

Parametrización de modelos de infiltración basada en pruebas de campo en suelos agrícolas de la cuenca del río Chirgua, Venezuela

Guevara Edilberto¹ Márquez Adriana²

(1) Ingeniero Agrícola-PhD Planificación de Recursos Hídricos, (2) Ingeniero Civil-MSc Ingeniería Ambiental. Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Venezuela

ammarquez@uc.edu.ve; eguevara@uc.edu.ve

1 Introducción

La infiltración ha recibido gran atención por parte de científicos de suelos y aguas debido a su papel fundamental en la hidrología superficial y subterránea, riego y agricultura. Para estimar este parámetro hidrológico se han desarrollado numerosos modelos matemáticos. En general, los modelos de infiltración pueden clasificarse en tres grupos (Mishra y otros., 1999): (1) con base física (teóricos), (2) semi-empíricos y (3) empíricos. Los modelos con base física 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 humedad), relación de retención, condiciones límites e iniciales; estos modelos son de complejidad variable. Entre ellos figuran el de Green-Ampt (1911), Philip (1957,1969), Mein y Larson (1971,1973), Smith (1972), Smith-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). Entre los modelos semi-empíricos figuran los de Horton (1938), Holtan (1961), Overton (1964), Singh-Yu (1990), Grigorjev-Iritz (1991), y otros. Los modelos empíricos se basan en datos medidos de campo o en experimentos de laboratorio. Entre los modelos empíricos están los del SCS-CN (1956,1971), Kostikov (1932), Huggins-Monke (1966), Kostikov modificado (Smith, 1972), Collis-George (1977), y otros. Existe muchos otros modelos de infiltración pero su adecuación a los datos del mundo real es menos clara; de modo que no es siempre evidente cuál es el mejor modelo de estimación y bajo cuáles condiciones. Por lo tanto, en estudios sobre evaluación comparativa, con frecuencia sólo dos a cuatro modelos de infiltración se consideran para su uso en experimentos de laboratorio o de campo. Asimismo, no está claro cuál modelo es el mejor y bajo cuáles condiciones. Los modelos funcionan de manera diferente cuando se aplican en el laboratorio y en el campo. El objetivo de este trabajo es por lo tanto, evaluar los resultados de nueve modelos de infiltración divididos en los tres grupos indicados anteriormente, comparar su funcionamiento sobre un conjunto de datos recolectados en campo para diferentes tipos de suelo y condiciones de humedad, y comentar su adecuación a estas condiciones.

2 Descripción teórica de los modelos

2.1 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, s , C son parámetros dependientes de las características de difusividad y retención de humedad del suelo. El parámetro s se conoce como sorptividad.

2.2 Modelo de Green-Ampt

Green-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, superficie inundada, las ecuaciones de Green-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. El modelo de Green-Ampt ha resurgido, debido a que sus parámetros se pueden obtener de cantidades medibles físicamente, Brakensiek (1981), Rawls y otros (1983), Odgen y Sagafian (1977). Actualmente, existe una vasta literatura sobre el modelo de Green-Ampt. Se han estimado parámetros por ajuste empírico para aplicaciones en campo a partir de datos de infiltración medidos. La Ecuación (3) se puede reescribir como:

$$f = A + \frac{C}{F} \quad (3)$$

Donde $C = AB(H_c + H)$. Los parámetros A y C pueden ser estimados con los datos de infiltración medidos.

2.3 Modelo Lineal de Smith-Parlange

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

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

Donde K_s es la conductividad hidráulica saturada, y C es un parámetro que está relacionado con la sorptividad del suelo y la variación lineal de la humedad inicial, también es dependiente de la cantidad y el patrón de intensidad de lluvia.

2.4 Modelo no lineal de Smith-Parlange

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

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

Donde C tiene la misma connotación que en la Ecuación (4). Ambos parámetros K_s y C pueden derivarse de las propiedades físicas de los suelos. Sin embargo, para aplicaciones prácticas, los parámetros se estiman empíricamente por ajuste del modelo a datos medidos

2.5 Modelo de Mishra-Singh (2002)

Al expresar el método convencional SCS-CN en la forma del método de Horton, suponiendo una variación lineal de la precipitación acumulada con el tiempo (o intensidad de lluvia constante), Mishra (1998) y Mishra y Singh (2002) desarrollaron una ecuación de infiltración:

$$f_t = f_c + \frac{Sk}{[1 + kt]^2} \quad (6)$$

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

$$S = \frac{f_o - f_c}{k} = \frac{\pi \cdot s^2}{4 K} \quad (7)$$

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.

2.6 Modelo de Horton

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

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad (8)$$

Donde f_c es el valor para estado estable de f , f_o es el valor de f en $t=0$, y k es el factor de decaimiento de la infiltración.

2.7 Modelo de Holtan

Usando un concepto de agotamiento del almacenamiento, Holtan (1961) en 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, 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

2.8 Modelo de Kostiakov

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

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

Donde $\alpha=ab$ y $\beta=1-b$

2.9 Modelo de Kostiakov Modificado

Smith (1972) modificó la Ecuación de Kostiakov, 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.

