

Estimación de parámetros de infiltración en base a propiedades físicas del suelo en una zona agrícola de Venezuela

Adriana Márquez, Edilberto Guevara Pérez*

Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Resumen.-

En esta investigación se estiman parámetros de infiltración a partir de las siguientes propiedades físicas de suelo: textura, permeabilidad, límites de consistencia, cohesión, ángulo de fricción, contenidos de humedad inicial y final y gravedad específica de partículas sólidas. Se realizó muestreo no perturbado para ensayos de permeabilidad y resistencia al esfuerzo cortante y perturbado para el resto. El muestreo se realizó en la cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela, en seis sectores con un total de 496 pruebas de campo durante ciclos de cultivos desarrollados bajo riego y lluvia en el lapso 2008-2009. Se encontró que los modelos de Green-Ampt, Philip, Kostiakov y Horton, arrojan resultados satisfactorios en la modelación de la infiltración acumulada. Las propiedades físicas de suelo explican entre un 70 y 90 % de la variabilidad de los estimados de la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo.

Palabras clave: Ajuste de modelos de infiltración, modelos conceptuales, modelos empíricos, modelos basados en procesos físicos, parámetros de infiltración.

Estimating infiltration parameters based on soil physical properties of agricultural land in Venezuela

Abstract.-

In this research, infiltration parameters were estimated as a function of following soil physical properties: texture, permeability, limits of consistency, cohesion, friction angle, moisture content and initial and final specific gravity of solid particles. Undisturbed samples were used for testing permeability and shear strength; disturbed samples for the other soil properties. The study was performed in Chirgua River Basin, Carabobo, Venezuela, in six sectors with a total of 496 field tests during cycles of crops grown under irrigation and rain in the period 2008-2009. Measured infiltration is satisfactorily explained by the mathematical models: Green-Ampt, Philip, Kostiakov and Horton. Soil physical properties explained between 70 and 90 % of the estimates variability of permeability and soil water storage capacity.

Keywords: Infiltration models adjustment, conceptual models, empirical models, models based on physical processes, infiltration.

Recibido: octubre 2010

Aceptado: febrero 2011

1. INTRODUCCIÓN

La problemática que involucra la medición de la infiltración ha conducido al desarrollo de varios modelos de estimación, los cuales pueden clasificarse en tres grupos:

1. Teóricos o de base física;

* Autor para correspondencia

Correo-e: eguevara@uc.edu.ve (Edilberto Guevara Pérez)

2. semi-empíricos; y
3. empíricos.

Los primeros se basan en la Ley de Conservación de Masa y la Ley de Darcy, dependiendo de la dimensionalidad, dinámica del flujo, conductividad hidráulica-carga capilar, relación de retención, condiciones iniciales y límites; en este grupo se incluyen los de [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Los modelos semi-empíricos se basan en la ecuación de continuidad y la hipótesis de la relación flujo-concentración, entre los cuales están los de [8], [9], [10], [11] y [12]. Los modelos empíricos se basan en pruebas de campo o de laboratorio; entre ellos se incluyen los del [12], [13], Kostiakov modificado [6], [14].

En este trabajo se estiman los parámetros de modelos de infiltración relacionando propiedades hidráulicas con propiedades físicas y químicas del suelo (fracción del limo, arena, porosidad e intercambio de cationes [15], [16]).

2. DESCRIPCIÓN TEÓRICA

2.1. Modelos de infiltración basados en procesos físicos

Los modelos basados en propiedades físicas utilizados en esta investigación son las ecuaciones de Philip y Green-Ampt; ambas son soluciones de la ecuación de flujo de Richards, la cual se expresa como sigue ([2], [17], [8], [3])

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial (K \partial h) / \partial z}{\partial z} - \frac{\partial K}{\partial z}, \quad (1)$$

donde θ es el contenido de humedad volumétrico (cm^3/cm^3), z es la posición coordenada positiva hacia abajo (mm), K es la conductividad hidráulica (mm/h), h es la columna de presión de agua sobre el suelo, y t es el tiempo (h).

2.1.1. Modelo de Philip

Philip [3] propuso una serie de tiempo para resolver la Ecuación (1), la cual se expresa como

$$F = S t^{1/2} + K t, \quad (2)$$

donde F es la infiltración acumulada (mm) y S es la sorptividad ($mm/h^{0.5}$), la cual es una función del potencial hídrico del suelo, y K es la conductividad hidráulica.

2.1.2. Modelo de Green-Ampt

Green y Ampt [2] desarrollaron otra solución para la ecuación (1), dada por

$$\begin{aligned} F &= K t + \lambda \ln(t + F/\lambda), \\ \lambda &= (\theta_1 - \theta_2)(h_1 - h_2), \end{aligned} \quad (3)$$

donde h_1 (mm) es la profundidad del agua para condiciones de detención, h_2 es el valor para la entrada de aire, θ_1 (cm^3/cm^3) el contenido de humedad saturado, θ_2 (cm^3/cm^3) el contenido de humedad inicial y $\theta_1 - \theta_2$ la capacidad de almacenamiento de agua.

2.2. Modelos de infiltración empíricos

Los modelos empíricos tratan de ajustar la forma de la curva de infiltración tan bien como sea posible a las mediciones, sin profundizar en el proceso de infiltración. Los más conocidos son los modelos de Kostiakov y Horton.

2.2.1. Modelo de Kostiakov

La ecuación empírica de Kostiakov [13] está dada por:

$$F = \left(\frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} \right) t^{1 - \alpha_2}, \quad (4)$$

donde α_1 y α_2 son parámetros de ajuste adimensionales. La principal desventaja de esta ecuación es que, para $t \rightarrow \infty$, F , no llega a ser constante.

2.2.2. Modelo de Horton

Horton [8] introdujo para la infiltración la siguiente expresión:

$$F = \gamma_1 t + \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_3} \right) (1 - e^{-\gamma_3 t}), \quad (5)$$

que tiene tres parámetros de ajuste, γ_1 (mm/h), γ_2 (mm/h) y γ_3 ($1/h$)

3. APLICACIÓN

3.1. Materiales y Métodos

Para determinar las propiedades físicas de los suelos y realizar las pruebas de infiltración, se llevó a cabo un muestreo probabilístico por

