

Introducción

Los bosques templados son ecosistemas importantes para la recarga de los mantos acuíferos, ya que se estima que estos proveen 25 % del total nacional que es de 4.8 billones de metros cúbicos de agua (Torres y Guevara, 2002). Al respecto, la Sierra Madre Occidental del estado de Durango es una región vital para las cuencas del océano Pacífico y del interior del centro norte del país (Dueñez *et al.*, 2006).

La capacidad de infiltración es el término aplicado al proceso de entrada de agua a través de la superficie del suelo (Hillel, 1971). La estimación de la velocidad de infiltración y la lámina acumulada es de gran importancia dado que constituyen componentes clave del ciclo hidrológico; dicho cálculo permite cuantificar la escorrentía, la erosión, la disponibilidad de sedimentos, la capacidad de recarga de acuíferos, así como definir la operación de sistemas de riego y estudiar los efectos de diferentes prácticas de uso de la tierra (Grego y Vieira, 2005; Machiwal *et al.*, 2006).

Los usos del suelo asociados con actividades antrópicas, como la agricultura, el pastoreo y manejo forestal pueden afectar negativamente a la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos y contribuyen, de manera significativa, en los procesos de cambio climático a nivel regional (Sahagún-Sánchez y Reyes-Hernández, 2018). Además, ocasionan la disminución de las aportaciones hídricas, debido a que el suelo pierde su capacidad de infiltración y de recarga de los acuíferos (Turnbull *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2018).

El manejo forestal involucra la ejecución de un programa de prácticas silvícolas como son los métodos de regeneración: árboles Padre, corta de selección, cortas sucesivas y cortas totales o matarrasa; así como, todas las actividades de cultivo o tratamientos intermedios entre los que se consideran los aclareos, reforestaciones, quemas prescritas, cortas de saneamiento y podas, que se llevan a cabo durante la gestión del bosque (Monárrez *et al.*, 2018). Dichas prácticas son cuestionadas cuando, por la alta intensidad del aprovechamiento y de las operaciones de abastecimiento, reducen la vegetación forestal; provocan disturbios que exponen el suelo superficial a los efectos de las lluvias, alteran y

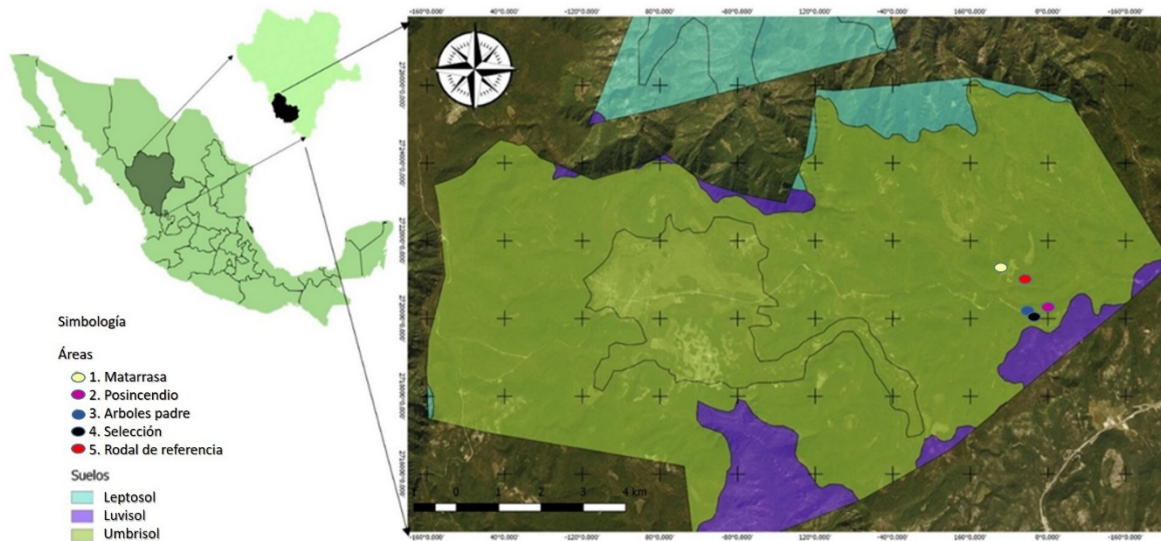


Figura 1. Área de estudio.

