


Modelación de la infiltración en un campo agrícola de la cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela

Modeling of the infiltration in a crop field of Chirgua basin, Carabobo state, Venezuela

Edilberto GUEVARA PÉREZ  y Adriana MÁRQUEZ ROMANCE

Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM). Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, estado Carabobo, Venezuela. E-mails: eguevara@uc.edu.ve y ammarquez@uc.edu.ve

 Autor para correspondencia

Recibido: 19/12/2011 Fin de primer arbitraje: 20/02/2012 Primera revisión recibida: 10/03/2012
Fin de segundo arbitraje: 09/04/2012 Segunda revisión recibida: 12/06/2012 Aceptado: 27/07/2012

RESUMEN

El objetivo del trabajo es comparar los parámetros de la infiltración estimados mediante el uso de nueve modelos: cuatro con base física, dos semi-empíricos y tres empíricos, utilizando los resultados de 107 pruebas de campo de infiltración realizadas en suelos agrícolas de la cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela. Los suelos se clasifican en tres grupos: arcilla limosa, limo orgánico y arena limosa; se evaluaron dos condiciones de humedad durante las pruebas: alta y baja. Se considera que los ajustes de los modelos son satisfactorios cuando el coeficiente R^2 es igual o mayor que 0,7. Los modelos que incluyen la variable tiempo en su estructura, tal como Mishra-Singh, Kostiakov y Horton, arrojaron un ajuste satisfactorio. El nivel de significancia de los parámetros de los modelos Horton y Kostiakov es más elevado para el caso de las diferentes condiciones de humedad que para el de los tipos de suelo; para el conjunto total de la serie de datos, los resultados son similares a los obtenidos para diferentes tipos de suelo; los tres tipos de suelo responden de la misma manera frente a la tasa de infiltración.

Palabras clave: Infiltración, modelos conceptuales, modelos empíricos, procesos hidrológicos

ABSTRACT

The objective of this study is to compare the estimated infiltration parameters using nine models, four physically based, two semi-empirical and three empirical, using results of 107 infiltration field trials conducted in agricultural soil of Chirgua river basin, Carabobo, Venezuela. Soils characteristics in the research plots range from silty sand to organic silt. Results of regression analysis show that the parameters of models of Mishra-Singh, Kostiakov and Horton explained up to 70% of variability (minimum $R^2= 0,70$). Models that include the time variable in their structure, as Mishra-Singh, Kostiakov and Horton, resulted in satisfactory adjustment of the estimated values to those observed. The significance level of the Kostiakov and Horton model parameters is higher for the case of different humidity conditions as for the soil types. For the entire data set, the results are comparable to those obtained for different soil types; the three soil types respond in the same manner against the infiltration rate.

Key words: infiltration, conceptual models, empirical models, hydrological processes.

INTRODUCCIÓN

La infiltración es un fenómeno de tres procesos independientes complejos y sólo parcialmente comprendidos: el paso del agua de la superficie al interior del suelo, el movimiento a través del perfil debido al gradiente de humedad en la zona de aireación y el movimiento debido a la succión por parte de las plantas del agua contenida en los espacios porosos del suelo. Esos procesos dependen de las variables que determinan el estado del sistema hidrológico; es decir, de la intensidad y duración de las precipitaciones, condiciones antecedentes de

humedad, características físicas e hidráulicas del suelo, estado de la superficie del suelo, cobertura vegetal, composición mecánica del suelo y de la intervención del hombre; por lo que no es posible obtener una expresión única para toda una unidad taxonómica de suelo debido a la falta de uniformidad (Menhg *et al.*, 2006; Van de Genachte, 1996; Guevara, 1990).

La infiltración es, por tanto, un proceso que siempre posee un interés científico y que sigue siendo modelado por parte de los profesionales dedicados a los recursos de agua y suelo y las ciencias

del agro, debido a su papel fundamental en la hidrología superficial y subterránea y la agricultura de riego; su magnitud se cuantifica por medio de parámetros que se estiman usando diferentes tipos de modelos.

Desde el punto de vista hidrológico, la infiltración se considera como una pérdida o abstracción, muy importante durante una tormenta; es decir, representa una parte de la porción de lluvia que no escurre, humedece al suelo en la zona de aireación y alimenta al flujo subterráneo por percolación profunda; su magnitud varía con el estado del sistema hidrológico, desde un porcentaje muy bajo para condiciones altamente impermeables hasta valores cercanos al 100 por ciento para condiciones altamente permeables. La abstracción o pérdida de la lluvia por infiltración durante una tormenta permiten determinar la lluvia efectiva; es decir, la que escurre superficialmente y que va ocasionando la erosión, ya sea laminar, en surcos, canales o cárcavas. En este sentido, desde el punto de vista hidrológico, se considera a la infiltración como un componente de la modelación de la erosión (Guevara y Cartaya, 2004). Desde el punto de vista de la ingeniería de riego, las curvas de velocidad de infiltración y de infiltración acumulada sirven para establecer los parámetros de diseño de los sistemas de riego, tal como tiempo para que se infiltre la lámina de riego, así como, frecuencia y duración de riego. En tal sentido, la información sobre la infiltración le permite al ingeniero agrícola o agrónomo responder a las interrogantes de cuánto, cuándo y cómo regar para que su diseño sea el óptimo (Guevara, 1990).

Debido al comportamiento diferente de las pruebas de infiltración en campo y laboratorio, no siempre es evidente cuál de los modelos de estimación de los parámetros de la infiltración es el mejor y bajo qué condiciones. Por ello, en estudios sobre evaluación comparativa de resultados, sólo se suele considerar entre dos a cuatro modelos para ser ajustados mediante pruebas de laboratorio o mediciones de campo.

Para estimar la infiltración se han desarrollado numerosos modelos matemáticos, los cuales, en general, pueden dividirse en tres grupos (Mishra *et al.*, 1999): (1) teóricos o con base física; (2) semi-empíricos; y (3) empíricos. Los modelos con base física son de complejidad variable; se fundamentan en la Ley de Conservación de la Masa y la Ley de Darcy, dependiendo de las consideraciones

de dimensionalidad, dinámica de flujos, conductividad hidráulica-carga capilar (o contenido de agua), relación de retención, condiciones límites e iniciales. En este grupo están los de Green y Ampt (1911), Philip (1957, 1969), Mein y Larson (1971, 1973), Smith (1972), Smith y Parlange (1978).

Los modelos semi-empíricos utilizan formas sencillas de la ecuación de continuidad (con frecuencia espacialmente concentrados) y la hipótesis elemental de la relación de la capacidad de infiltración – infiltración acumulada (o la relación flujo-concentración). En este grupo están los de Horton (1938), Holtan (1961), Overton (1964), Singh y Yu (1990), Grigorjev y Iritz (1991), y otros.

Los modelos empíricos se basan en mediciones de campo o pruebas experimentales de laboratorio ajustados a un modelo sencillo. Por ejemplo: Soil Conservation Service (1956, 1971), Kostiaikov (1932), Huggins y Monke (1966), Smith, (1972) y Collis-George (1977).

Modelo de Philip

Philip (1957, 1969) derivó el siguiente modelo para estimar la infiltración en función del tiempo:

$$f(t) = st^{-1/2} + C \quad (1)$$

Donde f es la velocidad de infiltración (LT^{-1}), s , C son parámetros dependientes de las características de difusividad y retención de humedad del suelo. El parámetro s se conoce como sortividad ($LT^{-1/2}$). Para suelos arcillosos, Berndtsson, (1987) encontró que s varía entre 0 y 525 $mm/h^{1/2}$; C varía entre 0 y 250 mm/h .

Modelo de Green y Ampt

Green y Ampt (1911) propusieron un modelo basado en el supuesto de que el suelo se puede considerar como un paquete de diminutos tubos capilares de área, dirección y forma irregular. Asumiendo homogeneidad, contenido de humedad inicial uniforme en la profundidad y superficie inundada, las ecuaciones de Green y Ampt toman la forma siguiente:

$$f = A \left[1 + \frac{B(H_c + H)}{F} \right] \quad (2)$$

Donde A y B son parámetros que dependen de las características del suelo, H es la carga de agua sobre la superficie (L), y F es la infiltración acumulada (L). El modelo de Green y Ampt ha resurgido, debido a que sus parámetros se pueden obtener de magnitudes medibles físicamente (Brakensiek *et al.*, 1981; Rawls *et al.*, 1983; Odgen y Sagafian, 1977). Actualmente, existe una vasta literatura sobre el modelo de Green-Ampt (Jain y Kumar, 2006; Barri *et al.*, 2005; Mishra *et al.*, 2003; Van de Ganachte *et al.*, 1996, Chow y Maidment, 1988); se han estimado los parámetros por ajuste empírico para aplicaciones en campo a partir de datos de infiltración medidos. La Ecuación (2) se puede reescribir como:

$$f = A + D/F \quad (3)$$

Donde $D = AB(H_c + H)$. Los parámetros A y D pueden ser estimados utilizando datos de mediciones de la infiltración.

Modelo Lineal de Smith y Parlange

Smith y Parlange (1978) desarrollaron la expresión siguiente para estimar la infiltración:

$$f = K_s \left[\frac{C_1}{K_s F} + 1 \right] \quad (4)$$

Donde K_s es la conductividad hidráulica saturada (LT^{-1}), y C_1 es un parámetro que está relacionado con la sortividad del suelo y la variación lineal de la humedad inicial, también es dependiente de la cantidad y el patrón de intensidad de la lluvia (L^2T^{-1}). Mishra *et al.*, (2003) encontraron que: para suelos arcillosos, K_s varía entre 2,75 y 4,9 mm/h; C_1 varía entre 19,55 y 3774 mm²/h. Para suelos limosos, K_s varía entre 13,72 y 47,74 mm/h; C_1 varía entre 548,4 y 1741,4 mm²/h. Para suelos arenosos, K_s varía entre 29,525 y 102,98 mm/h; C_1 varía entre 388,6 y 1897,5 mm²/h.

Modelo no lineal de Smith y Parlange

Smith y Parlange (1978), también desarrollaron un modelo no lineal de infiltración, el cual se expresa como sigue:

$$f = K_s \frac{e^{\left(\frac{FK_s}{C_2}\right)}}{e^{\left(\frac{FK_s}{C_2}\right)-1}} \quad (5)$$

Donde C_2 tiene la misma connotación que en la Ecuación (4). Ambos parámetros K_s y C_2 pueden derivarse de las propiedades físicas de los suelos. Sin embargo, para aplicaciones prácticas, los parámetros se estiman empíricamente ajustando el modelo a datos medidos. Según Smith y Parlange (1978), bajo condiciones iniciales de agua detenido sobre el terreno, K_s varía en forma exponencial cerca de la saturación; mientras que C_2 varía aproximadamente en forma lineal para cambios en la saturación inicial. Mishra *et al.*, (2003) encontraron que: para suelos arcillosos, K_s varía entre 3,45 y 68,85 mm/h; C_2 varía entre 21,5 y 4499,5 mm²/h. Para suelos limosos, K_s varía entre 21,04 y 56,08 mm/h; C_2 varía entre 747 y 1803,8 mm²/h. Para suelos arenosos, K_s varía entre 24,49 y 70,48 mm/h; C_2 varía entre 1103,416 y 2161,08 mm²/h.

Modelo de Horton

Horton (1938) desarrolló la siguiente ecuación para estimar la velocidad de infiltración:

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad (6)$$

Donde f_c es el valor para estado estable de f (LT^{-1}), f_o es el valor de f en $t=0$ (LT^{-1}), y k es el factor de decaimiento de la infiltración (T^{-1}). Para suelos arcillosos, Berndtsson, (1987) encontró que f_o varía entre 0 y 8950 mm/h; f_c varía entre 0 y 435 mm/h; k varía entre 0 y 96 (h^{-1}). Para suelos que varían desde arcilla hasta arena, Mihra *et al.*, (2003) encontraron los siguientes valores promediados para los parámetros: f_o varía desde 27,3 hasta 6897,3 mm/h; f_c desde 0,8 hasta 180,8 mm/h; k entre 0,6 y 5919,6 (h^{-1}). Para suelos que varían desde una arena media a gruesa, Ganatche *et al.*, (1996) encontraron los siguientes valores promediados para los parámetros: f_o varía desde 1124,8 hasta 3518 mm/h; f_c desde 411 hasta 1793 mm/h; k entre 34,39 hasta 195,4 (h^{-1}).

Modelo de Mishra y Singh

Mishra (1998) y Mishra y Singh (2002) desarrollaron para la infiltración el modelo dado en la Ecuación (7), expresando el procedimiento convencional del SCS-CN bajo la forma del método de Horton, suponiendo una variación lineal de la precipitación acumulada con el tiempo (o intensidad de lluvia constante):

$$f_t = f_c + \frac{Sk}{[1 + kt]^2} \quad (7)$$

Donde S es el potencial máximo de retención (L), idéntico al parámetro S_o del modelo de Singh y Yu (1990), y k es coeficiente de decaimiento igual al parámetro del modelo de Horton (T^{-1}). Collis-George (1977), Mishra (1998) y Mishra y Singh (1999) expresan S como se indica a continuación:

$$S = \frac{f_o - f_c}{k} = \frac{\pi s^2}{4 K} \quad (8)$$

Donde S es la retención máxima potencial, f_o es la tasa de infiltración inicial, k es el factor de disminución de la infiltración, análogo al parámetro de tiempo del modelo de Horton, y K es la conductividad hidráulica no saturada (LT^{-1}). Según Mishra (1998); Mishra y Singh (1999), Tyagi *et al.*, (2008) encontraron para: suelos en una condición saturada, S varía entre 38,04 y 55,74 mm; suelos en una condición normal, S varía entre 72,24 y 143,48 mm; suelos en una condición seca, S varía entre 271,34 y 716,34 mm.