Tabla 1: Ubicación y usos de la tierra de los sectores de estudio

| Zona N° | Ubicación coordenadas | | | | Área (ha) | Uso de la tierra % | | | |
|----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-------|--------|-------|
| | Norte | | Oeste | | | Agríc. | Avíc. | Resid. | Otros |
| 1 | 10°13'55" | 10°15'00" | 68°12'10" | 68°11'05" | 244,38 | 95,3 | 2,7 | 2 | 0 |
| 2 | 10°13'00" | 10°14'00" | 68°11'10" | 68°12'00" | 209,21 | 87,99 | 4,46 | 6,13 | 1,42 |
| 3 | 10°10'10" | 10°11'50" | 68°11'10" | 68°10'20" | 320,64 | 93,04 | 0,74 | 6,22 | 0 |
| 4 | 10°12'25" | 10°13'10" | 68°11'10" | 68°11'50" | 131,74 | 83,33 | 5,56 | 16,67 | 0 |
| 5 | 10°12'18" | 10°15'45" | 68°11'67" | 68°15'07" | 250,64 | 94,04 | 0,84 | 7 | 0 |
| 6 | 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 |

conglomerados en dos etapas, en seis zonas de la Cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela (ver Tabla 1); 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 [18]. 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 (ver Tabla 2). La malla permite un registro preciso de la posición de un lugar [19]. Las dimensiones de las cuadrículas se fijaron utilizando el criterio de [20], según el cual, para estudios experimentales la mínima área delimitada debe ser de una hectárea. La malla se superpuso sobre 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 escalas entre 1:5.000 y 1:10.000. El área total muestreada fue de 1.319 ha, de las cuales, el 88,58 % es agrícola; 3,31 % avícola; 9,11 % residencial y 1,42 % otros usos. Los cultivos tradicionales son papa (*Solanum tuberosum* L) en la estación seca y maíz (*Zea mays* L) en el período de lluvias.

Se llevaron a cabo 496 pruebas de infiltración con infiltrómetros de doble anillo durante el período 2008–2009, midiendo el nivel del agua en los minutos 2, 7, 17, 47, 77 y 137. Se tomaron muestras no perturbadas para los ensayos de permeabilidad y prueba de resistencia al

esfuerzo cortante; y muestras perturbadas para granulometría por tamizado e hidrómetro en el estrato superficial de 30 cm; en ambos casos siguiendo las indicaciones de [21]. Se midió el contenido de humedad inicial y final en sitio. Se usaron los métodos estándares para ensayos de laboratorio. En la Tabla 1 se detallan las características de las zonas de muestreo.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización física de suelo

En la Tabla 3 se dan los resultados de la caracterización física de los suelos. Menos del 3 % en peso de la muestra es retenido en el tamiz # 10 (contenido de material grueso); el 97 % restante pasa el tamiz # 10 (fracción fina del suelo). Entre 40–50 % de del material fino pasa el tamiz # 200 (fracción más fina; es decir, limo y arcilla); el resto es arena. En promedio, el 45 % del suelo es arena, 45 % limo y 10 % arcilla. En la Tabla 3 se observa que el coeficiente de variación de la porción de muestra que pasa disminuye en los tamices cercanos al # 200, indicando uniformidad en el diámetro del material retenido en los tamices de malla fina. En las parcelas agrícolas predomina el grano fino, con un diámetro medio de partícula (d_{50}) cercano a 0,074 mm, frontera entre arena fina y limo. En las zonas 2 y 5 predomina el contenido de arena. El límite líquido varía entre 25 y 32 %, el límite plástico, entre 23 y 28 %, el índice de plasticidad se aproxima a 5 %. La diferencia

Tabla 2: Muestreo para infiltración

| Zona | Fecha de muestreo | Tipo de muestreo | | Muestreo por conglomerado | | Fuente | Tamaño de muestra sitios |
|-------|-------------------|------------------|--------------|---------------------------|-----------------|--------|-----------------------------|
| | | | | Total de parcelas | Total de sitios | | |
| 1 | 2008 | Múltiple | 1era Muestra | 30 | 210 | [24] | 46 |
| | 2009 | | 2da Muestra | | | [25] | 30 |
| | 2009 | | 3era Muestra | | | [26] | 30 |
| 2 | 2008 | Múltiple | 1era Muestra | 41 | 188 | [27] | 30 |
| | 2009 | | 2da Muestra | | | [28] | 30 |
| | 2009 | | 3era Muestra | | | [29] | 30 |
| 3 | 2008 | Múltiple | 1era Muestra | 35 | 120 | [30] | 30 |
| | 2009 | | 2da Muestra | | | [31] | 30 |
| 4 | 2008 | Múltiple | 1era Muestra | 24 | 120 | [32] | 30 |
| | 2009 | | 2da Muestra | | | [33] | 30 |
| | 2009 | | 3era Muestra | | | [34] | 30 |
| 5 | 2008 | Múltiple | 1era Muestra | 55 | 220 | [35] | 30 |
| | 2009 | | 2da Muestra | | | [36] | 30 |
| | 2009 | | 3era Muestra | | | [37] | 30 |
| | 2009 | | 4ta Muestra | | | [38] | 30 |
| 6 | 2008 | Simple | Una Muestra | 20 | 45 | [39] | 30 |
| Total | | | | 205 | 903 | | 496 |

entre los límites plástico y líquido es pequeña, indicando que la saturación del suelo es rápida. De acuerdo con el Sistema de Clasificación Unificado basado en la combinación de la composición granulométrica y los límites de consistencia, el suelo varía entre un limo orgánico (OL) de baja plasticidad y una arena limosa (SM) ([22] y [23]).

La humedad inicial del suelo in situ varía entre 15 y 20 %, menor que los límites líquido y plástico. El suelo se encuentra en un estado semisólido a sólido, precediendo al estado seco [22]. En estas condiciones de humedad se realizaron los ensayos de permeabilidad y resistencia al esfuerzo cortante en las muestras no perturbadas llevadas al laboratorio.

La permeabilidad o conductividad hidráulica saturada es cercana a 1 mm/h en la mayoría de las zonas, pudiendo clasificarse como baja a muy baja, según [40].

En el ensayo de resistencia al esfuerzo cortante se aplicaron presiones verticales de 0,26; 0,4 y 0,54 Kgf/cm² sobre muestras no perturbadas con una porosidad inicial entre 40 y 50 %, equivalentes

al peso de un tractor de neumáticos (llantas o ruedas) en piso de tránsito [41]. Según [42] la porosidad es uno de los índices de compacidad del suelo, para un limo varía entre 52 y 29 % y para una arena limosa varía entre 47 y 23 %. Por tanto, los valores encontrados en campo coinciden con los valores máximos admitidos por un suelo clasificado como limo y arena limosa y corresponden a un estado “suelto”.

Los resultados de los ensayos de resistencia al esfuerzo cortante fueron los siguientes: ángulo de fricción entre 30 y 32° y cohesión menor a 0,5 Kgf/cm². De acuerdo con [22] el valor del ángulo de fricción obtenido corresponde a un limo y una arena limosa con compacidad media.

