

# Parámetros de erosionabilidad del modelo WEPP para andosoles con uso pecuario en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán

## WEPP erodibility parameters for Andisols under rangeland use in the Patzcuaro Lake Watershed, Michoacan, Mexico

Miguel Bravo-Espinosa<sup>a</sup>, Luis E. Fregoso-Tirado<sup>a</sup>, Lenin E. Medina-Orozco<sup>b</sup>

### RESUMEN

El objetivo del estudio fue determinar los parámetros de erosionabilidad del modelo de erosión WEPP (Water Erosion Prediction Project) en un andosol con uso pecuario, en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. El trabajo de campo se realizó en junio de 2001. Se usó un simulador de lluvia con aspersor-solenoides estacionario. Las mediciones del desprendimiento laminar se efectuaron en parcelas de 0.5 m de ancho por 1.2 m de largo, y la erosión del flujo concentrado en parcelas de 1 m de ancho por 3 m de largo; en ambos casos se usó un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones. El contenido de humedad del suelo afectó significativamente el escurrimiento y el desprendimiento laminar, y la densidad aparente de la capa superficial del suelo fue estadísticamente menor con el uso agrícola respecto del pecuario. Los parámetros de erosionabilidad laminar y acanalada del suelo con uso pecuario fueron  $774.7 \times 10^3 \text{ kg seg m}^{-4}$  y  $0.5 \times 10^{-4} \text{ seg m}^{-1}$ , respectivamente. Al comparar estos valores con los reportados en la literatura, se puede establecer que el Andosol estudiado con uso pecuario, presentó una susceptibilidad moderada a la erosionabilidad laminar y susceptibilidad baja a la erosionabilidad acanalada. El pisoteo del ganado provocó la compactación del suelo, lo que a su vez pudo haber limitado la erosividad del flujo concentrado, y con ello, probablemente la erosión acanalada del suelo.

**PALABRAS CLAVE:** Erosionabilidad laminar, Erosionabilidad acanalada, Esfuerzo-cortante crítico.

### ABSTRACT

The aim of this study was to determine the soil-erodibility parameters of the WEPP erosion model (Water Erosion Prediction Project) for an Andisol used to raise cattle in the Patzcuaro Lake watershed, Michoacan, Mexico. It was used a solenoid-operated rainfall simulator. Interrill detachment was measured in 0.5 m wide, 1.2 m long plots, and the detachment of flowing water was measured in 1 m wide, 3 m long plots; in both cases it was used a completely randomized design with four replications. Soil moisture affected runoff and interrill erosion, whereas the bulk density of the surface layer was lower in the cropland use than under the rangeland use. The interrill and rill erodibility parameters were  $774.7 \times 10^3 \text{ kg sec m}^{-4}$ , and  $0.5 \times 10^{-4} \text{ sec m}^{-1}$ . These values in comparison with those reported in the literature permit to establish that the rangeland Andisol under study showed a moderated susceptibility to interrill erodibility and low detachment of flowing water. Soil compaction due to livestock trampling may have limited the erosivity of the concentrated flow and therefore the rill erosion.

**KEY WORDS:** Interrill erodibility, Rill erodibility, Critical-hydraulic shear.

Los sistemas mixtos cultivo-ganado de pequeña escala ocupan aproximadamente 2,500 millones de hectáreas y son la fuente principal de carne y leche

Cattle-crop production systems in smallholder units cover near 2,500 million hectares, and they constitute the main meat and milk source of the

Recibido el 30 de agosto de 2004 y aceptado para su publicación el 29 de septiembre de 2005.

<sup>a</sup> Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Producción Sostenible (CENAPROS). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Km 18.5 carretera Morelia-Aeropuerto (La Carreta) 58920 Álvaro Obregón, Mich.. AP 7-116, Morelia Mich. bravo\_miguel@infosel.net.mx Correspondencia al primer autor.