Modelo de Holtan

Usando un concepto de agotamiento del almacenamiento, Holtan (1961) desarrolló una ecuación para la infiltración, expresada de la siguiente forma:

$$f = f_c + a(S_o - F)^n \quad (9)$$

Donde a y n son constantes que dependen del tipo de suelo, superficie y el tipo de cultivo, a se expresa en $L^{1/n}T^{-1}$, y S_o es el almacenamiento potencial por encima de la capa de impedimento (porosidad total, \emptyset , menos la humedad inicial del suelo θ_0), la expresión $(S_o - F)$ representa el potencial de infiltración.

Modelo de Kostiakov

Kostiakov en 1932 desarrolló una ecuación empírica para la infiltración de la siguiente manera:

$$F = \gamma_1 t^{\gamma_2} \quad (10)$$

Donde γ_1 y γ_2 son constantes ($0 < \gamma_2 < 1$). Para tres suelos diferentes (franco limoso, franco arenoso y arcilloso), Kincaid *et al.*, (1969) encontraron que el valor de γ_1 varía desde 0,225 hasta 1,1 y el valor de γ_2 desde 0,458 hasta 0,669. Diferenciando la Ecuación

(10) se encuentra la siguiente expresión para la velocidad de infiltración (Rode, 1965):

$$f = \alpha(t)^{-\beta} \quad (11)$$

Donde $\alpha = \gamma_1 \gamma_2$ y $\beta = 1 - \gamma_2$

Modelo de Smith

Smith (1972) modificó la Ecuación 11 propuesta por Kostiakov (1932), para introducir un nuevo término f_c como sigue:

$$f = f_c + \alpha t^{-\beta} \quad (12)$$

Donde α y β son los mismos parámetros que en el caso anterior. Cahoon (1998) derivó los parámetros de la Ecuación (12) a partir del modelo de la onda cinemática.

El objetivo fue evaluar el grado de adecuación de nueve modelos de infiltración, ajustando sus parámetros en base a un conjunto de mediciones de campo bajo diferentes tipos de suelo y condiciones de humedad. La investigación se llevó a cabo como parte de un proyecto más amplio sobre el modelaje de la erosión en la cuenca Pao-Cachinche, el cual a su vez, se desarrolla dentro del marco del proyecto sobre Manejo Integrado de Cuencas con Enfoque Participativo con aplicación en las cuencas Pao Cachinche y Unare. En tal sentido, se espera que los resultados sirvan como un componente de los modelos de la erosión al permitir la estimación de la lluvia efectiva y como información para el diseño de sistemas de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Pruebas de campo

Las pruebas de infiltración cuyos datos se usan en esta investigación se llevaron a cabo en la Cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela, durante las estaciones seca y lluviosa entre 2008 y 2010 en seis sectores cultivados principalmente con papa (*Solanum tuberosum* L.) y maíz (*Zea mays* L.) y cuyas características se muestran en el Cuadro 1 (Zamora y Toro (2008), Archila y Hernández (2009), Córdova y Jiménez (2009), Chacón *et al.* (2009), Da Graca y Saturno (2009), Manrique *et al.* (2009), Morillo y Morey (2009), Morillo (2009), Quintero y Altamiranda (2009); Silva y Sifontes (2009), Muñoz

(2009), López y De Ornelas, 2009; Sánchez y Sortino (2009); Trejo *et al.* (2009), Velásquez (2010), Bárcenas y Angola (2010), Vivas *et al.* (2010)).

Utilizando infiltrómetros de dos cilindros concéntricos (Diskin y Nazimov, 1996; Tricker, 1978; Hills, 1970) se llevaron a cabo 107 pruebas de infiltración: 47 en el sector 1; y 30 en cada uno de los sectores 2 y 3. La selección de los puntos para realizar las pruebas de infiltración se llevó a cabo aplicando un muestreo probabilístico por conglomerados en dos etapas, en la Cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela, durante el período 2008-2010; asumiendo un error estándar próximo a 0.015 y una probabilidad de ocurrencia de 99%. En la primera etapa se seleccionaron los racimos y en la segunda, los sujetos de medición dentro de cada racimo (Hernández, 2003). Los racimos vienen a ser las parcelas agrícolas y los sujetos de medición, los puntos de muestreo definidos por las intersecciones en una malla cuadrada constituida por cuadrículas dibujadas con un sistema geográfico de información. La malla permite un registro preciso de la posición de un lugar (Hodgson, 1987). Las dimensiones de las cuadrículas se fijaron utilizando el criterio del Soil Survey Division Staff (1993), según el cual, para estudios experimentales la mínima área delimitada debe ser de una hectárea. La malla se superpuso a un ortofotomapa digital usando la versión 9.3 de ArcGIS. Se hizo corresponder los ortofotomapas con las hojas oficiales de Cartografía Nacional 6546-I-SO y 6546-I-NO, con escala variable entre 1:1000 y 1:50000. Las coordenadas de los puntos de muestreo en Sistema de Coordenadas Geográficas se tomaron con un equipo de posicionamiento global y mediante aplicación en ArcGIS se proyectaron empleando la proyección transversa de Mercator (En inglés Universal Transverse Mercator, UTM) ubicándose la región de estudio en la zona UTM 19N.

Las pruebas de infiltración se realizaron ejecutando hasta 3 mediciones a la vez, debido a que

los puntos seleccionados no se encontraban a más de 20 metros de distancia uno del otro. Las condiciones superficiales de los sitios de muestreo fueron descritas en cuanto a cobertura viva o muerta, roturación del suelo, grietas, humedad hasta al menos una profundidad de 50 cm en cada uno de los sitios. Se tomaron muestras para determinar el contenido de humedad en peso al inicio y al final de la prueba. Cada cilindro fue colocado, hincándolo en el suelo hasta 10 cm, procurando que quedara nivelado. Se marcó un punto en su borde superior. Se hizo un pequeño dique de tierra de 5 a 10 cm de profundidad alrededor del cilindro y a unos 20 cm de distancia de su pared exterior; vertiendo el agua en la zona entre el dique de tierra y el cilindro hasta una altura de 4 – 5 cm. Se colocó una lámina impermeable sobre el suelo en el interior del cilindro y se agregó agua hasta una altura de 10 a 15 cm. Usando un escalímetro, se apoyó con el cero en la parte inferior sobre el punto que anteriormente fue marcado sobre el borde del cilindro. Éste fue deslizado por la pared interior del cilindro hasta que la punta quedó exactamente en el nivel de agua. Desde que se añadió el agua dentro del cilindro hasta que se tomó la primera lectura transcurrieron entre 1 y 2 minutos. Después de la primera lectura, éstas se repitieron a intervalos de 2, 5, 10, 15 y 30 minutos. Cuando el descenso del nivel del agua en un intervalo fue menor de un centímetro, se pasó a un intervalo superior. Las lecturas se realizaron hasta que el descenso del nivel de agua dentro del cilindro fue aproximadamente igual en dos lecturas sucesivas con el mismo intervalo de tiempo.

Se tomaron muestras de suelos para determinar sus características: contenido de agua inicial y final en sitio, permeabilidad con muestras no perturbadas y granulometría, por tamizado e hidrómetro, con muestras perturbadas. En el laboratorio se usaron los métodos estándares para Contenido de Agua (ASTM D2216), Límites de Atterberg (ASTM D4318), Análisis por Tamizado (ASTM D422), Análisis por Hidrómetro (ASTM

Cuadro 1. Ubicación y usos de la tierra de los sectores en la Cuenca del Río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela.

Sector Nº	Ubicación		Área (ha)	Usos de la tierra (%)					
	Coordenada Norte	Coordenada Oeste		Agrícola	Avícola	Residencial	Otros		
Cariaprima	10° 13' 55"	10° 15' 00"	68° 12' 10"	68° 11' 05"	244,38	95,30	2,70	2,00	0
Potrerito	10° 13' 00"	10° 14' 00"	68° 11' 10"	68° 12' 00"	209,21	87,99	4,46	6,13	1,42
El León	10° 10' 10"	10° 11' 50"	68° 11' 10"	68° 10' 20"	320,64	93,04	0,74	6,22	0
La Paredaña	10° 12' 25"	10° 13' 10"	68° 11' 10"	68° 11' 50"	131,74	83,33	5,56	16,67	0
La Colonia	10° 12' 18"	10° 15' 45"	68° 11' 67"	68° 15' 07"	250,64	94,04	0,84	7,00	0
Casupito	10° 11' 50"	10° 12' 20"	68° 11' 30"	68° 10' 30"	162,58	77,78	5,56	16,66	0
Total					1319,19				
Promedio						88,58	3,31	9,11	1,42

D422), Clasificación (ASTM D2487), Gravedad Específica (ASTM D854) y Conductividad Hidráulica-Permeabilidad con carga variable (ASTM D5084). Los resultados obtenidos para esas propiedades son los que se utilizan para el ajuste de los modelos de estimación de la infiltración.

Los datos empleados para el ajuste de los modelos de infiltración fueron: la serie total abarcan 2567, la serie asociada a la humedad alta incluyen 1407, y la serie para la humedad baja incluyen 1160. Cada conjunto de datos fue dividido como sigue: 70% para la calibración y 30% para la validación. Durante el proceso de ajuste de cada modelo, se eliminaron los residuos mayores a 3 desviaciones estándar ya que corresponden a observaciones aberrantes atribuidas al observador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del suelo

En cuanto al tamaño de partículas de suelo, en los tres sectores el diámetro medio es de 0,074 mm (100% del suelo pasa el tamiz N° 4, más del 50% pasa el tamiz N° 200). En el sector 1, el porcentaje de arena varía entre 38 y 67; el de limo, entre 26 a 54%; el de arcilla, entre 6 a 15. El límite líquido varía entre 23 a 30%; el límite plástico de 16 a 25%; el Índice de Plasticidad entre 3 y 8% (ver Figuras 1(a), 1(b), 1(c), 1(d), 1(e) y 1(f)). De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), estos suelos se clasifican como Arcilla Limosa (CL), Arena Limosa (SM) y Limo Orgánico (OL) (Figura 2 (a)). Se observa que los puntos CL se ubican muy próximos a la Línea A, parte inferior, lo cual indica propiedades similares a los limos orgánicos. La permeabilidad varía en el rango de 12 a 68 mm/hora. La porosidad de la muestra de suelo no perturbada varía entre 0,26 y 0,43; la relación de vacíos, entre 0,34 y 0,75 (ver Figuras 1(g), 1(h) y 1(i)).

En el sector 2 las variaciones son como sigue: arena entre 19 y 49; limo entre 22 y 56; arcilla entre 6 y 39; límite líquido 26 a 41%; límite plástico entre 14 a 35%; índice de plasticidad entre 0,66 y 19% (Figuras 1(a), 1(b), 1(c), 1(d), 1(e) y 1(f)). El suelo se clasifica en unos casos como Arcilla Limosa (CL) y en otros como Limo Orgánico (OL). La permeabilidad varía en el rango de 1 a 6 mm/hora; el contenido de humedad en peso, entre 3 y 18%. La relación de vacíos varía entre 0,39 y 1,02. La

porosidad de la muestra de suelo no perturbada varía entre 0,28 y 0,5 (Figuras 1(g), 1(h) y 1(i)).

En el sector 3 los resultados son como sigue: el porcentaje de arena varía entre 33 y 49%; limo 47 y 60 % y arcilla entre 1 y 8 %. Los límites de consistencia de Atterberg; límite líquido 24 a 43 %, límite plástico 21 y 40 %, índice de plasticidad 0,18 y 14 % (ver Figuras 1(a), 1(b), 1(c), 1(d), 1(e) y 1(f)). Los suelos son, por tanto, Limo Orgánico (OL), el cual prevalece en el sector. La permeabilidad varía entre 1 y 6 mm/hora. El sector 3 fue el de mayor variación del contenido de humedad, debido a la aplicación de riego y lluvia. La porosidad de la muestra de suelo no perturbada varía entre 0,26 y 0,54; la relación de vacíos varió entre 0,36 y 1,17. (Figuras 1(g), 1(h) y 1(i)).

En general, en la Figura 1 se observa que los diagramas se traslapan ligeramente, en las tres zonas de estudio, lo que indica que las propiedades físicas de suelo puede que no sean significativamente diferentes entre sí. Se realizan las siguientes observaciones: (1) el cuadro que va desde el cuartil inferior hasta el cuartil superior correspondiente al contenido de arena en la zona de Cariaprima es el más amplio, lo que indica una mayor variabilidad en el contenido, (2) en la mayoría de las propiedades, la mediana (línea vertical) se aproxima a la media (símbolo en cruz); siendo la excepción el índice de plasticidad -diferencia entre límite líquido y límite plástico- donde se evidencia un sesgo, explicado por una mayor proporción de muestras donde el límite líquido toma valores que se alejan del límite plástico; indicando que en una parte de la muestra existe una mayor permanencia en la transición entre el estado plástico y líquido. En términos de la infiltración, se indica una mayor tiempo para alcanzar la saturación del suelo y comenzar a fluir (Figura 1f), (3) los puntos exteriores al rango intercuartil representan valores que difieren en más de 3 veces al rango indicado; ocurriendo desde 2 hasta 3 muestras, lo cual no es significativo para la determinación de las propiedad físicas del suelo de las zonas de estudio.

Humedad en el suelo

La humedad inicial del suelo, medida antes de realizar las pruebas de infiltración, encontrada durante la estación lluviosa resultó menor al límite líquido. Basado en el procesamiento de 77 muestras se encontraron los siguientes parámetros estadísticos, promedio igual a 10 %, desviación estándar igual a

3,99%, coeficiente de variación igual a 39,97%, mínimo igual a 3,04%, máximo igual a 18,23%, coeficiente de asimetría igual a 1,04 y coeficiente de curtosis igual a -1,85 (Figura 3).