Dado que el suelo de las parcelas posee un contenido de humedad próximo al estado seco, resulta ser de grano fino, uniforme, alta porosidad, baja compacidad, baja plasticidad, media a baja compresibilidad. El paso del tractor, con una frecuencia de 2 veces mensual con fines de aplicación de plaguicidas debería ejercer una baja influencia sobre la capacidad de infiltración de los

Tabla 3: Media (μ) y desviación estándar (σ) para las propiedades físicas de suelo por zonas

| Propiedades físicas | Zona 1 | | Zona 2 | | Zona 3 | | Zona 4 | | Zona 5 | | Zona 6 | |
|---------------------------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| | $\hat{\mu}$ | $\hat{\sigma}$ |
| Textura: | | | | | | | | | | | | |
| % Arena | 46,4 | 4,2 | 30,7 | 5,6 | 46,1 | 1,6 | 46,1 | 1,6 | 46,1 | 1,6 | 46,2 | 2,1 |
| % Limo | 49,5 | 2,7 | 36,7 | 11,7 | 46,9 | 2,3 | 49,5 | 2,7 | 46,9 | 2,3 | 46,9 | 2,3 |
| % Arcilla | 4,1 | 2,0 | 19,9 | 8,2 | 7,0 | 2,4 | 6,6 | 1,8 | 7,0 | 2,4 | 6,9 | 2,5 |
| Hidráulica: | | | | | | | | | | | | |
| Permeabilidad (mm/h) | 0,4 | 0,1 | 24,0 | 22,7 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 1,4 | 0,6 |
| Estructural: | | | | | | | | | | | | |
| Ángulo de fricción (°) | 29,9 | 3,9 | 29,8 | 1,1 | 29,8 | 1,1 | 31,8 | 1,9 | 32,7 | 1,1 | 32,7 | 1,1 |
| Cohesión (kgf/cm ²) | 0,3 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,43 | 0,03 | 0,3 | 0,0 | 0,3 | 0,0 |
| Relaciones de Fase: | | | | | | | | | | | | |
| Humedad Inicial (%) | 21,8 | 11,5 | 7,1 | 3,5 | 18,9 | 11,8 | 20,7 | 10,6 | 18,9 | 11,8 | 15,0 | 7,1 |
| Humedad Final (%) | 26,1 | 11,5 | 51,0 | 11,7 | 40,5 | 7,7 | 40,5 | 7,7 | 40,5 | 7,7 | 54,0 | 12,6 |
| Porosidad | 0,4 | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 0,5 | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 0,4 | 0,1 |
| Limite Líquido (%) | 26,2 | 2,5 | 30,7 | 4,1 | 32,4 | 4,4 | 33,2 | 4,2 | 32,4 | 4,4 | 29,6 | 2,0 |
| Limite Plástico (%) | 23,1 | 5,0 | 26,2 | 3,7 | 27,1 | 2,9 | 28,3 | 3,9 | 27,1 | 2,9 | 25,2 | 3,4 |
| índice de Plasticidad (%) | 5,1 | 2,2 | 4,5 | 2,5 | 5,2 | 4,0 | 4,9 | 1,2 | 5,2 | 4,0 | 4,3 | 2,6 |
| Gravedad Específica | 2,6 | 0,1 | 2,5 | 0,1 | 2,5 | 0,1 | 2,7 | 0,1 | 2,5 | 0,1 | 2,6 | 0,2 |

suelos

4.2. Ajuste de los datos de infiltración acumulada a una función de probabilidades

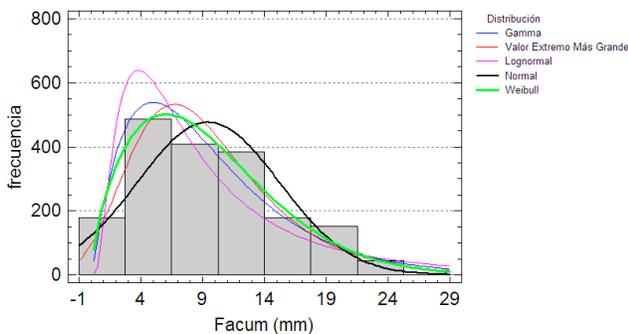


Figura 1: Histograma de frecuencias de datos observados versus Distribuciones Teóricas

En la Figura 1 se presenta el histograma de frecuencias de 496 pruebas de campo de infiltración acumulada (Facum). En la misma figura se compara el ajuste al histograma de frecuencias de los datos observado de cinco (5) funciones de densidad de probabilidades:

Normal, LogNormal, Gamma, Weibull y Valores Extremos. Los valores más frecuentes indican una capacidad rápida de saturación del suelo almacenando una lámina de agua entre 4 mm y 14 mm; este último valor es más frecuente que los valores más altos registrados, los cuales varían entre 25 y 30 mm, considerados como la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo. La función Weibull es la que muestra un mejor ajuste a las frecuencias reales. En la Tabla 4 se presenta la validación estadística del ajuste aplicando la prueba Chi-Cuadrado para determinar si las diferencias entre los datos medidos y los valores de la curva son significativos (Hipótesis alternativa) o no (Hipótesis nula). El nivel de significancia es de 5%. Las cifras en la tabla muestran que los valores- p son menores que el nivel de significancia, por tanto se rechaza la hipótesis nula.

En la Tabla 5 se presentan los resultados del ajuste de otras funciones desplegadas en orden descendente del grado de ajuste. Los mejores ajustes corresponden a valores más grandes del

Tabla 4: Prueba Chi-Cuadrado de Bondad-de-Ajuste para Facum

| | Gamma | Valor Extremo Máximo | Lognormal | Normal | Weibull |
|--------------|---------|----------------------|-----------|---------|---------|
| Chi-Cuadrada | 4946,33 | 4932,63 | 5087,15 | 5034,25 | 4915,31 |
| G.l. | 73 | 73 | 73 | 74 | 74 |
| Valor-P | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Tabla 5: Comparación de distribuciones alternas

| Distribución | Parámetros Est. | Log Verosimilitud |
|----------------------|-----------------|-------------------|
| Weibull | 2 | -5657,316109 |
| Gamma | 2 | -5697,108039 |
| Valor Extremo Máximo | 2 | -5733,163259 |
| Normal | 2 | -5795,492835 |
| Loglogística | 2 | -5839,011416 |
| Logística | 2 | -5845,617973 |
| Lognormal | 2 | -5861,163925 |
| Uniforme | 2 | -5868,449936 |
| Birnbaum-Saunders | 2 | -5925,302287 |
| Exponencial | 1 | -5942,670926 |
| Laplace | 2 | -5961,971221 |
| Gaussiana Inversa | 2 | -6005,378323 |
| Valor Extremo Mínimo | 2 | -6013,021177 |
| Pareto | 1 | -999999999,9 |

logaritmo de la función de verosimilitud. De acuerdo con este criterio, la función de mejor ajuste es la de Weibull.