3 Aplicación

3.1 Pruebas de campo

Las pruebas de infiltración cuyos datos se usan en esta investigación se hicieron en la Cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela, en tres sectores (Zamora y Toro, 2008; Manrique et al, 2009; Quintero y Altamiranda, 2009): (1) Cariaprima, (2) Potrerito y (3) La Paredaña. La ubicación geográfica, área y uso de la tierra de cada sector es: el primero; W 68°12'10" - 68°11'05", N 10°13'55"-10°15'0"; 244,38 ha, 95,3% agrícola, 2,7% avícola, 2% residencial. El segundo, W 68° 11' 10"- 68° 12'0", N 10° 13' 00"-10° 14' 00"; 209,21 ha, 87,99% agrícola, 4,46% avícola, 6,13% residencial, 1,42% recreacional. El tercero, W 68° 11' 10"-68° 10' 20", N 10° 10' 10"-10° 11' 50"; 320,64 ha, 93,04% agrícola, 0,74% avícola, 6,22% residencial. Con respecto al uso agrícola, en todos los sectores de la cuenca se cultivan dos rubros principalmente: papa (*Solanum tuberosum* L) y maíz (*Zea mays* L). De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Tierras (2006), la superficie sembrada con papa representa el 4% del total nacional. En el área de estudio se realizaron 107 pruebas de infiltración y se tomó igual número de muestras para determinar sus propiedades físicas (47, 30 y 30 en Cariaprima, Potrerito y La Paredaña, respectivamente). Se tomaron muestras no perturbadas para permeabilidad y muestras

perturbadas para granulometría por tamizado e hidrómetro; se midió el contenido de humedad inicial y final en sitio. En el laboratorio se usaron los métodos estándares para Contenido de Humedad (ASTM D2216), Límites de Atterberg (ASTM D4318), Análisis por Tamizado (ASTM D422), Análisis por Hidrómetro (ASTM D422), Clasificación (ASTM D2487), Gravedad Específica (ASTM D854), Conductividad Hidráulica-Permeabilidad con carga variable (ASTM D5084). Estas propiedades permitirán definir el rango de datos para el ajuste de los modelos de estimación de la infiltración. Los datos seleccionados se usarán en otra investigación sobre el proceso de erosión de suelos por efecto de la actividad agrícola en la zona, que se viene desarrollando en el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo.

4 Análisis de los resultados

4.1 Caracterización de propiedades físicas de suelo

En cuanto al tamaño de partículas de suelo, en los tres sectores el diámetro es de 0.074 mm (100% del suelo pasa el tamiz N° 4, más del 50% pasa el tamiz N° 200); en Cariaprima, el porcentaje de arena varía entre 38 y 67; limo, 26 a 54%, arcilla, 6 a 15. Límite líquido 23 a 30%; límite plástico 16 a 25%; 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) (ver 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; el contenido de humedad entre 6 y 17% (ver Mapa I). 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; la gravedad específica, entre 2,33 y 2,41 (ver Figuras 1(g), 1(h), 1(i), 1(j) y 1(k)). En el sector Potrerito el porcentaje de arena varía entre 19 y 49; limo 22 y 56; arcilla 6 y 39. Límite líquido 26 a 41%, límite plástico 14 a 35%, índice de plasticidad entre 0,66 y 19% (ver 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 entre 3 y 18% (ver Mapa II). La porosidad de la muestra de suelo no perturbada varía entre 0,28 y 0,5; la relación de vacíos entre 0,39 y 1,02; la gravedad específica entre 2,15 y 2,36 (ver Figuras 1(g), 1(h), 1(i), 1(j) y 1(k)).

En el sector La Paredaña 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 lo tanto Limo Orgánico (OL), el cual prevalece en el sector. La permeabilidad varía entre 1 y 6 mm/hora; el contenido de humedad, entre 5 y 33% . Este fue el sector de mayor variación del contenido de humedad, debido a la aplicación de riego y lluvia (ver Mapa III). La porosidad de la muestra de suelo no perturbada varió entre 0,26 y 0,54; la relación de vacíos varió entre 0,36 y 1,17; la gravedad específica, entre 2,32 y 2,67 (ver Figuras 1(g), 1(h), 1(i), 1(j) y 1(k)).

4.2 Medición de la infiltración

Las pruebas de infiltración arrojaron los siguientes valores máximos y mínimos para los tres sectores (Cariaprima, Potrerito y La Paredaña), respectivamente: 1980 y 2 mm/h; 240 y 1 mm/h y 1200 y 2 mm/h. (ver Figura 3). El conjunto de valores se agrupa por debajo de 400 mm/h. Las tasas de infiltración más elevadas (menos frecuentes) corresponden al primer intervalo de medición

4.3 Modelos de estimación de la infiltración

Los parámetros de ajuste de los nueve modelos usados para estimar la infiltración se obtuvieron mediante el método de estimación Marquardt. Se consideraron los tres casos siguientes: (a) serie total de datos, (b) contenido de humedad y (c) tipo de suelo. A continuación se presentan los resultados para cada caso.