Diseño experimental

La evaluación se realizó en cinco sitios con diferentes condiciones silvícolas que corresponden a tres tipos de cortas, un área regenerada posincendio y un testigo denominado rodal de Referencia. Las áreas de los tratamientos bajo estudio son rodales aprovechados mediante cortas de regeneración con una edad promedio de ocho años, los cuales se describen a continuación: 1) Matarrasa: tiene una superficie de 10.29 ha y consistió en la extracción total del arbolado; 2) Árboles Padre: área de 9 ha y se aplicó una intensidad de corta de 80 %; 3) Selección: superficie de 20 ha, con un aprovechamiento equivalente a 34 % del volumen total; 4) Posincendio: área regenerada de 10 ha; y 5): rodal de Referencia o testigo de 4.35 ha.

En cada tratamiento (rodal) se aplicaron tres pruebas de infiltración durante la última semana de enero de 2019; para ello se usó un infiltrómetro de doble anillo (metálico), con diámetro interior de 15 cm y 30 cm de exterior y una altura de 45 cm; el cual se enterró a una profundidad de 10 cm. Las lecturas se llevaron a cabo por un lapso de 270 minutos, por medio de la aplicación de rellenos (recargas) variables. El proceso

Velocidad de infiltración

Con los datos de campo se calculó la velocidad de infiltración (Zhang *et al.*, 2017; Yáñez-Díaz *et al.*, 2019) mediante la ecuación:

$$I = \frac{HL \times 10 \times 60}{t}$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración (mm h^{-1})

HL = Diferencia entre lecturas (cm)

10 = Factor de conversión de cm a mm

60 = Factor de conversión de minutos a horas

t = Período de tiempo (min)

La infiltración acumulada (Fa) se determinó mediante la suma total de los volúmenes de agua infiltrada, considerada como la integral de la velocidad de infiltración en esos periodos:

$$Fa = \int_0^t I(t) dt$$



Modelo tipo *Lewis-Kostiakov*. Modificación del modelo original de *Kostiakov*, el cual adhiere a su fórmula el valor de infiltración básica, calculada a partir del promedio de los valores de la tasa para los últimos tres instantes (180, 210 y 270 minutos) de la prueba de infiltración (Yáñez-Díaz *et al.*, 2019):

$$F(t) = Fb + at^{-b}$$

Donde:

$F(t)$ = Tasa de infiltración (mm h^{-1}) en un tiempo dado

Fb = Tasa básica de infiltración (mm h^{-1})

a = Parámetro asociado a la infiltración inicial (mm h^{-1})

t = Tiempo (minutos)

b = Parámetro de ajuste

Análisis estadísticos

Las variables hidrológicas infiltración inicial (F_i), infiltración básica (F_b) e infiltración acumulada (F_a), así como la humedad gravimétrica fueron sometidas a la prueba de *Kolmogorov-Smirnov* (Romero, 2016) para verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. La variable F_i cumplió con estos, por lo que se le realizó un análisis de varianza para determinar la existencia de diferencias significativas entre los diferentes rodales, con un nivel de significancia de $p < 0.05$. A las variables de humedad gravimétrica, F_a y F_b se les aplicó la prueba no paramétrica de *Kruskal-Wallis* (Berlanga y Rubio, 2012) para determinar la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$) de cometer error tipo I. Los datos se analizaron con el paquete estadístico *Statistical Package for the Social Sciences*, versión 22 (IBM, 2013).

La Figura 2 describe el comportamiento de la tasa de infiltración observada en los distintos rodales. En general, se aprecian tres periodos distintos: inicialmente la velocidad de infiltración es alta y se mantiene constante por un corto tiempo (<15 min); después la tasa de infiltración baja considerablemente (15-60 min); lo que resulta en un tercer momento de estabilización, denominado tasa de infiltración básica, el cual tiende a apreciarse en todos los tratamientos después de los 200 minutos de aplicación de la prueba.