La humedad final del suelo, medida al finalizar las pruebas de infiltración, encontrada durante la estación lluviosa resultó mayor al límite

líquido. Basado en el procesamiento de 77 muestras se encontraron los siguientes parámetros estadísticos, promedio igual a 52,83 %, desviación estándar igual a 10,55%, coeficiente de variación igual a 19,98%, mínimo igual a 30,4%, máximo igual a 75,3%, coeficiente de asimetría igual a -0,6 y coeficiente de curtosis igual a -1,11 (Figura 3).

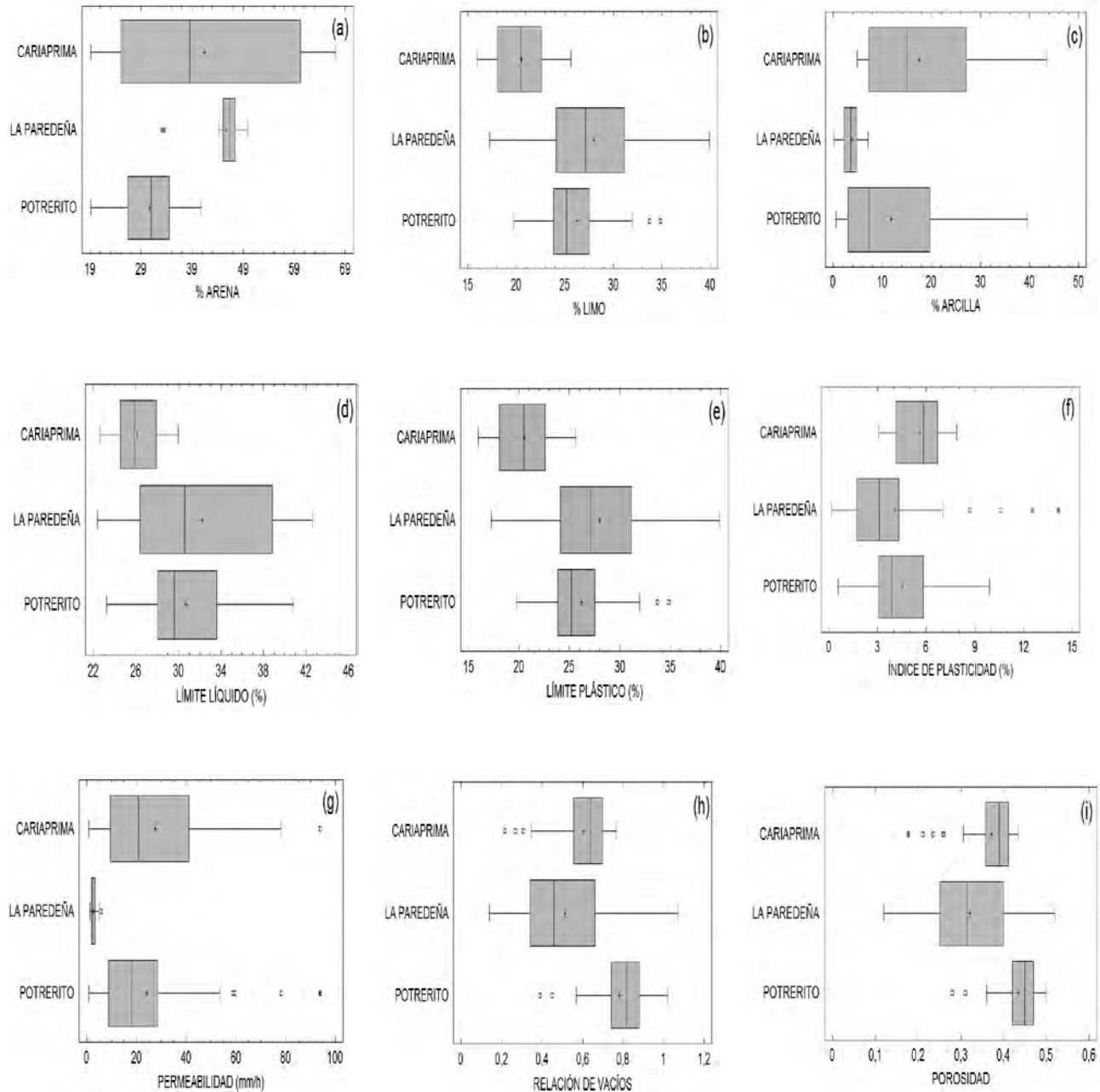


Figura 1. Características físicas de los suelos en los Sectores Cariaprima, Potrerito y La Paredaña. Cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela. (a) Porcentaje de Arena, (b) Porcentaje Limo, (c) Porcentaje Arcilla, (d) Límite Líquido, (e) Límite Plástico, (f) Índice de Plasticidad, (g) Permeabilidad, (h) Relación de vacíos, (i) Porosidad. +: Media Aritmética v □: Puntos Exteriores

La humedad inicial del suelo, medida antes de realizar las pruebas de infiltración, encontrada durante la estación seca resultó en parte, menor al límite líquido. Basado en el procesamiento de 30 muestras se encontraron los siguientes parámetros estadísticos, promedio igual a 16,92 %, desviación estándar igual a 8,32%, coeficiente de variación igual a 49,23%, mínimo igual a 5,38%, máximo igual a 32,56%, coeficiente de asimetría igual a 0,67 y coeficiente de curtosis igual a -1,15 (Figura 3).

La humedad final del suelo, medida al finalizar las pruebas de infiltración, encontrada durante la estación seca resultó mayor al límite líquido. Basado en el procesamiento de 30 muestras se encontraron los siguientes parámetros estadísticos, promedio igual a 33,10 %, desviación estándar igual a 6,02 %, coeficiente de variación igual a 18,18%, mínimo igual a 22,38%, máximo igual a 44,57%, coeficiente de asimetría igual a 0,37 y coeficiente de curtosis igual a -0,79 (Figura 3).

Durante la estación lluviosa, la intensidad y frecuencia de ocurrencia de las lluvias fue baja. Hubo retraso en el inicio de las lluvias por lo que fue preciso aplicar riegos con duraciones mayores a dos horas en las primeras etapas del cultivo, lo que produjo condiciones extremas en el contenido de agua en el suelo (Figura 3). Durante la estación seca, las zonas de riego suelen tener dimensiones de 24 m de ancho y 200 m de largo, en campos cuya área varía entre 10 y 12 ha. El campo es regado durante dos

horas con una frecuencia diaria. La humedad inicial y final se aproxima hacia el final del periodo de muestreo (Figura 3), lo que resulta debido a la saturación del suelo en la zona de raíces y el incremento de la cobertura vegetal.

Medición de la infiltración

Las pruebas de infiltración arrojaron los siguientes valores máximos y mínimos para los tres sectores (1. Cariaprima; 2. Potrerito y 3. La Paredaña), respectivamente: 1980 y 2 mm/h; 240 y 1

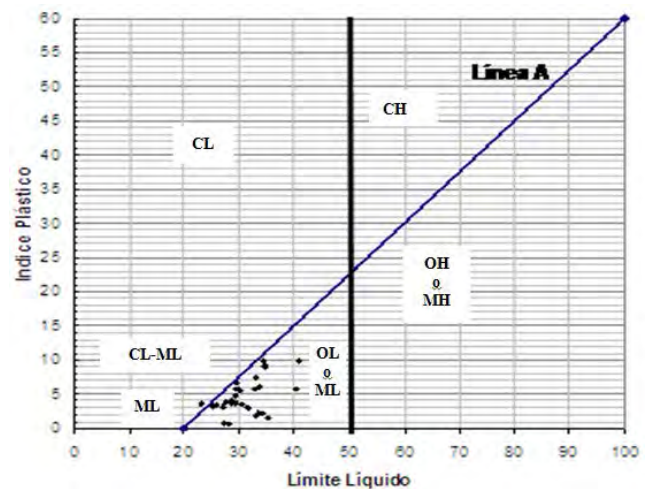


Figura 2. Carta de plasticidad para clasificación de suelos de partículas finas en laboratorio en los Sector Potrerito. Cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela.

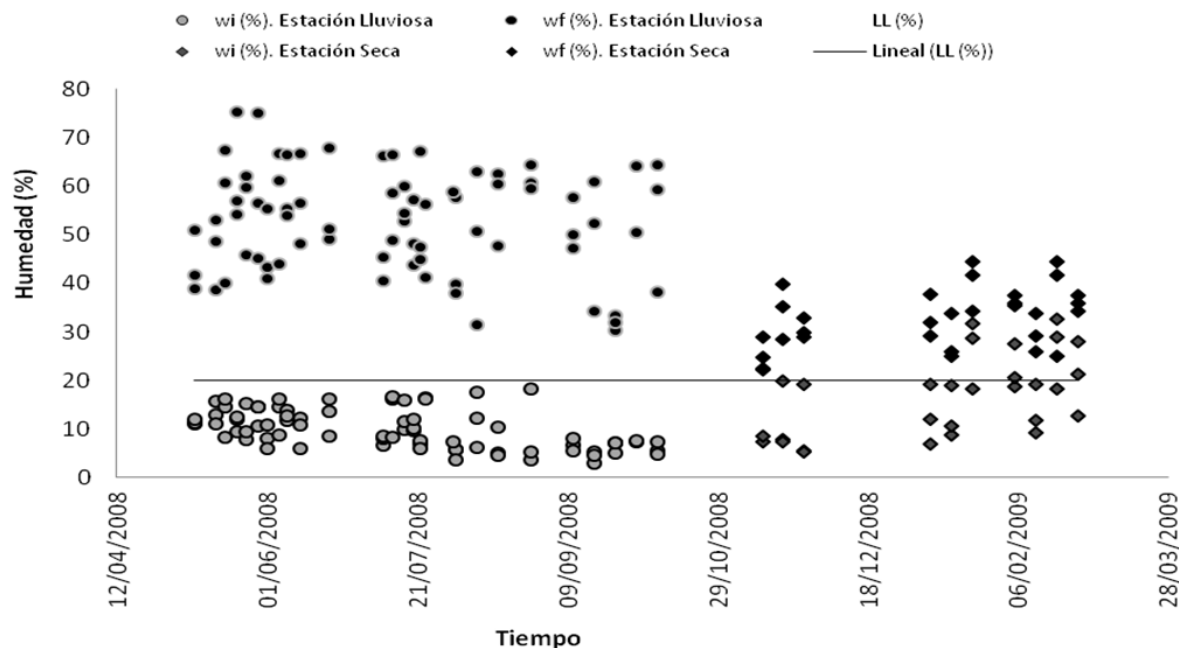


Figura 3. Humedad del suelo durante ensayos de infiltración en la Cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela. w_i : humedad inicial. w_f : humedad final. LL: límite líquido

mm/h y 1200 y 2 mm/h (Figura 4). El conjunto de valores se agrupa por debajo de 400 mm/h. En particular en el sector Cariaprima, las tasas de infiltración con una desviación mayor a 3 veces el rango intercuartil, indicados como puntos exteriores en la Figura 4, corresponden a la infiltración inicial, cuyo valor se cree que depende de la porosidad y relación de vacíos del suelo. Esta abstracción inicial disminuye hasta cerca de 300 mm/h en el segundo intervalo de medición de la infiltración.

Ajuste de los modelos de estimación de la infiltración

Los parámetros de ajuste de los diez modelos usados para estimar la infiltración se obtuvieron aplicando el método de estimación Marquardt mediante el procedimiento de mínimos cuadrados. (Jain y Kumar, 2006; Mishra *et al.*, 2003; Clausnitzer *et al.*, 1998; Van de Genachte *et al.*, 1996). Se consideran los tres casos siguientes: (a) serie total, (b) contenido de humedad y (c) tipo de suelo. A continuación se presentan los resultados para cada caso. Los resultados obtenidos del ajuste de las observaciones a los modelos de infiltración se indican como sigue: Etapa de calibración: ajuste cualitativo (Figuras 5, 6 y 7); ajuste cuantitativo: parámetros para las series; total, humedad baja y alta (Cuadro 2), según el tipo de suelo (Cuadro 3), estadísticos de ajuste (Cuadros 3 y 4). Etapa de validación: como una muestra se presentan los estadísticos del ajuste para las series: total, humedad baja y alta (Cuadro 5).

a) Serie total de datos

En la Figura 5 se presentan los resultados del ajuste de los parámetros de los modelos considerando

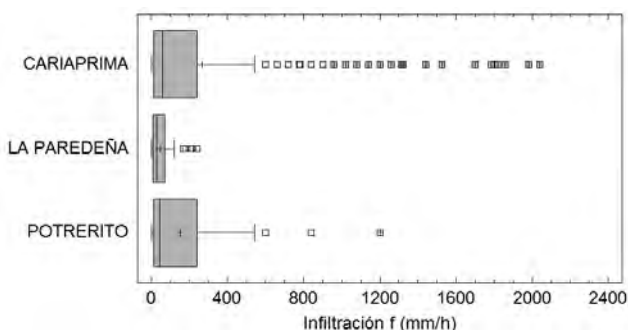


Figura 4. Diagrama de cajas de la infiltración observada en los Sectores Cariaprima, Potrerito y La Paredeña, Cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela. +: Media aritmética y □: Puntos exteriores.

