

PARAMETRIZACIÓN DE MODELOS DE EROSIÓN HÍDRICA Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN PARCELAS AGRÍCOLAS UBICADAS EN LA CUENCA DEL RÍO CHIRGUA – VENEZUELA

Linares Gabriel, Marin Carolina, Rojas Yeni, Araujo Elio, Rendón Jorge, Rivero edras, Ortega
Francisco, Oviedo Hely, Márquez Adriana, Guevara Edilberto
Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Venezuela
Teléfonos: 0058 414 416 5856, 0058 4166472245.
E-mail: ammarquez@uc.edu.ve; eguevara@uc.edu.ve

RESUMEN

El propósito de esta investigación es parametrizar modelos de transporte de sedimentos y erosión hídrica en parcelas agrícolas ubicadas en la cuenca del Río Chirgua- Estado Carabobo-Venezuela, en terrenos con pendiente longitudinal 0.8, 1, 1.5, 2.5 y 13%. La unidad básica para el estudio fue el surco formado para dirigir la escorrentía del agua proveniente del riego o lluvia a los cultivos durante cada ciclo desarrollado en la parcela. El tipo de investigación fue correlacional – explicativa, con un diseño de investigación no experimental – longitudinal de tendencia en cultivos de *Solanum tuberosum* L. Se caracterizó suelos, topografía, geometría del fluido en los surcos, caudal, sólidos totales. La ecuación de Duboys ajustada arrojó coeficientes $R^2 > 70\%$. En el ciclo de la bajo riego se realizaron estimaciones de la pérdida de suelo empleando regresiones de los modelos de Kilinc, Simons Li y Fullerton considerando la influencia del ancho (W), pendiente (S), profundidad del flujo en el surco (h), temperatura del fluido (T) y el tamaño de partículas (d_s); se obtuvo un rango de coeficientes de ajuste (R^2) de un 79 a 94.5 %

ABSTRACT

The purpose of this research is to parameterize models of sediment transport and water erosion in agricultural fields located in the River Basin Chirgua-Estado Carabobo, Venezuela, in areas with longitudinal slope 0.8, 1, 1.5, 2.5 and 13%. The basic unit for the study was the furrow to lead the runoff water from irrigation or rain to crops during each cycle developed in the plot. The research was correlational - explanatory, with a non-experimental research design - longitudinal trend in cultures of *Solanum tuberosum* L. It was characterized soils, topography and geometry of the fluid in the grooves, flow, total solids. The equation yielded coefficients Duboys adjusted $R^2 > 70\%$. In the cycle of under irrigation estimates were made of soil loss using regression models Kilinc, Simons Li and Fullerton considering the influence of the width (W), slope (S), depth of flow in the groove (h), fluid temperature (T) and particle size (d_s), we obtained a range of adjustment coefficients (R^2) from 79 to 94.5%

INTRODUCCIÓN

Los procesos de erosión y sedimentación han fascinado a generaciones de investigadores, y las contribuciones científicas en este campo aún continúan en progreso. El estado del arte de los modelos de erosión y sedimentación se puede comprender sólo a través del examen cuidadoso de los desarrollos teóricos y de la tecnología empleada en la práctica de la ingeniería. La erosión y sedimentación involucran los procesos de erosión, transporte, y deposición de partículas sólidas, con frecuencia, denominadas sedimentos. Estos procesos naturales han estado activos a través de períodos geológicos y han formado el paisaje actual de nuestro mundo. Hoy, la erosión, transporte y sedimentación pueden causar graves problemas medioambientales y a la ingeniería a consecuencia de actividades humanas, tales como la agrícola, minera, construcción de carreteras y vías. El transporte de sedimentos afecta la calidad del agua y su aptitud para el consumo humano y otros usos. Numerosas industrias no pueden tolerar cantidades mínimas de sedimentos en el agua que se requiere para procesos de manufactura y pagan altos precios para la remoción de los sedimentos del agua que consumen a diario. La construcción de presas favorece la retención de los sedimentos aportados y cambia el flujo natural y la carga de sedimentos aguas abajo. Como consecuencia neta, la acumulación de sedimentos incrementa el riesgo de inundación aguas arriba del embalse. La pérdida de capacidad de los embalses genera problemas de abrasión de turbomáquinas. El sedimento degrada la calidad del agua de aporte municipal, los químicos y residuos son asimilados

sobre y dentro de las partículas de sedimento. Ocurre intercambio iónico entre solutos y sedimentos. De esta manera, las partículas de sedimento se han convertido en un agente de transporte y almacén de pesticidas, fósforo adsorbido, nitrógeno y otros compuestos orgánicos.

Según ONU, (1992), en el documento Agenda 21, se plantea que para el año 2025, el 83% de la población mundial, que según se prevé será de unos 8.500 millones de personas, vivirá en países en desarrollo. Ahora bien, la capacidad de recursos y tecnologías disponibles para satisfacer las demandas de alimentos y otros productos básicos agrícolas de esta población en constante crecimiento sigue siendo incierta. La agricultura tendrá que hacer frente a este reto, sobre todo mediante el aumento de la producción en las tierras que ya se están utilizando, y evitando asimismo el aprovechamiento aún más intenso de tierras que sólo son marginalmente aptas para el cultivo. El éxito de la agricultura y el desarrollo rural sostenibles dependerá en gran parte del apoyo y la participación de la población rural, de los gobiernos, del sector privado y de la cooperación internacional, incluida la cooperación técnica y científica. Las situaciones mencionadas antes evidencian la necesidad de incrementar el aporte científico relativo al conocimiento sobre los modelos matemáticos que permitan estimar la magnitud en la que suceden los procesos de erosión y sedimentación a consecuencia de la actividad del hombre, a fin de mantener una relación hombre/tierra sostenible. En este artículo se revisa el ajuste de los modelos de erosión y transporte de carga de lecho aplicados al flujo en surcos o canales agrícolas sometidos a riego en tierras cultivadas con *Solanum Tuberosum*, actividad que se lleva a cabo en tierras ubicadas en la cuenca del embalse Pao-Cachinche-Venezuela. Los modelos se basan en la teoría del movimiento incipiente, la cual es aplicable a partículas no cohesivas, tal como arena y grava, considerando que éstos han sido generados a partir de pruebas experimentales de laboratorio, se pretende evaluar la capacidad de estimación de tales modelos en función de datos recolectados a base de mediciones en campo, así como realizar ajuste de parámetros en caso de ser necesario. Entre los cuales, se encuentran los de Duboys (1879), Meyer-Peter y Müller (1948), Einstein y Brown (1950). También se incluyen modelos que explican la capacidad de transporte de sedimentos de una corriente de acuerdo con formulaciones basadas en la teoría de advección-difusión de la cual se deriva el modelo de Einstein (1964), a partir del cual se han derivado expresiones de cálculo más simple sin pérdida significativa de exactitud, entre las que se encuentra el modelo de Simons, Li, Fullerton (1981), según los cuales la cantidad de material transportado por una corriente depende de dos grupos de variables: (1) las que gobiernan la capacidad de transporte de sedimentos de la corriente tales como, geometría del canal, ancho, profundidad, forma, perímetro húmedo, pendiente, alineamiento, fuerza tractiva, y uniformidad de descarga; y (2) aquellas que reflejan la calidad y cantidad de material disponible para el transporte a través de la corriente que incluyen la topografía, magnitud, intensidad y duración del riego, tipo de suelo, tamaño de partículas, gravedad específica, contenido de sólidos totales. La erosión en surcos se estimará a través del modelo de Kilinc (1972), el cual representa una forma simplificada de la USLE. Los modelos mencionados incluyen algunas de las variables mencionadas antes, las cuales serán medidas en esta investigación y el ajuste permitirá evaluar en qué medida contribuyen a la explicación de la erosión y el transporte de sedimentos