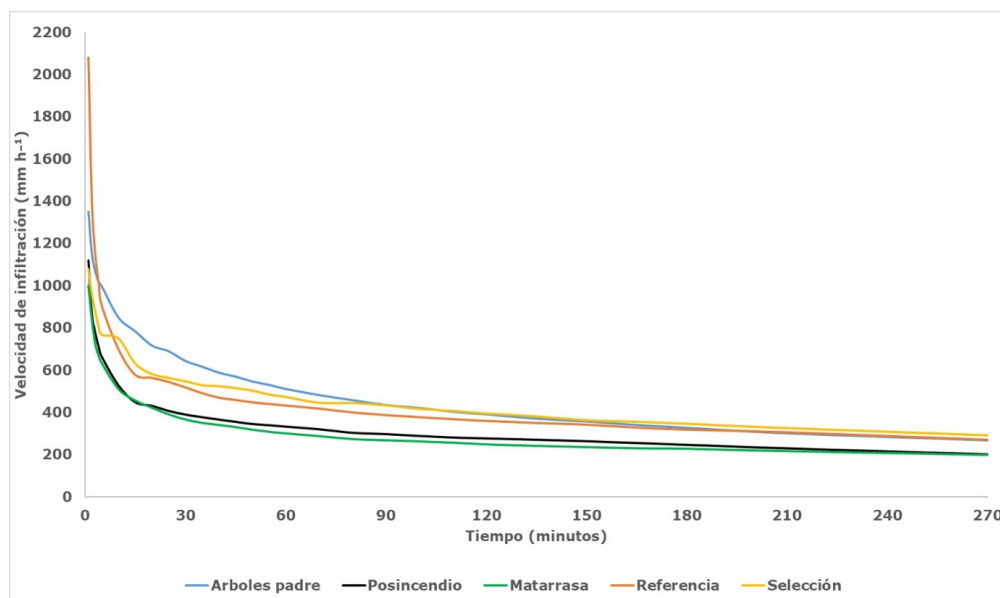


Figura 2. Tasa de infiltración observada en los rodales silvícolas.

En el proceso de infiltración acumulada se demostró que los rodales de Árboles Padre y Referencia tuvieron los mayores volúmenes de infiltración, seguidos del área de aprovechamiento por Selección, el área de posincendio y por último, la de Matarrasa. La infiltración acumulada creció en forma constante durante los primeros 60 minutos, posteriormente empezó a tener un crecimiento con segmentos más estables, la infiltración fue más lenta y prolongada a partir de los 200 minutos (Figura 3).

Cuadro 3. Parámetros de los modelos ajustados y coeficientes de determinación(R^2).

Tratamientos	Medición	<i>Kostiakov</i>			<i>Horton</i>			<i>Lewis-Kostiakov</i>				
		<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>Fb</i>	<i>Fi</i>	<i>K</i>	R^2	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>Fb</i>	R^2
Matarrasa	1er	1 141	-0.27	0.96	304	993	-0.05	0.92	942	-0.48	254	0.97
	2da	759	-0.38	0.94	172	1 075	-0.34	0.70	719	-0.74	137	0.92
	3er	1 144	-0.28	0.96	300	996	-0.06	0.92	948	-0.48	251	0.97
Árboles Padre	1er	1 191	-0.34	0.95	202	977	-0.05	0.93	1 081	-0.47	146	0.99
	2da	1 671	-0.21	0.98	508	1 392	-0.02	0.95	1 266	-0.37	453	0.98
	3er	248	-0.23	0.97	93	278	-0.16	0.80	189	-0.61	85	0.92
Selección	1era	371	-0.12	0.98	111	323	-0.01	0.80	203	-0.23	168	0.99
	2da	1 158	-0.25	0.97	250	926	-0.02	0.95	838	-0.42	322	0.97
	3er	308	-0.41	0.93	133	2 615	-422.6	0.31	184	-0.48	93	0.95
Posincendio	1er	714	-0.33	0.95	185	908	-0.27	0.74	644	-0.75	167	0.90
	2da	1 510	-0.32	0.95	309	1 263	-0.05	0.76	1 346	-0.46	215	0.89
	3er	1 025	-0.24	0.97	383	1 262	-0.24	0.75	844	-0.56	299	0.94
Rodal de Referencia	1er	2 112	-0.43	0.91	413	3 244	-0.41	0.64	2 076	-0.76	300	0.93
	2da	2 214	-0.43	0.92	407	2 973	-0.32	0.71	2 130	-0.67	263	0.96
	3er	1 379	-0.27	0.96	428	1 387	-0.13	0.82	1 177	-0.49	300	0.97

