

Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México

Infiltration and runoff of water in soils of a basin, in southern Mexico

Salvador Lozano-Trejo^{1†} , Jaime Olazo-Aquino² , María I. Pérez-León¹ ,
Ernesto Castañeda-Hidalgo¹ , Gustavo O. Díaz-Zorrilla¹  y Gisela M. Santiago-Martínez¹ 

¹ Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. ² Egresado del programa de Maestría en Ciencias del ITVO. Ex-Hacienda de Nazareno. 71230 Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

† Autor para correspondencia (lozanos2004@gmail.com)

RESUMEN

El cambio de uso de suelo en el territorio de una cuenca, afecta directamente la infiltración y escurrimiento superficial de agua, alterando el balance del ciclo hidrológico. Por lo que estimar parámetros de infiltración y escurrimiento por tipo de uso de suelo y vegetación (USV), es fundamental para diferenciar el impacto que ejerce el cambio de uso del suelo, sobre el balance hídrico de la misma. El objetivo de este estudio fue estimar la infiltración acumulada (F), tasa de infiltración básica (Ti), tasa de infiltración constante (fc) y coeficiente de decaimiento (k); así como los coeficientes de infiltración y escurrimiento en suelos del bosque mesófilo de montaña (BMM), selva mediana subperennifolia asociada con café bajo sombra (SMSPC), bosque de pino encino (BPQ), bosque de encino (BQ), pastizal inducido (PI), bosque de pino (BP), tierra de cultivo en uso (TC) y tierra de cultivo en descanso (TCD). Se realizaron 38 experimentos de lluvia simulada con intensidad media de 100 mm h⁻¹ con un simulador tipo mono vertedor trípode. Se utilizó el modelo exponencial para estimar fc y k, y el modelo semi empírico de Horton para estimar Ti y F. El análisis de varianza se realizó con el modelo lineal general (GML) para los efectos de USV y clase textural, análisis de covarianza para estudiar los efectos de pendiente del suelo, profundidad de mantillo, contenido de materia orgánica; contenido de arena, limo y arcilla y densidad aparente. El modelo exponencial ajustó más del 80% de la variabilidad total (R²) en todos los USV. Las TC y TCD mostraron la menor F y Ti, con el mayor k ($P < 0.001$), el BMM mostró la mayor capacidad de

infiltración (F) y menores tasas de decaimiento (k). Las variables asociadas positivamente con la infiltración ($P < 0.01$) fueron la densidad aparente del suelo, contenido de limo y materia orgánica.

Palabras clave: capacidad de infiltración, Horton, lluvia simulada, modelo exponencial, tasa de infiltración.

SUMMARY

Changes in the land use of a basin area affects the infiltration and surface water runoff directly, altering the balance of the hydrological cycle. Therefore, estimating parameters of water infiltration and runoff for each type of land use and vegetation (USV) is fundamental to differentiate the impact caused by a change of land use over the hydric balance of a given area. The objective of this study was to estimate cumulative infiltration (F), basic infiltration rate (Ti), constant infiltration rate (fc) and infiltration decay coefficient (k); as well as infiltration and runoff coefficients in mountainous cloud forest (BMM), (SMSPC), pine-oak forest (BPQ), oak forest (BQ), induced grassland (PI), pine forest (BP), agricultural land in use (TC) and fallowed agricultural land (TCD). Thirty-eight simulated rain experiments were carried out at an average intensity of 100 mm h⁻¹ with a hand-portable single nozzle rainfall simulator. The exponential model was employed to estimate fc and k and the Horton semi-empirical model to estimate Ti and F. The analysis of variance was performed by the generalized linear model (GML) to evaluate the effects of USV and texture type, and the

Cita recomendada:

Lozano-Trejo, S., J. Olazo-Aquino, M. I. Pérez-León, E. Castañeda-Hidalgo, G. O. Díaz-Zorrilla y G. M. Santiago-Martínez. 2020. Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Terra Latinoamericana* 38: 57-66.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.443>

Recibido: 27 de agosto de 2018.

Aceptado: 13 de septiembre de 2019.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 38: 57-66.

analysis of covariance was employed to determine the effects of slope, mulch depth, organic matter % of total variability content, sand, mud and clay content, and bulk density. The exponential model fitted more than 80% of total variability (R^2) at all USV. Agricultural land in use and TCD showed the lowest F and Ti and the highest k ($P < 0.001$), BMM exhibited the highest infiltration capacity (F) and lowest decay rate (k). The bulk density of the soil, and content of mud and organic matter were the variables positively associated to infiltration ($P < 0.01$).

Index words: *infiltration capacity, Horton, simulated rain, exponential model, infiltration rate.*

INTRODUCCIÓN

La conversión de tierras ocupadas por bosques templados, tropicales y subtropicales en el sureste de México, es un problema que afecta a los ecosistemas para brindar servicios hidrológicos en cuencas con territorios orográficamente complejos (Muñoz-Villers y López-Blanco, 2008; Toledo-Aceves *et al.*, 2011). La cuenca del río Copalita, ha experimentado la transformación de más de 40 000 hectáreas de bosques templados de pino y pino-encino a cultivos anuales en la cuenca alta y media (27% del territorio de la cuenca), bajo el sistema de roza-tumba y quema con rotación de parcelas agrícolas que dejan descansar de 2 a 7 años (SAGARPA/SEDAPA, 2014¹). La sustitución de los bosques está propiciando menores tasas de infiltración, aumentando los escurrimientos y tasas de pérdida de suelo (Dueñez-Alanís *et al.*, 2006).