la serie total de datos observados. La Figura 5(a), relaciona la infiltración con el tiempo mediante un modelo potencial; el modelo se ajusta en un tramo corto a los datos, lo que indica un ajuste parcial para tasas de infiltración inicial menores a 400 mm/h, y cubre la serie de datos hasta 40 minutos (0.6 horas). Las Figuras 5(b), 5(c) y 5(d) muestran la relación entre la tasa de infiltración y la infiltración acumulada; el ajuste sólo es significativo para la tasa de infiltración en el estado estable; es decir, cuando la tasa de infiltración tiene a ser constante. La Figura 5(e) muestra la superficie de respuesta, la cual indica la dependencia de la infiltración con la carga de agua sobre la superficie y la infiltración acumulada; las relaciones son consistentes con los valores observado en el estado estable; sin embargo, se observa que en el rango de datos estimados en la variable infiltración entre 183 y 90 mm/h, se evidencia exclusión de los valores de la serie entre 183 y 1200 mm/h. La Figura 5(f) relaciona infiltración con permeabilidad e infiltración acumulada. Las relaciones son consistentes con los valores observados en el estado estable; sin embargo, el rango de datos para la infiltración oscila entre 40 y 200 mm/h. Se evidencia exclusión de los valores de la serie entre 200 y 1200 mm/h. Las Figuras 5(g) y 5(h) muestran la relación de la infiltración con el tiempo, mediante modelos potencial y exponencial modificado, las cuales evidencian un ajuste satisfactorio a toda la serie de datos. La Figura 4(i) confirma que el modelo potencial en la infiltración acumulada representa sólo el estado estable. Las Figuras 5 (j) y 5(k) confirman la dependencia de la infiltración con respecto al tiempo mediante otra estructura incluida dentro de los modelos de potencias, ya que los valores observados se aproximan a los valores estimados en las etapas de transición y estabilización, lo que es mostrado por la fracción de los datos menor a 400 mm/h. En general, los modelos dependientes del tiempo muestran el mejor ajuste a los datos, específicamente Horton y Mishra y Singh.

b) Considerando el contenido de humedad del suelo

En las Figuras 5 y 6 se presentan los resultados de la modelación agrupando la serie total de datos en dos grupos, de acuerdo con el contenido de humedad inicial durante la prueba de infiltración: alta, >20%; y baja, < 20% (Casagrande, 1948). En ambos rangos de humedad, los resultados se comportan en forma similar que para el caso (a); sin embargo, para humedad alta, también muestran un

buen ajuste los modelos de Philip, Green y Ampt, y las versiones de Smith y Parlange (Figuras 7 (a), 7(b), 7(c) y 7(d)). Esto podría deberse a que el rango de los valores de infiltración es más corto, ya que comienza con tasas de infiltración inicial más bajas a consecuencia del contenido de humedad mayor en el suelo al inicio de la prueba. La retención de la humedad en el suelo puede deberse a fuerzas de

adsorción originadas sobre la superficie de las partículas sólidas por causa de una descompensación eléctrica, de esta forma las moléculas de agua actúan como dipolos y son atraídas por las fuerzas electrostáticas. El modelo de Holtan no se adapta bien para estimar la infiltración en este rango de humedad.

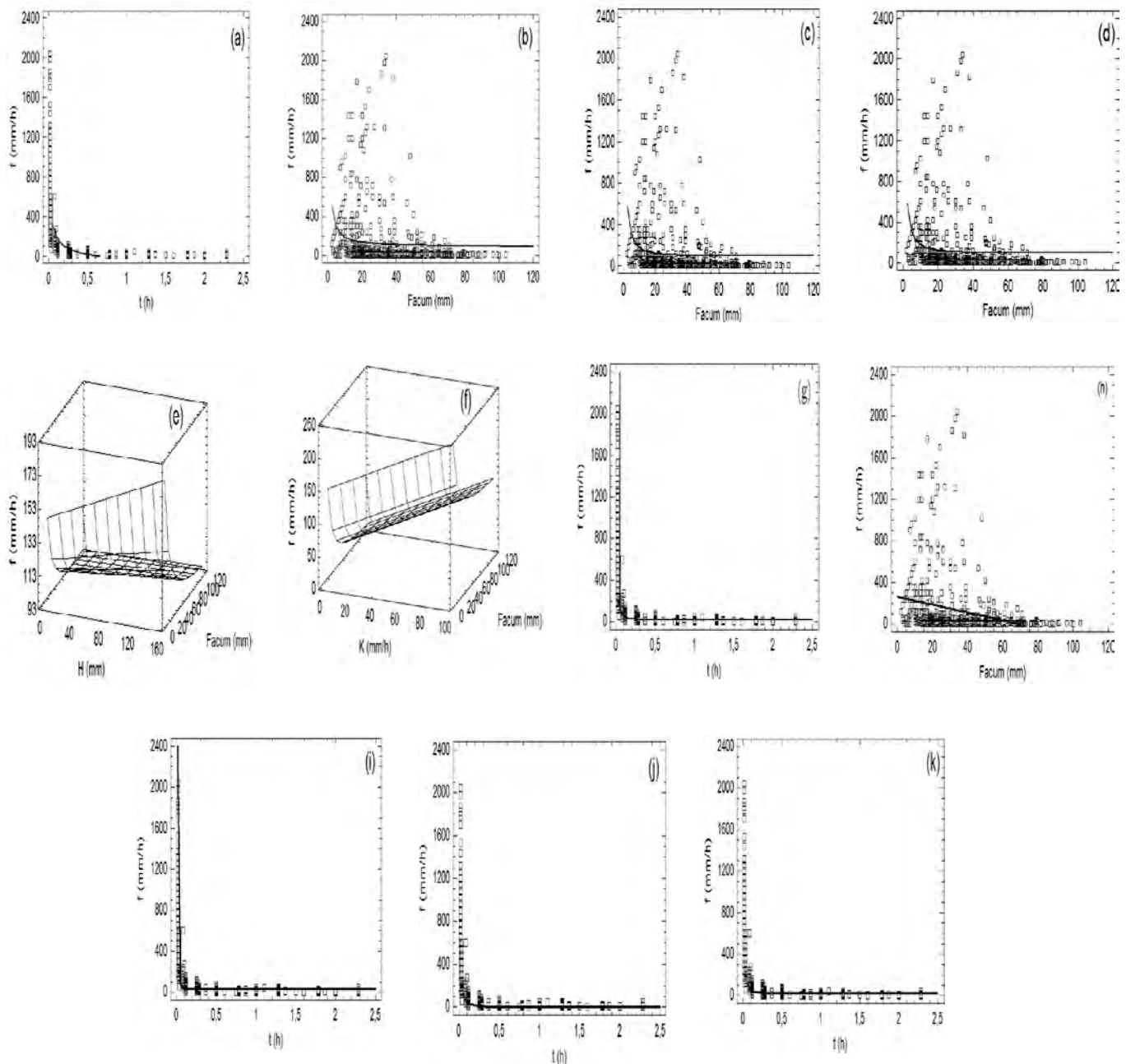


Figura 5. Resultados del ajuste de los parámetros de los modelos considerando la serie total de datos observados (a) Philip, (b) Green y Ampt Lineal, (c) Smith y Parlange Lineal, (d) Smith y Parlange No Lineal, (e) Green y Ampt multivariable, (f) Smith y Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra y Singh, (h) Holtan, (i) Horton, (j) Kostiakov, (k) Smith.

c) Modelación de la infiltración considerando el tipo de suelo

Los resultados obtenidos considerando el tipo de suelo son similares a aquellos indicados para el caso (a); esto probablemente se debe a que las tasas de infiltración se encuentran en el mismo rango que las de la serie del conjunto total de datos. La poca

diferenciación entre las tasas de infiltración para los diferentes tipos de suelo se debe a la similitud en la plasticidad (Línea A, Figuras 2). El comportamiento del límite líquido y el índice de plasticidad corresponden a suelos cuya respuesta al movimiento vertical del agua se manifiesta frente a la infiltración, aproximadamente, funcionando los tres grupos como un solo bloque.

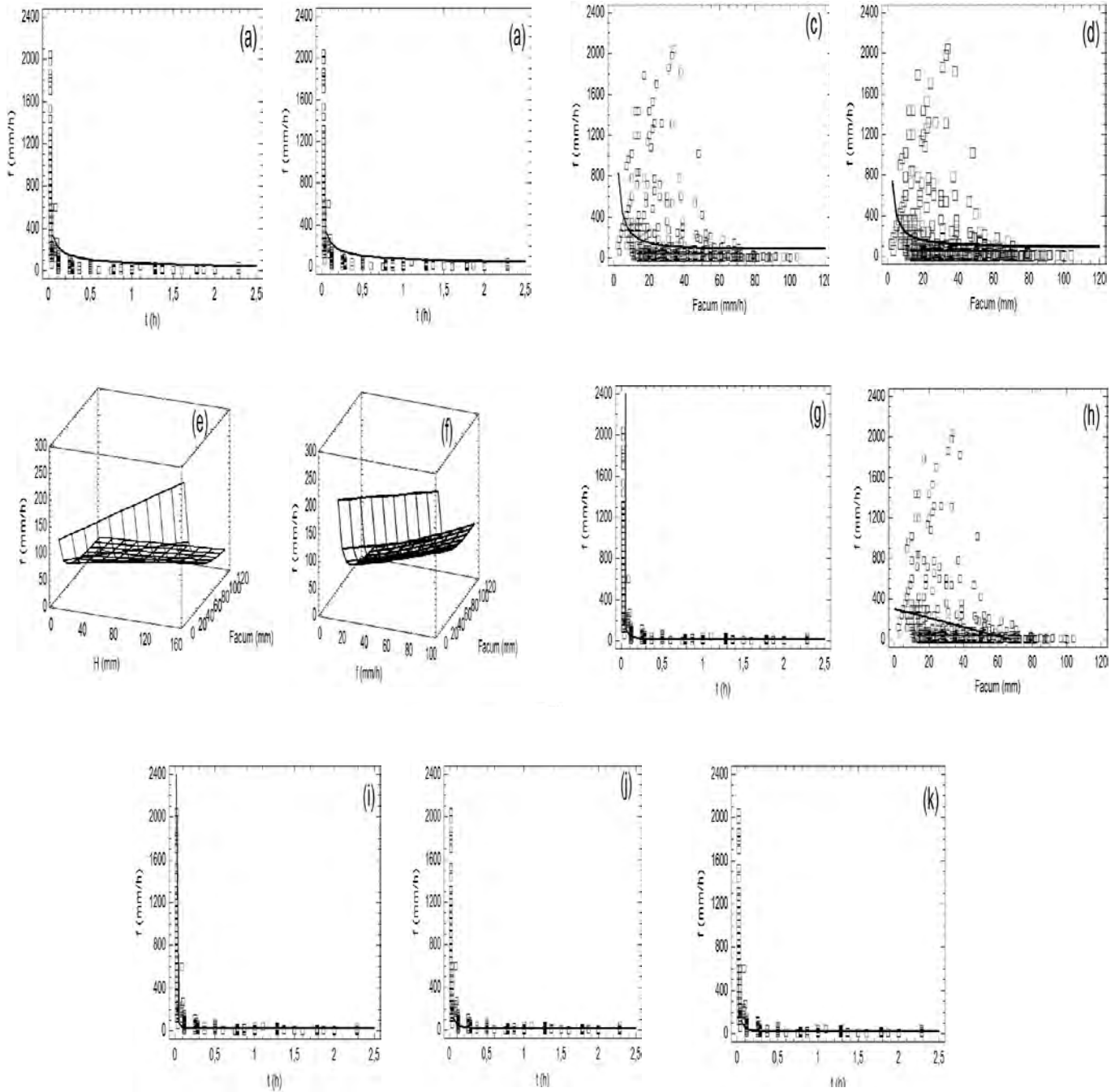


Figura 6. Resultados de la modelación para contenido de humedad inicial bajo. (a) Philip, (b) Green y Ampt Lineal, (c)Smith y Parlange Lineal, (d) Smith y Parlange No Lineal, (e) Green y Ampt multivariable, (f)Smith y Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra y Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Smith

Como ilustración, en la Figura 2 se presenta la carta de plasticidad de los suelos del sector Potrerito, donde se puede observar que el límite líquido varía entre 20 y 50%; mientras que el índice de plasticidad varía entre 0 y 10%, por lo que el suelo puede ser clasificado como un limo orgánico de baja plasticidad. En los otros sectores, los suelos son de grano fino, predominantemente limos (100% pasa el

Tamiz N° 4), lo que favorece una tasa de infiltración alta en el estado seco y lenta en el estado saturado, así como una saturación rápida del suelo (Figuras 1(a), 1(b) y 1(c)). La baja plasticidad ocasiona que los suelos pierdan agua rápidamente y pasen a un estado desmoronado y agrietado, requiriendo riegos o lluvias consecutivas para cubrir los requerimientos de los cultivos.