En la Figura 4, como ejemplo, se exhibe el comportamiento de la tasa de infiltración observada y estimada, a partir de los modelos ajustados de la tercera prueba para las áreas de rodal de Referencia, Selección, Matarrasa y Posincendio; se observa claramente que desde la infiltración inicial, el modelo de *Kostiakov* tiene un mejor arreglo, a diferencia de *Horton* el cual no estima de manera adecuada la tasa de infiltración durante los primeros momentos, y después de 30 minutos tienden a sobrestimar la infiltración. En general, ese comportamiento se registró en la mayoría de las pruebas. No obstante, el modelo de *Lewis-Kostiakov* tuvo un correcto desempeño en el ajuste, cuando se registraron tasas de infiltración inicial bajas ($F_i < 300 \text{ mm h}^{-1}$), a diferencia de los modelos de *Horton* y *Kostiakov*, los que sobrestimaron y subestimaron la infiltración, respectivamente; lo cual se observa claramente en el área de Selección.

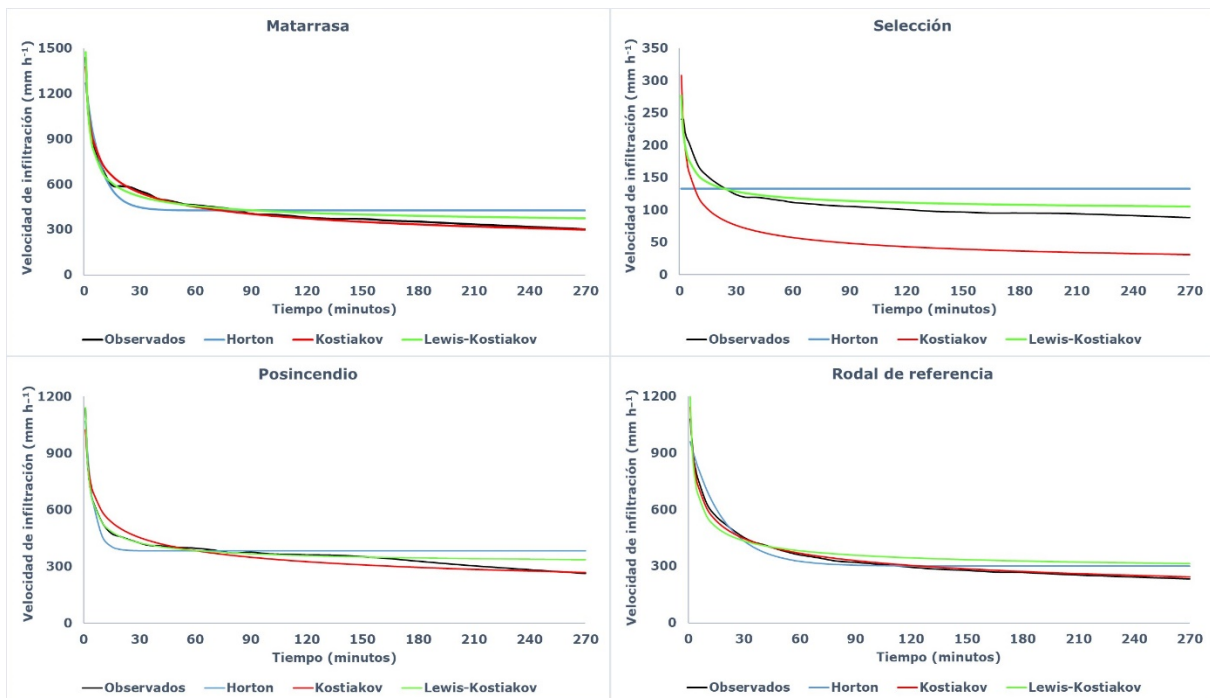


Figura 4. Ajuste de la tasa de infiltración a partir de los modelos de *Horton*, *Kostiakov* y *Lewis-Kostiakov*.