Medir la infiltración directamente, sigue siendo complicado por la multitud de factores involucrados y por la escala de las mediciones. Existen diferentes formas de medirla en parcelas de escurrimiento, a través de infiltrómetros y simuladores de lluvia; estos últimos permiten el control experimental de las intensidades de lluvia aplicada, en condiciones de campo y la oportunidad de realizar un mayor número de repeticiones, incluso estimar la pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1978; Meyer, 1994). Para tal caso, se requiere el uso de ecuaciones predictivas, que han sido suficientemente validadas durante más de 50 años en modelos de infiltración (Mayor *et al.*, 2009; Shao y Baumgartl, 2014) para generar la estimación de

los parámetros de un comportamiento típico, explicado por Horton desde 1940.

Beven (2004) destaca, que la capacidad de infiltración está en gran parte controlada por la resistencia de la capa superficial del suelo, a la penetración del agua al comienzo de la precipitación; numerosos datos experimentales, muestran que hay una marcada variación de la capacidad de infiltración para el mismo suelo, con la misma profundidad de penetración, diferentes tipos de cobertura y diferentes tratamientos de la superficie del suelo. Otros autores han sugerido la influencia específica de la conductividad hidráulica (CH) y la intensidad de lluvia aplicada, el contenido de arena, limo y arcilla; el contenido de materia orgánica y la pendiente de la superficie del suelo, el micro relieve, el grado de cobertura del suelo; entre otros (Merz *et al.*, 2002; Langhans *et al.*, 2010, 2012). Sin embargo, no ha sido posible integrar en un solo modelo de regresión eficiente, a todos estos factores que han sido obtenidos de manera unitaria, en los modelos empíricos y semi empíricos de Green y Ampt (1911), Horton (1941), Phillips (1957) y Holtan (1961); pero se ha demostrado que cuando la conductividad hidráulica (CH) del suelo, es incorporada como factor predictor de la tasa de infiltración, la eficacia de los modelos mejora sustancialmente (Shao y Baumgartl, 2014). Lo anterior puede ser debido a que la CH se halla gobernada por propiedades físicas de la masa del suelo y del fluido contenido (Rojas *et al.*, 2008). Peinado-Guevara *et al.* (2010), encontraron una alta correlación entre el contenido de arcilla en el suelo y valores de CH, ellos concluyen que a medida que aumenta el contenido de arcillas la CH disminuye ($r = -0.96$); lo cual se relaciona con una menor porosidad del suelo y en consecuencia menor infiltrabilidad (Osuna-Ceja y Padilla-Ramírez, 1998).

La presente investigación tuvo el propósito de explorar la variabilidad de la infiltración total o acumulada (F), tasa de infiltración básica (Ti), tasa de infiltración constante (fc), coeficiente de decaimiento (-k), y los coeficientes de infiltración (CINF) y escurrimiento (CESC), en diferentes tipos de uso del suelo y vegetación; generados con series de ensayos de lluvia simulada en micro parcelas. Así como determinar si los estimadores se hallan asociados a las condiciones de uso de suelo y vegetación prevalecientes, profundidad de suelo y clase textural.

¹ SAGARPA/SEDAPA. 2014. Plan rector de la cuenca emblemática del río Copalita. Informe final. Ciudad Judicial, Reyes Mantecón San Bartolo Coyotepec Oax. Edificio Gral. Heliodoro Charis Castro, archivo de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Pesca y Acuicultura, versión digital.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La cuenca del río Copalita se encuentra en la Región Hidrológica 21 “Costa de Oaxaca” integrada por seis microcuencas, de las cuales cinco forman la porción alta y media del río Copalita. Las mayores precipitaciones ocurren con un media de 1200 a 2500 mm anuales e intensidades de lluvia de 80 a 150 mm h⁻¹ durante 30 min, para 10 años de retorno (Rodríguez, 2012²). En el territorio se distribuyen 12 formaciones vegetales sobre una área aproximada de 1151.6 km², en un gradiente altitudinal de 230 a 3750 m, con una diversidad de suelos de tipo: Leptosol, Cambisol, Luvisol y Phaeozem, mayormente (SAGARPA/SEDAPA, 2014¹). La morfometría de la cuenca revela una orografía compleja con 51.8% de pendiente media, densidad de drenaje de 1.75 km km⁻², un coeficiente de compacidad de 1.65 (oval-oblonga a rectangular-oblonga) y una sinuosidad de corriente principal de 1.92 (INEGI/SIATL, 2017).

Medición de Variables

Se realizaron 38 experimentos de lluvia simulada con diferente número de repeticiones en ocho tipos de uso de suelo y vegetación (USV): bosque mesófilo de montaña (BMM), selva mediana subperennifolia asociada con café bajo sombra (SMSPC), bosque de pino-encino (BPQ), bosque de encino (BQ), pastizal inducido (PI), bosque de pino (BP), tierra de cultivo en uso (TC) y tierra de cultivo en descanso (TCD). Las variables medidas en campo fueron volumen de agua escurrida, volumen de agua infiltrada, pendiente del suelo (grados de inclinación) con clinómetro Sunto; profundidad de mantillo (cm) con vernier, y profundidad del suelo (cm) con barrena graduada. Se utilizó un simulador mono vertedor trípode con patas ajustables, regadera a una altura de 1.98 m, recomendado para superficies con pendiente significativa; prototipo y procedimiento propuesto por Wilcox *et al.* (1986), en condiciones de suelo seco. El tamaño medio de gota para el dispersor utilizado, fue de 1.2 mm equivalente al 36% de la energía cinética de las gotas de lluvia natural, generando ensayos estandarizados de lluvia simulada durante la época seca de febrero a marzo

del 2014. El volumen de agua escurrido y captado (L min⁻¹), se midió en un área de 1 m² delimitada con lámina galvanizada enterrada a 5 cm de profundidad, colocando un receptor del mismo material en el punto más bajo del área delimitada; durante 25 a 30 min de aplicación de lluvia simulada (Figura 1). Se calculó el coeficiente de escurrimiento (CESC) y el coeficiente de infiltración (CINF) en porcentaje, por diferencia del volumen vertido conocido (100 L h⁻¹), menos el volumen escurrido y captado con una probeta graduada de 2 L. Se obtuvieron 38 muestras de suelo, una en cada sitio de aplicación de lluvia simulada, a las cuales se les determinó la materia orgánica por el procedimiento de Walkley y Black; textura por el método hidrómetro de Bouyoucos y densidad aparente por el método de la probeta en el Laboratorio Central Universitario de la Universidad Autónoma Chapingo, UACH.