<sup>b</sup> IRENAT. Colegio de Postgraduados.

en el mundo<sup>(1)</sup>. Los sistemas de producción que integran exitosamente las actividades agrícolas y pecuarias tienen la posibilidad de ganar sinergias que impactan en las eficiencias de producción y agroecológicas<sup>(2,3)</sup>. Las áreas de uso pecuario cubren importantes funciones, como zonas de pastoreo, recreación, hábitats de fauna silvestre y cuencas productoras de agua; sin embargo, debido al sobrepastoreo y en general al mal manejo, la erosión que se produce en ellas, que es menor a la producida en áreas agrícolas<sup>(4)</sup>, disminuye la calidad y disponibilidad de agua en el suelo.

Los andosoles cubren 2.35 millones de hectáreas en el territorio nacional<sup>(5)</sup>. Se originan a partir de cenizas volcánicas con propiedades ándicas, resultantes de la presencia de materiales no cristalinos asociados con ácidos húmicos, poseen alto contenido de materia orgánica (1.5 a 20 %), alta porosidad (60 a 80 %), permeabilidad (24 a 90 mm h<sup>-1</sup>) y retención de humedad (30 a 60 %), microagregados estables (1 a 10 mm diámetro) y baja densidad aparente ( $\leq 0.9$  g cm<sup>-3</sup>); sin embargo, presentan deficiencias nutrimentales (fijación de fósforo, toxicidad por aluminio, etc), que pueden inhibir la actividad microbológica, y cuando están secos, pierden las mejores características físicas<sup>(6)</sup>.

En México existen avances en la utilización de nuevas tecnologías de predicción de la erosión en áreas de pastoreo<sup>(7,8)</sup>, las cuales deben ser aplicadas. Los modelos de predicción con mayor capacidad predictiva que la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS), como lo es el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), requieren bases de datos que son escasas en México. El modelo WEPP es de tipo distribuido y de simulación continua basado en procesos físicos, diseñado para cuantificar el desprendimiento de las partículas de suelo, su transporte y sedimentación<sup>(9)</sup>. Para su aplicación efectiva se requiere determinar los parámetros de erosionabilidad laminar, erosionabilidad acanalada y el esfuerzo-cortante crítico en las condiciones en las cuales el modelo deberá utilizarse. En la literatura no existe información sobre la erosionabilidad que presentan los andosoles con uso pecuario.

world<sup>(1)</sup>. Those successful cattle production systems that integrate farm activities have the possibility of gaining synergisms that affect production and agroecological efficiency favorably<sup>(2,3)</sup>. Rangelands cover important functions such as livestock grazing, recreation, wildlife habitat, and water-production basins; however, due to overgrazing and in general due to inappropriate management, erosion from rangelands, although lower than that present in croplands<sup>(4)</sup>, diminishes water quality and water availability into the soil.

Andisols cover 2.35 million hectares in Mexico<sup>(5)</sup>. Those soils are originated from volcanic ashes with andic soil properties that result from the presence of non-crystalline materials associated with humic acids, their organic matter content is high (1.5 to 20 %), their porosity is also high (60 to 80 %), permeability (24 to 90 mm h<sup>-1</sup>), and they have high water holding capacity (30 to 60 %). They present also stable microaggregates (1 to 10 mm diameter), and low bulk density ( $\leq 0.9$  g cm<sup>-3</sup>). However, they present nutrient deficiencies (sorption of phosphorous, toxicity by aluminum, etc) that might inhibit microbiological activity, and when dry, they lost their best physical characteristics<sup>(6)</sup>.

In Mexico, there are several advances on new erosion-prediction technologies applied on grazing areas<sup>(7,8)</sup>, which must be used. Erosion prediction models with higher capacity than that of the Universal Soil Loss Equation (USLE), such as the WEPP model (Water Erosion Prediction Project) require data basis that are scarce in Mexico nowadays. The WEPP erosion model is of distributed type based on physical processes that was designed to quantify soil-particle detachment, its transport, and sedimentation<sup>(9)</sup>. To apply this model effectively it is necessary to determine the interrill and rill erodibility, and the critical-hydraulic shear values under which the model shall be used. In the literature there is not information on the erodibility of Andisols under rangeland use.

