naturales en las inmediaciones de las ciudades son referidas al disturbio antropogénico más que a causas naturales o a su manejo. La deforestación de especies arbustivas afecta la humedad del suelo y con ello los escurrimientos subsuperficiales y subterráneos más que a otros procesos hidrológicos lo que limita el agua disponible para la recarga de acuíferos (Soto y Díaz-Fierro, 1997). Bajo condiciones naturales y sin disturbio antropogénico, los suelos con cobertura vegetal no presentan escurrimientos superficiales (Satterlund y Adams, 1992). En suelos de zonas áridas y semiáridas la respuesta hidrológica es en pocos minutos debido a la presencia de suelos con alto contenido de arcillas y limos, lo que ocasiona una baja tasa de infiltración final y sea rebasada por eventos de lluvias máximas con periodos frecuentes y ocasione excesos de escurrimiento y se produzca el flujo superficial con respuesta inmediata y pueda ocasionar inundaciones en los valles. Las características de suelo y vegetación son determinantes en la cantidad de agua que fluye en la superficie o es absorbida por el suelo. Para Imesen y Prinsen (2004) los patrones o mosaicos de

vegetación-suelo desnudo son indicadores de la salud del ecosistema y que pueden ser usadas como fuente o barreras para el escurrimiento. En las zonas áridas y semiáridas otra causa de disturbio del suelo es la presencia de ganado domestico. Jackson *et al.* (2002) mencionan que una buena cobertura de vegetación arbustiva en estas zonas el disturbio animal al suelo se reduce y puede usarse como un indicador de la desertificación cuando existe. Mah *et al.* (1992) encontraron que el volumen de la escorrentía superficial en las regiones áridas de Australia no está influenciada por la pendiente, pero si por el tipo de suelo y es correlacionado negativamente con la conductividad hidráulica y microporosidad en 0-5 mm de la superficie del suelo después de 10 min de aplicar 50 mm hr^{-1} de lluvia, lo cual es una respuesta al encostramiento superficial de los suelos. Al inicio de una lluvia, los suelos sin cubierta vegetal están expuestos al impacto de las gotas de lluvia, sus efectos son en destruir la estabilidad de agregados y con ello sellar la superficie del suelo y reducir la tasa de infiltración al suelo (Shainberg *et al.*, 1992). En cuencas con condiciones de buena cobertura y sin disturbio, los arroyos responden rápido a la precipitación, aun en ausencia de escurrimiento superficial, debido al flujo por desplazamiento (Harr, 1976). Esto se explica por el agua entrante que desplaza el agua encontrada en el suelo (Návar *et al.*, 1995). El agua antecedente desplazada emerge como escurrimiento subsuperficial (McDonnell, 2003) desplazada por varios mecanismos, donde las estructuras porosas o macroporos activos juegan un papel importante (Satterlund y Adams, 1992; Návar *et al.*, 1995; 1996). A pesar de la evidencia del movimiento del flujo subsuperficial que sigue varias direcciones en el suelo (McDonnell, 2003), existen pocos estudios para entender las variaciones espaciales que controlan el movimiento rápido del agua dentro del suelo. Esto requiere que los recursos sean manejados ecológica, social y económicamente sustentable (Thoms y Betters, 1997). Dunkerly (2002) encontró que la infiltración se reduce rápidamente en un patrón radial alrededor del fuste y entre sus espacios, y es explicada en una función de potencia. Este reporte esta enfocado a determinar si se presenta el escurrimiento superficial en el área metropolitana de Saltillo, Coahuila, México. Los objetivos del presente estudio fueron: a) medir las tasas de infiltración, b) ajustar ecuaciones de proyección de la infiltración, c) predecir la tasa de infiltración final, d) ajustar la distribución probabilística Log normal a la tasa final de infiltración, d)

desarrollar las curvas de intensidad-duración-frecuencia a las precipitaciones diarias de estaciones climáticas de referencia, y e) determinar la frecuencia y magnitud de escorrentía superficial que se producirá a partir de lluvias máximas con periodos de retorno o frecuencias establecidas, y f) determinar el hidrograma de corrientes en el área metropolitana de Saltillo, Coahuila, México.

Materiales y Métodos

Este estudio se realizó en el área metropolitana de Saltillo, Coahuila, comprendiendo los municipios de Arteaga, Saltillo y Ramos Arizpe en el año de 2004. Para iniciar los trabajos de campo, previamente se delimitó y digitalizó el área metropolitana de Saltillo con los programas de Arcinfo y Arcview. Mediante el procesamiento de información en base al tipo de suelo (Xerosol, Regosol, Rendzina, Yermosol y Litsol) (CETENAL, 1976a, b, c, d), pendiente (0-8%, 8-30% y mayor de 30 %) y uso del suelo (matorral desértico micrófilo y bosque de pino-encino) (CETENAL, 1976e, f, g, h), se caracterizaron 7 unidades hidrológicas de respuesta homogénea dominantes (Figura 4.1). La infiltración se midió de marzo a abril de 2004, en 16 sitios de las unidades hidrológicas (Tabla 4.1). El área de estudio se localiza en las coordenadas geográficas 25° 33' y 25° 15' y 100° 55' 100° 05' de latitud Norte y de longitud Oeste, respectivamente. El clima predominante para el área de estudio es BWhw(x')(e) que corresponde a los climas secos con un coeficiente precipitación-temperatura mayor de 22.9, temperatura media anual entre 18 y 22 °C, considerado como cálido con invierno fresco, con un régimen de lluvias de verano, con por lo menos 10 veces más lluvia en el mes más húmedo que el mes más seco, con un porcentaje de lluvias invernales mayor del 10.2 %, siendo un clima extremo, con oscilaciones anuales de temperaturas medias mensuales entre 7 y 14 °C.

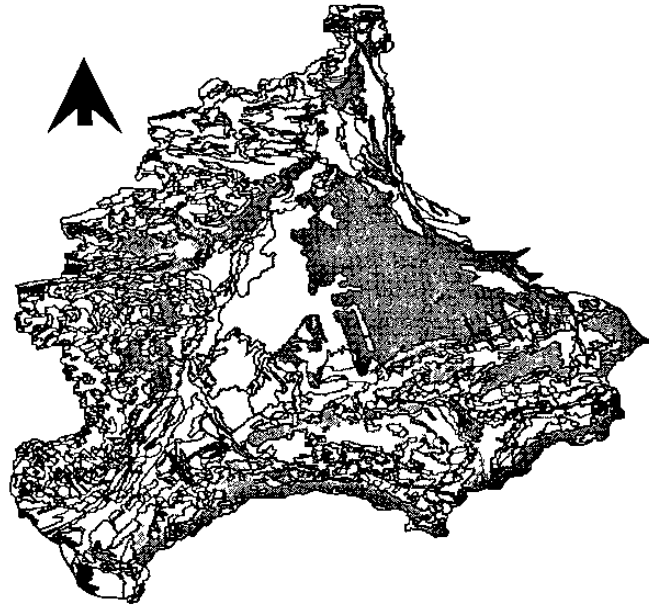


Figura 4.1. Unidades hidrológicas (suelo, pendiente y uso del suelo) del Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México.

Tabla 4.1. Unidades hidrológicas determinadas en el área metropolitana de Saltillo, Coahuila, México.

| Unidades muestreadas | Tipo de Suelo | Pendiente (%) | Uso del Suelo |
|----------------------|---------------|---------------|------------------------------|
| 3 | Xerosol | 0 a 8 | Matorral Desértico Micrófilo |
| 2 | Rendzina | 0 a 8 | Matorral Desértico Micrófilo |
| 2 | Rendzina | 8 a 30 | Matorral Desértico Micrófilo |
| 2 | Yermosol | 0 a 8 | Matorral Desértico Micrófilo |
| 2 | Regosol | 0 a 8 | Matorral Desértico Micrófilo |
| 2 | Litosol | >30 | Bosque de Pino y Pino-Encino |
| 3 | Litosol | >30 | Matorral Desértico Micrófilo |

Para medir las tasas de infiltración se construyeron cuatro simuladores de lluvia portátiles de boquilla simple (Wilcox *et al.*, 1986), aplicando intensidades diferenciales dadas por las presiones diferenciales del sistema de bombeo. Se aplicó lluvia durante 40 minutos sobre 64 microparcels de 0.1444 m² de superficie. Se midió la escorrentía y la precipitación en intervalos de cada cinco minutos y la diferencia entre estos dos componentes generó la infiltración por unidad de tiempo.

Se ajustaron los modelos de infiltración siguientes (Hillel, 1982; Návar y Synnott, 2000)

Green and Amp:

$$i = i_c + b/I$$

donde: i_c y b = constantes del modelo infiltración constante, I = infiltración acumulada

El modelo de Kostiakov modificado es:

$$i = Bt^{-n} + i_c$$

donde: B y n = constantes del modelo, i_c = infiltración final

El modelo de Horton se describe como sigue:

$$i = (i_0 - i_c) * e^{-kt} + i_c$$

donde: i_c y k = constantes del modelo, i_0 = infiltración inicial, t = tiempo

Philip desarrolló su ecuación más físicamente basada en el desarrollo de la ecuación del movimiento del agua dentro del suelo y se representa en forma condensada como sigue:

$$i = i_c + s/2t^{1/2}$$

donde: i_c y s = constantes del modelo, s = sorbilidad del suelo.

Solo dos constantes para cada ecuación fueron estimadas usando regresión no lineal para realizar las comparaciones apropiadas entre los cuatro modelos, utilizando los estadísticos de ajuste el coeficiente de determinación (r^2), el error estándar (s_x) y el coeficiente de variación (CV). El parámetro i_c se estimó con el modelo de Horton a 40 minutos y se corrieron análisis de varianza para determinar las principales fuentes de variación sobre este parámetro. Se ajustó la distribución Log normal a los valores de i_c , estimados por la mejor ecuación de ajuste de infiltración, cuya función matemática es (Haan, 1987):

$$p_x(i_0) = (1/(\sqrt{2\pi} \sigma_x^2 i_c^2)) * (e^{-(y-\mu)^2/2\sigma_y^2})$$

Las curvas de IDF para las estaciones climáticas de la región con registros de 20 años o más, se estimaron a partir de los datos de las lluvias máximas registradas en 24 horas, aplicando la cuatro modelos de distribución probabilística, estos fueron Normal, Log normal, Exponencial y Valores Extremos, cuyas ecuaciones son (Haan, 1977; Viessman *et al.*, 1989):

Normal:

$$p(x) = (1/\sqrt{2\pi s_x}) * e^{-1/2(x-x_m/S_x)^2}$$

donde: x_m = media de los datos, s_x = desviación de los datos x_i

Log normal:

$$f_x(x) = (1/\sqrt{2\pi\sigma_y^2 x^2}) * e^{(y_i - y_m)/(2\sigma_y^2)}$$

donde: σ_y^2 = varianza de datos transformados logarítmicamente, y_m = media aritmética de los datos logarítmicos, y_i = datos transformados logarítmicamente.

Exponencial:

$$f(x) = 1/a * e^{-x/a}$$

Valores extremos:

$$f(x) = q(e^{-q(x-w)-e^{-q(x-w)}})$$

donde: $q = \pi/\sigma\sqrt{6}$, y $w = x - 0.5572/q$

Se realizaron las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Sminorv y de χ^2 a los valores absolutos de la diferencia de los valores observados y estimados con la distribución Log normal (Navar *et al.*, 1996; Aparicio, 2005).