DESCRIPCIÓN TEÓRICA DE LOS MODELOS

Movimiento Incipiente

Las condiciones umbrales entre erosión y sedimentación de una partícula individual se conocen como movimiento incipiente. En el movimiento incipiente sumergido, el flujo de un fluido alrededor de partículas de sedimento ejerce fuerzas que tienden a iniciar el movimiento de la partícula. La fuerza resistente del material no cohesivo se relaciona con el peso de la partícula. Las condiciones umbrales ocurren cuando el momento hidrodinámico de las fuerzas que actúan sobre una partícula individual se igualan el momento resistente de las fuerzas. La partícula está entonces en movimiento incipiente. En el flujo en cauces o canales, las partículas de lecho no cohesivas

entran en movimiento tan pronto como el esfuerzo cortante aplicado sobre el material del lecho excede el esfuerzo cortante crítico. Generalmente el limo y las partículas de arcilla entran en suspensión, y las partículas de arena y grava ruedan y deslizan en una fina capa próxima al lecho denominada capa de lecho. La carga de lecho, o carga de contacto, se refiere a las partículas de sedimento para transporte que frecuentemente se mantienen en contacto con el lecho. El transporte de la carga de lecho se puede tratar como un problema determinístico y probabilístico. Los métodos determinísticos han sido propuestos por Duboys y Meyer-Petter y Müller; los métodos probabilísticos por Kalinske y Einstein. (Julien, 1995)

Modelos de transporte de sedimentos

El transporte de la carga de lecho, o carga de contacto, se refiere al transporte de las partículas de sedimento que frecuentemente mantienen contacto con el lecho. El transporte de la carga de lecho se puede tratar como un problema determinístico y probabilístico. Los métodos determinísticos han sido propuestos por Duboys y Meyer-Petter y Müller; los métodos probabilísticos por Kalinske y Einstein.

Modelo de Duboys

La contribución pionera de Duboys (1879) se basa en el concepto de que el sedimento se mueve en una delgada capa a lo largo del lecho. El esfuerzo cortante aplicado al lecho τ_0 debe exceder al esfuerzo cortante crítico τ_c para iniciar el movimiento. El volumen del material del lecho en movimiento por unidad de área y el tiempo q_{bw} en lbf/s/ft^2 se calcula a partir de la Ecuación (1):

$$q_{bw} = \frac{0.173}{d_s^{3/4}} \gamma_s \tau_0 (\tau_0 - 0.0125 - 0.019d_s) \quad (1)$$

Donde: d_s es el tamaño de partícula en mm, τ_0 es el esfuerzo cortante límite en lbf/ft^2 y el esfuerzo cortante crítico es $\tau_c = 0.0125 + 0.019d_s$; τ_c en lbf/ft^2

Modelo de Meyer-Peter y Muller

Meyer-Peter y Muller (1948) desarrollaron una fórmula para la carga de lecho compleja basada en el tamaño del sedimento medio. Chien (1956) demostró que la formulación original se podía reducir a la siguiente forma simple mediante la Ecuación (2)

$$\frac{q_{bw}}{\sqrt{(G-1)gd_s^3}} = 8\gamma_s (\tau_* - \tau_{*c}) \quad (2)$$

Donde τ^* corresponde al parámetro de Shields, $\tau^* = \tau_0 / (\gamma_s - \gamma)d_s$ y el valor crítico del parámetro de Shields τ_{*c}^* se puede aproximar como sigue:

$$\tau_c^* = 0.5 \tan \phi \quad \text{cuando } d_* < 0.3 \quad (3)$$

$$\tau_c^* = 0.25d_*^{-0.6} \tan \phi \quad \text{cuando } 0.3 < d_* < 19 \quad (4)$$

$$\tau_c^* = 0.013d_*^{0.4} \tan \phi \quad \text{cuando } 19 < d_* < 50 \quad (5)$$

$$\tau_c^* = 0.06 \tan \phi \quad \text{cuando } d_* > 50 \quad (6)$$

$$d_* = d_s \left[\frac{(G-1)g}{v_m^2} \right]^{1/3}$$

Modelo de Einstein y Brown

H. A. Einstein introdujo la idea de que los granos se mueven en intervalos proporcionales a su tamaño. Definió el espesor de la capa de lecho como el doble del diámetro de las partículas. Utilizó conceptos de probabilidad extensiva para formular una relación para el caudal de sedimentos por contacto. El caudal de sedimentos por contacto q_{bv} es el volumen de sedimentos por unidad de ancho y tiempo (q_{bv} en L^2/T) se transforma, usando la velocidad de caída en agua clara de Rubey ω_0 en un caudal de sedimentos en unidades volumétricas dimensionales q_{bv}^* como la Ecuación 7

$$q_{bv}^* = \frac{q_{bv}}{\omega_0 d_s} \quad (7)$$

La tasa dimensional de transporte de sedimentos q_{bv}^* es una función del parámetro de Shields $\tau^* = \tau_0 / (\gamma_s - \gamma) d_s$, con mediciones de Gilbert (1914), Meyer – Meter y Muller (1948), Bogardi (1974) y Wilson (1966). Brown (1950) sugirió las siguientes dos relaciones:

$$q_{bv}^* = 2.15 e^{-0.391/\tau^*} \quad \text{cuando } \tau^* < 0.18 \quad (8)$$

$$q_{bv}^* = 40\tau_*^3 \quad \text{cuando } 0.52 > \tau^* > 0.18 \quad (9)$$

Considerando los datos del transporte de sedimentos a una alta tasa de corte, se obtiene

$$q_{bv} = 15\tau_*^{1.5} \quad \text{cuando } \tau^* > 0.52 \quad (10)$$

A esta tasa de corte, el sedimento también se moverá en suspensión.