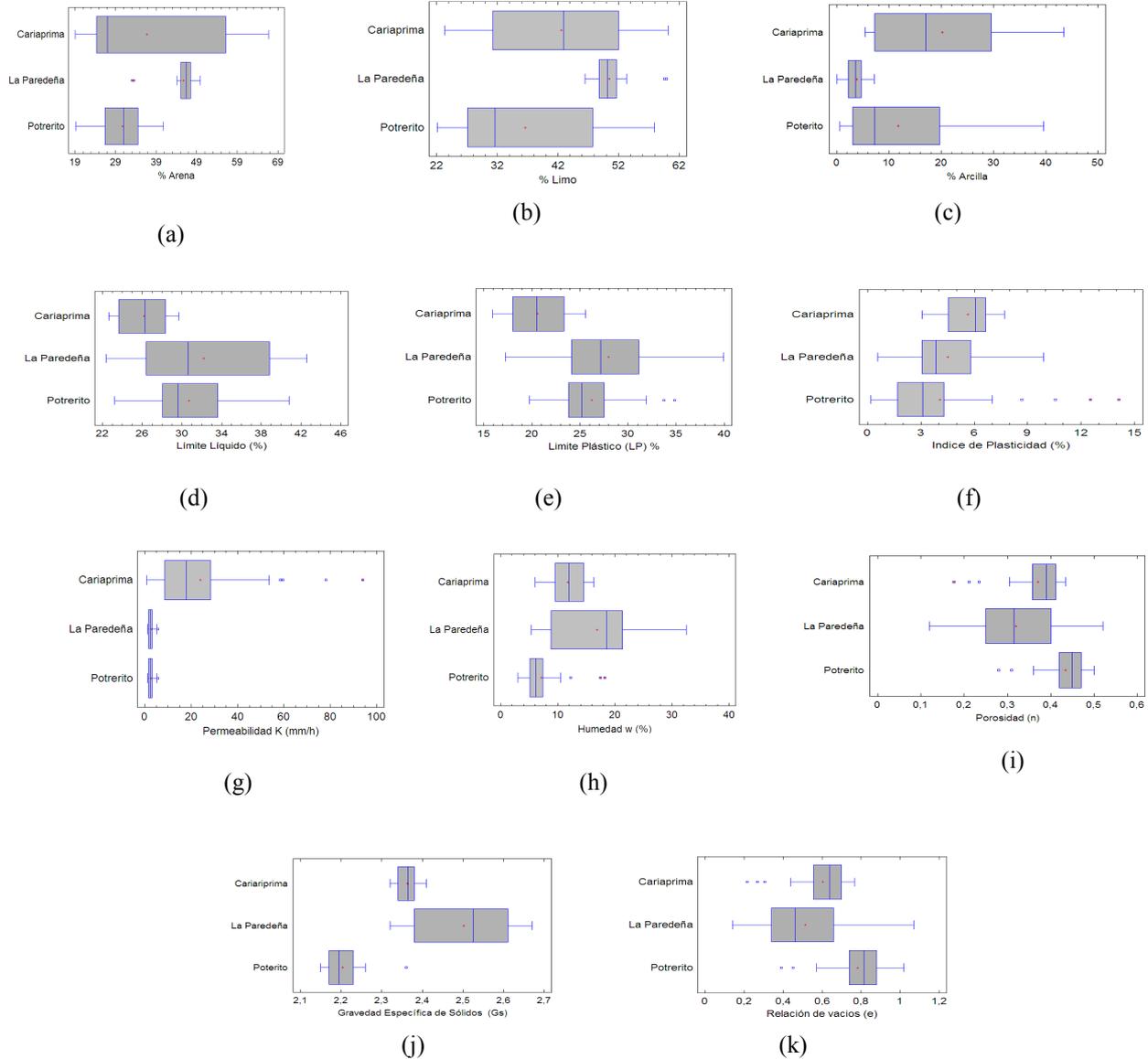


Figura 1 Características físicas de suelos en los Sectores Cariaprima, Potrerito y La Paredeña. Cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo. (a) Porcentaje de Arena, (b) Porcentaje Limo, (c) Porcentaje Arcilla, (d) Límite Líquido, (e) Límite Plástico, (f) Índice de Plasticidad, (g) Permeabilidad, (h) Humedad, (g) Relación de vacíos, (i) Porosidad

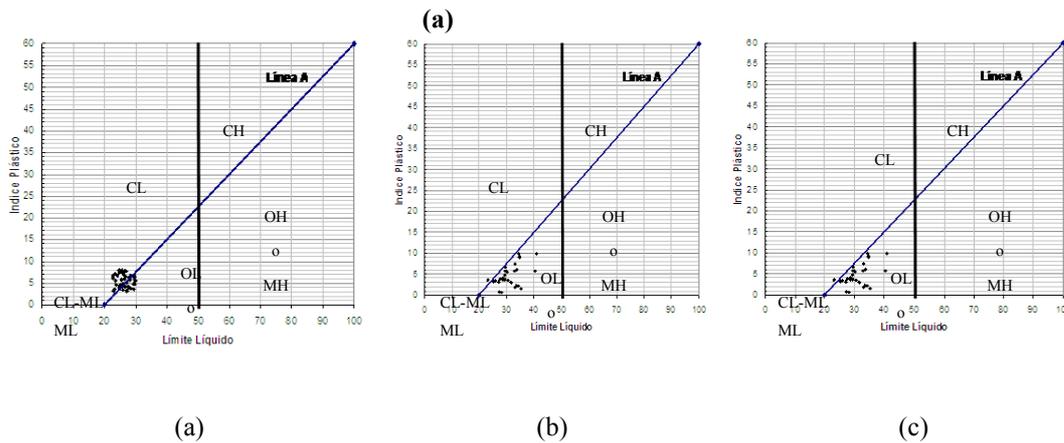


Figura 2 Carta de Plasticidad para clasificación de suelos de partículas finas en laboratorio en los Sectores (a) Cariaprima (b) Potrerito y (c) La Paredaña. Cuenca del río Chirgua- Estado Carabobo