4.3. Modelación de infiltración

Para estimar los parámetros de los cuatro (4) modelos usados (ecuaciones 2 a 5) se usó el método de mínimos cuadrados no lineales que minimiza los errores de ajuste del modelo. El algoritmo seleccionado para determinar la calidad del ajuste fue el de Levenberg-Marquardt. En la Figura 2 se muestran los resultados del ajuste gráficamente, así como los residuos. En la Tabla 6 se presentan los resultados de la estimación de los parámetros por intervalos a un nivel de confianza de 95 %; también se incluye el coeficiente de determinación (R^2).

En cuanto al modelo de Philip, en la Figura 2 (a)

se observa que los datos medidos siguen la tendencia general de la curva teórica; los residuos son aleatorios (Figuras 2 (b)) y se ajuste a una función de distribución normal (Figura 2 (c)). En la Tabla 6 se dan los valores obtenidos para los parámetros y los límites de confianza superior e inferior del modelo de Philip. El ancho del intervalo indica una baja incertidumbre para los valores de los parámetros; sin embargo, los valores negativos para el parámetro K no corresponden al proceso físico que se está representando. El estadístico R^2 indica que el modelo explica 66,2484 % de la variabilidad en la infiltración acumulada.

Con respecto al modelo de Green-Ampt (Figura 2 (d)), los datos se aproximan a la recta en una proporción 1:1. Los residuos evidencian un ligero patrón sistemático y no se ajustan a la distribución normal (Figuras 2(e) y 2 (f)),

Tabla 6: Estimación de parámetros e intervalos de confianza al 95 %

| Modelo: | | R² | | |
|----------------|------------|----------------------|------------|------------|
| Philip | Parámetros | S | K | |
| | Promedio | 22,1671 | -7,4305 | |
| | Mínimo | 21,4211 | -8,0566 | |
| | Máximo | 22,9130 | -6,8044 | |
| | | | 0,662484 | |
| Green-Ampt | Parámetros | λ | K | |
| | Promedio | 2,3800 | 7,1173 | |
| | Mínimo | 2,1019 | 6,8291 | |
| | Máximo | 2,6582 | 7,4055 | |
| | | | 0,513525 | |
| Kostiakov | Parámetros | α_1 | α_2 | |
| | Promedio | 4,2255 | 0,6944 | |
| | Mínimo | 4,0436 | 0,6828 | |
| | Máximo | 4,4074 | 0,7059 | |
| | | | 0,686582 | |
| Horton | Parámetros | γ_1 | γ_2 | γ_3 |
| | Promedio | 4,5489 | 209,8059 | 24,7204 |
| | Mínimo | 4,2657 | 190,3212 | 21,9340 |
| | Máximo | 4,8321 | 229,2907 | 27,5067 |
| | | | | 0,692218 |

evidenciando un ajuste deficiente del modelo. El ancho del intervalo de los parámetros dado en la Tabla 6 indica baja incertidumbre de los parámetros. A juzgar por estadístico R^2 , el modelo sólo explica el 51,3525 % de la variabilidad en la infiltración acumulada.

El modelo de Kostiakov (Figura 2 (g)) se ajusta mejor que los dos anteriores; los residuos muestran aleatoriedad y un ajuste normal (Figuras 2(h) y 2(i)). La Tabla 6 contiene los valores obtenidos para los parámetros y los límites de confianza superior e inferior. El ancho del intervalo de los parámetros (Tabla 6) indica una baja incertidumbre; el estadístico R^2 explica 68,6582 % de la variabilidad en la infiltración acumulada.

Como se puede observar en la Figura 2 (j), el modelo de Horton es el que se ajusta mejor a los datos observados; los residuos también evidencian aleatoriedad y se distribuyen normalmente (Figuras 2(k) y 2(l)). En la Tabla 6 se dan los valores de los parámetros y los límites de confianza. El ancho del intervalo revela una baja incertidumbre para los valores de los parámetros.

El estadístico R^2 indica que el modelo, explica el 69,2218 % de la variabilidad en la infiltración acumulada.

4.4. Modelación de parámetros basada en propiedades físicas de suelo

Se consideraron dos parámetros físicos: conductividad hidráulica saturada o permeabilidad (K_{sat}) y (λ). En ambos casos se usó un modelo lineal múltiple. Se seleccionaron como variables independientes a once propiedades físicas de suelo: Porcentaje de arcilla (% arcilla), porcentaje de arena (% arena), porcentaje de limo (% limo), porosidad (n), contenido de humedad inicial (w_i (%)), contenido de humedad final (w_f (%)), cohesión (c (kg/cm²)), ángulo de fricción (f (°)), gravedad específica de partículas sólidas (G_s), límite líquido (LL), y límite plástico (LP). Se aplicó la técnica de regresión hacia atrás a fin de obtener un modelo depurado.