Modelos de Capacidad de Transporte de sedimentos

Los siguientes métodos reflejan el desarrollo pasado y presente en los cálculos del transporte de sedimentos. El método de Einstein es todavía una referencia, a pesar de la complejidad de los procedimientos basados en difusión y algunas incertidumbres relacionadas con los coeficientes determinados arbitrariamente. El método de Simons, Li y Fullerton se ha derivado del método de Einstein. El método de Bagnold basado en potencia de corriente y energía se ofrece como modelo computarizado.

Modelo de Simons, Li, Fullerton

Simons, Li, Fullerton (1981) desarrollaron una aplicación simple de relaciones de potencia que estima el transporte de sedimentos basado en la profundidad del flujo h y la velocidad V . Ecuación (11):

$$T_c = C_{s1} h^{C_{s2}} V^{C_{s3}} \quad (11)$$

Modelo de Bagnold

Bagnold (1966) propuso que la potencia del flujo suministra energía para el transporte de sedimentos. Ecuación 11. Donde A y B son parámetros.

$$T_c = \frac{\tau_0 V}{G_s - 1} \left(A - B \left(\frac{V}{V_s} \right) \right) \quad (12)$$

Modelo empírico de erosión

Kilinc (1972) propuso una ecuación para estimar la erosión laminar y en surcos, la cual es una forma reducida de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisadas (RUSLE), (Renard et al, 1997a, 1997b). Ecuación (12). Donde S es la pendiente de la superficie del terreno y q es el caudal de escorrentía unitario m^2/s

$$q_s = c_1 S^{c_2} q^{c_3} \quad (13)$$

APLICACIÓN

Muestreo en campo

El muestreo en campo se realizó en el Sector La Paredeña, Cuenca del río Chirgua, Estado Carabobo, Venezuela, en cinco parcelas agrícolas (Araujo E., y otros, 2008; Álvarez S., y otros, 2008; Betancourt y Rendón, 2008; Oviedo H., y otros, 2008; Rodríguez A., y otros, 2008; Lugo, D., y otros, 2008; López, A., y otros, 2008, Peraza Y., y otros, 2008; Linares G. y Morgado E., 2008), las cuales se clasificaron por las pendientes de terreno: (1) 0,8 %, (2) 1%, (3) 1,5%, (4), 2,5% y (5) 13%. La ubicación geográfica, área y uso de la tierra del sector es: 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. 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). La fuente de suministro de agua para los cultivos; en el primer rubro es el riego por aspersión y en el segundo es la lluvia. 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 un total de 375 mediciones de caudal y sólidos totales. Se caracterizaron factores climáticos, edáficos, topográficos y de manejo; temperatura del agua, propiedades físicas de suelo (límites de consistencia, textura y relaciones de fases) pendientes de los surcos, caudal y tiempo de riego aplicado. Se realizó muestreo probabilístico al azar; tomaron tres muestras al azar de suelo por parcela para determinar sus propiedades, con un error del 5% y una probabilidad de ocurrencia del error de 99%. Se tomaron muestras perturbadas para granulometría por tamizado e hidrómetro. 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). Estas propiedades permitirán definir el rango de datos para el ajuste de los modelos de estimación de la erosión y transporte de sedimentos. A esta investigación se incorporaran modelos de estimación de infiltración en suelos, así como se considerará la influencia de los patrones de escorrentía, que se viene desarrollando en el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Caracterizar propiedades del fluido y factores: edáficos, topográficos y de manejo

Las propiedades fisico-químicas del fluido analizadas fueron: la temperatura y los sólidos totales. La temperatura del fluido varió entre 20 a 24°C (ver Figura 1 (a)). Los sólidos totales promedio durante el intervalo variaron entre 3300 y 4500 mg/L. Los sólidos totales promedio durante el período variaron desde 6000 hasta 2000 mg/L. (ver Figura 1(b) y 1(c)). Los factores caracterizados fueron; edáfico: textura del suelo; topográfico: pendiente de los surcos y de manejo: caudal de aplicación de agua al cultivo y de escorrentía. El tamaño medio de partículas de suelo se encontró próximo a 0.074 mm (100% del suelo pasa el tamiz N° 4, más del 50% pasa el tamiz N° 200). Los límites de consistencia de Atterberg; límite líquido 24 a 43 %, límite plástico 21 y 40 %, índice de plasticidad 0,18 y 14 %, lo cual dio como resultado un suelo de tipo Limo Orgánico (OL) (ver Figura 1(d)). Se aplicaron métodos de clasificación, tales como el Análisis de Conglomerados (AC) y el Análisis de Componentes Principales (ACP). Se analizaron 52 muestras de suelo, descritas por el porcentaje pasante asociado a 14 tamaños de partículas. El AC muestra a través del dendrograma de la Figura 1(d), la proximidad existente en 47 de los 52 puntos de muestreo. El ACP mostró que existe una alta correlación entre los vectores integrados por las proporciones pasantes de un determinado tamaño, ya que las dos primeras componentes (PCOMP_1) y (PCOMP_2) explican 88,12% de la variabilidad de los datos originales. La Figura 1(f) muestra la acumulación de puntos en la gráfica de las componentes, lo cual confirma la hipótesis de homogeneidad en las muestras de suelo. La pendiente del terreno correspondió a 0,8, 1, 1,5, 2,5 y 13%. La pendiente de los surcos presentó valores promedios entre 0,3, 1 y 2% (ver Figura 1(g)). El caudal promedio aplicado a cada surco mediante aspersión resultó entre 0,24 y 0,25 L/s. El caudal de escorrentía durante el periodo varió desde 0,25 a 0,1 L/s presentando disminuciones durante el período de desarrollo del cultivo e incrementos dentro del tiempo de riego (ver Figuras 1(h), 1(i))