Modelos de Ajuste

Para obtener el valor de la infiltración constante (f_c) se utilizó el modelo exponencial negativo, recomendado por Lin *et al.* (2007), el cual puede estimar valores aceptables de la tasa de infiltración en equilibrio:

$$f_c = f_o \exp^{-kt} \quad (1)$$

donde: f_o = infiltración inicial y $-k$ la constante de decaimiento por el tiempo (t) del ensayo de lluvia simulada. Utilizando los parámetros anteriores, se



Figura 1. Simulación de lluvia mono vertedor de agua.
Figure 1. Single nozzle rainfall simulation.

² Rodríguez T., D. 2012. Disponibilidad del agua y riesgo hidrológico en los escurrimientos de la cuenca del Río Copalita, con un modelo estocástico. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, México D.F. 130p.

estimó la tasa de infiltración (Ti), incorporando los valores correspondientes a la ecuación semi empírica de Horton (Horton, 1941; Beven, 2004; Guevara y Márquez, 2009):

$$Ti = fc + (fo - fc)e^{-kt} \quad (2)$$

donde: Ti = tasa de infiltración en mm h^{-1} , fc = infiltración constante en mm h^{-1} , fo = infiltración inicial al $t = 0$; “ e ” representación de la función exponencial y $-kt$ es la constante de decaimiento de la infiltración (L min^{-1}) a través del tiempo (t) del ensayo de aplicación de lluvia simulada. Debido al comportamiento hiperbólico de los datos se integró $f = k / t^n$, al modelo empírico de Horton para estimar el volumen total de la infiltración (F) (Horton, 1941; Mishra y Singh, 2004):

$$F = [fo - fc/k][1 - \exp(-kt)] \quad (3)$$

donde: F es el volumen total de agua infiltrada o acumulada.

En suelos del BMM, la capacidad de infiltración del suelo, superó la intensidad de lluvia aplicada de 100 mm h^{-1} , por lo que se repitieron los ensayos incrementando el volumen de agua vertida a 150 mm h^{-1} y se empleó la ecuación modificada por Akan (1992), para estimar el volumen total de agua acumulada en estos casos:

$$F = r(fo - r)/k(r - fc) \quad (4)$$

donde: r = la intensidad de lluvia aplicada; fo = infiltración inicial ajustada, k = coeficiente de decaimiento y fc = infiltración constante.

Análisis de Datos

Los parámetros de los modelos fueron optimizados por el método de Marquardt, bajo el procedimiento “model” (regresión no lineal) (SAS versión 9.4). Los estimadores y los coeficientes de infiltración y escurrimiento, fueron sometidos a un análisis de varianza por el procedimiento GLM (General Linear Model); análisis de covarianza covarianza para las variables intensidad de lluvia aplicada, suficiencia del modelo ajustado, profundidad de mantillo, contenido de materia orgánica en el suelo, contenido de arena, limo y arcilla; densidad aparente del suelo y grado de

pendiente; además, prueba de medias (Duncan, $\alpha = 0.05$) (Shao y Baumgartl, 2014, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos de la cuenca alta y media del río Copalita, se caracterizan por texturas de franco arenosos, areno francos y francos; en pendientes mayores del 20%. El contenido de materia orgánica fue superior al 5% en todos los sitios y profundidad de mantillo mayor a 4 cm, excepto en las tierras de cultivo (Cuadro 1).

El modelo exponencial (1) generó estimadores confiables para la constante de infiltración (fc), infiltración inicial (fo) y la constante de decaimiento ($-k$) ($P < 0.001$), los cuales se muestran en el Cuadro 2; con coeficientes de determinación ajustados mayores al 80%, lo que permitió estimar con mayor suficiencia los valores de tasa de infiltración básica (2) y volumen total de agua infiltrada o acumulada con el modelo de Horton (3) y el propuesto por Akan (1992) (4) para suelos en BMM.

Tasa de Infiltración Básica Horton (Ti) (2)

Los valores de Ti fueron significativamente diferentes por la interacción tipo de LUSV y la clase textural ($P < 0.001$). Los valores más altos de la Ti se presentaron en los suelos francos con vegetación de BMM = $2.29 \text{ mm h}^{-1} \pm 0.04$ error estándar (EE), seguidos por el BPQ $1.97 \text{ mm h}^{-1} \pm 0.09$ y BQ $1.95 \text{ mm h}^{-1} \pm 0.22$ ($P > 0.05$); las menores tasas de infiltración básica promedio se presentaron en suelos franco arenosos de tierras de cultivo en descanso (TCD) con 0.05 mm h^{-1} y tierra de cultivo en uso (TC) con 0.07 mm h^{-1} ($P > 0.05$) y altos coeficientes de variación. Los valores de Ti promediados sobre la clase textural muestran diferencias significativas entre suelos francos (1.48 mm h^{-1}), versus suelos areno francos (0.58 mm h^{-1}) y franco arenosos (0.48 mm h^{-1}) ($P < 0.05$). Según Guevara y Márquez (2012), la tracción capilar para una mayor succión de agua en el suelo, antes de que el suelo logre la condición de humedad, se considera el factor único implicado en la disminución rápida de la capacidad de infiltración durante la lluvia (k), hasta que las tasas de infiltración básica se estabilizan, lo que arroja valores bajos de permeabilidad (Ti) entre 1 y 5 mm h^{-1} , con ajustes del modelo empírico Horton.