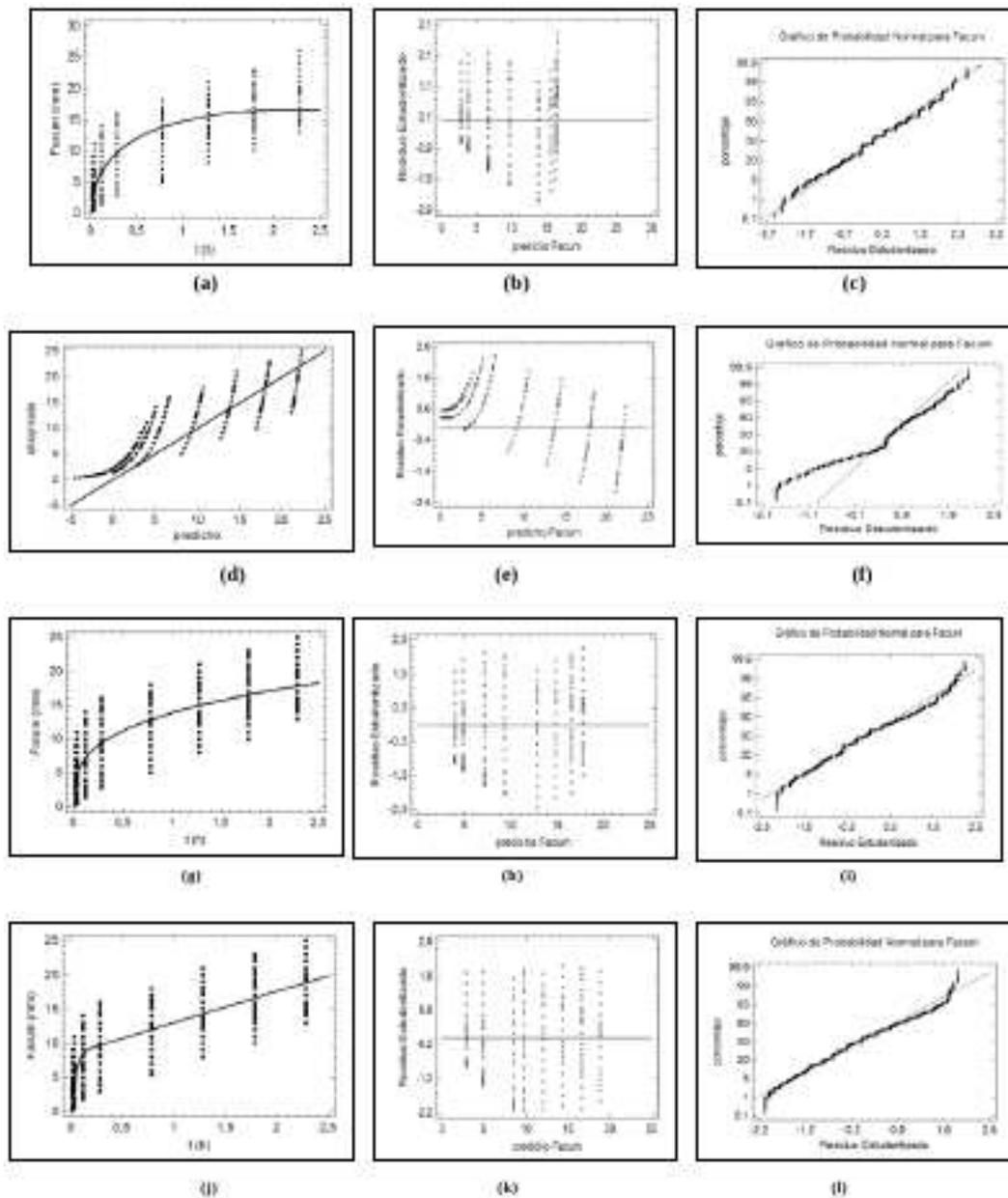


Figura 2: Modelo de Philip: (a) Modelo Ajustado, (b) Gráfica de residuos contra predichos, (c) Gráfica de Probabilidad Normal para residuos Green–Ampt; (d) Modelo Ajustado, (e) Gráfica de residuos contra predichos, (f) Gráfica de Probabilidad Normal para residuos. Modelo Kostiakov: (g) Modelo Ajustado, (h) Gráfica de residuos contra predichos (i) Gráfica de Probabilidad Normal para residuos. Modelo de Horton: (j) Modelo Ajustado, (k) Gráfica de residuos contra predichos, (l) Gráfica de Probabilidad Normal para residuos

En la Tabla 7 se presentan los resultados de la modelación de la conductividad hidráulica saturada. El modelo explica más del 70 % de la variación de los residuos. En la Figura 3(a) se relacionan los valores medidos y los estimados mediante el modelo, observándose un ajuste lineal 1:1 satisfactorio. También se muestra la estimación de valores en un rango de 0 a 2,4 mm/h. En la Figura 3(b) se muestra la gráfica de residuos contra estimados. El modelo es adecuado ya que en la gráfica los residuos se distribuyen aleatoriamente. Esto significa que el modelo se ajusta de igual manera a los valores observados de permeabilidad.

En la Tabla 8 se muestran los resultados del ajuste entre λ y las propiedades físicas de suelo utilizando un modelo de regresión lineal múltiple: el modelo explica más del 70 % de la variación de los residuos. En la Figura 3(c) se relacionan los valores medidos y los estimados mediante el modelo, observándose un ajuste lineal 1:1 satisfactorio. También se muestra la estimación de valores en un rango entre 0 y 100 mm. En la Figura 3(d) se muestra la gráfica de residuos contra estimados, donde se puede notar una ligera tendencia en forma de embudo, pero no demasiado fuerte; por ello el modelo se puede considerar aceptable.

La bondad de ajuste del análisis de regresión se evalúa de cuatro maneras en los modelos de tipo lineal múltiple: (1) aplicando la técnica *backward* (hacia atrás), (2) mediante la prueba de hipótesis sobre cada coeficiente. Aceptar H_0 significa que el coeficiente es igual a cero y la variable no contribuye en forma significativa al modelo de estimación. Se rechaza H_0 si $|t_0| > t_{(\alpha/2, n-k-1)}$ o si el *valor - p* = $P(t > |t_0|) < \alpha$, (3) Verificando la calidad de ajuste de la regresión y (4) analizando gráficamente los efectos de los componentes.

4.4.1. Modelo Lineal Múltiple para la permeabilidad

Mediante la aplicación de la técnica *backward* se eliminaron de la regresión: el porcentaje de arena y limo, el ángulo de fricción, humedad

final, límite líquido y límite plástico. Las variables significativas se dan en Tabla 7, donde se aprecia que el valor-*p* más alto de las variables independientes es 0,0064 que corresponde a la variable W_i . Puesto que el valor-*p* es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0 %. La calidad de ajuste medida por el estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica más del 70 % de la variabilidad en K_{sat} , por tanto es satisfactoria.

Los gráficos de las componentes para K_{sat} se muestran en la Figura 4. Los puntos en esa figura representan el efecto de las propiedades del suelo. Esto permite evaluar la importancia relativa de una propiedad física en comparación con los residuos. En las Figuras 4(b), 4(c) y 4(g), se observa que algunos residuos son tan grandes, sino mayores que el efecto del porcentaje de limo, porcentaje de arena y ángulo de fricción indicando que otros factores importantes pueden estar faltando en el modelo. Estas propiedades (factores) en orden de mayor a menor efecto son los siguientes: gravedad específica de partículas sólidas, porosidad, cohesión, porcentaje de arcilla y contenido de humedad inicial. (Ver Figuras 4(a), 4(b), 4(d), 4(e), 4(f) y 4(h)). Analizando la magnitud y signo de los parámetros se obtiene lo siguiente: la cohesión y el porcentaje de arcilla son de signo positivo. La cohesión es una característica que sólo la poseen los suelos arcillosos, los cuales por su propiedad de afinidad con el agua son capaces de lograr mayor grado de saturación que la arena y el limo. En el modelo ajustado, el efecto de la saturación se ve disminuido en mayor medida por la gravedad específica de los sólidos del suelo (signo negativo en el ajuste). Esta mide el peso específico de los sólidos en relación al peso específico del agua. En la práctica, G_s es mayor en la medida en que el suelo tiende a ser más cohesionado. Por tanto, en el modelo ajustado hay un efecto compensatorio entre las variables que tienden a disminuir la conductividad hidráulica saturada.