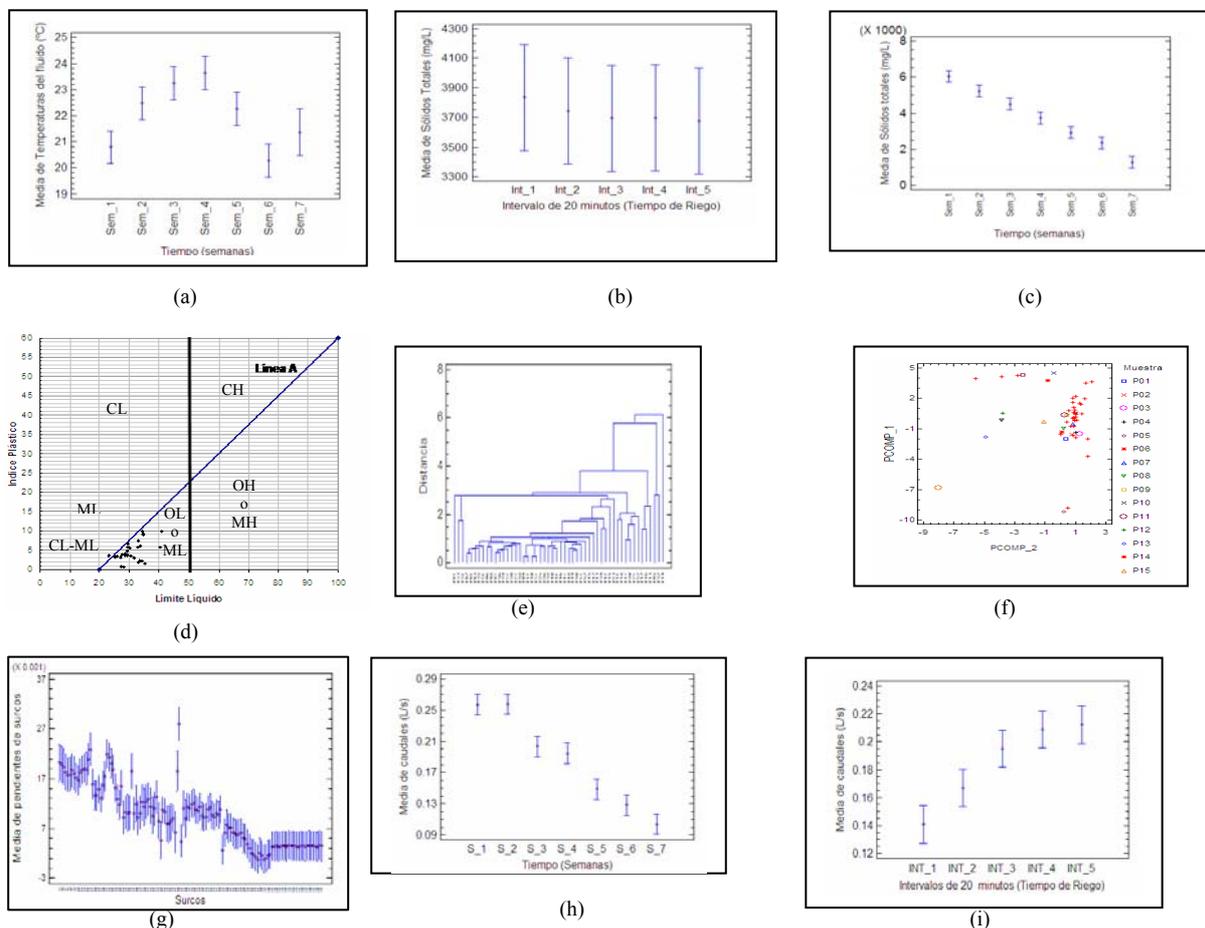


Figura 1. Propiedades físico-químicas del fluido y factores topográficos, edáficos y de manejo. (a) Temperaturas del fluido, (b) Sólidos totales en el tiempo de riego, (c) Sólidos totales en el período, (d) Clasificación del suelo, (e) Dendrograma-Suelo, (f) Análisis de Componentes Principales-Suelo, (g) Pendientes, (h) Caudales en el período, (i) Caudales en el intervalo

Medición de la carga de sedimentos

La carga de sedimentos en el fluido se obtuvo a través de las mediciones de caudales y ensayos de sólidos totales en laboratorio. La carga de sedimentos promedio varió desde 1700 hasta 4000 g/h, presentando extremos entre 12000 y 16000 gr/h, incrementándose durante el evento de riego. La carga de sedimentos promedio varió desde 4000 g/L hasta menos de 1000 g/L durante el periodo de desarrollo del cultivo. (Ver Figuras 2(a), 2(b), 2(c) y 2(d))