160684

Resultados y Discusión

Los valores promedio de las tasas de infiltración observadas y el valor estimado con los modelos de Green and Amp, Kostiakov modificado, Horton y Philip en la zona metropolitana de Saltillo, Coahuila, México se muestran en la Figura 4.2. Desde la tasa inicial hasta la tasa final de infiltración promedio observada, el modelo de Horton exhibe la mejor tendencia de la infiltración, seguido de los modelos de Philip, Kostiakov y Green y Amp.

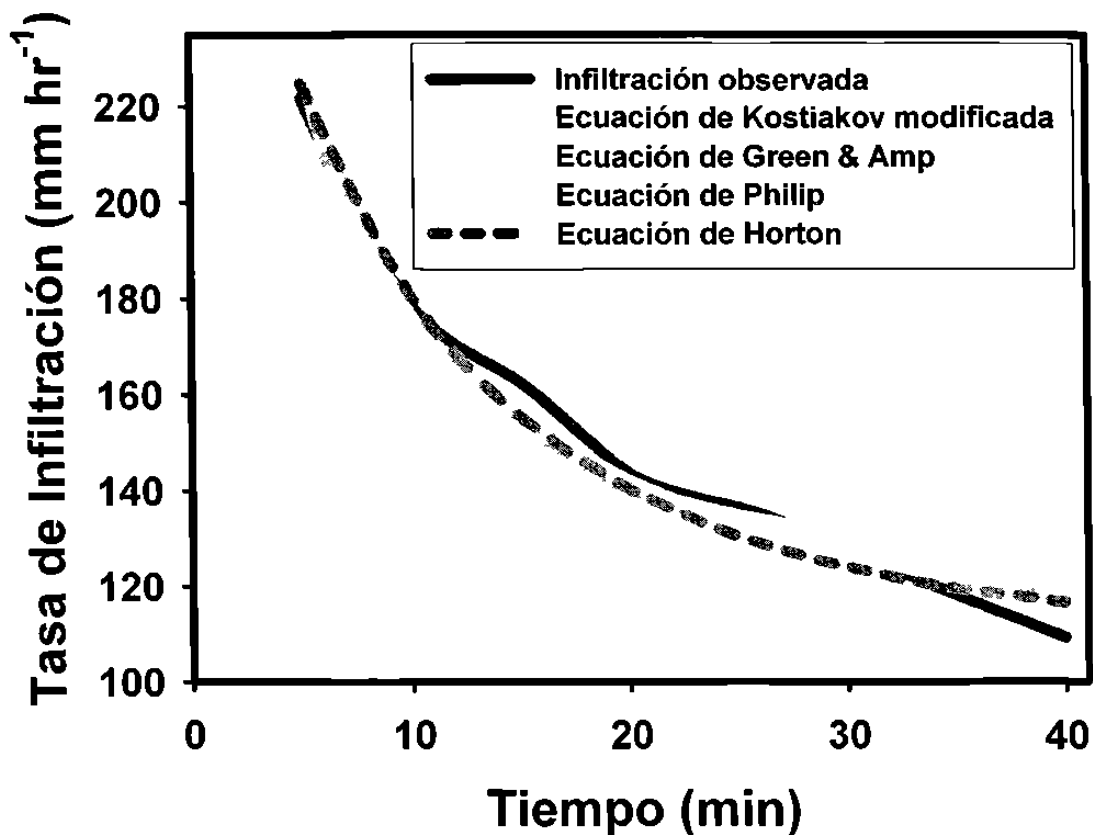


Figura 4.2. Tasas de infiltración (mm hr⁻¹) promedio observada y estimada con los modelos de infiltración en zona Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México.

De los datos observados, los valores promedio, desviación estándar e intervalos de confianza de la tasa final de infiltración fueron 10.93 cm hr⁻¹, 18.45 y 7.53 cm hr⁻¹,

respectivamente. En la Tabla 4.2 se muestran los parámetros de ajuste de la tasa de infiltración final determinada con los modelos aplicados a los 64 sitios bajo estudio. Se observa que los estadísticos con mejor ajuste de los modelos aplicados a la tasa de infiltración a los 40 min es el modelo de Horton ($r^2 = 0.87$, $s_x = 3.17$, y $CV = 0.15$). Además de considerar estos estadísticos, se tomo en cuenta la tendencia en los valores promedio observados y modelados de la Figura 4.2.

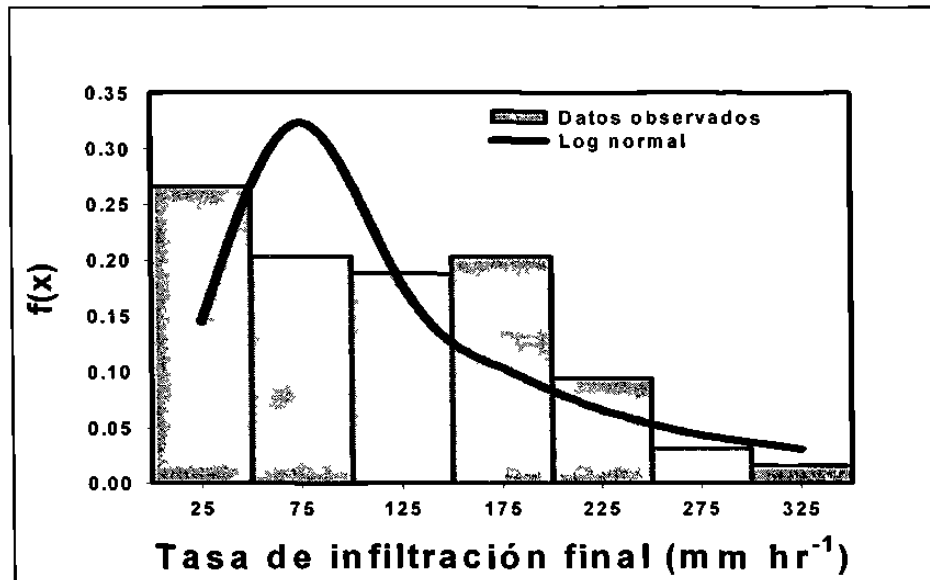
Tabla 4.2. Estadísticos de ajuste a la tasa de infiltración final aplicada a los sitios en el Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México.

| Modelo | r^2 | s_x | CV |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Green & Amp | 0.805 | 4.312 | 0.180 |
| Kostiakov | 0.848 | 3.689 | 0.160 |
| Horton | 0.872 | 3.178 | 0.154 |
| Philip | 0.869 | 3.557 | 0.166 |

El valor de infiltración final en los 64 sitios fue estimado con el modelo de Horton. La Figura 4.3 muestra el histograma de frecuencia y los valores estimados con la distribución Log normal de los valores de la tasa de infiltración final.

La infiltración final modelada tuvo diferencias estadísticamente significativas entre unidades hidrológicas ($P < 0.0001$) y posición fuera y dentro de la cobertura vegetal ($P < 0.034$), pero no en intensidad aplicada ($P < 0.71$). Esto es, las unidades hidrológicas tienen respuesta con una alta variación espacial en la infiltración final por tipo de suelo, fisiografía y uso del suelo y entre la cobertura vegetal del suelo, lo cual puede ser causado por la degradación del área debido al pastoreo, presencia de incendios, desarrollo y crecimiento urbano y manejo del área. Los suelos con mayores tasa de infiltración final fueron los de Rendzina (pendiente de 8 a 30 %) y Litosol (pendiente de 0 a 8 %) y con las menores tasas en los suelos de Yermosol y Regosol con vegetación de Matorral Desértico Micrófilo (pendientes de 0 a 8 %). Al comparar la diferencia absoluta de los valores observados y esperados (0.048) con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, no se presentó una significancia al 0.01 y 0.05% (0.17 y 0.21, respectivamente). Con la prueba de χ^2 , su valor calculado fue 0.054 y no mostró

significancia al 0.05, pero si al 0.1 % (0.103 y 0.0506, respectivamente). Con lo anterior, la frecuencia de los datos de la distribución Log normal se ajusta a la frecuencia de los datos de la tasa de infiltración final. La distribución Log normal mostró que la tasa final estimada en el estudio se distribuye en un 89 % en un rango de 0.01 a 20.05 cm hr⁻¹.



Figuras 4.3. Histograma de los valores observados y la distribución Log normal ajustada a las tasas de infiltración modelada por la ecuación de Horton.

Los datos de lluvias máximas de mejor ajuste fue la distribución de valores extremos y Log normal, pero fue seleccionada la distribución de valores extremos que es recomendada para estos análisis donde son esperados eventos máximos de precipitación en tiempo y son independientes de su frecuencia y su amplia aplicación por diversos autores (Haan, 1977). Los datos se modelaron con la distribución de valores extremos, inicialmente para determinar los intervalos de recurrencia, ajustando los valores de intensidad con los parámetros de la distribución; a partir de aquí se determinó las intensidades diarias a diferentes lluvias horarias de 30 min, 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas de duración y los diferentes periodos de retorno 1, 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

En la Figura 4.4 se presentan las curvas de IDF para los municipios de Arteaga, Ramos Arizpe y Saltillo, Coahuila. Se observa que para el municipio de Arteaga se presentan intensidades de lluvias mayores a 10.0 cm hr⁻¹ de eventos extremos. Es en este

municipio donde la precipitación tiene mayor probabilidad de lluvias más intensas en corto tiempo con los periodos de retorno calculadas. El municipio de Ramos Arizpe tiene probabilidad de lluvias menos intensas, pero con periodos de retorno de menor tiempo y mayor duración. Al estar el suelo disturbado o removido, expuesto y sin cobertura vegetal, los efectos de las lluvias intensas son incrementados al lavar o con el choque de las gotas de lluvia desprender del suelo friable los sedimentos y que estos entren en suspensión y sean arrastrados fuera de las cuencas o de su lugar de origen por la erosión hídrica.

La resta de los valores de intensidad a las infiltraciones finales muestran las curvas de escorrentía-duración-frecuencia (EDF) para la presencia de escurrimientos superficiales indicando que eventos máximos puede exceder la entrada de agua al suelo con frecuencia anual, con probabilidades de presencia desde un 2.4 hasta un 3.3% (Tabla 4.3, Figura 4.5). La probabilidad de la presencia de escurrimientos aumenta desde un 2.4 hasta 62 % con lluvias con una frecuencia de 1 en cada 100 años, para Saltillo y Arteaga, respectivamente. En periodos bianuales en eventos de duración de 1 hr, las lluvias producirán escorrentía superficial en el 16, 11.8 y 13.6% de la superficie estudiada en los municipios de Arteaga, Ramos Arizpe y Saltillo, respectivamente. A partir de este período, la mayor probabilidad de escorrentía se presenta en el municipio de Arteaga, seguido del municipio de Saltillo.