Cuadro 1. Valores medios y coeficiente de variación (CV) de las variables estudiadas en suelos de la cuenca media y alta del río Copalita.
Table 1. Mean values and coefficient of variation (CV) of the variables studied in soils of the middle and upper basin of the Copalita river.

Uso del suelo y vegetación	n	Intensidad de lluvia		Materia orgánica		Arena		Limo	
		Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
		mm h ⁻¹		%		%		%	
BMM	4	137	4.2	1.36	11.9	47.3	4.4	38	1.2
BP	4	139	2.3	8.06	86.6	61.4	1.8	29.3	15.7
BPQ	4	138	4.2	6.63	34.5	45.8	39.6	33.3	35.1
BQ	4	97.5	4.3	7.53	1.3	36.8	2	38	2.4
TCD	6	99.9	2.5	10.17	21.3	75.4	3	18	19.2
PI	5	99.5	0.86	6.00	28.4	44.8	15.4	36.6	3.1
SMSPC	5	98.8	2.5	6.22	1	44.9	11.7	34	11.7
TC	6	100	1.4	5.40	34.9	60.8	6.5	33.4	40

		Arcilla		Densidad aparente		Profundidad de mantillo		Pendiente	
		Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
		%		g cm ⁻³		cm		grados	
BMM	4	17.2	2.3	0.94	0.23	9.25	71.9	16.5	24.4
BP	4	9.2	37.6	1.01	17.1	12	57.7	23.3	12.3
BPQ	4	20.5	31.3	0.98	13.2	9.33	12.3	11.6	24.7
BQ	4	25.2	3.1	1.07	0.38	15	2.9	25	28.2
TCD	6	6.53	17.6	1.11	9.8	0	0	23	35.5
PI	5	18.5	31.1	0.98	7.63	4.83	98.3	11.3	10.1
SMSPC	5	20.7	4.8	0.98	7.5	6.5	115	21.25	29.6
TC	6	11.5	32.3	1.11	10.4	0	0	12.16	55.8

BMM = bosque mesófilo de montaña; BPQ = bosque de pino-encino; BQ = bosque de encino; BP = bosque de pino; PI = pastizal inducido; SMSPC = selva mediana subperennifolia con café; TC = tierra de cultivo; TCD = tierra de cultivo en descanso. CV %; n = número de muestras.

BMM = mountainous cloud forest; BPQ = pine-oak forest; BQ = oak forest; BP = pine forest; PI = induced grassland; SMSPC = medium semi-deciduous forest associated to shade-grown coffee; TC = agricultural land in use; TCD = fallowed agricultural land. CV %; n = number of samples.

Coeficiente de Decaimiento (-k) (1)

Los valores de k o tasa de decaimiento de la infiltración, se hallaron afectados significativamente por los tipos de USV ($P = 0.01$). Los valores más altos de k se presentaron para la tierra de cultivo en descanso (TCD) con $0.109 \text{ L min}^{-1} \pm 0.034$ (EE) y tierra de cultivo en uso (TC) con $0.077 \text{ L min}^{-1} \pm 0.011$ ($P > 0.05$) (Figura 2). Estos suelos dejan de infiltrar agua a mayor velocidad contrariamente a los suelos del BMM, BPQ y BQ que presentaron las tasas de decaimiento mas lentas 0.0027 , 0.0040 y $0.0057 \text{ L min}^{-1}$ respectivamente ($P > 0.05$). Los suelos profundos presentaron mayores

tasas de decaimiento k (0.044 L min^{-1}) que los suelos someros (0.014 L min^{-1}) ($P < 0.05$).

En suelos agrícolas se ha demostrado que la capacidad de infiltración inicial puede ser máxima en el primer estadio del proceso, con una saturación rápida del suelo en estado seco, para después declinar abruptamente (Aoki y Sereno, 2006; Guevara y Márquez, 2012); y si los suelos son continuamente labrados suelen tener velocidades mayores (Martínez-Villanueva *et al.*, 2015), con altas tasas de decaimiento de la infiltración (k), lo cual coincide con este estudio en los suelos de tierras de cultivo y tierras de cultivo en descanso.

Cuadro 2. Parámetros del modelo exponencial y estimaciones de infiltración Horton (Ti, F) en mm h⁻¹ para diferentes tipos de LUSV en la cuenca alta y media del río Copalita.

Table 2. Exponential model parameters and estimates of Horton infiltration (Ti, F) in mm h⁻¹ for different types of LUSV in the upper and middle basin of the Copalita River.

Uso del Suelo y Vegetación	n	Horton		Modelo exponencial			Horton
		Ti	fo	fc	k	R ² aj	F
BMM	4	2.29 a	2.48 a	2.42 a	-0.0027 c	93.00	156.96 a
BPQ	4	1.97 a	1.82 abc	1.44 b	-0.0040 c	84,33	49.40 cd
BQ	4	1.95 a	1.97 abc	1.44 b	-0.0056 c	81.00	32.59 cd
PI	5	1.16 b	2.38 ab	0.68 c	-0.0213 c	91,33	58.10 b
SMSPC	5	0.59 c	1.92 bc	0.33 cd	-0.0352 b	83.50	42.20 bc
BP	4	0.54 c	1.54 cd	0.31 cd	-0.028 c	82,25	34.79 bcd
TC	6	0.07 d	1.18 cd	0.042 d	-0.077 ab	82.00	16.44 d
TCD	6	0.05 d	2.01 abc	0.025 d	-0.109 a	87.33	19.15 cd

Letras iguales no existe diferencia significativa ($P < 0.05$, Duncan) n = número de experimentos. BMM = bosque mesófilo de montaña; BPQ = bosque de pino-encino; BQ = bosque de encino; BP = bosque de pino; PI = pastizal inducido; SMSPC = selva mediana subperennifolia con café; TC = tierra de cultivo; TCD = tierra de cultivo en descanso. Ti = tasa de infiltración básica (mm h⁻¹); fo = infiltración inicial (mm); fc = tasa de infiltración constante o de equilibrio (mm h⁻¹); k = constante de decaimiento de la infiltración (L min⁻¹); F = agua acumulada (mm); n = número de ensayos de lluvia simulada.