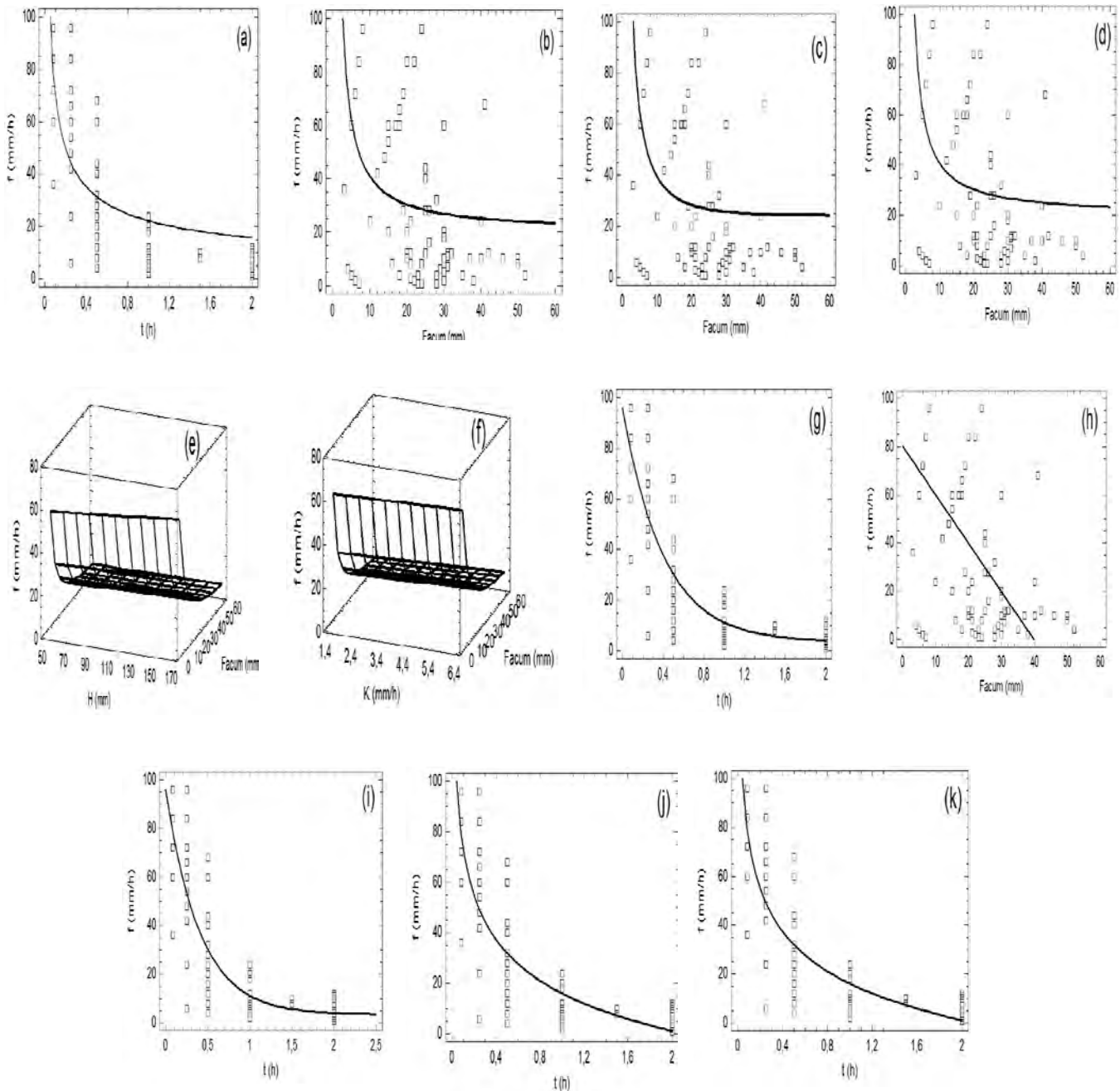


Figura 7. Resultados de la modelación para contenido de humedad inicial alto. (a) Philip, (b) Green y Ampt Lineal, (c) Smith y Parlange Lineal, (d) Smith y Parlange No Lineal, (e) Green y Ampt multivariable, (f) Smith y Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra y Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Smith

Cuadro 2. Parámetros de los modelos de infiltración considerando el contenido de humedad del suelo en la Cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela.

Nº	Modelo	Condición de suelo	Estadísticas	Parámetro				
1	Philip	Parámetro		s	C			
		Serie Total	Min	100,8	-153,17			
			Máx	115,38	-104,39			
			Prom	108,12	-128,78			
		Humedad Alta	Min	22,1	-21,5			
			Máx	23,7	-15,7			
			Prom	22,9	-18,6			
		Humedad Baja	Min	177,7	-221,2			
			Máx	199,6	-174,9			
			Prom	188,7	-198,0			
2	Green y Ampt	Parámetro		A	B	H _c		
		Serie Total	Min	68,89	-0,003	-2639,1		
			Máx	91,43	0,002	1459,91		
			Prom	80,16	-0,00076	-589,59		
		Humedad Alta	Min	-5,3	-4,9	-1,2 x10 ⁶		
			Máx	5,4	5,0	1,3 x10 ⁶		
			Prom	0,06	0,05	79587,9		
		Humedad Baja	Min	45,67	0,07	-108,28		
			Máx	133,73	0,79	-16,29		
			Prom	89,71	0,43	-62,28		
		3	Smith y Parlange	Parámetro		C ₂		
				No Lineal	Min	2025,2		
Máx	2786,6							
Prom	2405,9							
K _s (variable)	Humedad Alta			Min	288,72			
				Máx	322,52			
				Prom	305,62			
Humedad Baja	Min			2535,65				
	Máx			3687,01				
	Prom			3111,33				
4	Smith y Parlange	Parámetro		C ₂	K _s			
		No Lineal	Min	1492,82	29,34			
			Máx	2679,6	132,97			
			Prom	2086,21	81,16			
		K _s (constante)	Humedad Alta	Min	263,6	-4,0		
				Máx	312,4	14,1		
				Prom	288,0	5,0		
		Humedad Baja	Min	1549,05	41,81			
			Máx	3581,98	136,12			
			Prom	565,52	88,97			
		5	Smith y Parlange	Parámetro		C ₁	K _s	
				Lineal	Min	822,3	29,8	
Máx	2066,7				105,7			
Prom	1444,5				67,8			
K _s (constante)	Humedad Alta			Min	265,1	-1,40		
				Máx	308,2	7,03		
				Prom	286,6	2,81		
Humedad Baja	Min			-187,26	51,61			
	Máx			2236,15	138,88			
	Prom			1024,44	95,24			

Continuación

Cuadro 2. Parámetros de los modelos de infiltración considerando el contenido de humedad del suelo en la Cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela

6	Mishra y Singh	Parámetro	Estadísticas	f_c	f_0	k		
		Serie Total	Mín	3,20	-3784,8	8,19		
			Máx	36,86	24676,3	308,8		
			Prom	20,03	10445,7	158,52		
		Humedad Alta	Mín	8,69	374,0	30,2		
			Máx	13,43	511,6	44,4		
			Prom	11,06	442,8	37,3		
		Humedad Baja	Mín	-16,12	2019,77	12,61		
			Máx	15,78	2482,88	16,59		
			Prom	-0,17	2251,32	14,60		
7	Horton	Parámetro		f_c	f_0	k		
		Serie Total	Mín	7,0	1910,18	56,4		
				Máx	40,3	3199,09	84,7	
				Prom	23,6	2554,64	70,5	
		Humedad Alta	Mín	12,6	291,8	35,4		
				Máx	16,7	340,8	43,2	
				Prom	14,6	316,3	39,3	
		Humedad Baja	Mín	6,99	1809,1	15,96		
				Máx	43,81	2170,28	19,59	
				Prom	25,40	1989,69	17,78	
8	Kostiakov	Parámetro		α	β			
		Serie Total	Mín	-1,7	1,06			
				Máx	5,2	1,93		
				Prom	1,7	1,49		
		Humedad Alta	Mín	5,87	0,74			
				Máx	7,88	0,82		
				Prom	6,88	0,78		
		Humedad Baja	Mín	37,89	0,84			
				Máx	48,35	0,93		
				Prom	41,52	0,88		
9	Smith	Parámetro		α	β	f_c		
		Serie Total	Mín	0,02	1,40	1,72		
				Máx	2,03	1,86	32,7	
				Prom	1,02	1,63	17,2	
		Humedad Alta	Mín	4,29	0,74	-1,26		
				Máx	7,64	0,88	5,16	
				Prom	5,96	0,81	1,95	
		Humedad Baja	Mín	50,08	0,707	-84,45		
				Máx	83,27	0,828	-31,56	
				Prom	66,68	0,767	-58,00	
10	Holtan	Parámetro		f_c	a	S	n	
		Serie Total	Mín	-84142	0,013	23148,8	-847,16	
				Máx	-48623	0,022	23148,8	850,17
				Prom	-66382	0,017	23148,8	1,505
		Humedad Alta	Mín	-7,23x10 ⁶	-37,7	-2,44 x10 ⁶	-123,4	
				Máx	7,22x10 ⁶	43,9	2,44 x10 ⁶	125,3
				Prom	-2955,9	3,06	1026,34	0,99
		Humedad Baja	Mín	-3,89x10 ⁶	-465,14	-9,89 x10 ⁶	-8,29	
				Máx	3,88x10 ⁶	466,92	9,90 x10 ⁶	10,07
				Prom	-674,71	0,889	2105,34	0,89

Cuadro 3. Parámetros de modelos de infiltración considerando el tipo de suelo en la Cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela.

Nº	Modelo	Tipo de suelo	Símbolo	Estadísticas	Parámetros		R ²	R ² ajust			
1	Philip	Parámetro			s	C					
		Limo Orgánico	OL	Mín	71	-101	0,64	0,64			
				Máx	82	-67					
				Prom	77	-84					
				Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	Mín	80	-180	0,52	0,51	
				Máx	111	-63					
				Prom	95	-122					
				Arena Limosa	SM	Mín	133	-258	0,68	0,68	
						Máx	164	-144			
				Prom	149	-201					
2	Green y Ampt	Parámetro			A	B	H _c				
		Limo Orgánico	OL	Mín	14	-0,22	-8268,9	0,05	0,05		
				Máx	72	0,273	9922,2				
				Prom	43	0,025	826,6				
				Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	Mín	47	-0,45	-98552	0,011	0,01
				Máx	200	0,44	96184				
				Prom	124	-0,004	-1184				
				Arena Limosa	SM	Mín	-73	-7,10	-99,5	0,23	0,22
						Máx	165	14,69	-34,9		
				Prom	46	3,79	-67,2				
3	Smith y Parlange No Lineal	Parámetro			C ₂						
		Limo Orgánico	OL	Mín	1188		0,057	0,057			
				Máx	1699						
				Prom	1443						
				K _s (variable)	Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	Mín	823		0,05	0,05
				Máx	2368						
				Prom	1595						
				Arena Limosa	SM	Mín	5411		0,17	0,17	
						Máx	8513				
				Prom	6962						
4	Smith y Parlange No Lineal	Parámetro			C ₂	K _s					
		Limo Orgánico	OL	Mín	840,3	25,3	0,05	0,05			
				Máx	1507,0	90,6					
				Prom	1173,7	57,9					
				K _s (constante)	Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	Mín	-4796,0	98,9	0,05	0,05
				Máx	4930,2	208,9					
				Prom	67,1	153,9					
				Arena Limosa	SM	Mín	5367,5	-402,1	0,17	0,16	
						Máx	11828,1	181,7			
				Prom	8597,8	-110,1					
5	Smith y Parlange Lineal	Parámetro			C ₁	K _s					
		Limo Orgánico	OL	Mín	645,1	19,1	0,05	0,05			
				Máx	1408,7	74,6					
				Prom	1026,9	46,8					
				Permea- bilidad como constante	Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	Mín	-359,601	52,310	0,041	0,041
				Máx	1612,3	4					
				Prom	626,3	196					
				Arena Limosa	SM	Mín	5878,5	-166,8	0,17	0,16	
						Máx	11625,7	49,3			
				Prom	8752,1	-58,7					

Continuación

Cuadro 3. Parámetros de modelos de infiltración considerando el tipo de suelo en la Cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela.

6	Mishra y Singh	Parámetro			f_c	f_o	k			
					Limo Orgánico	OL	Mín			7,6
				Máx	32,6	3866,8	94,3			
				Prom	20,1	2610,0	65,35			
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	Mín	-20,5	-3,1E6	-6957,9	0,62	0,61	
				Máx	61,5	3,6E6	9041,8			
				Prom	20,5	255581	1041,9			
		Arena Limosa	SM	Mín	-23,2	-3,09E7	-18326	0,87	0,86	
				Máx	34,4	3,54E7	23345,7			
				Prom	5,6	2,26E6	2509,8			
7	Horton	Parámetro			f_c	f_o	k			
					Limo Orgánico	OL	Mín			16,7
				Máx	40,7	1629,5	59,9			
				Prom	28,7	1374,3	50,4			
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	Mín	-10,6	1311,2	55,6	0,61	0,61	
				Máx	69,0	5832,8	128,9			
				Prom	29,1	3572,0	92,3			
		Arena Limosa	SM	Mín	-4,2	4831,7	86,7	0,87	0,87	
				Máx	50,6	10024,9	128,1			
				Prom	23,1	7428,36	107,4			
8	Kostiakov	Parámetro			α	β				
					Limo Orgánico	OL				Mín
				Máx	9,5	1,2				
				Prom	6,4	1,1				
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	Mín	-0,54	1,2	0,61	0,61		
				Máx	1,35	2,4				
				Prom	0,4	1,85				
		Arena Limosa	SM	Mín	-0,04	2,0	0,87	0,87		
				Máx	0,18	2,7				
				Prom	0,07	2,3				
9	Smith	Parámetro			α	β	f_c			
					Limo Orgánico	OL	Mín			1,21
				Máx	7,67	1,3	25,8			
				Prom	4,44	1,1	11,0			
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	Mín	-0,04	2	-8,5	0,87	0,87	
				Máx	0,13	2,9	47,6			
				Prom	0,04	2,4	19,5			
		Arena Limosa	SM	Mín	-0,41	1,3	-19,3	0,62	0,61	
				Máx	0,8	2,7	64,2			
				Prom	0,19	2	22,4			
10	Holtan	Parámetro			f_c	a	So	n		
					Limo Orgánico	OL	Mín	-2,8x10 ⁶		
				Máx	2,8x10 ⁶	26462	598421	289,6		
				Prom	-1293,7	10,8	386,5	0,825		
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	Mín	-955111	-8240,7	-150089	-115,8	0,07	0,05
				Máx	953759	8259,77	150453	117,5		
				Prom	-676,3	9,5	182	0,8		
		Arena Limosa	SM	Mín	-1,401x10 ⁷	-48156,6	-1,3x10 ⁶	-339,4	0,17	0,15
				Máx	1,400x10 ⁷	48190,5	1,30x10 ⁶	341,2		
				Prom	-3238,4	16,9	401,3	0,9		

La permeabilidad como una expresión de la velocidad del movimiento vertical del agua dentro del estrato saturado del suelo, es el valor límite de la velocidad de infiltración, conocida como infiltración básica en los modelos de Philip (1957, 1969); Horton (1938); Mishra y Singh (2002); Holtan (1961), Kostiaikov, (1932) y Smith, (1972). La magnitud de la permeabilidad es relativamente baja en todos los sectores de estudio; varía entre 1 y 5 mm/h en Potrerito y La Paredeña; y es de 30 mm/h en Cariaprima, esto último, debido a la presencia de zonas en este sector con mayor contenido de arena. En los dos primeros sectores, con predominancia de humedad inicial baja durante las pruebas de campo, este límite se alcanza entre los 15 y 30 minutos después de haberse iniciado la medición de infiltración (Figura 1(h)), valores menores que el límite plástico, el cual correspondería a humedades mayores, entre 18 y 20% (Figuras 1(e)), ubicados en la frontera entre los estados semisólido y plástico. En el estado semisólido, el suelo aún disminuye de volumen al secarse, a pesar de que tiene la apariencia de un sólido. En el Sector La Paredeña, la variabilidad de la humedad es alta: alrededor del 75% de los casos, con valores menores que 16%; y 25%, entre 20

y 30%. El límite líquido se encuentra en niveles de humedad entre 22 y 43% (Figura 1(d)) ubicados en la frontera entre los estados plástico y líquido.