Tabla 4.3. Probabilidad de presencia de la escorrentía superficial (%) con eventos máximos con duración de una hora en el Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México.

| Entidad | Duración (hr) | Frecuencia (años) | | | | | | |
|--------------|---------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| Arteaga | 1 | | 0.160 | 0.349 | 0.440 | 0.527 | 0.578 | 0.620 |
| Ramos Arizpe | 1 | 0.033 | 0.118 | 0.194 | 0.239 | 0.291 | 0.326 | 0.358 |
| Saltillo | 1 | 0.024 | 0.136 | 0.232 | 0.287 | 0.349 | 0.388 | 0.424 |

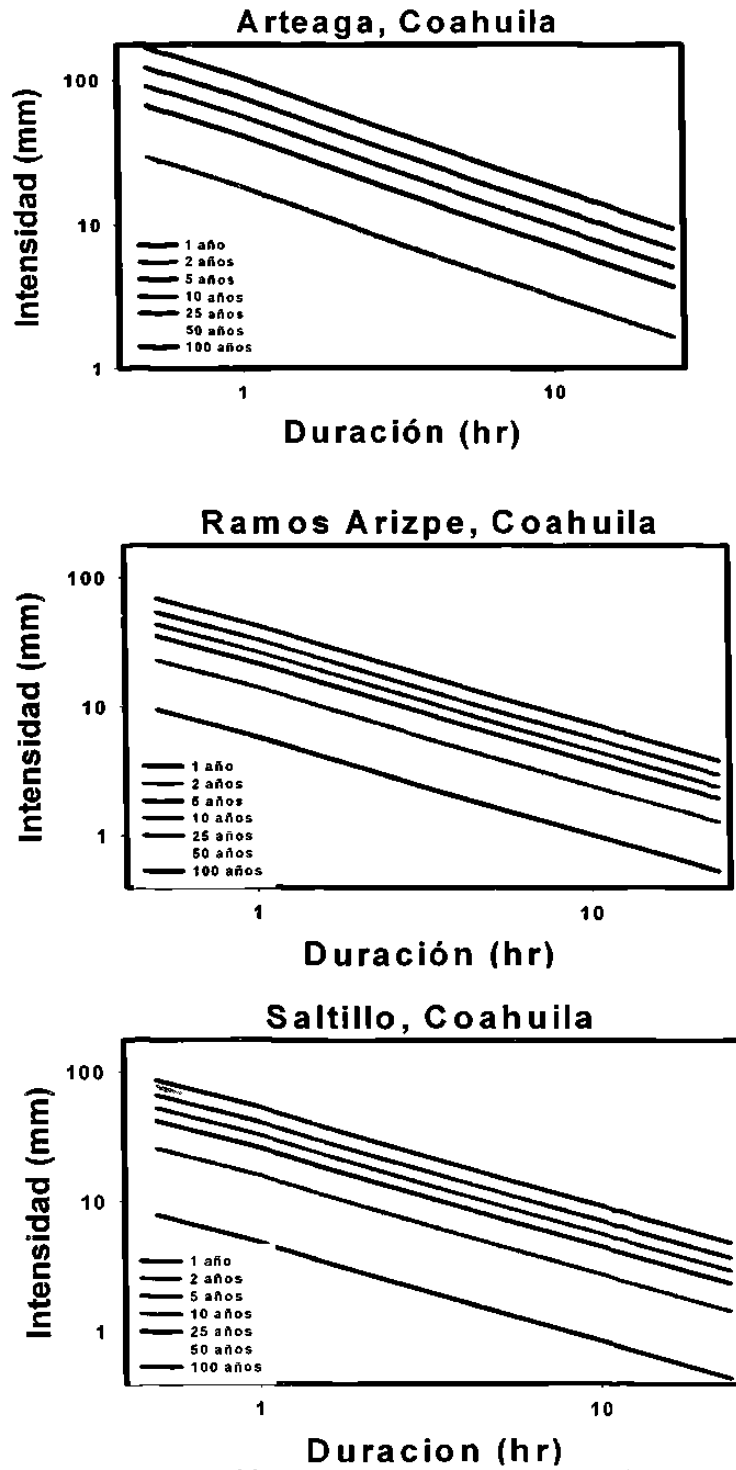
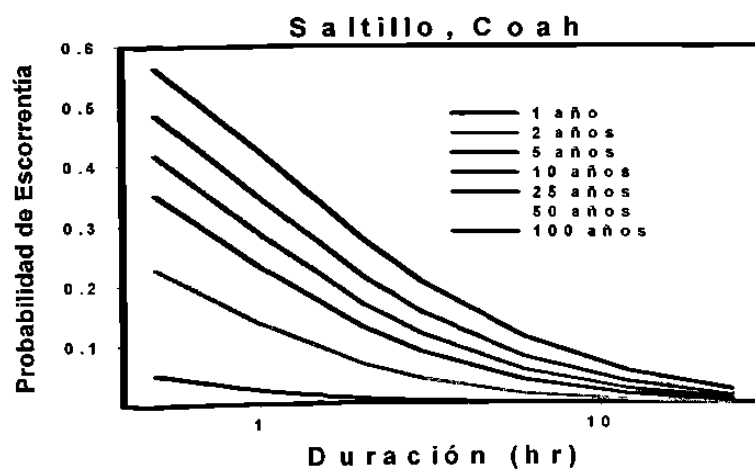
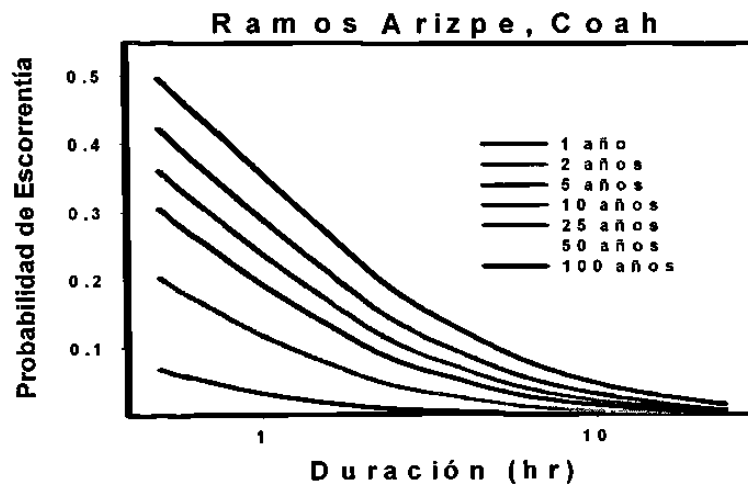
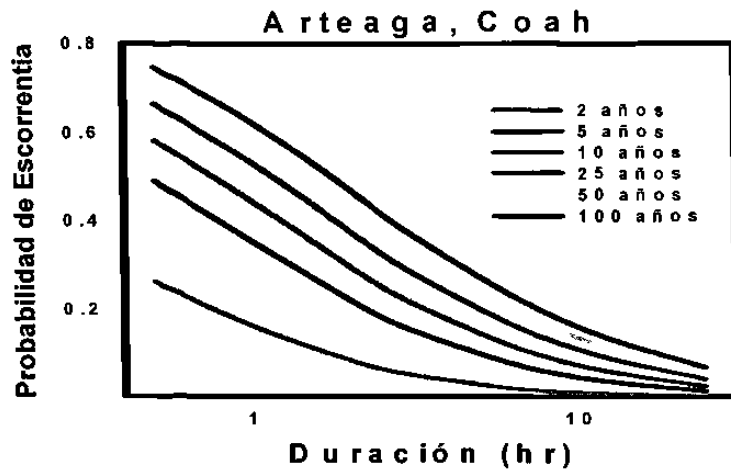


Figura 4.4. Curvas de intensidad-duración-frecuencia para las localidades del Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México.



Figuras 4.5. Las curvas de probabilidad de escorrentía-duración-frecuencia para las localidades del Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México.

Conclusiones

Los suelos del área metropolitana de Saltillo presentan disturbios importantes al demostrar matemáticamente y con mediciones de campo que se presentan escurrimientos superficiales. Este disturbio debe de ser controlado con la finalidad de facilitar la entrada del agua al suelo, facilitar la recarga de acuíferos someros, regular el ciclo hidrológico, mantener la perennialidad del agua en los cauces, y proveer con este servicio ambiental a los pobladores del área metropolitana.

Literatura Citada

- Aparicio, M., F. J. 2005. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. México. 303 p.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976a. Saltillo. Carta de Edafología. 1:50000. G14C23. Secretaría de la Presidencia. México, D F. México.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976b. Saltillo. Carta de Edafología. 1:50000. G14C24. Secretaría de la Presidencia. México, D F. México.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976c. Saltillo. Carta de Edafología. 1:50000. G14C33. Secretaría de la Presidencia. México, D F. México.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976d. Saltillo. Carta de Edafología. 1:50000. G14C34. Secretaría de la Presidencia. México, D F. México.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976e. Saltillo. Carta de Uso del Suelo. 1:50000. G14C23. Secretaría de la Presidencia. México, D F. México.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976f. Saltillo. Carta de Uso del Suelo. 1:50000. G14C24. Secretaría de la Presidencia. México, D F. México.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976g. Saltillo. Carta de Uso del Suelo. 1:50000. G14C33. Secretaría de la Presidencia. México, D F. México.

- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976h. Saltillo. Carta de Uso del Suelo. 1:50000. G14C34. Secretaría de la Presidencia. México, D F. México.
- Dunkerly, D. L. 2002. Infiltration rates and soil moisture in grove mulga community near Alice Springs. *Arid Central Australia: evidence for complex internal rain water redistribution in a runoff-runon landscape. Journal of Arid Environments.* 51: 199-219.
- Dunne, T. y L. B. Leopold. 1978. *Water in environmental planning.* W. H. Freeman and Company. New York, USA. 818 p.
- Hann, C. T. 1977. *Statistical Methods in hydrology.* The Iowa State University Press. USA. 378 p.
- Harr, R. D. 1976. *Hydrology of small forest streams in western Oregon.* General Technical Report PNW-55. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Portland, Oregon. USA. 15 p.
- Hewlett, J. D. 1981. *Principles of forest hydrology.* Second edition. Universidad of Georgia Press., USA. 183 p.
- Hillel, D. 1982. *Introduction to soil physics.* Second edition. Academic Press, Inc. USA. 364 p.
- Imesen, A. C. y H. A. M Prinsen. 2004. *Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain.* *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 10: 333-342.
- Jackson, E. C., S. N. Krogh y W. Whitford. 2002. *desertification and biopedturbation in the northern Chihuahuan Desert.* *Journal of Arid Environment.* 53: 1-14.
- Leopold, B. L. 1968. *Hydrology for urban land planning-a guidebook on the hydrology effects of urban use.* U. S. Geological Survey Circular 554. 18 pp.
- Mah, M. G. C., L. A. Douglas y A. J. Ringrose-Voase. 1992. *Effects of crust Development and slope on erosion by rainfall.* *Soil Science.* 154: 37-43.
- McDonnell, J. J. 2003. *Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response.* *Hydrological Processes.* 17: 1869-1875.