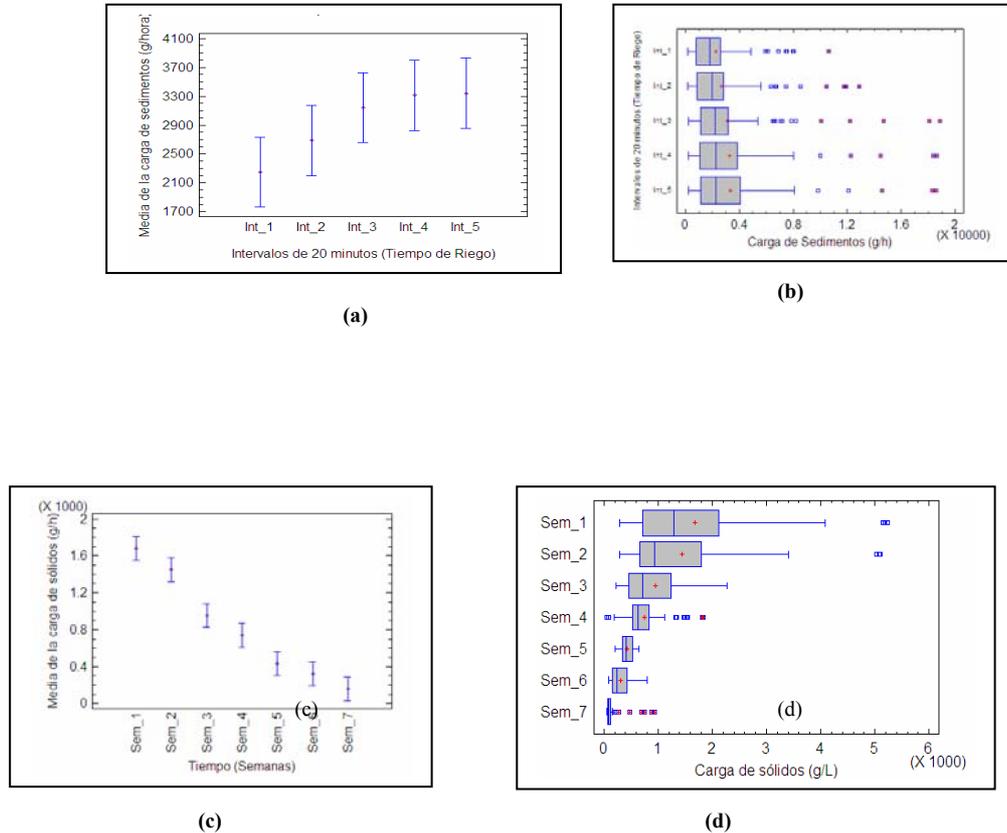


Figura 2. Media y diagrama de cajas de la carga de sedimentos observada. (a) y (b) Por intervalos de 20 minutos en el tiempo de riego, (c) y (d) Por semanas durante el desarrollo del cultivo

Modelos basados en el esfuerzo cortante excedente

Los resultados de la evaluación de los modelos de Duboys, Einstein-Brown y Meyer, Peter y Müller en los terrenos de pendientes entre 0,8 y 13% con una relación observado/estimado baja, lo cual implica que los modelos sobreestiman las magnitudes medidas de carga de sedimentos transportada por los surcos. (Ver Figuras 3 (a), 3(b), 3(c) y 3 (d)). Por lo tanto, resulta conveniente realizar el ajuste paramétrico de ecuaciones basadas en el modelo de Duboys. Este modelo se ha seleccionado motivado a la facilidad que ofrece para efectuar el ajuste.

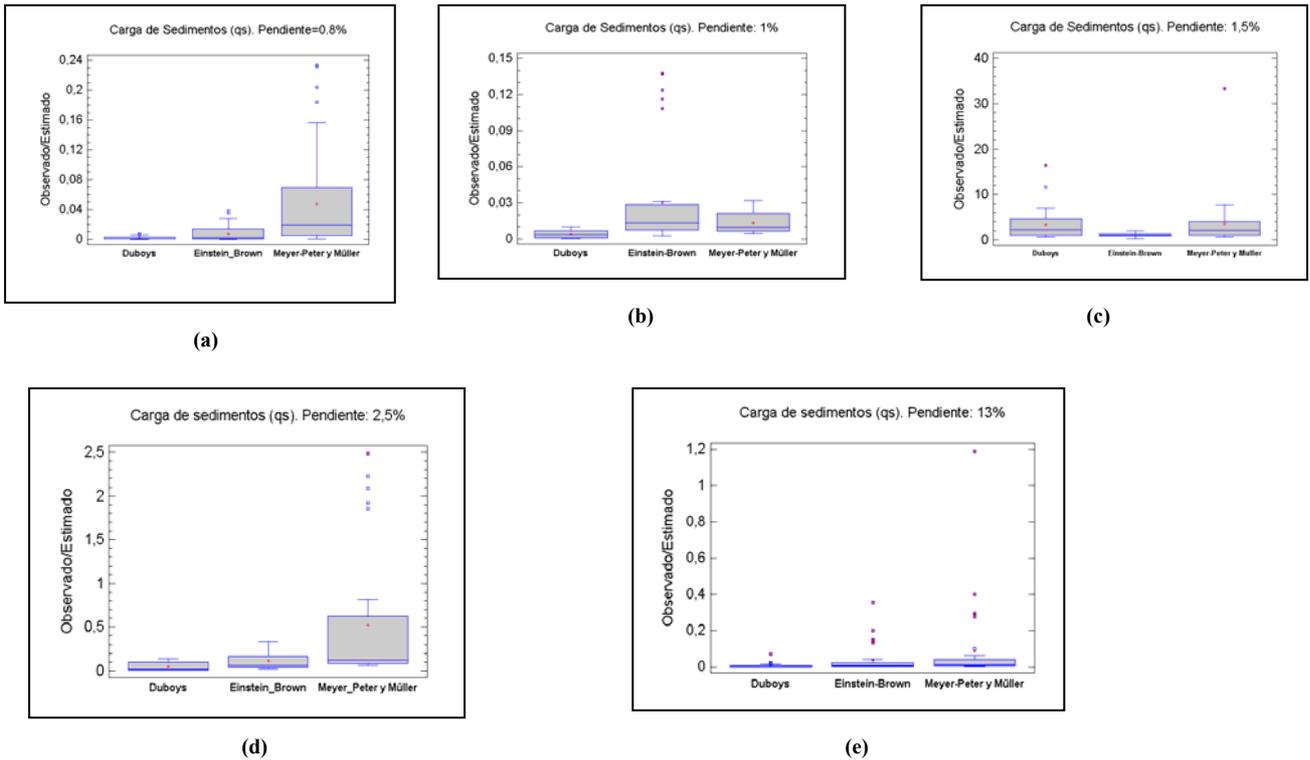


Figura 3. Diagrama de cajas Box-Whisker que muestra media, cuarteles, mínimo y máximo para pruebas en campo realizadas en terrenos de diversas pendientes que relacionan la medición de la carga de sedimentos observada y la estimación de los modelos, para las siguientes pendientes: (a) 0,8%, (b) 1%, (c) 1,5%, (c) 2,5% y (d) 13% . Modelos: Duboys, Einstein-Brown, Meyer-Peter y Müller

Ajuste de Ecuaciones

Los resultados de los ajustes considerando modelos lineales y no lineales multivariable basados en el excedente de esfuerzo cortante se indican en las Tablas 1, 2, 3, 4, 5. Las tablas muestran los valores de los parámetros y el estadístico (R^2) indicando que la resistencia al esfuerzo cortante, profundidad del fluido y la pendiente del surco son los factores predominantes que contribuyen a la explicación del fenómeno de transporte. El estadístico R^2 en la mayoría de los ajustes se encontró entre 50 y 80%. El ajuste de modelos basados en advección-difusión y erosión laminar se encuentra en la Tabla 6. Esta tabla indica que se encontraron ajustes superiores al 80% resultando un ajuste satisfactorio para estos modelos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se evaluaron nueve modelos para estimar el transporte de sedimentos y erosión laminar, en la comunidad agrícola localizada en la cuenca del río Chirgua-Venezuela, en suelo clasificado como limo orgánico, mediante pruebas de campo. Se llevaron a cabo 375 mediciones de caudal y sólidos totales, así como mediciones variables hidráulicas durante el ciclo bajo riego. Los parámetros de las variables de esfuerzo cortante, pendiente y profundidad del fluido resultaron significativos en la explicación de los fenómenos de desprendimiento, transporte y el modelo de erosión empírico $R^2 > 70\%$. Existen varias alternativas para elegir ecuaciones de acuerdo con la disponibilidad de datos de campo

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).