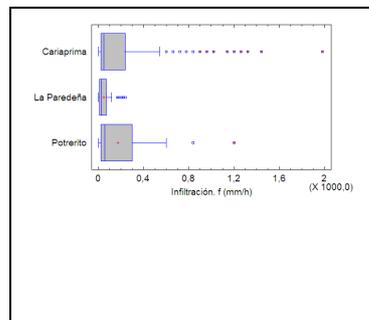


Figura 3 Diagrama de cajas de la infiltración observada

4.3.1 Serie total de datos

En la Figura 4 se presentan los del ajuste de los parámetros de los modelos considerando la serie total de datos observados. La Figura 4(a), relaciona infiltración con el tiempo mediante un modelo potencial, éste 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 4(b), 4(c) y 4(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. La Figura 4(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, sin embargo se observa que el rango de datos estimados en la variable infiltración entre 183 y 90 mm/h, se evidencia exclusión los valores de la serie entre 183 y 1200 mm/h. La Figura 4(f) relaciona infiltración con permeabilidad e infiltración acumulada. Las relaciones son consistentes; 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 4(g) y 4(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 4 (j) y 4(k) confirman la dependencia de la infiltración del tiempo mediante otra estructura incluida dentro de los modelos de potencias, lo que representa la fracción inferior 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-Singh.

4.3.2 Considerando 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 contenido de humedad inicial durante la prueba de infiltración: alta, >20%; y baja, < 20%. 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-Ampt, y las versiones de Smith-Parlange (ver Figuras 6 (a), 6(b), 6(c) y 6(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. El modelo de Holtan no se adapta bien para estimar la infiltración en este rango de humedad.

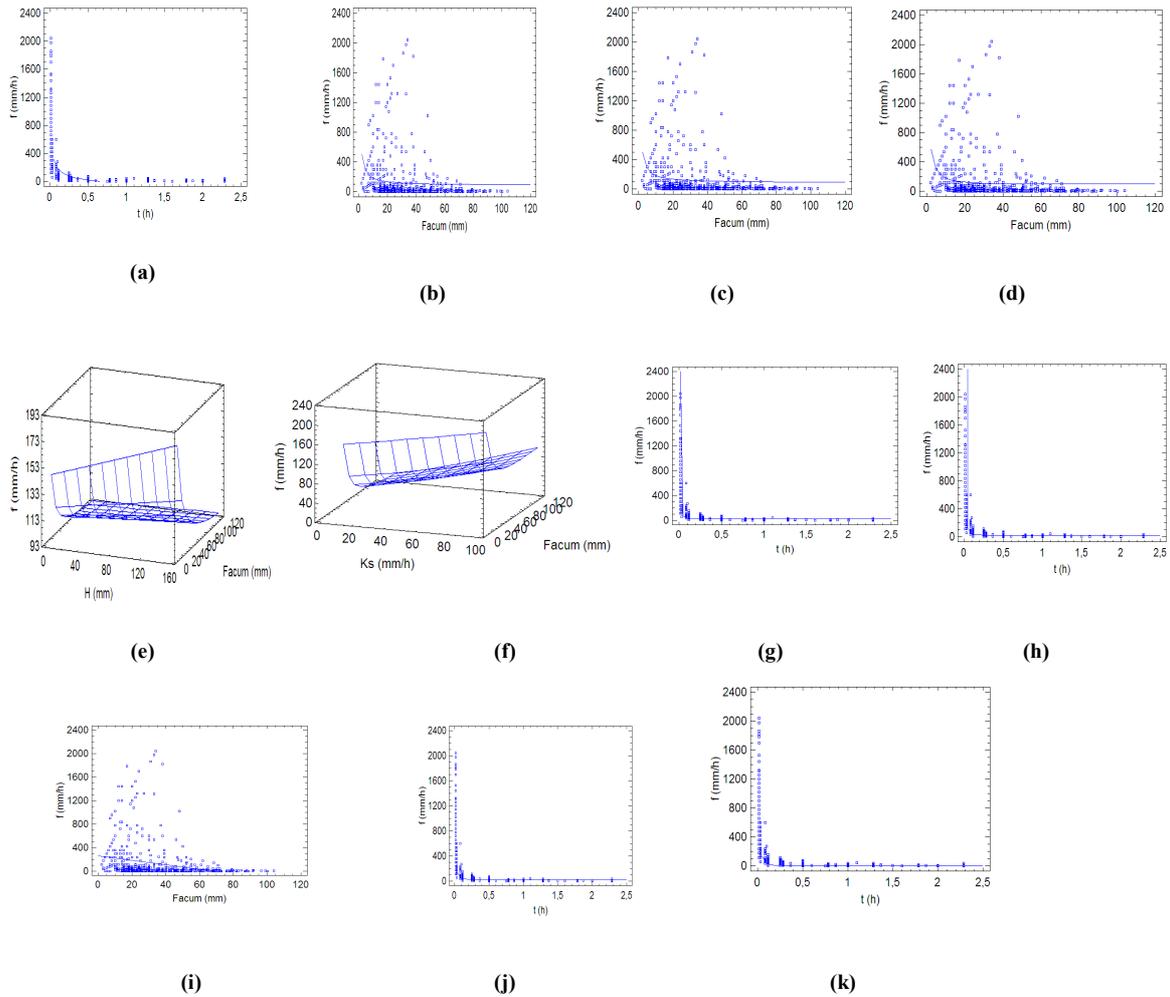


Figura 4 Gráficos de modelo ajustado. Todos los datos. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt multivariable, (f) Smith-Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra-Singh, (h) Horton,