- Návar, J. y T. Synnott. 2000. Soil infiltration and land use in northeastern Mexico. *Terra* 18: 255-262.
- Návar, J., D. Turton y Miller, E. 1995. Estimating macropore and matrix flow using the hydrograph separation procedure in an experimental forest plot. *Hydrological Processes* 9: 743-753.
- Návar, J., E. Miller y D. Turton. 1996. Subsurface flow generation in an experimental forest plot in the Ouachita Mountains of Arkansas. *Geofísica Internacional* 35: 595-605.
- Ramírez-Marcial N., M. González-Espinosa, y G. Williams-Linera. 2001. Anthropogenic disturbance and tree diversity in Mountain Rain Forest in Chiapas, Mexico. *Forest Ecology and Management*. 154: 311-326.
- Satterlund, D. R. y P. W. Adams. 1992. *Wildland watershed management*. Second edition. John Wiley and Sons, Inc. USA. 436 p.
- Shainberg, I., G. J. Levy, P. Rengasamy y H. Frenkel. 1992. Aggregate stability and seal formation as affected by drops' impact energy and soil amendments. *Soil Science* 154: 113-119.
- Soto, B. y F. Diaz-Fierro. 1997. Soil water Balance as affected by throughfall in gorse (*Ulex europaeus* L.) shrubland after burning. *Journal of Hydrology*. 195: 218-231.
- Spaeth, K. E., T. L. Thurow, W. H. Blackburn y F. B. Pierson. 1996. Ecological dynamics and management effects on rangelands hydrologic processes. *In*: K. E. Spaeth, F. B. Pierson, M. A. Weltz and, R. G. Hendricks. 1996. *Grazingland hydrology Issues: Perspectives for the 21st Century*. Society for Range Management. USA. Pp 25-51.
- Spurr, S. H. y B. V. Barnes. 1982. *Ecología forestal*. AGT Editor, S. A. México, D. F. 690 p.
- Thoms, C. A. y D. R. Betters. 1997. The potential for ecosystems management in Mexico's forest ejidos. *Forest Ecology and Management*. 103: 149-157.
- Viessman, W., G. L. Lewis y J. W. Knapp. 1990. *Introduction to hydrology*. third edition. Harper and Row, Inc. USA. 780 p.

Wilcox, B. P., M. K. Wood, J. M. Tromble y T. J. Ward. 1986. A hand portable single nozzle rainfall simulator designed for use on steep slopes. *Journal of Range Management*. 39: 375-379.

Estimación de la Probabilidad del Flujo de la Escorrentía Superficial en el Sudeste de Nuevo León, México.

Resumen

Se midió la infiltración final y la escorrentía superficial, y se generaron además las curvas de probabilidad de excedencia del escurrimiento a partir de las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) de datos de precipitación registrados en las estaciones climáticas de Iturbide y Linares, Nuevo León, México. Estos procesos hidrológicos se evaluaron de enero a abril de 2004, con el uso de cuatro simuladores de lluvia portátiles. Se aplicó diferentes intensidades de precipitación dentro y fuera del dosel del arbolado, durante 40 min sobre microparcels de 0.1444 m². Se evaluó en 16 sitios y 2 localidades, en un bosque de pino encino y un matorral espinoso Tamaulipeco. Los componentes hidrológicos medidos están en función de los parámetros de la infiltración constante durante la simulación, por esta razón, se utilizó un análisis de varianza sobre las constantes de las ecuaciones de Green y Amp, Kostiaikov modificada, Horton y Philip y se ajustó el mejor modelo a los datos. Los datos de precipitación para las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) se obtuvieron de estaciones climatológicas con información de más de 20 años ubicadas en la región. Se usó la distribución de valores extremos para obtener la probabilidad del ajuste y aplicar el método de intensidad-periodos de retorno. La excedencia de escorrentía se determinó al estandarizar con la distribución Log normal las constantes de la infiltración final y los valores de IDF. Los resultados muestran que, aún con diferente intensidad de lluvia dentro y fuera del dosel del bosque, no se presentaron diferencias en la tasa final de infiltración. La probabilidad de escorrentía superficial determinada en los diferentes periodos e intensidades máximas en una hora mostró que los valores variaron de 6 a 18% anualmente en una hora. En periodos de 25 años se producirán escurrimientos mayores al 50%. La información de este estudio enfatiza la necesidad de normar y reglamentar el manejo forestal, el disturbio y degradación de los ecosistemas forestales, y la necesidad de realizar infraestructura y prácticas de conservación de suelo y agua

para la recarga, el abasto perenne del agua en los cauces de arroyos y ríos, y al suelo de las cuencas en el Estado de Nuevo León.

Palabras clave: Infiltración final, curvas de escorrentía-duración-frecuencia, distribución Log normal.

Abstract

Final infiltration and superficial runoff was studied in south-east Nuevo Leon, Mexico. Also, probability curves of excess runoff, based upon curves of intensity, length, and frequency of precipitation were calculated using data from climatic stations from Iturbide and Linares, Nuevo León, Mexico. These hydrological processes were evaluated from January to April 2004, using four portable rain simulators, applying different rainfall intensities inside and outside of the forest canopy, during 40 minutes, on 0.1444 m² micro paddocks. Evaluations were made in 16 sites and two locations, in a pine-oak forest and a tamaulipan thornscrub. The hydrologic components measured were registered as a function of parameters of constant infiltration during the simulation, for this reason, an analysis of variance was carried out on constants of equations of Green and Amp, modified Kostiaikov, and Horton y Philip, and a model that best fitted the data was chosen. The precipitation analysis for the IDF curves was based on information obtained from data collected from climatic stations (records of more than 20 year), distributed in the study area. The extreme values distribution to obtain the adjustment probability of data, in order to apply the intensity of periods of returns was used. The excess of runoff was determined by standardizing, with the normal Log distribution, the constants of the final infiltration and the values of IDF. The results showed that, even with different rainfall intensities inside and outside the forest canopy, there were no statistical differences in final infiltration rate between the inside and outside forest canopy. The superficial runoff for different times with maximum intensities of one hour showed that the runoff values ranged from 6 to 18% annually with one-hour-rain, and it would be expected that runoffs exceeding the final infiltration rates would occur in 50% of the events, every 25 years. The information generated in the present study emphasize

the need to norm forest activity, in order to avoid disturb and degradation of forest ecosystems. This data also will allow planning of infrastructure and management practices for soil and water conservation to maximize ground-water recharge, as well as the perennial flux of water in creeks and rivers in forest basins in different areas of the State of Nuevo Leon.

Key words: Final infiltration, runoff-duration-frequency curves, Log normal distribution.

Introducción

En las pasadas décadas se ha ido incrementando las presiones sobre el uso de los recursos naturales en las cuencas hidrológicas a nivel región; igualmente expandiéndose la ocupación territorial y con ello creciendo exponencialmente los daños potenciales por inundación y deficiencias en el drenaje urbano y acentuando graves problemas de contaminación (FAO, 1996). La falta de integración e instrumentación en cuencas, las zonas de importancia de recarga de agua o la frecuencia de inundaciones ha propiciado que los procesos hidrológicos sean caracterizados a través de modelos hidrológicos. Para Foody *et al.* (2004) la actividad humana y el desarrollo económico en una región requieren el uso del enfoque de modelos de los procesos hidrológicos para su predicción ambiental y alcanzar o ir ambos a la par. El uso de modelos para estimar flujos de escurrimiento superficial, subsuperficial y los excesos de infiltración son caracterizados en muchos sistemas modernos con énfasis en la generación de modelos estocásticos y su predicción estadística a largo plazo para ser utilizado en la toma de decisiones del manejo de cuencas y extrapolarlos a diversos escenarios ambientales (Boughton y Droop, 2003). La evaluación del impacto de cambio global sobre el ciclo del agua regional puede ser integrada al analizar los escenarios de la problemática local típica de los procesos hidrológicos superficiales (Bormann *et al.*, 2005). En los estudios a nivel regional, los procesos hidrológicos superficiales tienen una alta variabilidad temporal y espacial debido a los tipos de vegetación y suelo y al historial de uso del suelo, principalmente (Bronstert y Plate, 1997). Asimismo, La modelación hidrológica y la representatividad del uso del suelo son usados para extrapolar la información a escalas

regionales (Burch *et al.*, 1987). A escala parcelaria, aun con una uniformidad superficial de las áreas de estudio, los procesos de infiltración y escurrimiento tienen una alta variación espacial, lateral y vertical dentro del suelo (Pilgrim *et al.*, 1978).

Al evaluar los procesos hidrológicos para su modelación, local o regional, se presentan diversas condiciones que los influyen, como es la matriz de suelo y las condiciones del estado actual de vegetación y su uso. La aplicación del modelo debe estar sujeta a las condiciones más representativas del área, de tal manera que dicho modelo sea ajustado y validado. Así, la variabilidad del escurrimiento en una cuenca depende de las características del suelo (Kollet y Maxwell, 2005); evidencias sugieren que el factor más importante son los macroporos al inicio de los eventos de lluvia y una vez saturados sus efectos se reflejan en la matriz del suelo, que a su vez se refleja en las diferencias de escalas temporal y espacial del escurrimiento. En áreas de pastizal, los suelos en el invierno son afectados por los macroporos, siendo más notable en el movimiento de agua hacia la recarga de mantos freáticos y, en el verano la capilaridad es dominante, reflejando el efecto temporal. En las zonas templadas, los escurrimientos superficiales son poco frecuentes y el efecto de la macroporosidad es la característica principal por lo que los suelos exhiban altas tasas de infiltración (Návar y Synnott, 2000; Duéñez-Alanís *et al.*, 2004).

El uso de modelos de infiltración tienen diferencias en su estructura matemática por lo cual la calibración debe hacerse en sus parámetros cuando los datos campo son los mismos (Chahinian *et al.*, 2005). La infiltración constante cuando se alcanzada es un estimador de la conductividad hidráulica de los suelos (Aparicio, 2005), por lo tanto su igualdad en la tasa final es similar en dichos modelos.

Las zonas áridas se caracterizan por tener cauces de corrientes efímeros, pero que producen inundaciones con alto riesgo para el hombre, las obras de infraestructura y la ecología (Camarasa y Segura, 2001; Costelloe *et al.*, 2003; Foody *et al.*, 2004). Es común asociar las características de pendiente, vegetación escasa, suelos delgados y la permeabilidad del material origen del suelo a los excesos de lluvia en un sitio que

generan inundaciones fugaces (Camarasa y Segura, 2001). Los objetivos de este estudio son: a) medir las tasas de infiltración, b) ajustar ecuaciones de proyección de la infiltración, c) predecir la tasa de infiltración final, d) ajustar la distribución probabilística Log normal a la tasa final de infiltración, d) desarrollar las curvas de intensidad-duración-frecuencia a las precipitaciones diarias de estaciones climáticas de referencia, y e) determinar la frecuencia y magnitud de escorrentía superficial que se producirá a partir de lluvias máximas con periodos de retorno o frecuencias establecidas.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en el Matorral Escuela y el Bosque Escuela de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. El matorral Escuela se localiza en la inmediación de la Facultad de Ciencias Forestales, a 7 km al sur de la ciudad de Linares, Nuevo León; sus coordenadas son 24° 47' de latitud Norte y 99° 32' de longitud oeste, a una altitud de 360 msnm. El tipo de vegetación corresponde al Matorral Espinoso Tamaulipeco (Estrada y Marroquín, 1988), caracterizado por especies subinermes, algunas taxas presentan espinas y son generalmente arbustivas y árboles de muy bajo porte (Estrada y Martínez, 2004). Se ubica en la planicie costera del Golfo Norte, donde la superficie que ocupa ha sido cambiante en los últimos años. El clima corresponde al tipo semicálido subhúmedo, con una temperatura media anual de 22.4 °C y 749 mm de precipitación media anual (250 mm de desviación estándar), la cual se presenta de forma bimodal (entre junio y octubre). Se caracteriza por 80 eventos de lluvias promedio, de las cuales el 60 % son menores de 5 mm y componen el 35 % de la precipitación total anual; las lluvias mayores de 20 mm son escasas (10 %) (Návar *et al.*, 1994; Návar *et al.*, 1999). Se encuentra estructurado en las partes bajas por arroyos; con el gradiente altitudinal se localizan valles o llanuras hasta presentarse laderas, encontrando mesetas en los sitios de mayor elevación. Por su génesis de la Sierra Madre Oriental, los suelos son profundos en las partes bajas con vegetación de porte alto y humedad disponible en la época de lluvias y por un período después de estas, medianamente profundos, arcillosos y vegetación de porte medio en los valles y laderas y en las mesetas son los menos profundos, delgados y pedregosos y menor cobertura

vegetal; se distinguen los tipos de suelo de Fluvisol mólico-calcárico, Fluvisol vértico-cálcico, Castañozem vértico-cálcico, Leptosol lítico y Regosol calcárico.