Cuadro 1. Modelos ajustados. Pendiente de terreno: 0,8%. Coeficientes R² de los valores medidos y estimados para la capacidad de desprendimiento de partículas sólidas. Modelos: LM: Lineal Múltiple. NL: No Lineal

Nº	Modelos de estimación de D _c (N/m.h). Pendiente: 0.8%	Estimados	Parámetros					R ²
			A	B	C	D	E	
1	$A + (B \cdot \tau_0) + (C \cdot S) + (D \cdot h) + (E \cdot w)$	Promedio	-241,41	-50,9475	17658,5	5463,52	249,705	92,5843
		Máximo						
		Mínimo						
2	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h$	Promedio	203,359					0
		Mínimo	152,426					
		Máximo	254,291					
3	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot S$	Promedio	19496,3					0
		Mínimo	11248,7					
		Máximo	27744					
4	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot w$	Promedio	661,708					8,97468
		Mínimo	507,545					
		Máximo	815,87					
5	$(A (\tau_0/\tau_c) \cdot h) / S$	Promedio	1,60739					68,7736
		Mínimo	1,41314					
		Máximo	1,80164					
6	$(A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S$	Promedio	0,60222					70,2853
		Mínimo	0,53142					
		Máximo	0,67301					
7	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h$	Promedio	346,209					0
		Mínimo	251,618					
		Máximo	440,8					
8	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot S$	Promedio	32634,8					0
		Mínimo	18061,8					
		Máximo	47207,8					
9	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h / S$	Promedio	2,84737					59,4181
		Mínimo	2,44831					
		Máximo	3,24643					
10	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w \cdot T) / S$	Promedio	0,37					52,6525
		Mínimo	0,31327					
		Máximo	0,42673					
11	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h) / (S \cdot G_s)$	Promedio	7,58686					57,5998
		Mínimo	6,49629					
		Máximo	8,67743					
12	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S$	Promedio	1,06769					61,0655
		Mínimo	0,92157					
		Máximo	1,21381					
13	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w) / S$	Promedio	8,96328					64,0061
		Mínimo	7,79021					
		Máximo	10,1363					
14	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s \cdot w) / S$	Promedio	3,35401					65,2034
		Mínimo	2,92337					
		Máximo	3,78466					
15	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S^{\wedge} B$	Promedio	0,00793	1,95958				84,8819
		Mínimo	-0,0044	1,67754				
		Máximo	0,02028	2,24162				
16	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w) / S^{\wedge} B$	Promedio	0,07717	1,92929				85,4207
		Mínimo	-0,0422	1,64937				
		Máximo	0,19648	2,20922				

Cuadro 2. Modelos ajustados. Pendiente de terreno: 1%. Coeficientes R² de los valores medidos y estimados para la capacidad de desprendimiento de partículas sólidas. Modelos: LM: Lineal Múltiple. NL: No Lineal

Nº	Modelos de estimación de D _c (N/m.h). Pendiente: 1%	Estimados	Parámetros			R ²
			A	B	C	
1	A+ (B* τ _o) + (C*S)	Promedio	147,144	192,279	-99750	78,5389
		Máximo				
		Mínimo				
2	A (τ _o /τ _c) *h	Promedio	509,432			57,8889
		Mínimo	424,25			
		Máximo	594,615			
3	A (τ _o /τ _c) *h*S	Promedio	51348,3			57,9174
		Mínimo	42765,8			
		Máximo	59930,7			
4	A (τ _o /τ _c) *h*w	Promedio	1474,29			62,7155
		Mínimo	1245,33			
		Máximo	1703,25			
5	(A (τ _o /τ _c) *h) /S	Promedio	5,01903			56,8861
		Mínimo	4,16752			
		Máximo	5,87054			
6	(A (τ _o /τ _c) *h*Gs)/S	Promedio	1,89635			57,0499
		Mínimo	1,57538			
		Máximo	2,21733			
7	A (τ _o - τ _c) *h	Promedio	906,795			60,4434
		Mínimo	760,855			
		Máximo	1052,74			
8	A (τ _o - τ _c) *h*S	Promedio	91317,8			60,3556
		Mínimo	76601,2			
		Máximo	106034			
9	A (τ _o - τ _c) *h/S	Promedio	8,94435			59,5852
		Mínimo	7,48594			
		Máximo	10,4028			
10	(A (τ _o - τ _c) *h*w*Γ) /S	Promedio	1,05947			61,1848
		Mínimo	0,8909			
		Máximo	1,22804			
11	(A (τ _o - τ _c) *h) / (S*Gs)	Promedio	23,6737			59,4247
		Mínimo	19,8042			
		Máximo	27,5431			
12	(A (τ _o - τ _c) *h*Gs)/S	Promedio	3,37929			59,7434
		Mínimo	2,8296			
		Máximo	3,92899			
13	(A (τ _o - τ _c) *h*w) /S	Promedio	25,8366			64,1515
		Mínimo	21,9171			
		Máximo	29,7561			
14	(A (τ _o - τ _c) *h*Gs*w)/S	Promedio	9,76035			64,2967
		Mínimo	8,28324			
		Máximo	11,2375			
15	(A (τ _o - τ _c) *h*Gs)/S^B	Promedio	1854,45	-0,36574		60,7075
		Mínimo	-27063	-3,69611		
		Máximo	30771,8	2,96463		
16	(A (τ _o - τ _c) *h*w) /S^B	Promedio	703,021	0,284996		64,8733
		Mínimo	-9431	-2,75303		
		Máximo	10837	3,32302		

Cuadro 3. Modelos ajustados. Pendiente de terreno: 1,5 %. Coeficientes R² de los valores medidos y estimados para la capacidad de desprendimiento de partículas sólidas. Modelos: LM: Lineal Múltiple. NL: No Lineal