Adaptabilidad de los modelación de infiltración

La calidad de ajuste de los modelos que estiman los parámetros de la infiltración se determina de dos maneras (Spiegel, 2010; Gutiérrez y De la Vara, 2004): (1) cualitativamente, por comparación visual del ajuste de las curvas teóricas a los datos observados y (2) cuantitativamente, por la magnitud del coeficiente de determinación R^2 y mediante la prueba de hipótesis sobre el modelo, asumiendo una distribución de probabilidades para el error de estimación (usualmente, normal, con media cero y varianza σ^2). De acuerdo con el análisis cualitativo, los modelos de mejor ajuste fueron los de Horton y Mishra y Singh ($R^2 > 0,65$), correspondientes a modelos univariados que dependen del tiempo con estructura recíproca y exponencial.

Para llevar a cabo el análisis cuantitativo se consideró que el ajuste es satisfactorio cuando el valor de los coeficientes de determinación y

Cuadro 4. Estadísticos de ajuste de modelos de infiltración a las observaciones en la etapa de calibración.

Nº	Modelo	Condición del suelo	n	R^2	$R^2_{ajust.}$	EEE	EMA	EPMA	EM	EPM
1	Philip	Serie Total	500	0,632	0,631	190,3	101,87	639,7	-4,00E-7	457,2
		Humedad Alta	980	0,77	0,77	30,4	17,5	86,1	-2,99E-7	7,3
		Humedad Baja	900	0,60	0,60	207,5	116,4	563,3	-0,000385	315,8
2	Green-Ampt	Serie Total	500	0,00029	0,00029	220,1	96,40	1128,4	0,000023	-1108,19
		Humedad Alta	980	0,32	0,32	54,0	34,9	396,8	0,23	-370,3
		Humedad Baja	900	0,014	0,01	307,9	158,1	1172,7	-0,000049	-1153,9
3	Smith y Parlange No Lineal Ks *	Serie Total	500	0,04	0,038	291,4	160,38	1481,4	0,000073	-1460,24
		Humedad Alta	980	0,334	0,333	52,29	33,94	399,6	0,107	-373,8
		Humedad Baja	900	0,018	0,01	314,7	151,2	1002,0	13,0	-981,0
4	Smith y Parlange No Lineal Ks **	Serie Total	500	0,0036	0,034	321,7	172,61	1445,53	4,60	-1424,8
		Humedad Alta	980	0,334	0,333	52,2	33,9	399,6	0,107007	-373,83
		Humedad Baja	900	0,0016	0,001	323,3	169,7	1257,87	-0,751	-1239,0
5	Smith y Parlange Lineal Ks**	Serie Total	500	0,045	0,045	154,7	1066,1	25,21	25,2	-1041,8
		Humedad Alta	980	0,329	0,328	52,0	33,41	403,3	-3,63E-8	-377,6
		Humedad Baja	900	0,003	0,001	312,1	160,9	1190,56	0,0006	-1172,1
6	Mishra y Singh	Serie Total	467	0,703	0,702	160,1	67,26	219,0	-0,0016	-194,56
		Humedad Alta	980	0,788	0,787	29,7	18,95	160,65	0,0001	-136,3
		Humedad Baja	900	0,61	0,61	190,3	79,078	104,862	-0,0019	-55,7
7	Horton	Serie Total	500	0,681	0,680	170,1	69,85	267,41	0,00022	-240,37
		Humedad Alta	979	0,744	0,744	32,2	20,3	210,1	0,00007	-181,8
		Humedad Baja	900	0,65	0,65	187,8	80,01	241,92	-0,002	-213,8
8	Kostiaikov	Serie Total	500	0,65	0,648	181,9	70,58	69,17	12,94	39,18
		Humedad Alta	979	0,778	0,778	29,9	17,04	5,5	8,0	6,82
		Humedad Baja	900	0,63	0,63	194,7	89,1	326,2	-17,1	-317,5
9	Smith	Serie Total	500	0,705	0,705	167,6	66,12	180,23	-0,023	-156,9
		Humedad Alta	980	0,778	0,778	29,9	17,3	90,48	-0,00004	-69,16
		Humedad Baja	900	0,64	0,64	179,1	80,0	228,3	0,0001	32,4
10	Holtan	Serie Total	500	0,072	0,068	297,9	169,9	1570,5	-2,5	-1377,5
		Humedad Alta	980	0,172	0,170	60,68	44,25	650,09	0,209	-560,2
		Humedad Baja	900	0,0004	0,0004	317,0	158,5	1232,0	-0,12	-1214,0

*K_s: variable, **K_s: constante, n: cantidad de datos, R²: coeficiente de determinación, R²_{ajust.}: coeficiente de determinación ajustado, EEE: Error Estándar del Estimado, EMA: Error Medio Absoluto, EPMA: Error Porcentual Medio Absoluto. EM: Error Medio, EPM: Error Porcentual Medio

determinación ajustados adquiere magnitudes mayores que 0,7 (Gutiérrez y De la Vara, 2004). En el Cuadro 2 se muestran los resultados de la estimación de los parámetros de los modelos como sigue: 1) Philip, a) Serie Total: s varía entre 100,8 y 115,38; C entre -153,17 y -104,39; b) Humedad Alta: s varía entre 22,1 y 23,7; C entre -21,5 y -15,7; c) Humedad Baja: s varía entre 177,7 y 199,6; C entre -221,2 y -174,9. 2) Green y Ampt, a) Serie Total: A varía entre 68,89 y 91,43; B entre -0,003 y 0,002; H_c entre -2639,1 y 1459,91; b) Humedad Alta: A varía entre -5,3 y 5,4; B entre -4,9 y 5,0; H_c entre -1,2E6 y 1,3E6; c) Humedad Baja: A varía entre 45,67 y 133,73; B entre 0,07 y 0,79; H_c entre -108,28 y -16,29. 3) Smith y Parlange No Lineal (K_s variable) a) Serie Total: C_2 varía entre 2025,2 y 2786,6; b) Humedad Alta: C_2 varía entre 288,72 y 322,52; c) Humedad Baja: C_2 varía entre 2535,65 y 3687,01. 4) Smith y Parlange No Lineal (K_s constante) a) Serie Total: C_2 varía entre 1492,82 y 2679,6; K_s varía entre 29,34 y 132,97 y b) Humedad Alta: C_2 varía entre 263,6 y 312,4; K_s varía entre -4 y 14,1; c) Humedad Baja: C_2 varía entre 1549,05 y 3581,98; K_s varía entre 41,81 y 136,12. 5) Smith y Parlange Lineal a)

Serie Total: C_1 varía entre 822,3 y 2066,7; K_s varía entre 29,8 y 105,7 y b) Humedad Alta: C_1 varía entre 265,1 y 308,2; K_s varía entre -1,40 y 7,03; c) Humedad Baja: C_2 varía entre -187,26 y 2236,15; K_s varía entre 51,61 y 138,88. 6) Mishra y Singh a) Serie Total: f_c varía entre 3,20 y 36,86; f_0 entre -3784,8 y 24676,3; k entre 8,19 y 308,8; b) Humedad Alta: f_c varía entre 8,69 y 13,43; f_0 entre 374,0 y 511,6; k entre 30,2 y 44,4; c) Humedad Baja: f_c varía entre -16,12 y 15,78; f_0 entre 2019,77 y 2482,88; k entre 12,61 y 16,59. 7) Horton a) Serie Total: f_c varía entre 7,0 y 40,3; f_0 entre 1910,18 y 3199,09; k entre 56,4 y 84,7; b) Humedad Alta: f_c varía entre 12,6 y 16,7; f_0 entre 291,8 y 340,8; k entre 35,4 y 43,2; c) Humedad Baja: f_c varía entre 6,99 y 43,81; f_0 entre 1809,1 y 2170,28; k entre 15,96 y 19,59. 8) Kostiakov a) Serie Total: α varía entre -1,7 y 5,2; β entre 1,06 y 1,93; b) Humedad Alta: α varía entre 5,87 y 7,88; β entre 0,74 y 0,82; c) Humedad Baja: α varía entre 37,89 y 48,35; β entre 0,84 y 0,93. 9) Smith a) Serie Total: α varía entre 0,02 y 2,03; β entre 1,40 y 1,86; f_c entre 1,72 y 32,7; b) Humedad Alta: α varía entre 4,29 y 7,64; β entre 0,74 y 0,88; f_c entre -1,26 y 5,16; c) Humedad Baja: α varía entre 50,08 y 83,27; β entre

Cuadro 5. Estadísticos de ajuste de modelos de infiltración a las observaciones en la etapa de validación.

Nº	Modelo	Condición del suelo	n	EMA	EPMA	EM	EPM
1	Philip	Serie Total	171	112,1	538,7	-19,79	342,85
		Humedad Alta	427	19,2	88,8	0,12	10,2
		Humedad Baja	260	97,2	655,4	-14,81	315,8
2	Green-Ampt	Serie Total	1067	94,97	1080,48	-3,05	-1060,31
		Humedad Alta	427	32,0	385,2	-4,2	-359,6
		Humedad Baja	260	167,4	1245,3	-3,79	-1228,2
3	Smith y Parlange No Lineal K_s *	Serie Total	171	118,61	1350,34	-14,71	-1334,27
		Humedad Alta	427	32,80	404,0	-0,31	-378,9
		Humedad Baja	260	154,4	1241,1	18,53	-1216,5
4	Smith y Parlange No Lineal K_s **	Serie Total	171	137,93	1403,77	-18,01	-1384,3
		Humedad Alta	427	32,79	399,4	-3,19	-374,3
		Humedad Baja	260	153,0	1412,6	-31,97	-1397,2
5	Smith y Parlange Lineal K_s **	Serie Total	172	170,18	1201,86	18,16	-1179,5
		Humedad Alta	428	33,65	385,89	0,79	-359,5
		Humedad Baja	260	160,1	1303,3	1,0	-1285,4
6	Mishra y Singh	Serie Total	204	64,3	196,5	15,28	-172,4
		Humedad Alta	428	20,42	155,81	-0,67	-130,4
		Humedad Baja	260	73,8	95,8	3,6	-47,71
7	Horton	Serie Total	172	69,96	201,02	30,21	-159,37
		Humedad Alta	428	23,9	185,0	0,96	-154,2
		Humedad Baja	260	81,7	209,6	7,9	-178,3
8	Kostiakov	Serie Total	164	63,74	66,70	17,05	43,3245
		Humedad Alta	428	17,05	77,45	0,46	-51,66
		Humedad Baja	260	96,7	339,2	-17,1	-330,1
9	Smith	Serie Total	171	82,76	187,75	12,19	-164,098
		Humedad Alta	427	19,81	89,91	5,63	-65,0
		Humedad Baja	260	100,1	220,90	17,3	20,0
10	Holtan	Serie Total	173	179,0	1572,13	1,10	-1388,8
		Humedad Alta	427	39,3	662,0	-4,87	-602,8
		Humedad Baja	260	168,73	1139,11	4,9	-1119,5

* K_s : variable, ** K_s : constante, n: cantidad de datos, R^2 : coeficiente de determinación, $R^2_{ajust.}$: coeficiente de determinación ajustado, EEE: Error Estándar del Estimado, EMA: Error Medio Absoluto, EPMA: Error Porcentual Medio Absoluto. EM: Error Medio, EPM: Error Porcentual Medio

0,707 y 0,828; f_c entre -84,45 y -31,56. 10) Holtan a) Serie Total: f_c varía entre -84142 y -48623; a entre 0,013 y 0,022; S entre 23148,8 y 23148,8; n entre -847,16 y 850,17; b) Humedad Alta: f_c varía entre -7,23E6 y 7,22E6; a entre -37,7 y 43,9; S entre -2,44E6 y 2,44E6; n entre -123,4 y 125,3; c) Humedad Baja: f_c varía entre -3,89E6 y 3,88E6; a entre -465,14 y 466,92; S entre -9,89E6 y 9,90E6; n entre -8,29 y 10,07.