En general, la formación del suelo esta influenciado por el pie de monte, proveniente del material parental de rocas sedimentarias marinas cretácicas y sedimentos aluviales plio-pleistocenos a recientes. La textura del suelo varía de franco arenosa a arcillosa. Los colores varían según el estado de integración encontrándose de gris parduzco a oliváceo hasta pardo amarillento (Woerner, 1991). La cubierta vegetal esta caracterizado por especies como *Ebenopsis ebano*, *Zanthoxylum fagara*, *Acacia farnesiana*, *Cordia boissieri*, *Caesalpinia mexicana* y *Celtis pallida*, especies de mayor abundancia y cobertura (Estrada y Marroquín, 1988). Históricamente, el área tiene 23 años de aislamiento al pastoreo convencional, anteriormente eran tierras de pastoreo extensivo.

El Bosque Escuela se ubica en la Sierra Madre Oriental, sus coordenadas geográficas son 24°42' 25.4" de latitud Norte y 99°51' 51" de longitud Oeste; el clima es templado con lluvias de verano (CW), la temperatura media anual es de 19 °C, la precipitación promedio es de 560 mm anuales, su régimen de lluvias es de septiembre a diciembre. El tipo de vegetación predominante es de varias especies de pino, encino, álamos, etc., principalmente. La hidrografía del área esta constituida por arroyos que drenan sus aguas al Río Pablillos.

Para medir las tasas de infiltración se construyeron cuatro simuladores de lluvia portátiles de boquilla simple (Wilcox *et al.*, 1987), aplicando intensidades dadas por las presiones diferenciales del sistema de bombeo. Se aplicó lluvia durante 40 minutos sobre 32 microparcels de 0.1444 m² de superficie. Se midió la escorrentía y la precipitación en intervalos de cinco minutos y la diferencia entre estos dos componentes generó la infiltración por períodos de tiempo.

Para predecir la infiltración constante, se ajustaron los modelos de infiltración siguientes (Hillel, 1982; Návar y Synnott, 2000):

Green and Amp:

$$i=ic+b/I$$

donde: i = tasa de infiltración, ic y b = constantes del modelo infiltración constante, ic = tasa final de infiltración, I = infiltración acumulada.

El modelo de Kostiakov modificado:

$$i=Bt^{-n}+ic$$

donde: B y n = constantes del modelo

El modelo de Horton se describe como sigue:

$$i=(i_0-ic)*e^{-kt}+ic$$

donde: k = constante del modelo, i_0 = infiltración inicial, t = tiempo

Philip desarrollo su ecuación mas físicamente basada en el desarrollo de la ecuación del movimiento del agua dentro del suelo y se representa en forma condensada como sigue:

$$i=ic+s/2t^{1/2}$$

donde: s = constante del modelo, s = sorbilidad del suelo.

Solo dos constantes para cada ecuación fueron estimadas usando regresión no lineal por la técnica de cuadrados mínimos, para realizar las comparaciones apropiadas entre los cuatro modelos, utilizando los estadísticos de ajuste el coeficiente de determinación (r^2), el error estándar (s_x) y el coeficiente de variación (CV). El modelo de mejor ajuste sirvió para estimar la tasa final de infiltración a un tiempo de 40 minutos. Con la tasa final de infiltración para cada una de las pruebas, se hicieron análisis de varianza para determinar las principales fuentes de variación (parcelas con y sin cobertura, sitios para diferentes suelos y municipalidades). Se ajustó la distribución Log normal a los valores de ic , estimados por la mejor ecuación de ajuste de infiltración, cuya función matemática es (Haan, 1987):

$$p_x(i_0) = (1/(\sqrt{2\pi} \sigma_x^2 i_c^2)) * (e^{-(y_i - y_p)^2 / 2\sigma_y^2})$$

donde: σ_x^2 = varianza de los datos sin transformar, i_c = tasa final de infiltración, y_i infiltración observada o variable aleatoria "x" transformada al logaritmo natural, y_p = infiltración promedio estimada como el promedio de las infiltraciones finales transformadas al logaritmo natural, σ_y = varianza de los datos de i_c transformados al logaritmo natural.

Las curvas de IDF para las estaciones climáticas de la región con registros de 20 años o más, se estimaron a partir de los datos de las lluvias máximas registradas en 24 horas, aplicando la cuatro modelos de distribución probabilística, estos fueron Normal, Log normal, Exponencial y Valores Extremos, cuyas ecuaciones dadas por Haan (1977) y Viessman (1989) utilizadas para estimar la precipitación con duraciones de 12, 6, 3, 2, 1 y 0.5 hr, se utilizaron las relaciones descritas en Hershfield (1961) y reportadas en Viessman *et al.* (1989). La descripción de las ecuaciones son:

Normal:

$$p(x) = (1/\sqrt{2\pi s_x}) * e^{-1/2(x-x_m/s_x)^2}$$

Donde: $(x-x_m)/s_x = z$ = valor estandarizado, x_m = media de los datos, s_x = desviación estándar de los datos x_i , x = valor observado

Log normal:

$$f_x(x) = (1/\sqrt{2\pi\sigma_y^2 x^2}) * e^{-(y_i - y_m)^2 / (2\sigma_y^2)}$$

Donde: σ_y^2 = varianza de datos transformados logarítmicamente, y_m = media aritmética de los datos logarítmicos, y_i = datos transformados logarítmicamente.

Exponencial:

$$f(x) = 1/a * e^{-x_i/a}$$

Donde: x_i = dato transformado logarítmicamente, a = media de los valores transformados logarítmicamente.

Valores extremos:

$$f(x) = q(e^{-q(x-w)} - e^{-q(x_1-w)})$$

$$q = \pi/\sigma\sqrt{6}, \text{ y } w = x - 0.5572/q$$

Donde: q = parámetro de escala, w = parámetro de posición, σ = desviación estándar de los datos transformados logarítmicamente, x_i = datos transformados logarítmicamente, e = exponente para máximos valores.

Se realizaron las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Sminov y de χ^2 a los valores absolutos de la diferencia de los valores observados y estimados con la distribución Log normal (Návar y Synnot, 2000).

Resultados y Discusión

Los datos de los sitios de estudio en el Bosque Escuela y el Matorral Escuela, se analizaron en forma conjunta y se sometieron al análisis estadístico. De los datos observados, los valores promedio, desviación estándar e intervalos de confianza de la tasa final de infiltración fueron 2.16 cm hr⁻¹, 10.3 y 0.66 cm hr⁻¹, respectivamente. En la Tabla 5.1 se muestran los parámetros de ajuste de la tasa de infiltración final determinada con los modelos aplicados a los 16 sitios bajo estudio. Se observa que los modelos aplicados a la tasa de infiltración a los 40 min son el modelo de Horton ($r^2 = 0.738$, $s_x = 2.056$, y $CV = 0.811$) y el modelo de Philip ($r^2 = 0.725$, $s_x = 2.584$, y $CV = 0.832$); sin embargo, aun cuando son muy similares, el modelo de Horton mostró estadísticos con mejor ajuste. Además de los estadísticos de ajuste, se consideró la tendencia en los valores promedio de los datos observados y modelados.

Tabla 5.1. Estadísticos de ajuste a la tasa de infiltración final (cm hr⁻¹) aplicada a los sitios en el sudeste del estado de Nuevo León, México.

| Modelo | r^2 | s_x | CV |
|-----------|-------|-------|-------|
| G&A | 0.649 | 3.127 | 0.878 |
| Kostiakov | 0.705 | 2.838 | 0.845 |
| Horton | 0.738 | 2.056 | 0.811 |
| Philip | 0.725 | 2.584 | 0.832 |

A partir de la información obtenida en los valores estimados por la ecuación de Horton, se realizó el histograma de valores observados y se aplicó la distribución Log normal a los valores de infiltración final modelados con la ecuación de Horton (Figura 5.1)

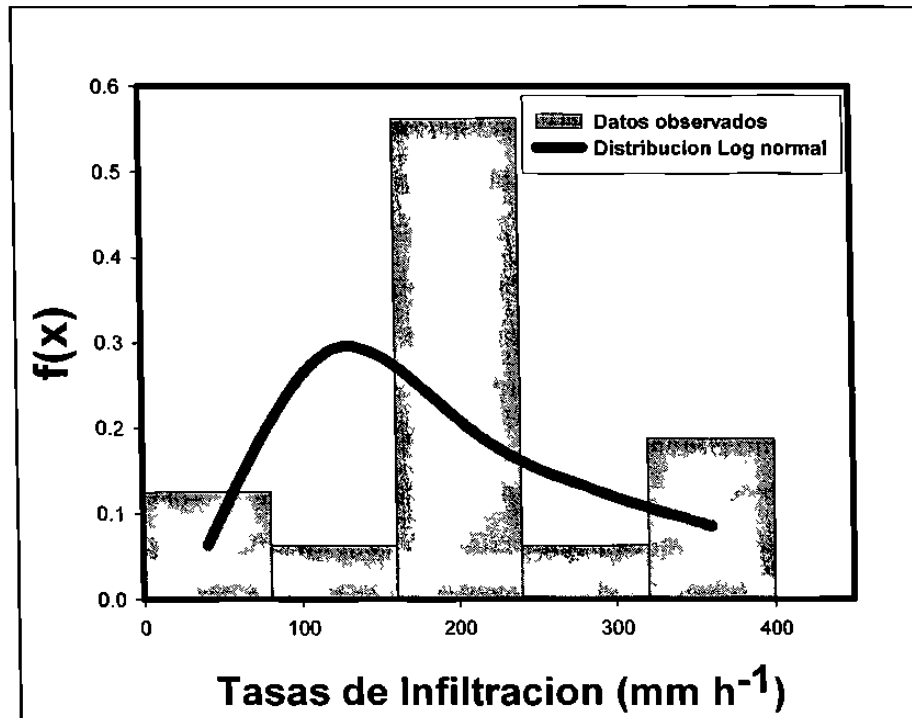


Figura 5.1. Histograma de los valores observados y la distribución Log normal ajustada a las tasas de infiltración final modelada por la ecuación de Horton.