Discusión

Di Prima *et al.* (2017) señalan que la apertura del dosel, debido a la remoción de un cierto número de árboles, es una práctica importante que influye en las relaciones entre el suelo y el agua. Con base en los resultados del presente estudio, las diferencias de la infiltración inicial, básica y acumulada en los rodales están determinadas por el tipo de disturbio o tratamiento silvícola aplicado. Dueñez *et al.* (2006) y Landini *et al.* (2007) citan que la intensidad de corta es un factor importante que define los niveles de intercepción de la precipitación, luminosidad, contenidos de humedad y profundidad de materia orgánica en el suelo, etcétera; y por lo tanto, provocan un efecto directo en las propiedades hidráulicas del suelo.

Bens *et al.* (2007), Wagner *et al.* (2011) y Archer *et al.* (2013) indican que la profundidad y la cantidad de materia orgánica contribuyen a mejorar la estructura edáfica e incrementan la capacidad de infiltración, almacenamiento de agua y la conductividad hidráulica; y a partir de los resultados de *Fi*, *Fb* y *Fa*; así como de, las características físicas del suelo y la vegetación que predominan en los rodales estudiados; lo anterior se puede corroborar, principalmente, en el rodal de Matarrasa, cuyas propiedades fueron afectadas de manera importante por la intensidad de corta aplicada, y ello provocó disminuciones en las variables hidrológicas.

Los valores de las variables de infiltración permiten definir lo consignado por Hümann *et al.* (2011), Marshall *et al.* (2014) y Archer *et al.* (2016) quienes sugieren que la etapa de crecimiento del bosque es un factor relevante que determina las características hidrológicas del suelo. Esto concuerda con los resultados del estudio que aquí se documenta, en el que las áreas de Matarrasa y Posincendio son masas forestales que presentan un estado de madurez similar, a diferencia de los rodales de Árboles Padre, Selección y Referencia donde existe arbolado superior.

Respecto a los valores del estadístico R^2 , se nota muy poca variación entre el modelo tipo *Kostiakov* y el de *Lewis-Kostiakov*, los cuales representan adecuadamente la evolución de la lámina infiltrada en las pruebas de infiltración de los diferentes rodales

evaluados. Lo anterior se confirma con lo señalado por Návar y Synnott (2000), Weber y Apestegui (2016), Sihag *et al.* (2017) quienes indican que las mejores predicciones, por lo general, se obtienen con el modelo *Lewis-Kostiakov.*, ya que sus parámetros son más sensibles al tipo de suelos Umbrisol, que se caracteriza por presentar un horizonte superficial grueso y oscuro, insaturado de bases y rico en materia orgánica (Casanova *et al.*, 2007). En relación con lo anterior, disminuciones en la materia orgánica repercuten en la estabilidad de los agregados, al dispersar partículas finas texturales y con ello se favorece la disminución de la porosidad y, en consecuencia, hay decrementos en la infiltración (García-Hernández *et al.*, 2008).

Cabe señalar que la información respecto a los temas hidrológicos y su relación con el manejo forestal es escasa y limitada, con base en ello se resalta la importancia del presente estudio.

Conclusiones

La tasa de infiltración inicial ($2\ 080\ \text{mm h}^{-1}$), básica ($297.93\ \text{mm h}^{-1}$) y acumulada ($16\ 428.29\ \text{mm}$) observadas en el rodal de Referencia evidencian diferencias estadísticas significativas, respecto a los otros rodales analizados; por lo tanto, las modificaciones en la estructura forestal provocan un efecto negativo sobre las variables hidrológicas F_i , F_b y F_a .

Las variables que componen el proceso de infiltración presentan el siguiente orden decreciente:

- Infiltración inicial: Referencia > Árboles Padre > Posincendio > Selección > Matarrasa
- Infiltración básica: Selección > Referencia > Árboles Padre > Posincendio > Matarrasa
- Infiltración acumulada: Árboles Padre > Referencia > Selección > Posincendio > Matarrasa

Características como el estado de madurez de la vegetación, estructura, composición y las variables edáficas densidad aparente, espesor de capa orgánica y humedad provocan variaciones en las tasas de infiltración en los diferentes rodales analizados. Los resultados del ajuste de modelos, basados en el coeficiente de determinación (R^2), muestran que los de *Kostiakov* y *Lewis-Kostiakov* son adecuados para predecir la infiltración en las diferentes condiciones del bosque estudiadas, específicamente, el modelo *Lewis-Kostiakov* estima mejor la infiltración para las áreas de Selección y Referencia, y en los rodales de Árboles Padre, Matarrasa y Posincendio es mejor descrita por el modelo *Kostiakov*.