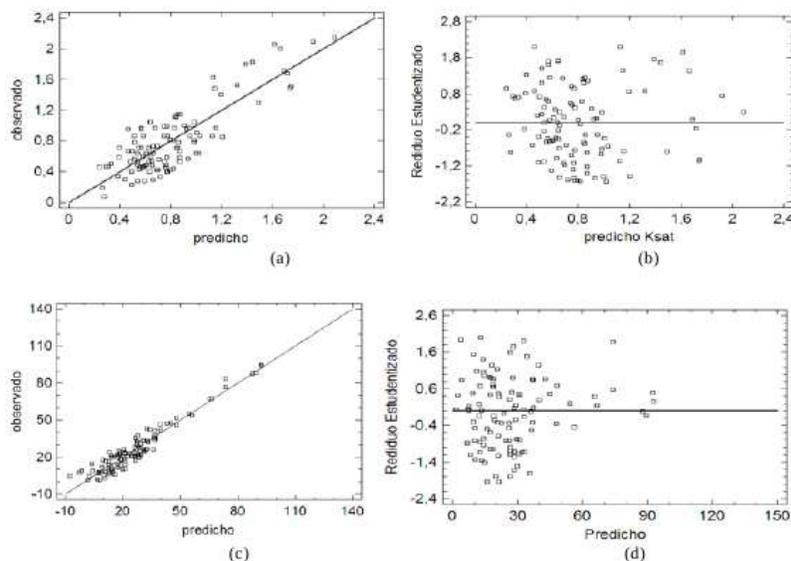


Figura 3: Gráficos de Observado vs Estimado, Residuos vs Predicho: (a), (b) Modelo para la permeabilidad. (c), (d) Modelo para λ

Tabla 7: Análisis de regresión para el modelo de permeabilidad

| Parámetro | Estimación | Error Estándar | Estadístico-t | P-Valor | R ² |
|----------------|-------------|----------------|---------------|---------|----------------|
| CONSTANTE | 5,32949 | 0,366535 | 14,5402 | 0,0000 | 0,701488 |
| % ARCILLA | 0,077966 | 0,0105574 | 7,38496 | 0,0000 | |
| n | -1,29244 | 0,321357 | -4,02182 | 0,0001 | |
| w _i | -0,00610807 | 0,00219439 | -2,78349 | 0,0064 | |
| c | 1,48242 | 0,198178 | 7,48026 | 0,0000 | |
| G _s | -1,85522 | 0,160969 | -11,5254 | 0,0000 | |

4.4.2. Modelo Lineal Múltiple para λ :

Mediante la aplicación de la técnica backward se eliminaron las siguientes variables: el porcentaje de arcilla, el ángulo de fricción, límite líquido y gravedad específica de sólidos. Las variables que quedan se indican en la Tabla 8, donde se aprecia que el valor-p más alto de las variables independientes es 0,0441 que corresponde a f . Puesto que el valor- p es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95 %. Prueba de hipótesis de la regresión. La calidad de ajuste medida por el estadístico R² indica que el modelo así ajustado explica 70,1488 % de la variabilidad en λ .

Los gráficos de las componentes para λ se

muestran en la Figura 5. En las Figuras 5(a), 5(e), 5(f) y 5(g), se observa que algunos residuos son tan grandes como, si no mayores, que el efecto del porcentaje de arcilla, contenido de humedad inicial, ángulo de fricción, gravedad específica de partículas sólidas y límite líquido indicando que otros factores importantes pueden estar faltando en el modelo. Estos factores en orden de mayor a menor efecto corresponden a: límite plástico, humedad inicial, humedad final, cohesión, porcentaje de arena, porcentaje de limo, ángulo de fricción (Ver Figuras 5(b), 5(c), 5(d), 5(e), 5(h), 5(i), 5(j) y 5(k)). El modelo del parámetro λ , aproximado a la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo, posee signo positivo para la cohesión y el ángulo de fricción. A mayor cohesión mayor fricción. Este efecto es disminuido por relaciones de fases y textura.

Tabla 8: Análisis de regresión para el modelo de λ

| Parámetro | Estimación | Error Estándar | Estadístico-t | P-Valor | R ² |
|-----------|------------|----------------|---------------|---------|----------------|
| CONSTANTE | 195,081 | 18,2879 | 10,6672 | 0,0000 | |
| % ARENA | -1,77732 | 0,17305 | -10,2706 | 0,0000 | |
| % LIMO | -1,58796 | 0,224914 | -7,06031 | 0,0000 | |
| c | 27,5445 | 4,2953 | 6,41272 | 0,0000 | |
| f | 0,510727 | 0,25057 | 2,03826 | 0,0441 | 0,924835 |
| LP | -1,53112 | 0,0989336 | -15,4762 | 0,0000 | |
| n | -52,1889 | 7,45846 | -6,99728 | 0,0000 | |
| wf | 1,3213 | 0,0712188 | 18,5527 | 0,0000 | |
| wi | -1,13395 | 0,0652929 | -17,3671 | 0,0000 | |

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los parámetros en la modelación de infiltración correspondientes a modelos dependientes del tiempo resultaron significativos por tanto el ajuste es satisfactorio para los modelos de Philip, Green-Ampt, Kostiakov y Horton. El coeficiente R² es próximo a 0,7. El modelo de Philip arroja valores negativos para el parámetro de conductividad hidráulica que no son consistentes con la práctica. El modelo de Green-Ampt arroja valores del parámetro permeabilidad en el orden de los encontrados en las mediciones de campo. Los modelos de Kostiakov y Horton pueden ser utilizados de preferencia debido a la simplicidad de sus expresiones. Las curvas de infiltración acumulada evidencian saturación del suelo antes de cumplirse media hora de aplicación de agua al suelo en forma de lluvia o riego.

La modelación del parámetro conductividad hidráulica saturada o permeabilidad a partir de propiedades físicas de suelo dio como significativas las variables en su mayoría asociadas a la fracción más fina del suelo: porcentaje de arcilla, porosidad, cohesión, contenido de humedad inicial y la gravedad específica de los sólidos siendo eliminados el porcentaje de limo y arena, así como la fricción. La permeabilidad estimada con el modelo propuesto puede ser un

excelente estimador de los valores requeridos por los modelos de Philip y Green-Ampt, considerando la condición de suelo saturado. El ajuste fue satisfactorio (R² > 0,7).

La modelación del parámetro λ asociado a la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo a partir de propiedades físicas de suelo dio como significativas las siguientes variables: porcentaje de arena y limo, porosidad, cohesión, fricción, contenido de humedad inicial y la gravedad específica de los sólidos. Fueron eliminados el porcentaje de arcilla, límite líquido y gravedad específica de sólidos. Este puede ser un buen estimador del parámetro λ del modelo Green-Ampt. También se puede emplear como estimador de la disponibilidad de agua en el suelo para las plantas y aproximado a la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, la cual según la función de frecuencias resultó ser con una alta frecuencia de 14 mm y con una baja frecuencia entre 25 y 30 mm.

La influencia que ejercen la granulometría y la porosidad sobre la resistencia al corte de los suelos hacen que el piso de tránsito de los tractores durante las labores de fertilización y control de plagas no afecte la ocurrencia del fenómeno de infiltración considerando una frecuencia de dos pases por mes.