La infiltración final modelada tuvo diferencias estadísticamente significativas entre localidades de estudio ($P < 0.0001$), pero no en intensidad y posición fuera y dentro de la cobertura vegetal ($P < 0.061$, $P < 0.91$, respectivamente). Esto es, los sitios tienen respuesta con una alta variación espacial en la infiltración final por tipo de suelo, fisiografía y uso del suelo y entre la cobertura vegetal del suelo, lo cual puede ser causado el uso del suelo y la degradación del área del matorral debido a disturbios por el pastoreo, la presencia frecuente de incendios, desarrollo y crecimiento urbano y manejo del área. Al comparar la diferencia absoluta de los valores observados y esperados en su distribución estadística con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, no se presentó una significancia al 0.01 y 0.05 % (0.17 y 0.21, respectivamente). Con la prueba de χ^2 , su

valor calculado fue 0.054 y no mostró significancia al 0.05, pero si al 0.1 % (0.103 y 0.0506, respectivamente). Esto es relacionado a la cubierta forestal sobre el suelo del bosque y matorral, la cual posee gran importancia hidrológica al poseer mantillo orgánico, raíces, suelos protegidos al pastoreo, al intemperismo y a otros factores de disturbio.

La frecuencia de los datos de la distribución Log normal se encontró que se ajustan a los datos de la tasa de infiltración final. La distribución Log normal mostró que la tasa final estimada en el estudio se distribuye en un 89 % en un rango de 0.01 a 20.05 cmhr⁻¹. Esto es debido a que las áreas boscosas de pino-encino de la Sierra Madre Oriental tienen una mayor entrada de agua al final de las estimaciones que las áreas del Matorral Espinoso Tamaulipeco. En ello, la matriz del suelo tiene gran importancia al considerar que la vegetación de especies arbóreas propicia la macroporosidad y materia orgánica; no obstante, esta área exhibió residuos de incendios que en algún momento afecta la matriz del suelo y en consecuencia las tasas de infiltración. Esta porción de la Sierra, merece especial atención debido a que se considera una importante zona de recarga de acuíferos y almacena agua en su interior que abastece los arroyos y ríos que confluyen en el municipio de Linares, Nuevo León. Es por ello que debe establecer una regulación para proteger al recurso agua durante aprovechamientos forestales. A diferencia, en el matorral se ha visto impactado por el desmonte para áreas agrícolas y el pastoreo, lo cual reduce la infiltración e incrementa la escorrentía, ocasionando daños al suelo estar desprovisto de cobertura, expuesto al impacto de las gotas de lluvia y compactación.

En Figura 5.2 se presentan las curvas de intensidad-duración-frecuencia para los municipios de Iturbide y Linares, Nuevo, León. En la curva de Iturbide se muestra que la frecuencia de eventos anuales se tiene lluvias con intensidades menores a 15 mm en periodos de una hora. En eventos bianuales, en lluvias de 30 minutos la intensidad aumenta hasta cerca de 50 mm; teniendo un incremento en eventos máximos a los 5, 10, 25 y 50 años de 74, 92, 110 y 125 mm, respectivamente. Estos eventos extremos se explican en el hecho que la cordillera oriental es una barrera natural a la circulación de

los vientos del Golfo de México que acarrear humedad y son descargados debido al efecto orográfico en estas localidades.

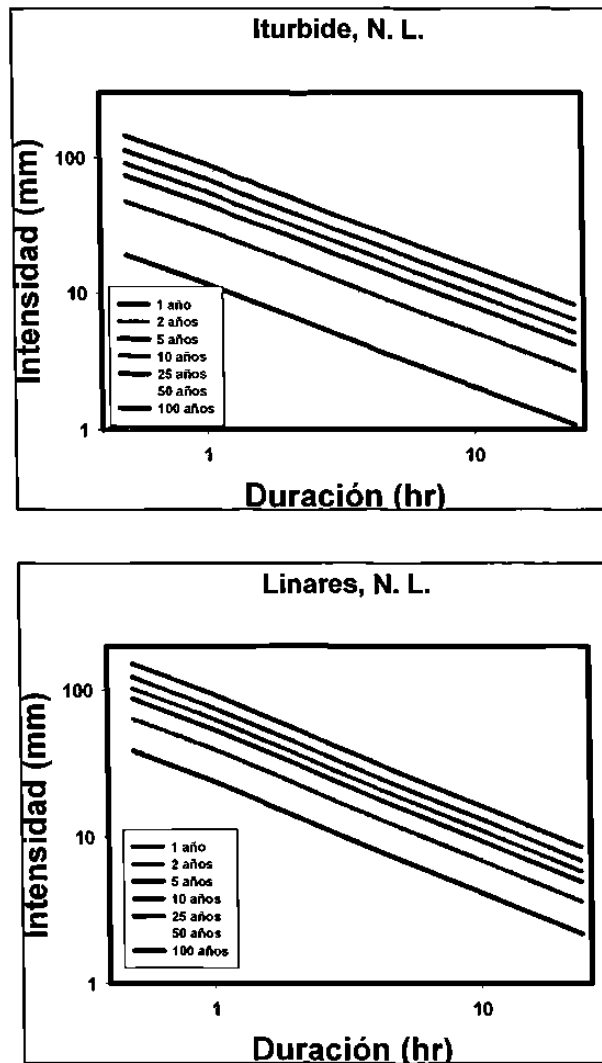


Figura 5.2. Curvas de intensidad-duración-frecuencia para las localidades de Iturbide y Linares, Nuevo León, México.

Las curvas de esorrentía-duración-frecuencia (EDF) para ambas localidades del sudeste de Nuevo León muestra la presencia de escurrimientos superficiales mínimos indicando que eventos máximos de precipitación de frecuencia anual son igualados por la entrada

de agua al suelo, con probabilidades de presencia desde un 0.2 hasta un 2.1 % en Iturbide y Linares Nuevo León, respectivamente (Figura 5.3). La probabilidad de la presencia de escurrimientos aumenta desde un 0.2 hasta 26% con lluvias con una frecuencia de 1 en cada 100 años, para ambas localidades. En periodos bianuales en eventos de duración de 1 hr, las lluvias producirán escorrentía superficial en el 2.6 y 6 % de la superficie estudiada en los municipios de Iturbide y Linares, respectivamente. La mayor probabilidad de escorrentía se presenta en el municipio de Linares, en el Matorral Espinoso Tamaulipeco, lo cual es de esperar dada la matriz de suelo que es afectada por los desmontes para la agricultura y el pastoreo, al disminuir el espacio poroso al ser compactada, alterar y modificar la actividad biológica del interior del suelo al reducir la cubierta vegetal y labrar y pastorear en esta región.

Conclusiones

Las tasas de infiltración no mostraron una diferencia estadística significativa en posición e intensidad, pero sí en localidad. Aun cuando hay diferencias, los efectos del uso del suelo sobre los procesos hidrológicos son evidentes con la presencia de disturbios en la cubierta de las comunidades vegetales y la superficie del suelo por el desmonte, la presencia de incendios y extracción de madera (leña y productos secundarios), por esto es necesario: a) normar y reglamentar el uso del suelo, b) minimizar los disturbios a la cubierta vegetal y, c) promover las prácticas de conservación de suelo y agua con la finalidad de incrementar la entrada de agua al suelo para abastecer la perenneabilidad de los cauces y su recarga a los mantos freáticos de la región.

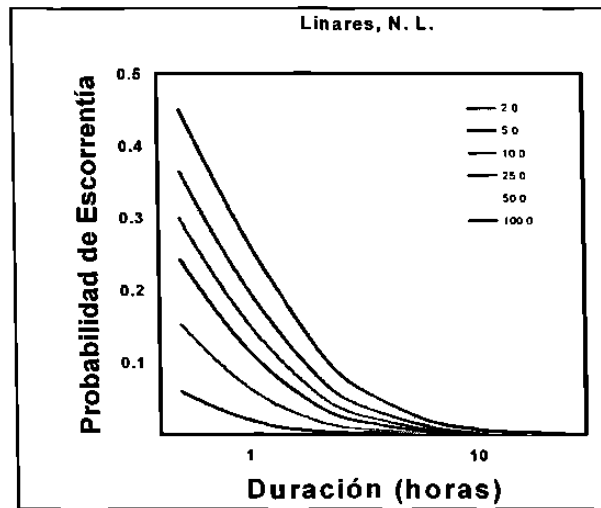
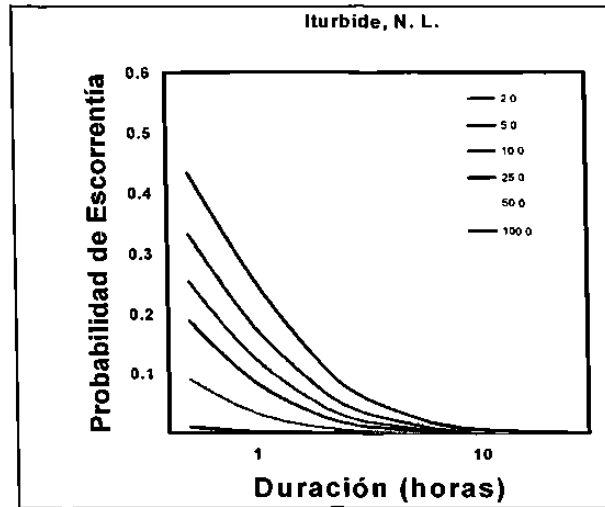


Figura 5.3. Curvas de probabilidad de escorrentía-duración-frecuencia para las localidades de Iturbide y Linares, Nuevo León, México.

Literatura Citada

- Aparicio, M., F. J. 2005. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. México. 303 p.
- Bormann, H., T. Fab, S. Giertz, B. Junge, B. Diekkruger, B. Reichert y A. Skowronek. 2005. From local Hydrological process analysis to regional hydrological model

- application in Benen: Concept, results and perspectives. *Physics and Chemistry of the Earth*. 30: 347-356. Doi: 10.1016/J.PCE.2005.06.005.
- Boughton, W. y O. Droop. 2003. Continuous simulation for flood estimation: A review. *Environmental Modelling and Software*. 18: 309-318. Doi: 10.1016/S1364-815(03)00004-5.
- Bronstert, A. y E. J. Plate. 1997. Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro-catchments. *Journal of Hydrology*. 198: 177-195. Doi: 10.1016/S0022-1694(96)03306-9.
- Burch, G. J., R. K. Bath, I. D. Moore y E. M. O'Loughlin. 1987. Comparative hydrological behaviour of forested and cleared catchments in southeastern Australia. *Journal of Hydrology*. 90: 19-42. Doi: 10.1016/0022-1694(87)90171-5.
- Camarasa B., A. M. y F. Segura B. 2001. Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia región, Spain. *CATENA*. 45: 229-249. Doi: 10.1016/S0341-8162(01)00146-1.
- Chahinian, N., R. Moussa, P. Andrieux y M. Voltz. 2005. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology*. 306: 191-214. Doi: 10.1016/J.JHYDROL.2004.09.009.
- Costelloe, J. F., R. B. Grayson, R. M. Argent y T. A. McMahon. 2003. Modelling the flow regime of an arid zone floodplain river, Diamantina River, Australia. *Environmental Modelling and Software*. 18: 693-703. Doi: 10.1016/S1364-8152(03)00071-9.
- Duénez-Alanís, J., J. Gutiérrez C., L. Perez R. y J Návar. 2004. Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento y erosión. *Terra Latinoamericana*. Xx:
- Estrada, A. E. y A. Marroquin F. 1988. Leguminosas de Nuevo Leon I. Sinopsis de las especies de Linares. Reporte Científico No. 9. Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Linares N. L. 49 p.
- Estrada, A. E. y A. Martínez M. 2004. Los géneros de leguminosas del norte de México. *Brit Press*. 134 p.
- Foody, G. M., E. M. Ghoneim y N. W. Arnell. 2004. Predicting locations sensitive to flash flooding in an arid environment. *Journal of Hydrology*. 292: 48-58. Doi: 10.1016/J.JHYDROL.2003.12.045.