Los parámetros de los modelos de infiltración son de gran importancia para estimar la recarga de los acuíferos, escurrimientos superficiales, erosión del suelo y por ende, facilitan la toma de decisiones con bases de sustentabilidad.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento a la Unidad de Prestación de Servicios Ejidales No. 6 El Salto, A. C., a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León y al Conacyt por todas las facilidades otorgadas para el desarrollo de la investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Erik Orlando Luna Robles: desarrollo de la investigación en campo y escritorio, estructura y diseño del manuscrito; Israel Cantú Silva: corrección del manuscrito y análisis estadístico; María Inés Yáñez Díaz: aportación de información analítica al manuscrito; Humberto González Rodríguez: corrección y revisión del documento; José Guadalupe Marmolejo Monsiváis: revisión y correcciones de manuscrito; Silvia Janeth Béjar Pulido: toma y procesamiento de datos del manuscrito.

Referencias

Archer, N. A. L., M. Bonell, N. Coles, A. M. MacDonald, C. A. Auton and R. Stevenson. 2013. Características del suelo y relaciones de cobertura del suelo en la conductividad hidráulica del suelo a escala de ladera: una visión hacia el manejo local de inundaciones *Journal of Hydrology* 497: 208-222. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.05.043.

Archer, N. A., W. Otten, S. Schmidt, A. G. Bengough, N. Shah and M. Bonell. 2016. Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grassland in a temperate northern climate. *Ecohydrology* 9(4): 585-600. Doi: 10.1002/eco.1658.

Bens, O., N. A. Wahl, H. Fischer and R. F. Hüttl. 2007. Water infiltration and hydraulic conductivity in sandy cambisols: impacts of forest transformation on soil hydrological properties. *European Journal of Forest Research* 126(1): 01-109. Doi: 10.1007/s10342-006-0133-7.

Berlanga, V. y H. M. J. Rubio. 2012. Clasificación de pruebas no paramétricas. Cómo aplicarlas en SPSS. *REIRE. Revista d'Innovació i Recerca en Educació* 5(2):101-113. Doi: 10.1344/reire2012.5.2528.

Casanova, M., W. Luzio y R. Maldonado. 2007. Correlación entre World Reference Base y Soil Taxonomy para los suelos de la VII Región del Maule de Chile. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 7(2): 14-21. Doi: 10.4067/S0718-27912007000200002.

Collis, G., N. 1977. Infiltration equations for simple soil systems. *Water resources research* 13(2): 395-403. Doi: 10.1029/WR013i002p00395.

Di Prima, S., V. Bagarello, J. Angulo, R. I. Bautista, A. Cerdà, A. Del Campo and F. Maetzke. 2017. Impacts of thinning of a Mediterranean oak forest on soil properties influencing water infiltration. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 65(3): 276-286. Doi: 10.1515/johh-2017-0016.

Dueñez, A., J. Gutiérrez, J. Pérez y J. Návar. 2006. Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión. *Terra Latinoamericana* 24(2): 233-240.

García-Hernández, M. A., M. A. García-Hernández, I. Castellanos-Vargas, Z. Cano-Santana y C. M. Peláez-Rocha. 2008. Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana* 26(1): 21-27.

González-Elizondo, M. S., M. González-Elizondo, J. A. Tena-Flores, L. Ruacho-González e I. López-Enríquez. 2012. Vegetación de la sierra madre occidental, México: Una síntesis. *Acta Botánica Mexicana* (100): 351-403. Doi: 10.21829/abm100.2012.40.

Grego, C. R. y S. R. Vieira. 2005. Variabilidad espacial de propiedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo Viçosa* 29(2):169-77. Doi: 10.1590/S0100-06832005000200002.

Hillel, D. 1971. *Soil and Water*. Academic Press. New York, NY, USA. pp. 131-153.