Equal letters indicate no significant difference ($P < 0.05$, Duncan) n = number of experiments. BMM = mountainous cloud forest; BPQ = pine-oak forest; BQ = oak forest; BP = pine forest; PI = induced grassland; SMSPC = medium semi-deciduous forest associated to shade-grown coffee; TC = agricultural land in use; TCD = fallowed agricultural land. Ti = basic infiltration rate (mm h⁻¹); fo = initial infiltration (mm); fc = constant or equilibrium infiltration rate (mm h⁻¹); k = infiltration decay constant (L min⁻¹); F = accumulated water (mm); n = number of simulated rain trials.

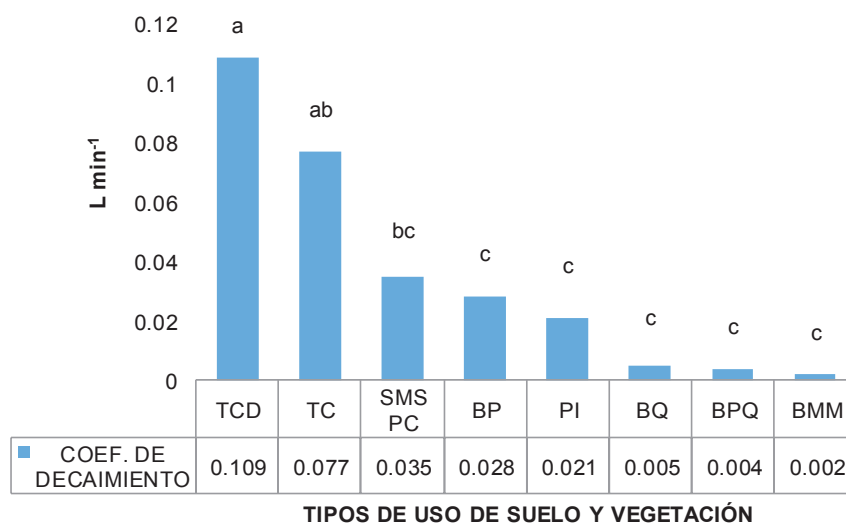


Figura 2. Coeficientes o tasas de decaimiento (k) por tipo LUSV. Letras iguales no existe diferencia significativa ($P < 0.05$, Duncan). BMM = bosque mesófilo de montaña; BPQ = bosque de pino-encino; BQ = bosque de encino; BP = bosque de pino; PI = pastizal inducido; SMSPC = selva mediana subperennifolia con café; TC = tierra de cultivo; TCD = tierra de cultivo en descanso.

Figure 2. Coefficients or decay rates (k) per type of LUSV. Equal letters indicate no significant difference ($P < 0.05$, Duncan). BMM = mountainous cloud forest; BPQ = pine-oak forest; BQ = oak forest; BP = pine forest; PI = induced grassland; SMSPC = medium semi-deciduous forest associated to shade-grown coffee; TC = agricultural land in use; TCD = fallowed agricultural land.

Volumen Total de Agua Infiltrada o Acumulada (F) (4 y 5)

Los valores de F difieren significativamente para los tipos de uso del suelo y vegetación en interacción con la clase textural ($P < 0.001$). El valor mas alto de F se presentó para los suelos francos del BMM con $156.9 \text{ mm} \pm 8.4$ (EE), significativamente superior a los demás tipos de uso de suelo y vegetación ($P < 0.05$), seguido por el pastizal inducido con un valor promedio de $F = 58.1 \text{ mm} \pm 6.02$, el BPQ $49.4 \text{ mm} \pm 2.18$ y la SMSPC $42.2 \text{ mm} \pm 7.22$; también con suelos francos (Cuadro 2). Los suelos profundos presentaron mayores valores de F (54 mm) que los suelos someros (36 mm) ($P < 0.05$). En experimentos realizados por Wilcox y Wood (1988), se obtuvieron resultados similares a este estudio para la estimación de F, utilizando el mismo prototipo de simulador e intensidad de lluvia aplicada de 103 mm h^{-1} . Los valores estimados de F fueron: 65, 59 y 55 mm en pastizales con condiciones similares de contenido de arena, limo, arcilla y suelo seco; los cuales, resultaron muy cercanos al promedio obtenido en pastizales inducidos (58.1 mm) del presente trabajo.

Coefficientes de Infiltración (CINF) y Escurrimiento (CESC)

Los resultados de los análisis muestran diferencias altamente significativas ($P < 0.001$) para el CINF y CESC entre los tipos de uso de suelo y vegetación en interacción con la clase textural. El mayor coeficiente de infiltración ajustado se presentó para el BMM (> 0.80) con suelos francos, seguido por el BPQ (0.63) y BP (0.58) ($P < 0.05$); mientras que los suelos de las TCD y TC, presentaron los mayores coeficientes de escurrimiento (CESC) 0.73 y 0.71 con suelos francos arenosos ($P < 0.05$) (Figura 3).

Los suelos franco arenosos presentaron el mayor CESC (0.52) ($P < 0.05$) en suelos someros. Entre las covariables estudiadas, el contenido de limo se asoció negativamente con el CESC, es decir a mayor contenido de limo menor CESC (Castiglioni *et al.*, 2006).