4.3.3 Modelación de la infiltración considerando el tipo de suelo

Los resultados obtenidos considerando el tipo de suelo son similares a aquellos para el caso (a); debido, probablemente a que las tasas de infiltración se encuentran en el mismo rango que de las serie del conjunto total de datos. La razón de la poca diferenciación de las tasas de infiltración con respecto al tipo de suelo se debe a similitud en las propiedades de los suelos en cuanto a la plasticidad (Línea A, Figura 2(a), 2(b) y 2(c)). El límite líquido y el índice de plasticidad corresponden a suelos que responden al movimiento vertical del agua de manera aproximada, funcionando los tres grupos como uno solo frente al fenómeno de infiltración. A continuación se va a profundizar más sobre el análisis de los resultados. En cuanto a las propiedades de los suelos, el hecho de que los suelos en los tres sectores sean de grano fino, predominantemente limos (100% pasa el Tamiz N° 4), favorece una tasa de infiltración alta en el estado seco y lenta en el estado saturado, así como una saturación rápida del suelo. Las características más homogéneas en el contenido de arena, limo y arcilla se

encuentran en el siguiente orden: La Paredeña, Potrerito y Cariaprima (Figuras 1(a), 1(b) y 1(c)). La presencia de arena podría deberse a las actividades de extracción de agua de río y de pozos subterráneos en épocas de sequía, donde se cultiva la papa bajo riego (ver Figuras 2(a), 2(b) y 2(c)). El límite líquido indica que los suelos son de baja plasticidad (ver Figuras 2(a), 2(b) y 2(c)). La plasticidad es la propiedad del material de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse. Con una variación del límite plástico de los suelos entre 15 y 40 %, lo acerca al límite líquido (Figuras 1(d) y 1(e)) y a un índice de plasticidad bajo (Figura 1(f)). Esto indica que estos suelos pierden agua rápidamente y pasan a un estado desmoronado y agrietado, requiriendo riegos o lluvias consecutivas para cubrir los requerimientos de los cultivos. En cambio, las arcillas que son de alta plasticidad, impermeables y baja capacidad de infiltración. La permeabilidad de los suelos en todos los sectores es baja, entre 1 y 5 mm/h en los Potrerito y La Paredeña y 30 mm/h en Cariaprima, debido zonas en este último sector con mayor contenido de arena. La permeabilidad es la velocidad de movimiento vertical del agua dentro del suelo en estado saturado; es decir es el valor límite de la velocidad de infiltración. En los dos primeros sectores, con predominancia de humedad inicial baja, este límite se alcanza entre los 15 y 30 minutos de haberse iniciado las pruebas de infiltración (Figura 1(h)), valores menores que el límite plástico, el cual correspondió a humedades mayores entre 18 y 20% (Figura 1(e)), representando la frontera entre los estados semisólido y plástico. En el estado semisólido, el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al secarse. En el Sector La Paredeña, ocurrió una alta variabilidad de la humedad: un 75% de los valores corresponden a humedades menores que 16%; un 25%, a humedades entre 20 y 30%. El límite líquido se asocia a humedades entre 22 y 43% (Figura 1(d)) y representa la frontera entre los estados plástico y líquido, favoreciendo humedades altas.