- Hershfield, D. M. 1961. Rainfall frequency atlas of the United States. U. S. Weather Bureau Technical Paper 40. U. S. Department of Commerce, Washington, D. C. 378 p.
- Hillel, D. 1982. Introduction to soil physics. Second edition. Academic Press, Inc. USA. 364 p.
- Kollet, S. J. y R. M. Maxwell. 2005. Integrated surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow Boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Advances in Water Resources*. Doi: 10.1016/J.ADVWATRES.2005.08.006.
- Návar, J. y Synnott, T. 2000. Soil infiltration and land use in northeastern Mexico. *Terra* 18: 255-262.
- Navar, J., E. Carlyle y M. A. Martínez. 1999. Interception loss from the Tamaulipas matorral thornscrub of northeastern Mexico: An application of the gash analytical interception loss model. *Journal of Arid Environment*. 40: 1-10.
- Návar, J., T. Cavazos y P. A. Domínguez. 1994. Los balances hidrológicos mensuales con tres probabilidades del estado de Nuevo León. *In*: C. Pola S., J. A. Ramírez F., M. M. Rancel y I. Navarro L. (eds.) *Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. Linares, N. L.* 8: 71-82.
- Organización para las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1996. Planificación y manejo integrado de cuencas hidrográficas en zonas áridas y semiáridas de América Latina. Serie: Zonas Áridas y Semiáridas numero 7. Programa conjunto FAO/PNUMA de Control de la desertificación en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. 321 p.
- Pilgrim, D. H., D. D. Huff y T. D. Steele. 1978. A field evaluation of subsurface and surface runoff. *Journal of Hydrology*. 38: 319-341. Doi: 10.1016/0022-1694(78)90077-X.
- Viessman, W., G. L. Lewis y J. W. Knapp. 1990. Introduction to hydrology. third edition. Harper and Row, Inc. USA. 780 p.
- Wilcox, B. P., M. K. Wood, J. M. Tromble y T. J. Ward. 1986. A hand portable single nozzle rainfall simulator designed for use on steep slopes. *Journal of Range Management*. 39: 375-379.

Woerner, M. 1991. Los suelos bajo vegetación de matorral del noreste de México, descritos a través de ejemplos en el campus universitario de la UANL, Linares, N. L. Reporte Científico No. 22. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, N. L. 115 p.

CAPÍTULO III

CONCLUSIONES

En los diferentes estudios de caso en el norte de México que comprende esta investigación se encontraron conclusiones específicas, las cuales son influidas por las comunidades vegetales, el ambiente y estado actual del uso del suelo que afectan a los procesos hidrológicos.

El uso de la simulación de lluvia es una herramienta simple y útil en la estimación de los procesos de infiltración, escorrentía superficial y erosión al generar indicadores hidrológicos que ayudan a interpretar el estado actual de los ecosistemas y sus diferencias en el uso del suelo.

Con el empleo de modelos matemáticos las regiones o cuencas hidrológicas sin instrumentar puede apoyar la toma de decisiones y establecer un plan estratégico para la solución de problemáticas específicas. Tal es el caso de la estimación y ajuste de los procesos de infiltración, escorrentía superficial y los excesos de lluvia que producen flujos de gran magnitud y llega inundar centros poblacionales.

En el estado de Durango, los usos del suelo con manejo silvícola y pecuario tienen un efecto negativo en los procesos de infiltración, escurrimiento y erosión durante el primer año; para el segundo año se tiene una recuperación hidrológica en las áreas silvícolas, no así en las áreas con un uso combinado con la ganadería; lo cual conlleva a señalar la necesidad de normar el uso pecuario en los bosques, reducir los impactos durante la extracción de la trocería y el realizar prácticas de conservación de suelo y agua para propiciar el almacenamiento del agua en las zonas forestales.

En las localidades con aprovechamientos maderables de Pueblo Nuevo y San Dimas, Durango, el efecto fuera o dentro del dosel del arbolado comercial, en un análisis conjunto de todos los sitios estudiados, no mostró efectos significativos en el tiempo de infiltración o escurrimiento. Sin embargo, los suelos forestales de la región sur sudoeste

del estado presentan disturbios importantes al demostrar matemáticamente y con mediciones de campo que se presentan escurrimientos superficiales. Este disturbio debe de ser controlado con la finalidad de facilitar la entrada del agua al suelo, facilitar la recarga de acuíferos someros, regular el ciclo hidrológico, mantener la perennidad del agua en los cauces, y proveer con este servicio ambiental a los pobladores de las partes bajas de las cuencas forestales. La alta infiltrabilidad del suelo forestal indica el poco efecto de las gotas de lluvia por la presencia de amortiguamiento del mantillo orgánico, y la transferencia del agua infiltrada hacia la zona de las rocas fracturadas para entrar hacia el interior del suelo y llegar a los acuíferos. El movimiento es debido parcialmente por la presencia de macroporos formados por condiciones que originan la vida misma en el ecosistema, desde raíces, vivas, descompuestas, agujeros u orificios formados por nematodos, insectos, hormigas, etc. que originan movimiento del agua en el interior de los suelos. Así, estas altas tasas de infiltración mostradas raramente sobrepasan por la intensidad de la lluvia y por consiguiente tampoco o rara vez presentan escorrentía superficial.

En el área metropolitana de Saltillo, Coahuila, las unidades de respuesta hidrológica muestran diferencias en la infiltración al ser analizadas estadísticamente se encontraron diferencias significativas, por lo tanto la frecuencia y magnitud de la escorrentía superficial muestra que eventos máximos exceden la infiltración final de los suelos con diferente tipo de vegetación y posición fisiográfica en periodos de frecuencia anual, y con una probabilidad desde un 2.4 a un 64 % para el área metropolitana se tiene la probabilidad de la presencia de escurrimientos con problemas de inundación e incrementar con eventos de precipitación de una frecuencia de 1 en cada 25 años. Mientras en periodos bianuales, las lluvias producirán escorrentía superficial con problemas de inundación en el 41.4 % de la superficie del área metropolitana de Saltillo, Coahuila, México.

En el estudio de caso en el estado de Nuevo León se encontró y demostró que la cubierta forestal del bosque y matorral posee gran importancia hidrológica. Las altas tasas de infiltración se explican por la presencia de amortiguamiento de las gotas de lluvia por el

mantillo orgánico, y la transferencia del agua infiltrada hacia la zona de las rocas fracturadas para entrar hacia los acuíferos someros existentes. Las tasas de infiltración no mostraron una diferencia estadística significativa en posición e intensidad, pero sí en localidad. Aun cuando hay diferencias, los efectos del uso del suelo sobre los procesos hidrológicos son evidentes con la presencia de disturbios en la cubierta de las comunidades vegetales y la superficie del suelo por el desmonte, la presencia de incendios y extracción de madera (leña y productos secundarios), por esto es necesario: a) normar y reglamentar el uso del suelo, b) minimizar los disturbios a la cubierta vegetal y, c) promover las prácticas de conservación de suelo y agua con la finalidad de incrementar la entrada de agua al suelo para abastecer la perenneabilidad de los cauces y su recarga a los mantos freáticos de la región.

CAPÍTULO IV

ANEXO

Resúmenes de Ponencias en Congresos

Efecto del Uso del Suelo sobre la Infiltración y la Pérdida de Suelo en la Cuenca Paso de Piedra, Durango, México

Resumen

La Sierra Madre Occidental del estado de Durango, México es una zona forestal por excelencia que sirve de zona de recarga para las cuencas del Océano Pacífico y las cuencas interiores del centro norte del País. Los bosques han sido tradicionalmente utilizados para la extracción de tacería y el apacentamiento. En este reporte de investigación se estudio el efecto de tres tratamientos silvícolas y el apacentamiento en la infiltración, escorrentía y erosión de los suelos forestales de una microcuenca de Santa Bárbara, Durango, México. Estos procesos hidrológicos fueron evaluados en 1998 y en 1999 con el uso de un simulador de lluvia portátil, aplicando una intensidad de 10.47 cm hr⁻¹ durante 30 minutos en un 2do aclareo, 3er aclareo, corta de regeneración y pastizal. Para evaluar el efecto del tiempo en el inicio, tendencia y final de los procesos hidrológicos se realizó un análisis de covarianza, donde el tiempo se utilizo como covariable. Se encontró una mayor infiltración, menor flujo superficial de agua y perdida de suelo en los tratamientos con cortas selectivas de tacería de segundo aclareo respecto a las áreas con 3er aclareo y corta de regeneración y pastizal ($P = 0.0001$). Los tratamientos con cortas de tercer aclareo y de regeneración no difirieron significativamente en ambos sitios durante el segundo año. Los efectos de las cortas de tacería de mayores dimensiones en la infiltración, escorrentía y erosión fueron solo temporales y atribuido al arrastre de los árboles durante las operaciones de extracción. Estos procesos continuaron siendo altos en los pastizales con apacentamiento. Las recomendaciones que emergen de este estudio son (i) normar la capacidad de carga en los agostaderos forestales, (ii) reducir o eliminar los impactos ambientales provocados por la extracción de tacería y (iii) realizar las practicas de conservación de suelo y agua necesarias para continuar propiciando el almacenamiento del agua en las zonas forestales de la Sierra Madre Occidental de Durango, México.

Recuperación Hidrológica de un Bosque de Coníferas con uso Forestal-Pecuario en Durango, México

Introducción

En México existe poca información y recientemente controversia del uso y manejo del bosque con varios propósitos, tales como madera, forraje, agua, etc. En las últimas tres décadas los bosques se han tratado por el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), realizando 3 ó 4 aclareos, una corta de regeneración y una corta de liberación. Las actividades del aprovechamiento afectan el ecosistema forestal al modificar y alterar su estructura y composición, al suelo y el agua por el arrastre y arrime de trocería y por la construcción de caminos. Estas prácticas reducen la infiltración e incrementan la escorrentía y la pérdida de suelo, entre otros. En estudios de hidrología en Australia, se ha encontrado que en los caminos de extracción la infiltración se reduce hasta 5 veces y la cantidad de sedimentos se incrementa 3.1 más que las condiciones iniciales debido a la maquinaria pesada (Croke *et al.* 2001); mientras en Canadá, durante los aprovechamientos con un tráfico de más de 3 ciclos tiene mayor impacto en la compactación del suelo superficial con una tendencia a recuperarse en tres años (Startsev y McNabb 2000). Pinard *et al.* (2000) señala que un disturbio mínimo del subsuelo por la construcción controlada de caminos durante las extracciones de trocería tiene un disturbio menor al 50% y una recuperación en 3 años que un sitio compactado por la construcción sin control de caminos. Por otro lado, el manejo de los bosques es cuestionado por el aprovechamiento conjunto de madera y forraje. El manejo intensivo del ganado doméstico en los bosques disminuye la cobertura vegetal, remueve el mantillo, compacta el suelo, destruye la nueva masa forestal y expone al suelo a los efectos erosivos de la lluvia. Por lo anterior, se ha señalado que el uso forestal y pecuario tienen efectos similares en los procesos hidrológicos de infiltración y pérdida de suelo (Bezkorowajnyj *et al.*, 1993; Ballenger, 2001; Belsky y Blumenthal, 1997; Abeli y Sawe, 1999). El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar la tendencia en el tiempo de los procesos de escorrentía, infiltración y la erosión superficial en un bosque sometido a uso silvícola y pecuario. La hipótesis planteada fue que el

método silvícola conjuntamente con el pastoreo resultaría en tasas diferenciales de escorrentía, infiltración y erosión.