In the Patzcuaro Lake watershed, extensive cattle production management systems are predominant and they are closely related to agroforestry and to the system known locally as “año y vez” in which

En la cuenca del lago de Pátzcuaro, Michoacán, predominan los manejos extensivos de ganado estrechamente vinculados con la actividad agroforestal con el sistema conocido localmente como ‘año y vez’; en donde se considera que existe un exceso de carga animal<sup>(10,11,12)</sup>.

Con base en lo anterior, en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, se desarrolló un estudio sobre la erosionabilidad del suelo andosol con usos agrícola y pecuario, determinándose la erosionabilidad laminar, erosionabilidad acanalada y el esfuerzo-cortante crítico del suelo con uso pecuario.

Los experimentos de erosionabilidad del suelo se realizaron durante junio de 2001. El trabajo experimental de campo se desarrolló en un sitio que tiene una pendiente de 10 %, ubicado en el km 18 de la carretera federal Pátzcuaro-Uruapan (19° 29' 34" N; 101° 44' 52" O y 2300 msnm), sujeto al pastoreo durante los últimos diez años (Figura 1). El clima es templado subhúmedo con temperatura media anual que varía de 14 a 17 °C y precipitación de 1000 mm anuales, con un balance positivo de la precipitación respecto de la evaporación  $[C(w_2)(w)bi]$ <sup>(13)</sup>. En la cuenca, los principales tipos de vegetación son el bosque de *Pinus*, bosque de *Pinus-Quercus*, matorrales de *Baccharis-Senecio*, y pastizales<sup>(14)</sup>. Los suelos andosoles y luvisoles cubren el 70 % del área de la cuenca. En cuanto al uso del suelo resaltan la superficie arbolada (32 %), seguida por la pecuaria (31 %) y finalmente la laborable (22 %). Gran parte de la superficie agrícola se maneja con el sistema de *año y vez*, que es un sistema de complementariedad entre la actividad agrícola con la pecuaria, el cual consiste en cultivar la tierra con maíz un año, dejándola después para el pastoreo de ganado durante 1 a 3 años<sup>(15)</sup>.

En el Cuadro 1 se presentan algunas características físicas del sitio donde se desarrolló el presente estudio. En dicho sitio coexistían matorrales y gramíneas; entre las especies presentes figuraron *Eragrostis intermedia*, *Setaria geniculata*, *Vulpia myuros*, *Cynodon spp.*, *Muhlenbergia spp.*, *Pennisetum spp.*, *Sporobolus spp.*, *Aegopogon spp.*,

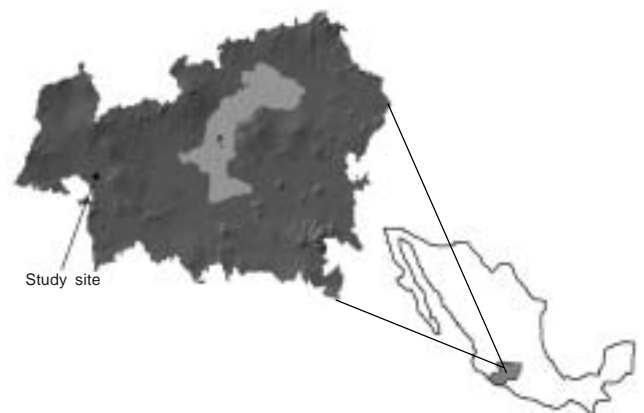
it is considered that there is an excessive animal stocking density<sup>(10,11,12)</sup>.

Based on the above mentioned facts, a study on Andisols devoted to agricultural and cattle production in the Patzcuaro Lake watershed was carried out, in which it was, determined the interrill and rill soil-erodibility, and the critical-hydraulic shear values of the soil used for cattle production.