En el Cuadro 4 se muestran los parámetros estadísticos del ajuste de las observaciones a los modelos de infiltración en la etapa de la calibración como sigue: 1) Philip, a) Serie Total: R^2 es igual a 0,632; $R^2_{ajust.}$, es 0,631; EEE es 190,3; EMA es 101,87; $EPMA$ es 639,7; EM es -4,00E-7; EPM es 457,2; b) Humedad Alta: R^2 es igual a 0,77; $R^2_{ajust.}$, es 0,77; EEE es 30,4; EMA es 17,5; $EPMA$ es 86,1; EM es -2,99E-7; EPM es 7,3; c) Humedad Baja: R^2 es igual a 0,60; $R^2_{ajust.}$, es 0,60; EEE es 207,5; EMA es 116,4; $EPMA$ es 563,3; EM es -0,000385; EPM es 315,8. 2) Green y Ampt, a) Serie Total: R^2 es igual a 0,00029; $R^2_{ajust.}$, es 0,00029; EEE es 220,1; EMA es 96,40; $EPMA$ es 1128,4; EM es 0,000023; EPM es -1108,19; b) Humedad Alta: R^2 es igual a 0,32; $R^2_{ajust.}$, es 0,32; EEE es 54,0; EMA es 34,9; $EPMA$ es 396,8; EM es 0,23; EPM es -370,3; c) Humedad Baja: R^2 es igual a 0,014; $R^2_{ajust.}$, es 0,01; EEE es 307,9; EMA es 158,1; $EPMA$ es 1172,7; EM es -0,000049; EPM es -1153,9. 3) Smith y Parlange No Lineal (K_s variable) a) Serie Total: R^2 es igual a 0,04; $R^2_{ajust.}$, es 0,038; EEE es 291,4; EMA es 160,38; $EPMA$ es 1481,4; EM es 0,000073; EPM es -1460,24; b) Humedad Alta: R^2 es igual a 0,334; $R^2_{ajust.}$, es 0,333; EEE es 52,29; EMA es 33,94; $EPMA$ es 399,6; EM es 0,107; EPM es -373,8; c) Humedad Baja: R^2 es igual a 0,018; $R^2_{ajust.}$, es 0,01; EEE es 314,7; EMA es 151,2; $EPMA$ es 1002,0; EM es 13,0; EPM es -981,0; 4) Smith y Parlange No Lineal (K_s constante) a) Serie Total: R^2 es igual a 0,0036; $R^2_{ajust.}$, es 0,0034; EEE es 321,7; EMA es 172,61; $EPMA$ es 1445,53; EM es 4,60; EPM es -1424,8; y b) Humedad Alta: R^2 es igual a 0,334; $R^2_{ajust.}$, es 0,333; EEE es 52,2; EMA es 33,9; $EPMA$ es 399,6; EM es 0,107007; EPM es -373,83; c) Humedad Baja: R^2 es igual a 0,0016; $R^2_{ajust.}$, es 0,001; EEE es 323,3; EMA es 169,7; $EPMA$ es 1257,87; EM es -0,751; EPM es -1239,0. 5) Smith y Parlange Lineal a) Serie Total: R^2 es igual a 0,045; $R^2_{ajust.}$, es 0,045; EEE es 154,7; EMA es 1066,1; $EPMA$ es 25,21; EM es 25,2; EPM es -1041,8; y b) Humedad Alta: R^2 es igual a 0,329; $R^2_{ajust.}$, es 0,328; EEE es 52,0; EMA es 33,41; $EPMA$ es 403,3;

EM es -3,63E-8; EPM es -377,6; c) Humedad Baja: R^2 es igual a 0,003; $R^2_{ajust.}$, es 0,001; EEE es 312,1; EMA es 160,9; $EPMA$ es 1190,56; EM es 0,0006; EPM es -1172,1. 6) Mishra y Singh a) Serie Total: R^2 es igual a 0,003; $R^2_{ajust.}$, es 0,001; EEE es 312,1; EMA es 160,9; $EPMA$ es 1190,56; EM es 0,0006; EPM es -1172,1; y b) Humedad Alta: R^2 es igual a 0,788; $R^2_{ajust.}$, es 0,787; EEE es 29,7; EMA es 18,95; $EPMA$ es 160,65; EM es 0,0001; EPM es -136,3; c) Humedad Baja: R^2 es igual a 0,61; $R^2_{ajust.}$, es 0,61; EEE es 190,3; EMA es 79,078; $EPMA$ es 104,862; EM es -0,0019; EPM es -55,7. 7) Horton a) Serie Total: R^2 es igual a 0,681; $R^2_{ajust.}$, es 0,680; EEE es 170,1; EMA es 69,85; $EPMA$ es 267,41; EM es 0,00022; EPM es -240,37; y b) Humedad Alta: R^2 es igual a 0,744; $R^2_{ajust.}$, es 0,744; EEE es 32,2; EMA es 20,3; $EPMA$ es 210,1; EM es 0,00007; EPM es -181,8; c) Humedad Baja: R^2 es igual a 0,65; $R^2_{ajust.}$, es 0,65; EEE es 187,8; EMA es 80,01; $EPMA$ es 241,92; EM es -0,002; EPM es -213,8. 8) Kostiakov a) Serie Total: R^2 es igual a 0,65; $R^2_{ajust.}$, es 0,648; EEE es 181,9; EMA es 70,58; $EPMA$ es 69,17; EM es 12,94; EPM es 39,18; y b) Humedad Alta: R^2 es igual a 0,778; $R^2_{ajust.}$, es 0,778; EEE es 29,9; EMA es 17,04; $EPMA$ es 5,5; EM es 8,0; EPM es 6,82; c) Humedad Baja: R^2 es igual a 0,63; $R^2_{ajust.}$, es 0,63; EEE es 194,7; EMA es 89,1; $EPMA$ es 326,2; EM es -17,1; EPM es -317,5. 9) Smith a) Serie Total: R^2 es igual a 0,705; $R^2_{ajust.}$, es 0,705; EEE es 167,6; EMA es 66,12; $EPMA$ es 180,23; EM es -0,023; EPM es -156,9; y b) Humedad Alta: R^2 es igual a 0,778; $R^2_{ajust.}$, es 0,778; EEE es 29,9; EMA es 17,04; $EPMA$ es 90,48; EM es -0,00004; EPM es -69,16; c) Humedad Baja: R^2 es igual a 0,64; $R^2_{ajust.}$, es 0,64; EEE es 179,1; EMA es 80,0; $EPMA$ es 228,3; EM es 0,0001; EPM es 32,4. 10) Holtan a) Serie Total: R^2 es igual a 0,072; $R^2_{ajust.}$, es 0,068; EEE es 297,9; EMA es 169,9; $EPMA$ es 1570,5; EM es -2,5; EPM es -1377,5; y b) Humedad Alta: R^2 es igual a 0,172; $R^2_{ajust.}$, es 0,170; EEE es 60,68; EMA es 44,25; $EPMA$ es 650,09; EM es 0,209; EPM es -560,2; c) Humedad Baja: R^2 es igual a 0,0004; $R^2_{ajust.}$, es 0,0004; EEE es 317,0; EMA es 158,5; $EPMA$ es 1232,0; EM es -0,12; EPM es -1214,0.

En el Cuadro 5 se muestran los parámetros estadísticos del ajuste de las observaciones a los modelos de infiltración en la etapa de la validación como sigue: 1) Philip, a) Serie Total: EMA es 112,1; $EPMA$ es 538,7; EM es -19,79; EPM es 342,85; b) Humedad Alta: EMA es 19,2; $EPMA$ es 88,8; EM es 0,12; EPM es 10,2; c) Humedad Baja: EMA es 97,2;

EPMA es 655,4; EM es -14,81; EPM es 315,8. 2) Green y Ampt, a) Serie Total: EMA es 94,97; EPMA es 1080,48; EM es -3,05; EPM es -1060,31; b) Humedad Alta: EMA es 32,0; EPMA es 385,2; EM es -4,2; EPM es -359,6; c) Humedad Baja: EMA es 167,4; EPMA es 1245,3; EM es -3,79; EPM es -1228,2. 3) Smith y Parlange No Lineal (K_s variable) a) Serie Total: EMA es 118,61; EPMA es 1350,34; EM es -14,71; EPM es -1334,27; b) Humedad Alta: EMA es 32,80; EPMA es 404,0; EM es -0,31; EPM es -378,9; c) Humedad Baja: EMA es 154,4; EPMA es 1241,1; EM es 18,53; EPM es -1216,5. 4) Smith y Parlange No Lineal (K_s constante) a) Serie Total: EMA es 137,93; EPMA es 1403,77; EM es -18,01; EPM es -1384,3; y b) Humedad Alta: EMA es 32,79; EPMA es 399,4; EM es -3,19; EPM es -374,3; c) Humedad Baja: EMA es 153,0; EPMA es 1412,6; EM es 1412,6; EPM es -1397,2. 5) Smith y Parlange Lineal a) Serie Total: EMA es 170,18; EPMA es 1201,86; EM es 18,16; EPM es -1179,5; y b) Humedad Alta: EMA es 33,65; EPMA es 385,89; EM es 0,79; EPM es -359,5; c) Humedad Baja: EMA es 160,1; EPMA es 1303,3; EM es 1,0; EPM es -1285,4. 6) Mishra y Singh a) Serie Total: EMA es 64,3; EPMA es 196,5; EM es 15,28; EPM es -172,4; y b) Humedad Alta: EMA es 20,42; EPMA es 155,81; EM es -0,67; EPM es -130,4; c) Humedad Baja: EMA es 73,8; EPMA es 95,8; EM es 3,6; EPM es -47,71. 7) Horton a) Serie Total: EMA es 69,96; EPMA es 201,02; EM es 30,21; EPM es -159,37; y b) Humedad Alta: EMA es 23,9; EPMA es 185,0; EM es 0,96; EPM es -154,2; c) Humedad Baja: EMA es 81,7; EPMA es 209,6; EM es 7,9; EPM es -178,3. 8) Kostiakov a) Serie Total: EMA es 63,74; EPMA es 66,70; EM es 17,05; EPM es 43,32; y b) Humedad Alta: EMA es 17,05; EPMA es 77,45; EM es 0,46; EPM es -51,66; c) Humedad Baja: EMA es 96,7; EPMA es 339,2; EM es -17,1; EPM es -330,1. 9) Smith a) Serie Total: EMA es 82,76; EPMA es 187,75; EM es 12,19; EPM es -164,098; y b) Humedad Alta: EMA es 19,81; EPMA es 89,91; EM es 5,63; EPM es -65,0; c) Humedad Baja: EMA es 100,1; EPMA es 220,90; EM es 17,3; EPM es 20,0. 10) Holtan a) Serie Total: EMA es 179,0; EPMA es 1572,13; EM es 1,10; EPM es -1388,8; y b) Humedad Alta: EMA es 39,3; EPMA es 662,0; EM es -4,87; EPM es -602,8; c) Humedad Baja: EMA es 168,73; EPMA es 1139,11; EM es 4,9; EPM es -1119,5.

En el Cuadro 3 se muestran los resultados de la estimación de los parámetros y estadístico de ajuste de los modelos como sigue: 1) Philip, a) OL: s

varía entre 71 y 82; C entre -101 y -67; R^2 es igual a 0,64 y $R^2_{ajust.}$, es 0,64; b) CL-ML: s varía entre 80 y 111; C entre -180 y -63; R^2 es igual a 0,52 y $R^2_{ajust.}$, es 0,51; c) SM: s varía entre 133 y 164; C entre -258 y -144; R^2 es igual a 0,68 y $R^2_{ajust.}$, es 0,68;. 2) Green y Ampt, a) OL: A varía entre 14 y 72; B entre -0,22 y 0,273; H_c entre -8268,9 y 9922,2; R^2 es igual a 0,05 y $R^2_{ajust.}$, es 0,05; b) CL-ML: A varía entre 47 y 200; B entre -0,45 y 0,44; H_c entre -98552 y 96184; R^2 es igual a 0,011 y $R^2_{ajust.}$, es 0,011 c) SM: A varía entre -73 y 165; B entre -7,10 y 14,69; H_c entre -99,5 y -34,9; R^2 es igual a 0,23 y $R^2_{ajust.}$, es 0,22 3) Smith y Parlange No Lineal (K_s variable) a) OL: C_2 varía entre 1188 y 1699; R^2 es igual a 0,057 y $R^2_{ajust.}$, es 0,057 b) CL-ML: C_2 varía entre 823 y 2368; R^2 es igual a 0,057 y $R^2_{ajust.}$, es 0,057 c) SM: C_2 varía entre 5411 y 8513; R^2 es igual a 0,17 y $R^2_{ajust.}$, es 0,17 4) Smith y Parlange No Lineal (K_s constante) a) OL: C_2 varía entre 840,3 y 1507,0; K_s varía entre 25,3 y 90,6; R^2 es igual a 0,05 y $R^2_{ajust.}$, es 0,05 y b) CL-ML: C_2 varía entre -4796,0 y 4930,2; K_s varía entre 98,9 y 208,9; R^2 es igual a 0,05 y $R^2_{ajust.}$, es 0,05 c) SM: C_2 varía entre 5367,5 y 11828,1; K_s varía entre -402,1 y 181,7; R^2 es igual a 0,17 y $R^2_{ajust.}$, es 0,16.