N°	Modelos de estimación de D _c (N/m.h). Pendiente: 1.5%	Estimados	Parámetros					R ²
			A	B	C	D	E	
1	$A + (B \cdot \tau_0) + (D \cdot h) + (E \cdot w)$	Promedio	-1274,93	2380,85	0	4481,8	-1339,05	94,2658
		Máximo						
		Mínimo						
2	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h$	Promedio	480,425					78,1847
		Mínimo	430,766					
		Máximo	530,084					
3	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot S$	Promedio	140858					81,7486
		Mínimo	127636					
		Máximo	154081					
4	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot w$	Promedio	1399,4					78,3295
		Mínimo	1255,27					
		Máximo	1543,52					
5	$(A (\tau_0/\tau_c) \cdot h) / S$	Promedio	1,62954					73,7789
		Mínimo	1,44321					
		Máximo	1,81586					
6	$(A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S$	Promedio	0,641088					75,2107
		Mínimo	0,570023					
		Máximo	0,712153					
7	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h$	Promedio	282512					72,6075
		Mínimo	249416					
		Máximo	315608					
8	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot S$	Promedio	3,22022					62,4043
		Mínimo	2,76866					
		Máximo	3,67178					
9	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h / S$	Promedio	0,408748					53,6916
		Mínimo	0,343907					
		Máximo	0,473589					
10	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w \cdot T) / S$	Promedio	0,408748					53,6916
		Mínimo	0,343907					
		Máximo	0,473589					
11	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h) / (S \cdot G_s)$	Promedio	8,15881					60,5686
		Mínimo	6,98246					
		Máximo	9,33515					
12	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S$	Promedio	1,27036					64,179
		Mínimo	1,09714					
		Máximo	1,44358					
13	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w) / S$	Promedio	9,34523					62,0464
		Mínimo	8,02754					
		Máximo	10,6629					
14	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s \cdot w) / S$	Promedio	3,68665					63,8154
		Mínimo	3,18101					
		Máximo	4,19229					
15	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S^B$	Promedio	1,29E+07	-1,83691				77,0951
		Mínimo	-1,56E+08	-4,25464				
		Máximo	1,82E+08	0,580827				
16	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w) / S^B$	Promedio	6,82E+07	-1,7782				77,1105
		Mínimo	-8,57E+08	-4,29914				
		Máximo	9,94E+08	0,742738				

Cuadro 4. Modelos ajustados. Pendiente de terreno: 2,5 %. Coeficientes R² de los valores medidos y estimados para la capacidad de desprendimiento de partículas sólidas. Modelos: LM: Lineal Múltiple. NL: No Lineal

N°	Modelos de estimación de D _c (N/m.h). Pendiente: 2.5%	Estimados	Parámetros					R ²
			A	B	C	D	E	
1	$A + (B \cdot \tau_0) + (C \cdot S) + (D \cdot h) + (E \cdot w)$	Promedio	-97,9538	-16,9703	10064	2735,5	-0,92254	91,0833
		Máximo						
		Mínimo						
2	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h$	Promedio	66,5189					61,0585
		Mínimo	59,2878					
		Máximo	73,7501					
3	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot S$	Promedio	5217,93					40,546
		Mínimo	4501,42					
		Máximo	5934,44					
4	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot w$	Promedio	1,77725					43,4996
		Mínimo	1,54011					
		Máximo	2,01439					
5	$(A (\tau_0/\tau_c) \cdot h) / S$	Promedio	0,819493					72,6579
		Mínimo	0,74574					
		Máximo	0,893246					
6	$(A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S$	Promedio	0,314628					72,1582
		Mínimo	0,28604					
		Máximo	0,343216					
7	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h$	Promedio	103,595					61,4815
		Mínimo	92,3997					
		Máximo	114,79					
8	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot S$	Promedio	8174,34					42,4379
		Mínimo	7072,16					
		Máximo	9276,53					
9	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h / S$	Promedio	1,26648					70,7323
		Mínimo	1,14832					
		Máximo	1,38464					
10	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w \cdot T) / S$	Promedio	0,00175					68,2639
		Mínimo	0,00158					
		Máximo	0,001921					
11	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h) / (S \cdot G_s)$	Promedio	3,2948					70,8842
		Mínimo	2,98825					
		Máximo	3,60135					
12	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S$	Promedio	0,486683					70,4957
		Mínimo	0,441082					
		Máximo	0,532284					
13	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w) / S$	Promedio	0,034995					62,0588
		Mínimo	0,031244					
		Máximo	0,038746					
14	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s \cdot w) / S$	Promedio	0,013417					61,1621
		Mínimo	0,01196					
		Máximo	0,014873					
15	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S^B$	Promedio	1,00E-01	1,35718				71,2893
		Mínimo	-2,36E-01	2,08171				
		Máximo	4,36E-01	71,2893				
16	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w) / S^B$	Promedio	3,23E-04	2,06034				69,1523
		Mínimo	-9,37E-04	1,26007				
		Máximo	1,58E-03	2,86061				

Cuadro 5. Modelos ajustados. Pendiente de terreno: 13 %. Coeficientes R² de los valores medidos y estimados para la capacidad de desprendimiento de partículas sólidas. Modelos: LM: Lineal Múltiple. NL: No Lineal