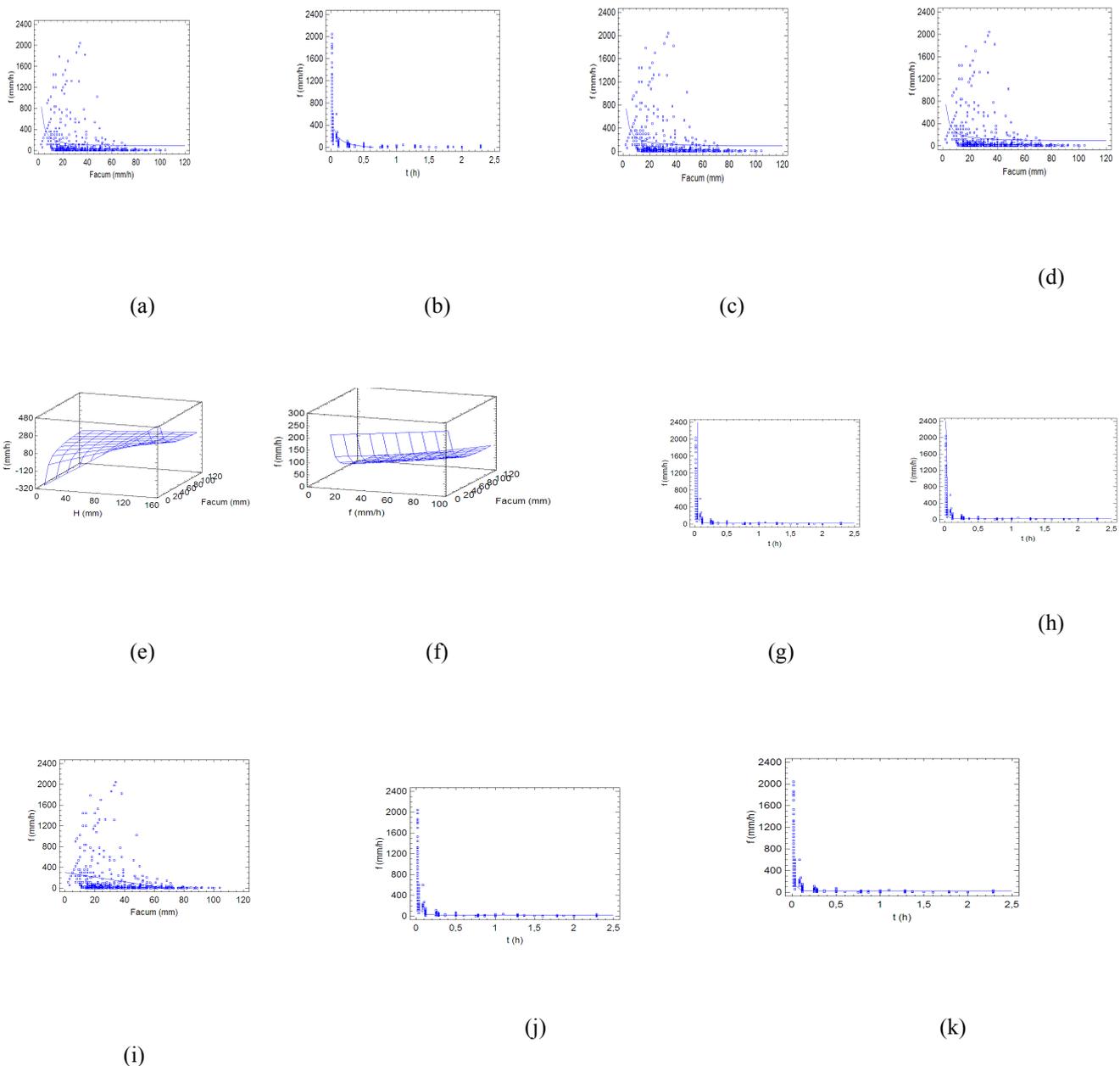


Figura 5

Gráficos de modelo ajustado. Contenido de Humedad Inicial Bajo. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt multivariable, (f) Smith-Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado

5 Adaptabilidad de los modelación de infiltración

La calidad de ajuste de los modelos que estiman la infiltración se determina dos maneras; (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, suponiendo 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-Singh (modelos univariados que dependen del tiempo con forma recíproca y exponencial).

Para el análisis cuantitativo se consideró que el ajuste es satisfactorio cuando el valor de los coeficientes de determinación y determinación ajustado tengan valores superiores a 0.7. En las Tablas I y II se presentan los resultados de la estimación de parámetros y coeficientes de determinación y determinación ajustados. Los valores de la Tabla I indican que el modelo de Philip (univariado y dependiente del tiempo) se ajusta sólo en el caso de humedad alta; sin embargo, este modelo puede arrojar buenas estimaciones de la infiltración para tasas entre 60 y 400 mm/h, correspondientes a intervalos de tiempo entre 1 y 40 minutos. Este comportamiento es consistente con el mostrado en la Tabla II para el caso de los diferentes tipos de suelo. Los modelos de Green-Ampt, Smith-Parlange no Lineal, Smith-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 (ver Tablas I y II). 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-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%.