5) Smith y Parlange Lineal a) OL: C_1 varía entre 645,1 y 1408,7; K_s varía entre 19,1 y 74,6; R^2 es igual a 0,05 y $R^2_{ajust.}$, es 0,05; y b) CL-ML: C_1 varía entre -359,601 y 1612,3; K_s varía entre 52,31 y 196; R^2 es igual 0,041 y $R^2_{ajust.}$, es 0,041; c) SM: C_1 varía entre 5878,5 y 11625,7; K_s varía entre -166,8 y 49,3; R^2 es igual a 0,17 y $R^2_{ajust.}$, es 0,16. 6) Mishra y Singh a) OL: f_c varía entre 7,6 y 32,6; f_0 entre 1353,3 y 3866,8; k entre 36,3 y 94,3; R^2 es igual a 0,70 y $R^2_{ajust.}$, es 0,69. b) CL-ML: f_c varía entre -20,5 y 61,5; f_0 entre -3,1E6 y 3,6E6; k entre -6957,9 y 9041,8; R^2 es igual a 0,62 y $R^2_{ajust.}$, es 0,61. c) SM: f_c varía entre -23,2 y 34,4; f_0 entre -3,09E7 y 3,54E7; k entre -18326 y 23345,7; R^2 es igual a 0,87 y $R^2_{ajust.}$, es 0,86. 7) Horton a) OL: f_c varía entre 7,0 y 40,3; f_0 entre 1119,1 y 1629,5; k entre 41,0 y 59,9; R^2 es igual a 0,68 y $R^2_{ajust.}$, es 0,68. b) CL-ML: f_c varía entre -10,6 y 69,0; f_0 entre 1311,2 y 5832,8; k entre 55,6 y 128,9; R^2 es igual a 0,61 y $R^2_{ajust.}$, es 0,61. c) SM: f_c varía entre -4,2 y 50,6; f_0 entre 4831,7 y 10024,9; k entre 86,7 y 128,1; R^2 es igual a 0,87 y $R^2_{ajust.}$, es 0,86. 8) Kostiakov a) OL: α varía entre 3,3 y 9,5; β entre 0,9 y 1,2; R^2 es igual a 0,70 y $R^2_{ajust.}$, es 0,70. b) CL-ML: α varía entre -0,54 y 1,35; β entre 1,2 y 2,4; R^2 es igual a 0,61 y $R^2_{ajust.}$, es 0,6. c) SM: α varía entre -0,04 y 0,18; β entre 2,0 y 2,7; R^2 es igual a 0,87 y $R^2_{ajust.}$, es 0,86. 9) Smith

a) OL: α varía entre 1,21 y 7,67; β entre 1,0 y 1,3; f_c entre -3,8 y 25,8; R^2 es igual a 0,70 y $R^2_{ajust.}$, es 0,70. b) CL-ML: α varía entre -0,04 y 0,13; β entre 2 y 2,9; f_c entre -8,5 y 47,6; R^2 es igual a 0,87 y $R^2_{ajust.}$, es 0,87. c) SM: α es -0,41; β es 1,3; f_c es -19,3; R^2 es igual a 0,62 y $R^2_{ajust.}$, es 0,61.

Los ajustes de los modelos mostrados a las observaciones para las diferentes series indican que: los modelos de Green y Ampt, Smith y Parlange no Lineal, Smith y Parlange Lineal, muestran un ajuste deficiente, en la mayoría de los casos menor que 17%, indicando baja interrelación entre infiltración, infiltración acumulada, permeabilidad y carga de agua sobre la superficie del terreno (Cuadros 3, 4 y 5). Por lo tanto, la hipótesis elemental de la relación de capacidad de infiltración – infiltración acumulada, no es significativa. El ajuste de los modelos de Mishra y Singh, Horton y Kostiakov (univariados dependientes del tiempo, con ecuaciones exponencial, recíproca y potencial, respectivamente), se considera satisfactorio, con valores del coeficientes de determinación alrededor de 70%. El modelo de Holtan (univariado, dependiente de la infiltración acumulada, mediante una función potencial) arroja un ajuste deficiente ya que el coeficiente de determinación es menor al 20%.

Los estadísticos en la etapa de la calibración como en la etapa de la validación para el ajuste de los modelos de infiltración a las observaciones en la series: total, y según el contenido de agua; son similares, por lo que los resultados de los parámetros son consistentes (Cuadros 4 y 5).

Comparando los resultados de los ajustes de los modelos de infiltración a las observaciones con los encontrados por Mishra *et al.*, (2003) para suelos similares a los indicados en el Cuadro 3 se encuentra que; los parámetros y los estadísticos de ajuste de los modelos Green y Ampt, Smith Parlange Lineal y Smith-Parlange no Lineal, Holtan difieren significativamente; mientras que los correspondientes a los modelos de Philip, Mishra-Sing, Horton, Kostiakov y Smith fueron aproximados. Las diferencias respecto al desempeño de los modelos Smith-Parlange Lineal y No Lineal se cree que podrían suponerse debido a que las pruebas fueron realizadas en laboratorio en muestras remoldadas; lo que tiene influencia en la propiedades físicas de suelo; tales como porosidad, relación de vacíos y cohesión; entre otros; a lo que parecen ser menos sensibles el resto de los modelos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

No se han encontrado diferencias significativas en la estimación de los parámetros de la infiltración entre los resultados obtenidos para los tipos de suelo individualmente (limo orgánico, arena limosa y arcilla limosa) y los resultados al considerar todos los datos en conjunto.

Los modelos de infiltración de Horton y Mishra & Singh son los que han mostrado mejores resultados en el ajuste a los datos medidos en el campo; por lo que se recomienda su uso para la estimación de las láminas de aplicación de agua al suelo en el diseño de los sistemas de riego.

Para contenidos de humedad del suelo elevados y tasas de infiltración bajas a estables, los modelos de mejor ajuste fueron los de Philip, Green & Ampt, Smith & Parlange y Holtan. Por lo tanto, se recomienda seguir investigando la estructura de estos modelos para usarlos en la estimación del coeficiente de permeabilidad, como una medida del valor límite inferior de la infiltración.

Dado que los resultados obtenidos en esta investigación sólo se restringen al área de estudio, se recomienda validar su aplicación antes de usarlos en otras regiones.

AGRADECIMIENTOS

La investigación se llevó a cabo con el apoyo logístico del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC) de la Universidad de Carabobo y el aporte financiero del Ministerio del Poder Popular para la Ciencia y Tecnología (Misión Ciencia).

LITERATURA CITADA

- Archila, A. y D. Hernández. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector El León. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Bárceñas E., M. y A. Angola. 2010. Validación de modelos matemáticos de infiltración. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

- Barri, D. A.; J. Y. Parlange, L. LI, D. S. Jeng and M. Crapper. 2005. Green-Ampt Aproximations, *Advances in Water Resources* 18 (10): 1003-1009.
- Berndtsson, R. 1987. Application of infiltration equation to a catchment with large spatial variability in infiltration. *Hydrological Sciences* 32 (3): 399-413.
- Brakensiek D. L.; R. L. Engleman and W. J. Rawls. 1981. Variation within texture classes of soil water parameters. *Transactions of the ASAE* 24 (2): 335-339.
- Cahoon J. 1998. Kostiakov infiltration parameters from kinematic wave model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 124 (2): 127-130.
- Casagrande, A. 1948. Classification and identification of soils. *American Society of Civil Engineers. Trans. ASCE* 113: 901-930.
- Clausnitzer V.; J. W. Hopmans and J. L. Starr. 1998. Parameter uncertainty analysis of common infiltration models. *Soil Science Society of America Journal* 62 (6): 1477-1487.
- Collis George, N. 1977. Infiltration equations for simple soil systems. *Water Resources Research* 13 (2): 395-403.
- Córdova, Y. y J. M. Jiménez. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector Casupito. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Chacón, C.; F. Segura and A. Sandoval. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector Cariaprima. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de República Bolivariana de Venezuela.
- Da Graca, E. y Y. Saturno. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector Cariaprima. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Diskin, M. H. and N. Nazimov. 1996. Ponding time and infiltration capacity variation during steady rainfall. *Journal of Hydrology* 178 (1-4): 369-380.
- Green, W. H. and C. A. Ampt. 1911. Studies on soil physics, I. Flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* 4: 1-24.
- Grigorjev, V. Y. and L. Iritz. 1991. Dynamic simulation model of vertical infiltration of water in soil. *Journal of Hydrological Sciences* 36 (2): 171-179.
- Guevara, E. 1990. Ingeniería de riego y drenaje. Consejo de desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela. 339 p.
- Gutiérrez, H. y R. De La Vara. 2004. Análisis y Diseño de Experimentos. Editorial McGraw-Hill. México.
- Hernández, R.; C. Fernández y P. Baptista. 2003. Metodología de la Investigación. (3ª ed.). Editorial McGraw-Hill. México. 442 p.
- Hills, R. C. 1970. The determination of the infiltration capacity of field soils using the cylinder infiltrometer. *B.G.R.C., Tech. Bull.* 3. 24 p.
- Horton, R. I. 1938. The interpretation and application of runoff plot experiments with reference to soil erosion problems. *Soil Science Society of America Proceedings* 3: 340-349.
- Holtan H. N. 1961. A concept of infiltration estimates in watershed engineering. ARS41-51, U.S. Department of Agricultural Service, Washington, DC. USA.
- Hodgson, J. 1987. Muestreo y descripción de suelos. Editorial Reverté, S.A. España. 225 p.
- Huggins L. F. and E. J. Monke. 1966. The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds. Technical Report No. 1, Purdue Water Resources Research Centre, Lafayette.
- Kincaid, D. C.; D. F. Heerman and E. G. Kruse. 1969. Application rates and runoff in center-pivot sprinkler irrigation. *Transactions of the ASAE* 12 (6): 790-794.
- Kostiakov, A. N. 1932. On the dynamics of the coefficients of water percolation in soils. In Sixth Commission, International Society of Soil Science, Part A: 15-21.

- López M. e I. De Ornelas. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector La Colonia. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Manrique, O.; Y. Velásquez e Y. Gómez. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Maidment, D. R. 1993. Handbook of hydrology. McGraw Hill: New York. USA. 1424 p.
- Mein R. G. and C. L. Larson. 1971. Modeling the infiltration component of the rainfall-runoff process. WRRC Bull. 43, Water Resources Research Center, University of Minnesota, Minneapolis. USA.
- Mein R. G. and C. L. Larson. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources Research 9 (2): 384-394.
- Meng, H.; J. D. Salas, T. R. Green and L. R. Ahuja. 2006. Scaling analysis of space-time infiltration based on the universal multifractal model. Journal of Hydrology. 322: 220-235.
- Mishra S. K. 1998. Operation of a multipurpose reservoir. Unpublished PhD thesis, University of Roorkee, Roorkee. India.
- Mishra S. K and V. P. Singh. 1999. Another look at the SCS-CN method. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE 4 (3): 257-264.
- Mishra S. K. and V. P. Singh. 2002. SCS-CN-based hydrologic simulation package. Ch. 13 *In: Mathematical Models in Small Watershed Hydrology*, (eds.) V. P. Singh and D. K. Frevert, Water Resources Publications, P. O. Box 2841, Littleton, Colorado. USA. p. 391-464.
- Mishra S. K.; S. R. Kumar and V. P. Singh. 1999. Calibration of a general infiltration model. Journal of Hydrological Processes 13: 1691-1718.
- Morillo J. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el sector potrerito-cuenca del río Chirgua, municipio Bejuma - Estado Carabobo. Período húmedo 2008. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Morillo K. y R. Morey. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el sector La Colonia, Cuenca del Río Chirgua, Municipio Bejuma, Estado Carabobo. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Muñoz H., 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector El León. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Ogden F. L. and B. Sagafian. 1997. Green and Ampt infiltration with redistribution. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 123 (5): 386-393.
- Overton D. E. 1964. Mathematical refinement of an infiltration equation for watershed engineering. ARS 41-99, U.S. Department of Agricultural Service, Washington, DC. USA.
- Philip J. R. 1957. Theory of infiltration. Soil Science 83 (5): 345-357.
- Philip J. R. 1969. Theory of infiltration. *In: Advances in Hydrosience*, (ed.) V. T. Chow. Academic Press. New York, USA. p. 215-296.
- Quintero A. y K. Altamiranda. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Rode, A A. 1965. Theory of soil moisture, Vol. 1 (translated from Russian). Published for USDA and NSF by the Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem.
- Sánchez J. y C. Sortino. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Tesis de Grado. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.

- SCS 1956, 1971. Hydrology. National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10. Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC. USA.
- Singh, V. P. 1992. Elementary hydrology. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ. USA.
- Singh V. P. and F. X. Yu. 1990. Derivation of infiltration equation using systems approach. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 116 (6): 837-857.
- Singh P.; N. K. Narda and A. Singh. 1992. Evaluation of Horton and Philip infiltration functions for determining optimum slope of graded check borders. Journal of Agricultural Engineering, ISAE 29 (1-4): 1-9.
- Silva W. y C. Sifontes. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector Potrerito. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Skaggs R. W.; L. E. Huggins, E. J. Monke and G. R. Foster. 1969. Experimental evaluation of infiltration equations. Transactions of the ASAE 12 (6): 822-828.
- Smith R. E. 1972. The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer. Journal of Hydrology 17: 1-21.
- Smith R. E. and J. Y. Parlange. 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. Water Resources Research 14 (3): 533-538.
- Spiegel, M. R. 2010. Teoría y problemas de probabilidad y estadística. McGraw-Hill, Serie Schaum; 3ª Ed; México.
- Snyder W. M. 1971. A proposed watershed retention function. Journal of Irrigation and Drainage Division 97 (1): 193-201
- Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- Trejo, G.; J. Pérez y E. Seijas. 2009. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el sector La Colonia, Cuenca del Río Chirgua, Municipio Bejuma, Estado Carabobo. Período Seco 2009. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Tricker, A. S. 1978. The infiltration cylinder: some comments on its use. Journal of Hydrology 36: 83-391.
- Tyagi, J. V.; S. K. Mishra, R. Sing and V. P. Singh,. 2008. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. Journal of Hydrology 352: 388-403.
- Van De Genachte G.; D. Mallants, J. Ramos, J. A. Deckers and J. Feyen. 1996. Estimating infiltration parameters from basics soil properties. Hydrological Processes 10: 687-701.
- Chow, V. T.; D. R. Maidment and L. W. Mays. 1988. Applied hydrology, McGraw-Hill International Editions, McGraw Hill Book Company, New York, USA.
- Velásquez L. 2010. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el sector La Paredaña, Cuenca del Río Chirgua, Municipio Bejuma. Estado Carabobo. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- Vivas R.; J. Petit y A. Palacio. 2010. Validar modelos matemáticos de infiltración en el sector La Paredaña, Cuenca alta del río Chirgua en el Municipio Bejuma. República Bolivariana de Venezuela.
- Zamora R. y E. Toro. 1998. Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.