Entre las covariables estudiadas para el CINF se detectó asociación negativa de la densidad aparente del suelo (DA), es decir mayores coeficientes de infiltración con menores valores de DA ($P < 0.05$), mayores CINF con mayores valores de contenido de

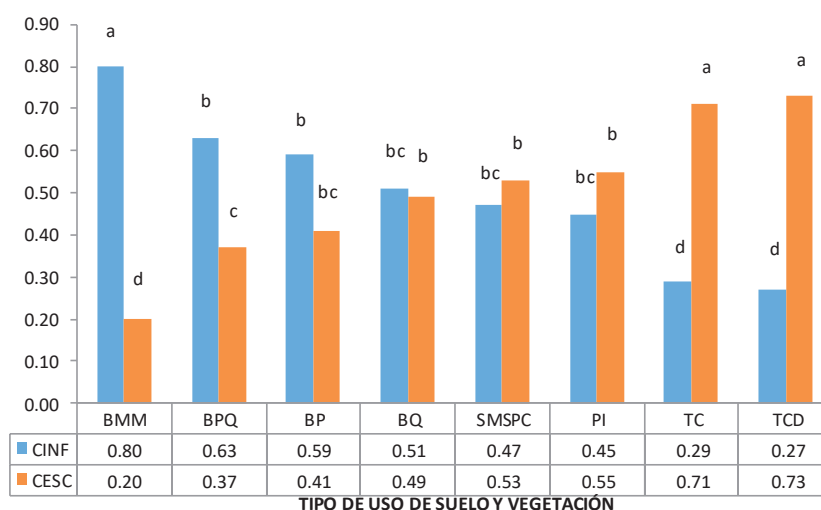


Figura 3. Coeficientes de infiltración (CINF) y escurrimiento (CESC) por tipo de LUSV. Letras iguales no existe diferencia significativa ($P < 0.05$, Duncan). CINF = coeficiente de infiltración; CESC= coeficiente de escurrimiento; BMM = bosque mesófilo de montaña; BPQ = bosque de pino-encino; BQ = bosque de encino; BP = bosque de pino; PI = pastizal inducido; SMSPC = selva mediana subperennifolia con café; TC = tierra de cultivo; TCD = tierra de cultivo en descanso.

Figure 3. Infiltration coefficients (CINF) and runoff (CESC) per type of LUSV. Equal letters indicate no significant difference ($P < 0.05$, Duncan). CINF = infiltration coefficient; CESC = runoff coefficient; BMM = mountainous cloud forest; BPQ = pine-oak forest; BQ = oak forest; BP = pine forest; PI = induced grassland; SMSPC = medium semi-deciduous forest associated to shade-grown coffee; TC = agricultural land in use; TCD = fallowed agricultural land.

limo en el suelo ($P < 0.05$); además, el contenido de materia orgánica, mostró una asociación positiva con el CINF ($P < 0.06$). Los valores de CINF promediados sobre la profundidad de suelo reflejaron que los suelos profundos infiltran mas agua (0.75 contra 0.63) que los suelos someros ($P < 0.05$).

La influencia positiva de la cobertura vegetal sobre la infiltrabilidad del agua en el suelo, ha sido estudiada por más de 30 años (Wilcox *et al.*, 1988). Sin embargo, Dunkerley (2002) en áreas arboladas versus no arboladas en Australia, encontró que las diferencias sustanciales obedecen más a propiedades particulares de los suelos, que a las unidades de vegetación estudiadas; aunque también, se ha demostrado que la vegetación arbórea puede aumentar la conductividad hidráulica en el suelo con el crecimiento de raíces, aumentando la velocidad de infiltración de agua sub superficial (Morikawa-Sakura y Yoshitaka, 2014).

Para este estudio con base en los resultados de T_i , se puede argumentar que la variabilidad en la capacidad de infiltración entre los tipos de LUSV, está asociada a un conjunto de características concurrentes, principalmente clase textural (Figura 4), distinguiendo a los suelos francos que poseen una mayor plasticidad y porosidad para almacenar agua en su interior (Osuna-Ceja y Padilla-Ramírez, 1998), además de la presencia de raíces creciendo en el interior del suelo en zonas arboladas (BMM); que en condiciones de

precipitaciones abundantes, funcionan como esponjas con velocidades lentas de decaimiento de la infiltración y suelos profundos; además presentan una mayor área de exposición a la infiltración en el perfil vertical del suelo (Muñoz-Villers *et al.*, 2015).

Aunque no quedó demostrado, la acumulación de mantillo sobre la superficie, podría estar aumentando el tiempo de retención del agua precipitada, para después incorporarse lentamente, siempre y cuando los suelos no sean alterados por prácticas de roturación agrícola (Petersen y Stringham, 2008).

Por otra parte, Langhans *et al.* (2010) demostraron que en suelos con cultivos agrícolas, la intensidad de lluvia aplicada presenta una asociación positiva de tendencia logarítmica, con la conductividad hidráulica; lo cual hace pensar, que con altas tasas de intensidad de lluvia en tierras cultivadas, se puede subestimar el valor de la infiltración constante (f_c) y por consecuencia el valor de la tasa de infiltración básica (T_i) puede ser menor, e incluso presentar mayor variabilidad; como sucedió en este estudio para la tierras cultivadas (Cuadro 3).