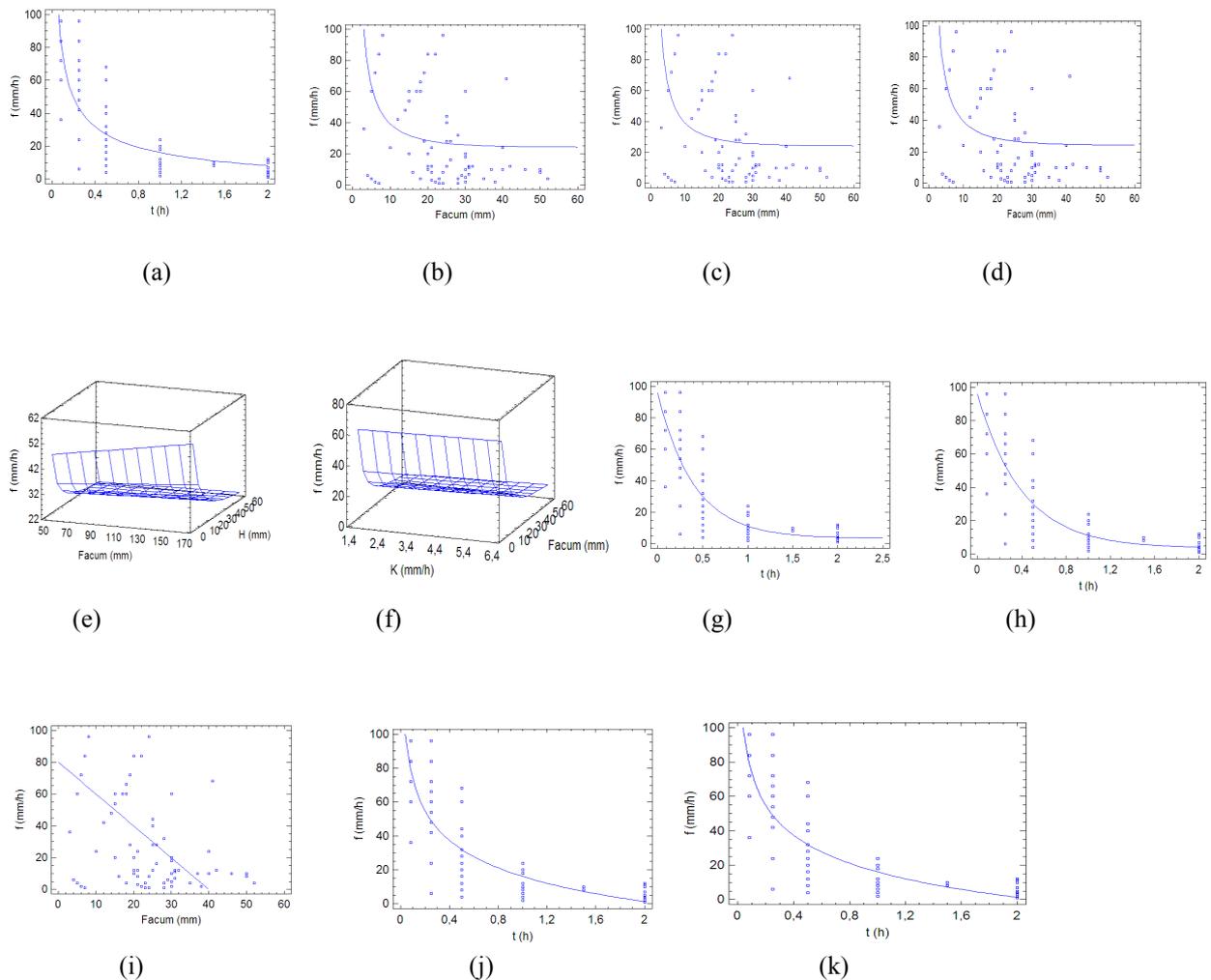


Figura 6 Gráficos de modelo ajustado. Contenido de humedad inicial alto. (a) Philip, (b) Green-Ampt Lineal, (c) Smith-Parlange Lineal, (d) Smith-Parlange No Lineal, (e) Green-Ampt multivariable, (f) Smith-Parlange No Lineal Multivariable, (g) Mishra-Singh, (h) Horton, (i) Holtan, (j) Kostiakov, (k) Kostiakov Modificado

6 Conclusiones y recomendaciones

Se evaluaron nueve modelos para estimar la infiltración, en tres sectores de una comunidad agrícola localizada en la cuenca del río Chirgua, en tres tipos de suelos; limo orgánico, arena limosa y arcilla limosa, mediante pruebas de campo usando infiltrómetros. Se llevaron a cabo 107 pruebas de infiltración y se tomaron igual número de muestras de suelo, durante el ciclo de siembra de papa y maíz. Se realizaron tres corridas con los datos de infiltración que consideraron las siguientes series; total de datos; contenido de humedades alto y bajo; y tipos de suelo. En general, los modelos dependientes del tiempo son los que mejor se ajustan a los datos observados. La infiltración acumulada y la carga de agua superficial (en los modelos univariados y multivariados) no se adaptan para la estimación de la infiltración. Considerando la serie total de datos, los modelos de mejor ajuste fueron los de Philip, para tasas bajas (humedad alta); Green-Ampt, Smith-Parlange Lineal y No Lineal univariado y multivariado, para tasas de infiltración en estado estable. El ajuste de los modelos de Mishra-Singh y Horton es satisfactorio para toda la serie de datos observados. El modelo de Holtan sólo se ajusta a la infiltración en el estado estable. El modelo de Kostiakov y su modificación estiman mejor la fracción de datos a partir de 400 mm/h y todo el estado estable. Los modelos de Horton y Mishra-Singh son los que muestran el mejor ajuste. En las humedades altas, se observó un buen ajuste del modelo de Philip, Green-Ampt, y las versiones de Smith-Parlange. Sólo el modelo Philip arroja un $R^2 > 70\%$.

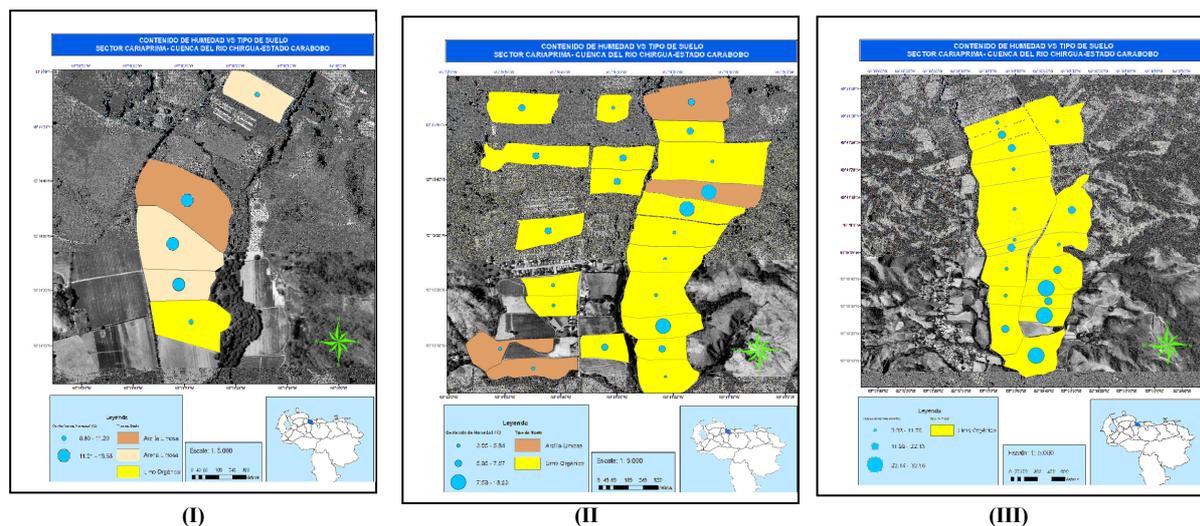
Las estimaciones de infiltración que dependen del tipo de suelo, ya sea, limo orgánico, arena limosa y arcilla limosa, revela que la distinción de las series de acuerdo al tipo de suelo arroja resultados equiparables con los encontrados con la serie total de los datos.

Se recomienda ampliar las investigaciones a otros tipos de suelo con la finalidad de establecer modelos regionales para la estimación de la infiltración.