Materiales y Métodos

Este estudio se realizó en los años de 1991 y 1992 en la localidad de Santa Bárbara, al sureste de Durango, Dgo., en donde desde 1946 se realiza una actividad ganadera en la región forestal de la Sierra Madre Occidental, se localiza a los 23° 43" de latitud norte y 104° 51" de longitud oeste. Con el simulador de lluvia se aplicó una intensidad de 10.47 cm hr⁻¹ durante 30 min, evaluando los procesos de infiltración y erosión superficial en tratamientos silvícolas con pastoreo de corta de regeneración (CR), segundo aclareo (2A) y tercer aclareo (3A) y un área con pastoreo (BT). El efecto de los tratamientos silvícolas fue evaluado a través de un análisis de covarianza, donde la variable tiempo fue utilizada como covariable. Es decir, los procesos escorrentía, erosión e infiltración están en función del tiempo de simulación de la lluvia.

Resultados y Discusión

El análisis de covarianza mostró que la variable tiempo contribuyó en explicar la variación total desde un 40 hasta un 80% dependiendo del proceso que se estudio. En general, el tratamiento 2A mostró el menor impacto a la corta y extracción del arbolado. Es decir, tuvo las mejores condiciones hidrológicas porque exhibió una menor escorrentía, una infiltración mayor y pérdida de suelo menor desde el inicio hasta el final de las estimaciones. Es posible que el menor disturbio al suelo por las operaciones de extracción de trocería y sus dimensiones del arbolado no se haya impactado el suelo y el régimen hidrológico. Por el contrario, el tratamiento sin bosque y con pastoreo rotacional mostró la mayor escorrentía, menor infiltración y mayores pérdidas de suelo. Los tratamientos 3A y CR exhibieron una recuperación para el segundo año de estudio, estadísticamente fueron semejantes al tratamiento 2A, pero sus valores fueron menores. El impacto de la ganadería posiblemente aunado a la conversión de bosques a pastizales modifica las características hidrológicas de los suelos, con el potencial de alterar cuencas forestales a mediano y largo plazo. Estas aseveraciones deben de continuarse estudiando para determinar con mayor grado de precisión los efectos independientes del cambio de

uso de suelo y el pastoreo sobre los suelos forestales con la finalidad de encontrar los umbrales de la sustentabilidad en el manejo de cuencas hidrológicas.

Conclusiones

Las conclusiones que emergen de este estudio son (i) normar la densidad de carga en los pastizales forestales, (ii) reducir o eliminar los impactos ambientales provocados por la extracción de trocería y (iii) realizar las prácticas de conservación de suelo y agua necesarias en las zonas forestales de la Sierra Madre Occidental de Durango, México.

Literatura Citada

- Abeli, W. S. y C. T. Sawe. 1999. *Journal of Tropical Forest Science*. 11:438-445.
- Ballenger, C. 2001. Department-of-Primary-Industry-and-Fisheries, Northern Territory of Australia. No. 289. 17 pp.
- Belsky, A J y D M Blumenthal. 1997. *Conservation-Biology*. 11: 315-327.
- Bezkorowajnyj, P. G., A M Gordon y R A McBride. 1993. *Agroforestry Systems*. 21: 1-10.
- Pinard, M. A., M. G. Barker y J. Tay. 2000. *Forest Ecology and Management*. 130: 213-225.
- Croke, J., P. Hairsine, P. Fogarty y R. T. Brooks. 2001. *Forest Ecology and Management*. 143: 3-12.
- Startsev, A. D. y D. H. McNabb. 2000. *Canadian Journal of Soil Science*. 80: 617-624.

Escurrimiento e Infiltración bajo Diferentes Condiciones de Cobertura Forestal e Intensidad de Lluvia en los Bosques de Coníferas del Sur de Durango, México

Resumen

La Sierra Madre Occidental del estado de Durango, México es una zona forestal comercialmente importante que esta sometida a la extracción de madera desde hace varias décadas. Sus aguas superficiales derivan a las cuencas del Océano Pacífico y del altiplano central del país. En esta investigación, se estudió el efecto de la vegetación arbórea, bajo y fuera del dosel, con cuatro diferentes intensidades sobre la infiltración y escorrentía superficial en los suelos forestales de la región montañosa del sur-suroeste del estado de Durango, México. Estos procesos hidrológicos se evaluaron de enero a abril de 2004, con el uso de cuatro simuladores de lluvia portátiles, aplicando diferente intensidad dentro y fuera del dosel del arbolado, durante 40 minutos sobre microparcels de 0.1444 m². En total se realizaron 32 pruebas para evaluar los parámetros descritos. Los parámetros hidrológicos medidos están en función del tiempo de simulación, por esta razón se utilizó un análisis de covarianza, donde el tiempo fue la covariable. Aun con la disminución de la intensidad de lluvia y fuera del dosel del bosque, en las áreas con alteraciones y disturbio superficial se encontró mayor escorrentía superficial y menor infiltración. Asimismo, bajo dosel y con alta intensidad de lluvia, los sitios mostraron los menores escurrimientos y mayor entrada de agua, seguido de los sitios que recibieron baja intensidad. De acuerdo a estudios y a lo encontrado la recomendación es conservar la vegetación original con las densidades adecuadas para mantener la recarga de agua de los acuíferos y los bienes derivados de la cobertura forestal.

Palabras Clave: Hidrología Forestal, Escorrentía Superficial, Erosión de Suelos Forestales.

Hidrología Superficial en el Área Metropolitana de Saltillo, Coahuila, México

Resumen

En las inmediaciones de las áreas metropolitanas es necesario caracterizar la respuesta hidrológica, ya que se espera un comportamiento diferencial en la escorrentía superficial que pudiera ocasionar inundaciones. El objetivo de este estudio fue determinar las curvas de escorrentía-duración-frecuencia (CIFE), para determinar la probabilidad de inundación en la zona metropolitana de Saltillo, Coahuila, México. Se digitalizaron unidades homogéneas de respuesta hidrológica (URH). Para estimar la escorrentía superficial se utilizó la infiltración final ajustada previamente al valor estimado con el modelo de Horton. Con los datos de lluvias extremas de estaciones climáticas de Arteaga, Ramos Arizpe y Saltillo, Coahuila, se construyeron las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), utilizándose valores ajustados a la distribución de valores extremos. Con la diferencia de los valores extremos y la infiltración final, se calcularon las CIFE. La infiltración final estimada se distribuyó entre 0.01 y 33.51 cm h⁻¹. Las CIFE mostraron que eventos máximos exceden la infiltración final de las URH en periodos anuales, con una probabilidad de 2.4 y un 64 %. En eventos de frecuencia de 1 en cada 25 años, la probabilidad de escurrimientos que producen inundación se incrementa. En periodos bianuales, se producirá escorrentía superficial con problemas de inundación en el 41.4 % de la superficie del área metropolitana de Saltillo.

Palabras clave: distribución probabilística, curvas IDF, curvas EDF.

Abstract

The determination of the hydrological response around Metropolitan areas is needed, because the modified rainfall-runoff in these areas can lead to flooding. The objective of the present study was to determine the rainfall intensity-duration-frequency curves, in order to predict floods in the Metropolitan area of Saltillo, Coahuila, Mexico. The Metropolitan area of Saltillo was digitized at URH by vegetation covers, soils and slope, as well as the identification sites for superficial hydrology studies. Superficial runoff was estimated from the final infiltration fit on the rainfall-runoff Horton's model, previously evaluated. Using extreme rainfall data from climatological stations in

Arteaga, Ramos Arizpe and Saltillo, the Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves were calculated, fitting data to extreme value distribution. From IDF curves and final infiltration determination, the runoff-duration-frequency curves (IFE) were estimated. With this model, final infiltration was estimated to be 0.01 to 33.5 cm hr⁻¹. The IFE curves showed that maximum events in the Metropolitan area of Saltillo exceed the infiltration constant in the URH on annual periods, with probabilities of 2.4 to 64 %. Flood's probabilities in biannual events, increase in rainfall from 1 to 25 years. In biannual periods, precipitations producing total direct runoff volume would generate floods problems in 41.4 % of the Metropolitan area of Saltillo

Key words: probabilistic distributions, IDF curves, IFE curves.

Infiltrabilidad en la Cuenca del Valle de Saltillo, Coahuila, México

Resumen

El abastecimiento de agua a la población en el valle de Saltillo (Arteaga, Ramos Arizpe y Saltillo), Coahuila, México, es por la extracción del agua subterránea. La principal fuente de agua para los mantos freáticos son los eventos de precipitación; debido a esto el proceso de infiltración que debe ser estudiado para ser manipulado e incrementar el agua que podrá recargar los acuíferos que abastecen la zona metropolitana. El objetivo de este estudio es evaluar la infiltrabilidad en los suelos con diferente cubierta vegetal del área metropolitana de Saltillo, Coahuila, México. La infiltrabilidad se estimó con simuladores de lluvia portátiles, aplicando una intensidad de lluvia diferencial durante 40 min, cantidad necesaria para que esta este disponible sobre la superficie del suelo a presión atmosférica y penetre bajo las condiciones actuales del suelo. La infiltrabilidad fue ajustada con las ecuaciones de Philips, Green y Amp, Kostiakov y Horton, previa calibración. Los valores de infiltrabilidad final obtenidos con la ecuación de mejor ajuste en sus parámetros estadísticos se someterán con la distribución Log normal. Los datos de infiltración final observados y estimados se analizaron con un diseño completamente al azar para encontrar diferencias entre tratamientos y para conocer los mejores tratamientos se utilizó la prueba Tukey. Los resultados muestran que los suelos con mayor infiltrabilidad final son los suelos de Rendzina con pendiente de 0-30 %, Litósol con pendiente mayor al 30 % y Xerosol con pendiente de 0-8 %, y una vegetación de Matorral Desértico Micrófilo (18.8, 18.3 y 16.5 cm hr⁻¹, respectivamente); los suelos de menor entrada de agua fueron Yermósol y Regósol con pendiente de 0-8 % y Matorral Desértico Micrófilo (11.5 y 11.54 cm hr⁻¹, respectivamente). En la mayoría de los sitios se encontró disturbio por pastoreo, alta pedregosidad y compactación y baja cobertura vegetal. En los suelos de Bosque de Pino y Encino mostraron bajos valores de infiltración (12.8 cm hr⁻¹) al presentarse capas compactas y residuos de material orgánico debido a incendios forestales. De acuerdo a los resultados, la infiltrabilidad difiere en los diferentes suelos del área metropolitana. No obstante su topografía y cubierta vegetal, los suelos se encuentran disturbados en su superficie lo cual reduce la

entrada de agua al suelo y consecuentemente la cantidad de agua que podría llegar a los mantos freáticos.