Soil erodibility experiments were done in June 2001. The field experimental work was developed on a 10 % steep land devoted to grazing during 10 years, sited on the km 18 of the federal Patzcuaro-Uruapan road (19° 29' 34" N; 101° 44' 52" W) at 2,300 m above sea level (Figure 1). The climate is temperate subhumid, with a mean annual temperature that varies from 14 to 17 °C, and 1,000 mm annual rainfall, with a positive rainfall/evaporation balance  $[C(w_2)(w)bi]$ <sup>(13)</sup>. Main vegetation types in the watershed are: *Pinus* and *Pinus-Quercus* forests, *Baccharis-Senecio* shrubs, and pastures<sup>(14)</sup>. Andisols and Luvisols cover 70 % of the watershed area. Regarding the soil use, 32 % is covered by trees, 31 % is devoted to cattle production, and 22 % is agricultural land. A large area of the agricultural land is managed under the “año y vez” system, in which the agricultural activity is complemented with cattle production. The land under this system is cultivated with corn one year,

Figura 1. Ubicación del sitio de estudio en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Mich

Figure 1. Study site location in the Patzcuaro Lake watershed



*Baccharis conferta*, y *Senecio spp.*, con una condición de regular a pobre, correspondiéndole un índice de agostadero bajo (> 11.8 ha por UA)<sup>(16)</sup>. El área experimental, ocupada solamente por gramíneas, fue podada a una altura de 2 cm, y los residuos (hojas y pequeñas ramas de la vegetación nativa) y piedras pequeñas fueron removidos de la superficie según la metodología utilizada<sup>(17,18)</sup>. El sitio presentó una predregosidad leve, con tamaños de piedra de 6 a 15 cm de diámetro. Después de la poda y remoción de residuos y piedras en cada parcela, en ésta se determinó la cobertura basal. Para ello, en posición vertical y a una distancia de 1.5 m del suelo se tomaron fotografías digitales a color de cada parcela, las cuales se exportaron a un sistema de información geográfica (ILWIS 3.1), y con el procedimiento de clasificación supervisada se determinó el porcentaje de suelo cubierto por la vegetación. No se realizó ningún laboreo del suelo en el área experimental.

Se usó un simulador de lluvia con aspersor-solenoides estacionario<sup>(19)</sup>. Las mediciones de la erosionabilidad laminar se efectuaron en parcelas de 0.5 m de ancho por 1.2 m de largo con cuatro repeticiones. Para delimitar las parcelas y evitar el flujo subsuperficial y salpicaduras de la parcela hacia fuera o viceversa, se usaron tiras de lámina de 1.5 m de largo por 0.30 m de ancho, las cuales se enterraron aproximadamente 10 cm. En la parte inferior de las parcelas se ubicaron aforadores para la medición y muestreo del escurrimiento. Las pruebas de erosionabilidad laminar se desarrollaron en tres etapas: (1) en suelo seco, se aplicaron 60 min de lluvia simulada o hasta que se alcanzó equilibrio en el escurrimiento; (2) en suelo húmedo, 24 h después de la primera etapa, se liberaron 30

and left for cattle grazing during a period from one to three years<sup>(15)</sup>.

Some physical characteristics of the site where the study was done are showed in Table 1. In the site there were shrubs and gramineous plants. Some of the species were: *Eragrostis intermedia*, *Setaria geniculata*, *Vulpia myuros*, *Cynodon spp.*, *Muhlenbergia spp.*, *Pennisetum spp.*, *Sporobolus spp.*, *Aegopogon spp.*, *Baccharis conferta*, and *Senecio spp.* The site presented a regular to poor condition, with a low cattle stocking density (> 11.8 ha for animal unit)<sup>(16)</sup>. The experimental area on which there were only gramineous plants was clipped to a 2 cm height, residues (native vegetation leaves and little branches), and small cobbles were removed from the soil surface according to the used methodology<sup>(17,18)</sup>. The site presented low stoniness with cobbles from 6 to 15 cm diameter. After clipping, residue and stone removal, the basal cover of each plot was determined taking digital color photos from vertical position at 1.5 m from the soil. Photos were exported to a geographic information system (ILWIS 3.1), and using the supervised classification procedure, the percentage of soil covered by vegetation was determined. Not any tillage was applied to the experimental plot area.