Se recomienda reducir los tiempos de aplicación del agua en el cultivo sometido a riego desde 2

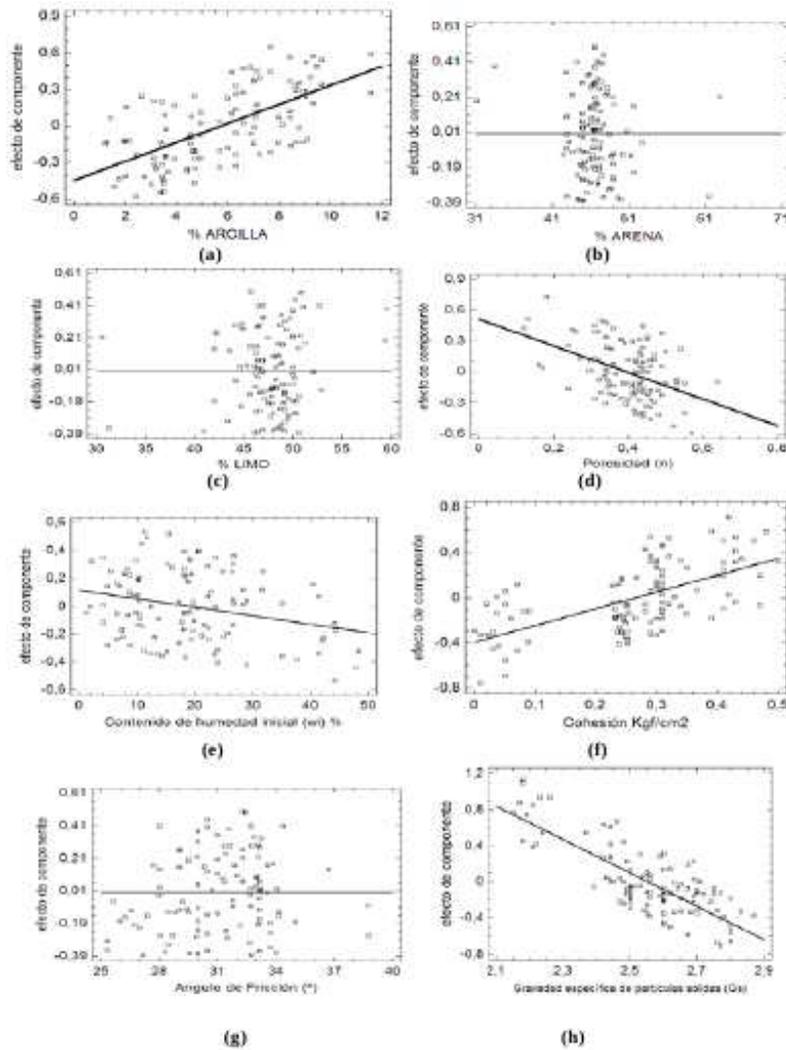


Figura 4: Gráficos de efectos de componentes + residuos para K_{sar} : (a) Porcentaje de Arcilla, (b) Porcentaje de Arena, (c) Porcentaje de Limo, (d) Porosidad, (e) Contenido de humedad inicial, (f) Cohesión, (g) Angulo de fricción, (h) Gravedad específica de sólidos

horas, el cual corresponde al tiempo empleado por los operarios de parcela a 20–30 minutos a fin de garantizar la sustentabilidad del uso de este recurso. Estos cambios en el manejo del agua reducirían el fenómeno de erosión hídrica protegiendo la capa vegetal y garantizando nutrientes para los cultivos.

Se recomienda integrar estos modelos a la predicción de erosión hídrica y escorrentía.

AGRADECIMIENTOS

La investigación se desarrolló en el Centro

de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC) con el aporte financiero del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo y al Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Investigación (FONACIT).

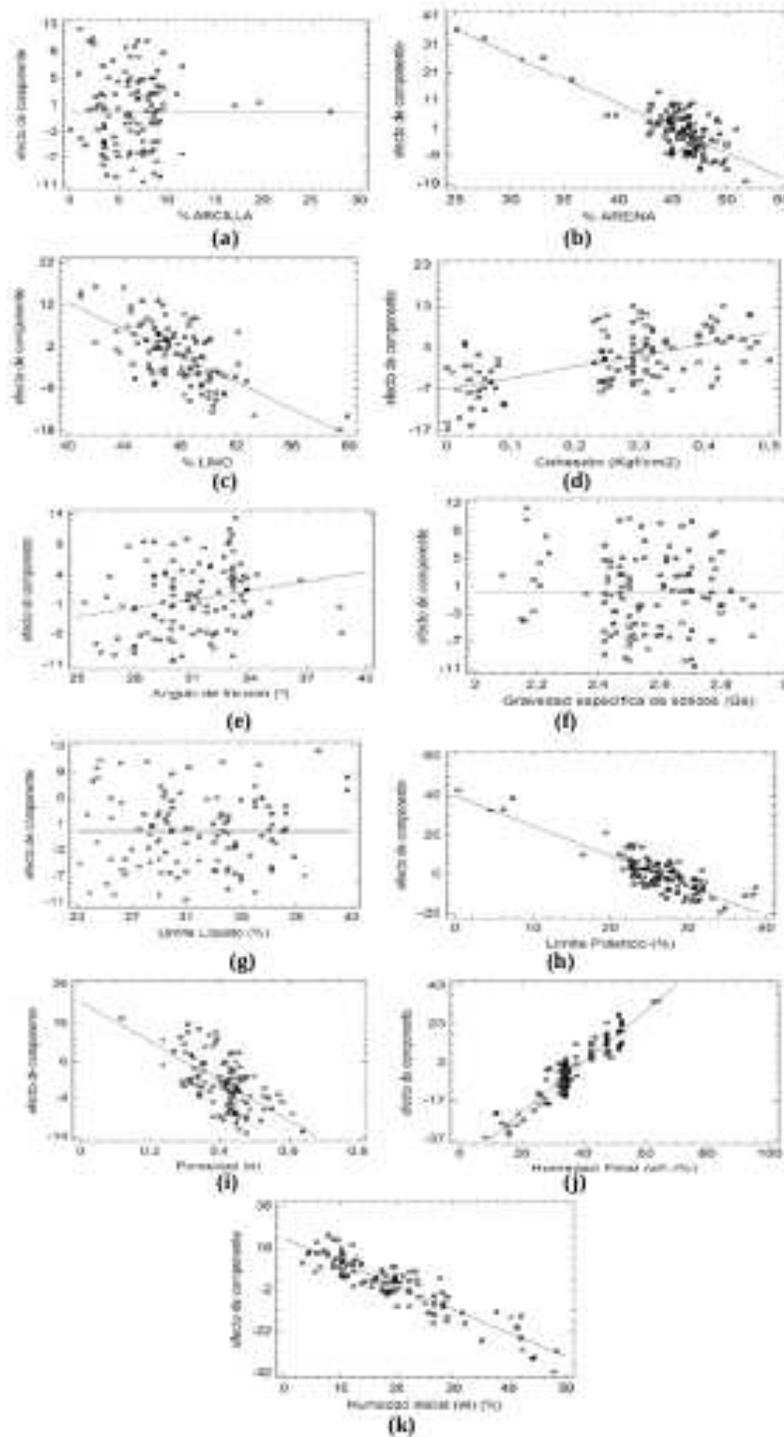


Figura 5: Gráficos de efectos de componentes + residuos para λ : (a) % Arcilla, (b) % Arena, (c) % Limo, (d) Cohesión, (e) Angulo de fricción, (f) Gravedad específica de sólidos, (g) Límite Líquido, (h) Límite Plástico, (i) Porosidad, (j) Humedad Final, (k) Humedad Inicial