CONCLUSIONES

El modelo exponencial negativo generó estimadores confiables de los parámetros de infiltración constante (f_c) y tasa de decaimiento (k), para estimar la infiltración básica (T_i) y potencial de almacenaje de agua en los suelos (F), utilizando el modelo semi empírico de Horton. La variabilidad de los parámetros de infiltración, resultó alta para las tierras de cultivo y en descanso, para el bosque de pino y la selva mediana subperennifolia asociada con café. Los suelos francos del bosque mesófilo de montaña, presentaron la mayor capacidad de almacenaje de agua con tasas lentas de decaimiento; lo cual evidencia la importancia de estas formaciones vegetales para mantener servicios hidrológicos de alto significado, ya que concurren la asociación de doseles arbóreos y suelos francos. El contenido de limo y materia orgánica pudieran estar favoreciendo las condiciones del suelo, para una mayor tasa de infiltración en condiciones de no roturación agrícola; pero es evidente, que el incremento de los volúmenes de escurrimiento y la disminución de la capacidad infiltración, se pueden producir también en los suelos de textura franca, cuando son intervenidos por la práctica de la agricultura independientemente del tipo de vegetación existente.

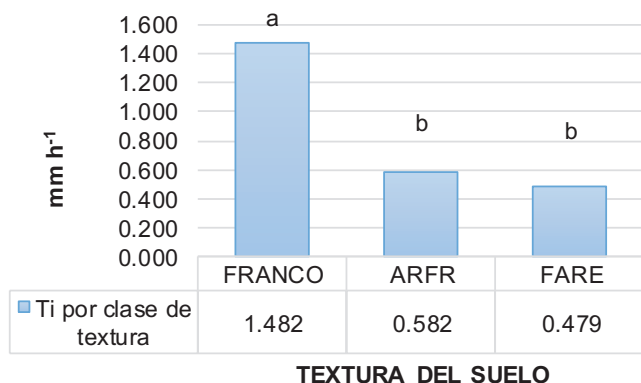


Figura 4. Tasa de infiltración básica (T_i) por clase de textura del suelo. Letras iguales no existe diferencia significativa ($P < 0.05$, Duncan). FRANCO = textura de suelo franco; ARFR = textura de suelo arenoso franco; FARE = textura de suelo franco arenoso.

Figure 4. Basic infiltration rate (T_i) per soil texture type. Equal letters indicate = no significant difference ($P < 0.05$, Duncan). FRANCO = loam soil texture; ARFR = loamy sand soil texture; FARE = sandy loam soil texture.

Cuadro 3. Coeficientes de variación (%) de los parámetros del modelo exponencial y de los estimadores de infiltración F y Ti (Horton) por tipo de LUSV.**Table 3. Variation coefficients (%) of the parameters of the exponential model and of the infiltration estimators F and Ti (Horton) by type of LUSV.**

USV	n	Horton		Modelo exponencial		Horton
		Ti	fo	fc	k	F
BMM	4	3.80	13.71	18.31	18.18	10.70
BPQ	4	8.53	11.65	17.32	25.00	7.66
BQ	4	19.64	22.79	38.27	44.41	4.73
BP	5	50.34	32.19	55.28	44.89	31.31
SMSPC	5	77.73	21.39	80.74	45.99	34.24
PI	4	31.28	17.52	33.65	15.06	17.96
TC	6	85.30	25.98	84.23	37.6	43.97
TCD	6	166.51	57.15	166.73	54.25	41.30

BMM = bosque mesófilo de montaña; BPQ = bosque de pino- encino; BQ = bosque de encino; BP = bosque de pino; PI = pastizal inducido; SMSPC = selva mediana subperennifolia con café; TC = tierra de cultivo; TCD = tierra de cultivo en descanso. N = número de ensayos de lluvia simulada.

BMM = mountainous cloud forest; BPQ = pine-oak forest; BQ = oak forest; BP = pine forest; PI = induced grassland; SMSPC = medium semi-deciduous forest associated to shade-grown coffee; TC = agricultural land in use; TCD = fallowed agricultural land; N = number of simulated rain trials.

AGRADECIMIENTOS

Al Sistema Producto del Café en el estado de Oaxaca. A la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y a la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesca del Gobierno del estado de Oaxaca. Especialmente a los comuneros y campesinos de la cuenca del río Copalita.

LITERATURA CITADA

- Akan, A. O. 1992. Horton infiltration equation revisited. *J. Irrig. Drain. Eng.* 118: 828-830. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1992\)118:5\(828\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:5(828)).
- Aoki, A. M. y R. Sereno. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *AgriScientia* 23: 23-31. doi: <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v23.n1.2688>.
- Beven, K. 2004. Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes. *Hydrol. Processes* 18: 3447-3460. doi: 10.1002/hyp.5740.
- Castiglioni, M. G., M. J. Massobrio, C. I. Chagas, O. J. Santanatoglia, and A. Buján. 2006. Infiltración del agua con labranza cero del suelo en una microcuenca agrícola de Argentina. *Terra Latinoamericana* 24: 423-430.
- Dueñez-Alanis, J., J. Gutiérrez, L. Pérez y J. Nívar. 2006. Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión. *Terra Latinoamericana* 24: 233-240.
- Dunkerley, D. 2002. Systematic variation of soil infiltration rates within and between the components of the vegetation mosaic in an Australian desert landscape. *Hydrol. Processes* 16: 119-131. doi: 10.1002/hyp.357.
- Holtan, H. N. 1961. A concept of infiltration estimates in watershed engineering. U. S. Department of Agriculture Service. Washington, DC, USA.
- Horton R., E. 1941. An approach toward physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 5: 399-417. doi: 10.2136/sssaj1941.036159950005000C0075x.
- Green, W. H. and G. A. Ampt. 1911. Studies on soil physics Part I. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4: 1-24. doi: <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>.
- Guevara, E. y A. Márquez. 2009. Parametrización de modelos de infiltración basada en pruebas de campo en suelos agrícolas de la cuenca del río Chirgua, Venezuela. *Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA 2009)*. Tema B: Hidrología y Gestión del Agua. IAHR. Madrid España.
- Guevara, E. y A. Márquez. 2012. Modelación de la infiltración en un campo agrícola de la cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela. *Rev. Científica UDO Agríc.* 12: 365-388.
- INEGI/SIATL (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática/Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas Hidrológicas). 2017. Consulta de morfometría de la Cuenca del Río Copalita. Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas. http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#. (Consulta: septiembre 11, 2017).
- Langhans, C., G. Govers, J. Diels, W. Clymans, and A. Van Den Putte. 2010. Dependence of effective hydraulic conductivity on rainfall intensity: loamy agricultural soils. *Hydrol. Processes* 24: 2257-2268. doi: 10.1002/hyp.7800.
- Langhans, C., G. Govers, and J. Diels. 2012. Development and parameterization of an infiltration model accounting for water depth and rainfall intensity. *Hydrol. Processes* 27: 3777-3790. doi: 10.1002/hyp.9491.
- Lin, K., S. Guo, W. Zhang, and P. Liu. 2007. A new baseflow separation method based on analytical solutions of the Horton infiltration capacity curve. *Hydrol. Processes* 21: 1719-1736. doi: 10.1002/hyp.6357.