A rainfall simulator with a stationary solenoid-nozzle spray<sup>(19)</sup> was used. Soil interrill erosion measurements were done in 0.5 m wide, 1.2 m long plots with four replications. To limit each plot, and to avoid subsurface flow and rain-splash to or from plot, 1.5 m long, 0.30 m wide sheet metal stripes were placed around each plot burying around 10 cm. At the lower part of each plot a flume was placed to

Cuadro 1. Características de la capa superficial del suelo en el sitio de estudio

Table 1. Soil superficial layer characteristics in the study site

Deepness (cm)	Characteristic							
	Sand (%)	Clay (%)	BD (g cm <sup>-3</sup> )	OM (%)	CEC (meq 100 g <sup>-1</sup> )	pH	VM*	VM**
0-15	37.0	12.0	0.89	2.23	38.9	6.4	53.7	30.1

BD= bulk density; OM= organic matter; CEC= cation exchange capacity; VM\*= volumetric moisture, water hold at 33 kPa; VM\*\*= volumetric moisture, water hold at 1500 kPa.

min de lluvia; y (3) en suelo muy húmedo, 30 min después de concluida la segunda etapa, se aplicaron 30 min de lluvia.

El desprendimiento del flujo concentrado se midió en parcelas de 1 m de ancho por 3 m de largo con cuatro repeticiones. Cada prueba de flujo concentrado se desarrolló en tres etapas<sup>(17,18)</sup>. En la primera etapa se aplicó, sobre suelo seco, una lluvia simulada de 60 min de duración o hasta alcanzar el equilibrio en el escurrimiento. La segunda etapa, que tuvo una duración de 30 min, comenzó 24 h después de finalizada la primer etapa y sólo incluyó el uso del simulador de lluvia; y la tercer etapa inició 30 min después de concluida la segunda etapa y consistió en una simulación de lluvia por 30 min, más la aplicación de dos flujos de agua limpia (14 y 27 L min<sup>-1</sup>), suministrados superficialmente desde la parte superior de cada parcela.

La intensidad de la lluvia aplicada en cada periodo de simulación fue estimada mediante la lectura de la lluvia acumulada, en intervalos de 5 min en dos pluviómetros de cuña, colocados en forma diagonal sobre la parcela. El escurrimiento total de cada prueba se colectó y midió a intervalos de 5 min. En cada intervalo se colectó una muestra de un litro para la determinación de la concentración de sedimentos por gravimetría. Después de cada corrida se registró la pendiente de la parcela, el ancho y la profundidad de los canalillos formados, y se elaboró un registro fotográfico a color antes y durante las simulaciones. Además, se tomaron muestras de suelo para determinar la densidad aparente y el contenido de humedad en el área experimental, y en parcelas agrícolas vecinas.

La infiltración inicial se obtuvo como la diferencia entre la intensidad de la lluvia (mm h<sup>-1</sup>) y la tasa de escurrimiento 5 min después de iniciada ésta, para la primera etapa de 60 min. La infiltración básica se calculó como la diferencia entre la intensidad de la lluvia y la tasa de escurrimiento al ocurrir el equilibrio en la segunda etapa de 30 min de lluvia<sup>(4)</sup>. Para conocer las diferencias en las intensidades de lluvia, ocasionadas por el funcionamiento del equipo o por pequeñas corrientes

measure and sampling runoff. Soil interrill erodibility tests were developed in three phases: (1) on dry soil conditions, 60 min of rainfall simulation or more up to get the runoff equilibrium was applied; (2) 30 min of simulated rainfall was applied to wet soil, 24 h after the dry run, and (3) 30 min of simulated rainfall was applied to very wet soil, 30 min after the second phase. Soil rill erodibility measurements were conducted in 3 m long, 1 m wide plots with four replicates. Each concentrated flow test was developed in four phases<sup>(17,18)</sup>. In the first phase, 60 min or more up to get the runoff equilibrium of simulated rainfall was applied to dry soil; the second phase included only the rainfall simulation during 30 min starting 24 h after finishing the second phase; the third phase was started 30 min after finishing the second phase that consisted of 30 min of simulated rainfall plus two rates of clean-water flow (14 and 27 L min<sup>-1</sup>) applied superficially from the upper end of each plot.