Referencias

- [1] Mishra S.K, Tyagi J. V., y Singh V. P. (2003). "Comparison of infiltration models". *Hydrol. Process.* 17 2629–2652.
- [2] Green WH, Ampt CA. (1911). "Studies on soil physics, I. Flow of air and water through soils". *Journal of Agricultural Science* 4: 1–24.
- [3] Philip, J. R. 1957. 'The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations', *Soil Sci.*, 84, 257-264.
- [4] Philip JR. (1969). "Theory of infiltration". In *Advances in Hydrosience*, Chow VT (ed.). Academic Press: New York; 215–296.
- [5] Mein RG, Larson CL. (1971). "Modeling the infiltration component of the rainfall-runoff process". *WRRC Bull.* 43, Water Resources Research Center, University of Minnesota, Minneapolis.
- [6] Smith RE. (1972). "The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer". *Journal of Hydrology* 17: 1–21.
- [7] Smith RE, Parlange J-Y. (1978). "A parameter-efficient hydrologic infiltration model". *Water Resources Research* 14(3): 533–538.
- [8] Horton, R. E. (1940). 'An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity', *Soil Sci. SOC. Am. Proc.*, 5, 399-417.
- [9] Holtan HN. (1961). A concept of infiltration estimates in watershed engineering. ARS41-51, U.S. Department of Agricultural Service, Washington, DC.
- [10] Overton DE. (1964). Mathematical refinement of an infiltration equation for watershed engineering. ARS 41-99, U.S. Department of Agricultural Service, Washington, DC.
- [11] Singh VP, Yu FX. (1990). "Derivation of infiltration equation using systems approach". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE (6): 837–857.
- [12] SCS 1956, (1971). *Hydrology*. National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10. Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- [13] Kostiaikov AN. (1932). On the dynamics of the coefficients of water percolation in soils. In Sixth Commission, International Society of Soil Science, Part A; 15–21.
- [14] Collis-George N. (1977). Infiltration equations for simple soil systems. *Water Resources Research* 13(2): 395–403.
- [15] Rawls, W. J., Gish, T. J., and Brakensiek, D. L. (1991). 'Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics', *Adv. Soil Sci.*, 16, 213-234.
- [16] Van de Genachte G., Mallants D., Ramos J., Deckers J. A., Feyen J. (1996). "Estimating infiltration parameters from basic soil properties". *Hydrological Processes*, Vol. 10, 687-701.
- [17] Richards, L. A. (1931). 'Capillary conduction of liquids through porous mediums', *Physics*, 1, 318-333.
- [18] Hernández, R., Fernández C., Baptista P., (2003). *Metodología de la Investigación*. (3ra ed.). Editotal McGraw-Hill. México
- [19] Hodgson, J., (1987). *Muestreo y descripción de suelos*. Editorial Reverté, S.A. España
- [20] Soil Survey Division Staff. 1993. "Soil survey manual. Soil Conservation Service". U.S. Department of Agriculture Handbook 18. <http://soils.usda.gov/technical/manual/>
- [21] Pla Sentis, I. (1977). *Metodología para la caracterización física de diagnostico de problema de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales*. Venezuela: Universidad Central de Venezuela. República Bolivariana de Venezuela.
- [22] Lambe, W., Whitman R., (1994). *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa. México.
- [23] Juárez, E., Rico A., (1991). *Mecánica de los Suelos*. Tomo I. Editorial Limusa. Mexico.
- [24] Toro E., Zamora R., (2008), *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.
- [25] Da Graca E., Saturno Y., (2009). *Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector Cariaprima*. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [26] Chacón Ch., Segura F., Sandoval A., (2009). "Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector Cariaprima. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo". Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [27] 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. República Bolivariana de Venezuela.
- [28] Silva W., Sifontes C., (2009). "Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector Potrerito. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo". Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [29] Morillo K., Morey R., (2009). *Comparación De Modelos Matemáticos De Infiltración En El Sector La Colonia*, Cuenca Del Río Chirgua, Municipio Bejuma, Estado Carabobo. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [30] Archila A., Hernández D., (2009). "Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector El León. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo". Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [31] Muñoz H., (2009). "Comparación de modelos ma-

- temáticos de infiltración en una parcela en el Sector El León. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo”. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [32] Morillo J., (2009). “Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el sector potrerito- cuenca del río Chirgua, municipio Bejuma - Estado Carabobo. Período húmedo 2008”. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [33] López M., De Ornelas I., (2009). “Comparación de modelos matemáticos de infiltración en una parcela en el Sector La Colonia. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo”. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [34] Trejo G., Pérez J., Seijas E., (2009). Comparación De Modelos Matemáticos De Infiltración En El Sector La Colonia, Cuenca Del Río Chirgua, Municipio Bejuma, Estado Carabobo. Periodo Seco 2009. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [35] 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. República Bolivariana de Venezuela.
- [36] Sánchez J., Sortino C., (2009). “Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector La Paredaña. Período húmedo 2008. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo”. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [37] Velásquez L., (2010). Comparación De Modelos Matemáticos De Infiltración En Una Parcela En El Sector La Paredaña- Cuenca Del Río Chirgua, Municipio Bejuma Del Estado. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [38] Vivas R., Petit J., Palacio A., (2010). Validar modelos matemáticos de infiltración en el sector La Paredaña, Cuenca alta del río Chirgua en el Municipio Bejuma del Estado Carabobo. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [39] Córdova Y., Jiménez J. M., (2009). “Comparación de modelos matemáticos de infiltración en el Sector Casupito. Cuenca del río Chirgua. Estado Carabobo”. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
- [40] Terzaghi, K., y Peck, R., (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2da Ed. John Wiley and Sons, Nueva York.
- [41] Delgado F., (1987). *Prácticas Agronómicas de Conservación de Suelos*. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. Mérida. Venezuela.
- [42] Hough, B., (1957). *Basic Soil Enigineering*, Ronald Press., New York.