N°	Modelos de estimación de D _c (N/m.h). Pendiente: 13%	Estimados	Parámetros					R ²
			A	B	C	D	E	
1	$A + (B \cdot \tau_0) + (C \cdot \tau_c) + (D \cdot h) + (E \cdot w)$	Promedio	19,9975	7,48	-40,9	-1413,6	18,851	79,429
		Máximo						
		Mínimo						
2	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h$	Promedio	8,13231					56,931
		Mínimo	7,28364					
		Máximo	8,98099					
3	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot S$	Promedio	350,729					61,574
		Mínimo	316,322					
		Máximo	385,135					
4	$A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot w$	Promedio	18,6671					25,469
		Mínimo	16,0161					
		Máximo	21,318					
5	$(A (\tau_0/\tau_c) \cdot h) / S$	Promedio	0,188127					51,54
		Mínimo	0,167184					
		Máximo	0,209069					
6	$(A (\tau_0/\tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S$	Promedio	0,0726515					52,406
		Mínimo	0,0646438					
		Máximo	0,0806593					
7	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h$	Promedio	11,8554					56,411
		Mínimo	10,6101					
		Máximo	13,1008					
8	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot S$	Promedio	511,026					60,824
		Mínimo	460,368					
		Máximo	561,683					
9	$A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h / S$	Promedio	0,274422					51,278
		Mínimo	0,243781					
		Máximo	0,305063					
10	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w \cdot T) / S$	Promedio	0,0265589					21,431
		Mínimo	0,0226692					
		Máximo	0,0304486					
11	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h) / (S \cdot G_s)$	Promedio	0,710198					50,24
		Mínimo	0,629973					
		Máximo	0,790423					
12	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S$	Promedio	0,10599					52,174
		Mínimo	0,0942766					
		Máximo	0,117704					
13	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w) / S$	Promedio	0,646431					28,123
		Mínimo	0,556545					
		Máximo	0,736318					
14	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s \cdot w) / S$	Promedio	0,248846					27,894
		Mínimo	0,21418					
		Máximo	0,283511					
15	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot G_s) / S^B$	Promedio	1,05E-01	1,2297				28,029
		Mínimo	-1,86E+00	-3,6642				
		Máximo	2,07E+00	6,1236				
16	$(A (\tau_0 - \tau_c) \cdot h \cdot w) / S^B$	Promedio	4,47E-02	1,7123				28,337
		Mínimo	-7,46E-01	-2,8264				
		Máximo	8,36E-01	6,251				

Tabla 6. Modelos ajustados. Coeficientes R^2 de los valores medidos y estimados para la carga de sedimentos. Modelos: Simons, Li, Fullerton y Kilinc

Modelos de estimación de qs (N/m.h). Pendiente: 0.8%		Estimados	Parámetros			R^2
			A	B	C	
Simons, Li, Fullerton	$qs=A^*h^{B*}V^C$	Promedio	76,9721	2,53971	2,05265	70,6338
		Maximo	395,272	3,22007	3,141	
		Minimo	-241,328	1,85936	0,964296	
Killinc	$qs=A^*q^{B*}S^C$	Promedio	0,805197	1,6748	-0,694241	86,7416
		Mínimo	-0,360533	1,30554	2,04406	
		Máximo	1,97093	-0,979884	-0,408597	
Modelos de estimación de qs (N/m.h). Pendiente: 1%		Estimados	Parámetros			R^2
			A	B	C	
Simons, Li, Fullerton	$qs=A^*h^{B*}V^C$	Promedio	355043	3,88547	0,853739	92,4476
		Maximo	1,12E+06	4,63505	1,00388	
		Minimo	-410177	3,1359	0,7036	
Killinc	$qs=A^*q^{B*}S^C$	Promedio	2099,74	1,29492	0,78418	81,6817
		Mínimo	-4516,07	1,09591	0,049533	
		Máximo	8715,55	1,49393	1,51883	
Modelos de estimación de qs (N/m.h). Pendiente: 1.5%		Estimados	Parámetros			R^2
			A	B	C	
Simons, Li, Fullerton	$qs=A^*h^{B*}V^C$	Promedio	673,618	1,27873	2,40658	92,0621
		Maximo	2042,85	1,80738	2,76093	
		Minimo	-695,615	0,750087	2,05223	
Killinc	$qs=A^*q^{B*}S^C$	Promedio	0,0585868	2,18143	-0,969241	86,526
		Mínimo	-0,834102	1,77268	2,59018	
		Máximo	0,951276	-3,55859	1,62011	
Modelos de estimación de qs (N/m.h). Pendiente: 2.5%		Estimados	Parámetros			R^2
			A	B	C	
Simons, Li, Fullerton	$qs=A^*h^{B*}V^C$	Promedio	1067,73	1,41814	0,239211	86,7782
		Maximo	2097,38	1,77719	0,586293	
		Minimo	38,0792	1,05908	-0,107872	
Killinc	$qs=A^*q^{B*}S^C$	Promedio	2009,41	1,0615	1,012880	56,1076
		Mínimo	-7327,18	0,346685	-0,0253623	
		Máximo	11346	1,77632	2,05113	
Modelos de estimación de qs (N/m.h). Pendiente: 13%		Estimados	Parámetros			R^2
			A	B	C	
Simons, Li, Fullerton	$qs=A^*h^{B*}V^C$	Promedio	3041,98	2,20393	0,165999	70,5917
		Maximo	6979,57	2,80365	0,403054	
		Minimo	-895,614	1,60421	-0,0710553	
Killinc	$qs=A^*q^{B*}S^C$	Promedio	478,902	0,575194	0,88824	24,9111
		Mínimo	-10863,6	0,17602	-5,47312	
		Máximo	11821,4	0,974368	7,2496	

REFERENCIAS

1. **Araujo E., Basna S., Da Silva S.,** (2008). Evaluación de factores que originan erosión en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de pie de monte de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 13%. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
2. **Álvarez S., Chaivez E., Latuff A.,** (2008). Evaluación de factores que originan erosión en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 1%. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
3. **Betancourt D., Rendón, J.,** (2008). Evaluación de factores que originan erosión en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 1,5%. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
4. **Julien, P** (1995). Erosión y sedimentación. Universidad de Cambridge. Nueva York
5. **Oviedo H., Mora J. Quintero M.,** (2008). Evaluación de factores que originan erosión en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 2,5%. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
6. **ONU,** (1992). Agenda 21. Consulta en línea: 06/06/08. <http://www.un.org/esa/sustdev/agenda21text.htm%20->
7. **Rodríguez A., Rivero J., Reyna J.,** (2008). Evaluación de factores que originan erosión en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 0,8%. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
8. **Lugo, D., Ortega F., Ramos R.,** (2008). Evaluación de factores que originan el transporte de sedimentos en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 1%. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
9. **López, A., Marin, C, Rojas Y.,** (2008). Evaluación de factores que originan el transporte de sedimentos en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 0,8%. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
10. **Peraza Y., Ramos J., Silva, J.,** (2008). Evaluación de factores que originan el transporte de sedimentos en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de pie de monte de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 13%. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela
11. **Linares G., Morgado E.,** (2008). Evaluación de factores que originan el transporte de sedimentos en una parcela agrícola ubicada en el Sector La Paredaña-zona de vega de la Cuenca del río Chirgua. Caso: suelos de pendiente longitudinal 1,5%. Tesis de Grado. Universidad de Carabobo. Venezuela