7 Reconocimiento

La investigación se ha llevado a cabo con el aporte financiero del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo y el Ministerio del Poder Popular para la Ciencia y Tecnología (Misión Ciencia).

8 Anexos



Mapas: (I) Humedad vs Tipo de Suelos- Sector Cariaprima. (II) Humedad vs Tipo de Suelos- Sector Potrerito. (III) Humedad vs Tipo de Suelos- La Paredaña

Tabla 1 Modelos ajustados considerando el tipo de suelo

Nº	Modelo	Tipo de suelo	Símbolo	R ²	R ² ajust
1	Philip	Parámetro			
		Limo Orgánico	OL	64,4644	64,3845
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	52,1733	51,8267
		Arena Limosa	SM	68,3787	68,1937
2	Green-Ampt	Parámetro			
		Limo Orgánico	OL	5,72642	5,30176
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	1,093	0,0
		Arena Limosa	SM	23,2598	22,357
3	Smith-Parlange No Lineal Permeabilidad Variable	Parámetro			
		Limo Orgánico	OL	5,70176	5,70176
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	0,0	0,0
		Arena Limosa	SM	17,7981	17,7981
4	Smith-Parlange No Lineal Permeabilidad constante	Parámetro			
		Limo Orgánico	OL	5,39772	5,18513
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	0,0	0,0
		Arena Limosa	SM	17,3444	16,8611
5	Smith-Parlange Lineal Permeabilidad constante	Parámetro			
		Limo Orgánico	OL	5,90791	5,69647
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	1,1304	0,413951
		Arena Limosa	SM	17,4493	16,9665

	Mishra-Singh	Parámetro			
		Limo Orgánico	OL	70,1115	69,9768
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	62,1047	61,5515
		Arena Limosa	SM	87,1295	86,9781
7	Horton	Parámetro			
		Limo Orgánico	OL	68,9965	68,8568
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	61,7567	61,1984
		Arena Limosa	SM	87,6044	87,4586
8	Kostiakov	Parámetro			
		Limo Orgánico	OL	70,379	70,3124
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	61,8451	61,5686
		Arena Limosa	SM	87,5197	87,4467
9	Kostiakov Modificado	Parámetro			
		Limo Orgánico	OL	70,5035	70,3706
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	87,6656	87,5205
		Arena Limosa	SM	62,1629	61,6106
10	Holtan	Parámetro			
		Limo Orgánico	OL	7,97756	7,35438
		Arcilla limosa – Limos Inorgánicos	CL-ML	7,63471	5,59725
		Arena Limosa	SM	17,0029	15,5296

Tabla 2

Nº	Modelo	Tipo de Suelo	Condición de suelo	R ²	R ² ajust
1	Philip	OL CL SM	Parámetro		
			Todos los puntos	57,1936	57,1341
			Humedad Alta	71,3303	71,0045
			Humedad Baja	57,5401	57,4719
2	Green-Ampt		Parámetro		
			Todos los puntos	2,4386	2,16722
			Humedad Alta	16,3923	14,4702
			Humedad Baja	7,39326	7,09549
3	Smith-Parlange No Lineal Permeabilidad Variable		Parámetro		
			Todos los puntos	0,667836	0,667836
			Humedad Alta	3,04763	3,04763
			Humedad Baja	2,90092	2,90092
4	Smith-Parlange No Lineal Permeabilidad constante		Parámetro		
			Todos los puntos	1,59099	1,45431
			Humedad Alta	14,0383	13,0614
			Humedad Baja	3,71553	3,56099
5	Smith-Parlange Lineal Permeabilidad constante		Parámetro		
			Todos los puntos	2,48385	2,34841
			Humedad Alta	16,6728	15,7259
			Humedad Baja	4,41923	4,26581
6	Mishra-Singh		Parámetro		
			Todos los puntos	68,0171	67,9282
			Humedad Alta	77,2927	76,7707
			Humedad Baja	68,1495	68,0471
7	Horton		Parámetro		
			Todos los puntos	67,4282	67,3376
			Humedad Alta	77,2927	76,7707
			Humedad Baja	67,6222	67,5181
8	Kostiakov		Parámetro		
			Todos los puntos	67,7088	67,6639
			Humedad Alta	69,5539	69,2079
			Humedad Baja	67,8862	67,8347
9	Kostiakov Modificado		Parámetro		
			Todos los puntos	68,0749	67,9861
			Humedad Alta	74,4732	73,8864
			Humedad Baja	68,2037	68,1014
10	Holtan		Parámetro		
			Todos los puntos	6,00014	5,60739
			Humedad Alta	23,335	20,6607
			Humedad Baja	8,08325	7,6392

9 Referencias

- Manrique, O., Velásquez Y., Gómez Y (2009). Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
- Mishra SK, Kumar SR, Singh VP. 1999. Calibration of a general infiltration model. *Journal of Hydrological Processes* **13**: 1691–1718.
- Philip JR. 1957. Theory of infiltration. *Soil Science* **83**(5): 345–357.
- Philip JR. 1969. Theory of infiltration. In *Advances in Hydroscience*, Chow VT (ed.). Academic Press: New York; 215–296.
- Quintero A. y Altamiranda, K., (2009). Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
- Singh VP. 1992. *Elementary Hydrology*. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ.
- Singh VP, Yu FX. 1990. Derivation of infiltration equation using systems approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE* **116**(6): 837–857.
- Zamora R., Toro E., (2008), Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo Venezuela.