- Martínez-Villanueva, J. J., V. M. Vaca-García, M. V. Esteller-Alberich, A. González- Huerta, M. Rubí-Arriaga y F. Gutiérrez- Rodríguez. 2015. Velocidad media de infiltración en un vertisol bajo distintos sistemas de labranza. *Terra Latinoamericana* 33: 95-99.
- Mayor, A. G., S. Bautista, and J. Bellot. 2009. Factors and interactions controlling infiltration, runoff, and soil loss at the microscale in a patchy Mediterranean semiarid landscape. *Earth Surf. Processes Landforms* 34: 1702-1711. doi:10.1002/esp.1875.
- Merz, B., A. Bárdossy, and G. R. Schiffler. 2002. Different methods for modelling the areal infiltration of a grass field under heavy precipitation. *Hydrol. Processes* 16: 1383-1402. doi: 10.1002/hyp.347.
- Meyer L., D. 1994. Rainfall simulators for erosion research. pp. 83-103. *In*: R. Lal (ed.). *Soil erosion research methods*. USA.
- Mishra, S. K. and V. P. Singh. 2004. Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates. *Hydrol. Processes* 18: 3323-3345. doi: 10.1002/hyp.1223.
- Morikawa-Sakura, M. S y K. Yoshitaka. 2014. El vínculo de la conductividad hidráulica saturada con la velocidad de infiltración subsuperficial del suelo del bosque. *Rev. Invest. Univ. Norbert Wiener* 3: 41-52.
- Muñoz-Villers, L. E. and J. López-Blanco. 2008. Land use/cover changes using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiverse mountainous area of central eastern Mexico. *Int. J. Remote Sens.* 29: 71-93. doi: <https://doi.org/10.1080/01431160701280967>.
- Muñoz-Villers, L. E., F. Holwerda, M. S. Alvarado-Barrientos, D. Geissert, B. Marín-Castro, A. Gómez-Tagle, J. McDonnell, H. Asbjornsen, T. Dawson y L. A. Bruijnzeel. 2015. Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque* 36: 395-407. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002015000300007>.
- Osuna-Ceja., E. S. y J. S Padilla- Ramírez. 1998. Estimación de la sorbilidad e infiltración usando datos de simulación de lluvia para tres tipos de suelo de la zona semiárida de México. *Terra Latinoamericana* 16: 293-302.
- Peinado-Guevara, H. J., C. R. Green-Ruiz, O. Delgado-Rodríguez, J. Herrera-Barrientos, S. Belmonte-Jiménez, M. Á. Ladrón de Guevara Torres y V. Shevnin. 2010. Estimación de la conductividad hidráulica y contenido de finos a partir de leyes experimentales que relacionan parámetros hidráulicos y eléctricos. *Ra Ximhai* 6: 469-478.
- Petersen, S. L. and T. K. Stringham. 2008. Infiltration, runoff, and sediment yield in response to western juniper encroachment in southeast Oregon. *Rang. Ecol. Manage.* 61: 74-81. doi: <https://doi.org/10.2111/07-070R.1>.
- Philip, J. R. 1957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.* 84: 257-264. doi: 10.1097/00010694-195709000-00010.
- Rojas D., L. M., H. Rojas-Palacio y J. C. Menjivar-Flórez. 2008. Estimación de la conductividad hidráulica saturada in situ en un suelo tratado con vinaza. *Acta Agron.* 57: 125-128.
- Shao, Q. and T. Baumgartl. 2014. Estimating input parameters for four infiltration models from basic soil, vegetation and rainfall properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78: 1507-1521. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.04.0122>.
- Shao, Q. and T. Baumgartl. 2016. Field evaluation of three modified infiltration models for the simulation of rainfall sequences. *Soil Sci.* 181: 45-56. doi: 10.1097/SS.0000000000000136.
- Toledo-Aceves, T., J. A. Meave, M. González-Espinosa, and N. Ramírez- Marcial. 2011. Tropical mountain cloud forests: current threats and opportunities for their conservation and sustainable management in Mexico. *J. Environ. Manage.* 92: 974-981. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.11.007.
- Wilcox, B. P., M. K. Wood, J. T. Tromble, and T. J. Ward. 1986. A hand-portable single nozzle rainfall simulator designed for use on steep slopes. *J. Range Manage.* 39: 375-377. doi: 10.2307/3899784.
- Wilcox, B. P., M. K. Wood, and J. T. Tromble. 1988. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes. *J. Range Manage.* 41: 197-206.
- Wilcox, B. P. and M. K. Wood. 1988. Hydrologic impacts of sheep grazing on steep slopes in semiarid rangelands. *J. Range Manage.* 41: 303-306.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook Num. 537. Washington, DC, USA.