Hümann, M., G. Schüler, C. Müller, R. Schneider, M. Johst and T. Caspari. 2011. Identification of runoff processes–The impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. *Journal of Hydrology* 409(3-4): 637-649. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.067.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2005. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Clave geoestadística. Pueblo Nuevo, Dgo., México. 9 p.
- International Business Machines (IBM). 2013. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 22.0. IBM Corp. Armonk, New York. E.U.A. n/p.
- Landini, A. M., D. Martínez, H. Días, E. Soza, D. Agnes y C. Sainato. 2007. Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ciencia del suelo* 25(2): 123-131.
- Machiwal, D., M. K. Jha and B. C. Mal. 2006. Modelling Infiltration and quantifying spatial soil variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering* 95(4):569-582. Doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.08.007.
- Marshall, M. R., C. E. Ballard, Z. L. Frogbrook, I. Solloway, N. McIntyre, B. Reynolds, and H. S. Wheeler. 2014. The impact of rural land management changes on soil hydraulic properties and runoff processes: results from experimental plots in upland UK. *Hydrological Processes* 28(4): 2617-2629. Doi: 10.1002/hyp.9826.
- Monárrez, G. J. C., V. G. Pérez, G. C. López, L. M. A. Márquez y M. D. S. G. Elizondo. 2018. Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques* 24(2): 1-16. Doi: 10.21829/myb.2018.2421569.
- Návar, J. and T. J. Synnott. 2000. Soil infiltration and land use in Linares, NL, Mexico. *Terra Latinoamericana* 18(3): 255-262.
- Pérez, E. G. y A. M. Romance. 2012. Modelación de la infiltración en un campo agrícola de la cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola* 12(2): 365-388.
- Pérez O., D. J., J. A. Segovia O., P. C. Cabrera M., I. A. Delgado V. y M. L. Martins P. 2018. Uso del suelo y su influencia en la presión y degradación de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas. *RIAA* 9(1): 1. Doi: 10.22490/21456453.2089.

- Rodríguez-Vásquez, A., A. M. Aristizábal-Castillo y J. H. Camacho-Tamayo. 2008. Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov en un suelo Ándico. *Engenharia Agrícola* 28(1): 64-75. Doi: 10.1590/S0100-69162008000100007.
- Romero S., M. 2016. Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Enfermería del Trabajo* 6(3): 105-114.
- Sahagún-Sánchez, F. J., y H. Reyes-Hernández. 2018. Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *Ciencia UAT* 12(2): 6-21.
- Sihag, P., N. K. Tiwari and S. Ranjan. 2017. Estimation and inter-comparison of infiltration models. *Water Science* 31(1): 34-43. Doi:10.1016/j.wsj.2017.03.001.
- Torres, R., J. M., y S. A. Guevara. 2002. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica* 63: 40–59.
- Turnbull, L., J. Wainwright and R. E. Brazier. 2010. Changes in hydrology and erosion over a transition from grassland to shrubland. *Hydrological Processes: An International Journal* 24(4): 393-414. Doi: 10.1002/hyp.7491.
- Wagner, S., H. Fischer and F. Huth. 2011. Canopy effects on vegetation caused by harvesting and regeneration treatments. *European Journal of Forest Research*, 130(1): 17-40. Doi: 10.1007/s10342-010-0378-z.
- Weber, J. F. y L. Apestegui. 2016. Relaciones entre parámetros de los modelos de infiltración de Kostiakov y Lewis-Kostiakov. Córdoba, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7(2): 115-132.
- Woerner, M. 1989. Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. Departamento Agroforestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N.L., México. 105 p.

Yáñez-Díaz, M. I., I. Cantú-Silva, H. González-Rodríguez and L. Sánchez-Castillo. 2019. Effects of land use change and seasonal variation in the hydrophysical properties in Vertisols in northeastern Mexico. *Soil Use and Management* 35(3):10. Doi: 10.1111/sum.12500.

Zhang, J., T. Lei, L. Qu, P. Chen, X. Gao, C. Chen and G. Su. 2017. Method to measure soil matrix infiltration in forest soil. *Journal of Hydrology* 552: 241–248. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.032.

Zúñiga, J., E. Martínez, C. Navarrete, J. D. J. S. Luna, D. M. Ayala, y B. Mejía. 2018. Análisis ecológico de un área de pago por servicios ambientales hidrológicos en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México. *Investigación y Ciencia* 73: 27-36.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 [Atribución-No Comercial \(CC BY-NC 4.0 Internacional\)](#)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.