Rainfall intensity applied during each rainfall simulation run was estimated at 5 min intervals in two direct-reading rain gauges placed diagonally on the runoff plot. Total runoff volume from each run was collected and measured at 5 min intervals. At each interval a liter sample was collected to determine the total sediment concentration. After each run the plot slope, and the formed rills wideness and deepness were recorded, and a color photographic register was elaborated before and during rainfall simulations. Moreover, soil samples were taken to determine its bulk density and soil moisture content in the experimental area, and in neighboring agricultural plots around.

Initial infiltration rate was determined as the difference between rainfall intensity (mm h<sup>-1</sup>), and the runoff rate 5 min after runoff began for the first 60 min phase. Final infiltration rate was calculated as the difference between the rainfall intensity and the runoff rate at equilibrium occurrence in the second phase in which simulated rainfall was applied during 30 min<sup>(4)</sup>. To recognize differences among rainfall intensities due to equipment performance or wind effects, runoff coefficients were determined by dividing the total runoff volume between the precipitated volumes

de aire, se determinaron coeficientes de escurrimiento, dividiendo el volumen total escurrido entre el volumen precipitado durante cada secuencia de simulación. Con base en los valores documentados por Elliot *et al* (20) para suelos franco arenosos, la velocidad promedio del flujo se estimó usando un valor de 0.619 para el cociente entre la velocidad promedio y la velocidad máxima.

El valor representativo de la tasa de desprendimiento laminar para cada parcela ( $D_i$ ) se obtuvo promediando, para cada secuencia de prueba, la totalidad de mediciones realizadas en cada parcela(17). Para cada parcela, el parámetro de erosionabilidad laminar ( $K_i$ ) se obtuvo resolviendo las ecuaciones (1) y (2) para  $K_i$ (21,22):

$$D_i = K_i I^2 S_f \dots\dots\dots (1)$$

donde  $D_i$  es la tasa de desprendimiento de sedimento del área laminar ( $\text{kg m}^{-2} \text{seg}^{-1}$ ),  $K_i$  es la constante de erosionabilidad laminar ( $\text{kg seg m}^{-4}$ ),  $I$  es la intensidad de la lluvia aplicada ( $\text{m seg}^{-1}$ ) y  $S_f$  es un factor de ajuste por pendiente expresado como:

$$S_f = 1.5 - 0.85 \exp(-4 \sin \alpha) \dots\dots\dots (2)$$

donde  $\alpha$  es el ángulo de la pendiente de la superficie que drena hacia el canalillo más próximo. Para este caso, el ángulo de la pendiente ( $\sin \alpha$ ) hacia el canalillo más próximo fluctuó entre 3.4 y 5.9°.

Los datos obtenidos en la tercera etapa, la cual consistió en el suministro de lluvia artificial más agua superficial, se usaron para determinar los parámetros de erosionabilidad acanalada y esfuerzo-cortante crítico. La erosionabilidad acanalada se relacionó con la tasa de desprendimiento por medio del esfuerzo-hidráulico-cortante promedio. El esfuerzo cortante ( $t$ ) se obtuvo con la siguiente expresión:

$$\tau = \gamma R S \dots\dots\dots (3)$$

donde  $\gamma$  es el peso específico del agua ( $\text{N m}^{-3}$ ),  $R$  es el radio hidráulico (m), y  $S$  es la pendiente del canalillo (%). La tasa de desprendimiento por flujo acanalado ( $D_r$ ) se determinó dividiendo la tasa de transporte de sedimento entre el largo y ancho del canalillo, cuyo cociente fue ajustado por la

during each rainfall simulation run. Based on values documented by Elliot *et al*(20) for sandy loam soils, the average flow velocity was estimated using a 0.619 value for the quotient between the average velocity and the maximum velocity of the flow.

The representative value of the interrill delivery rate for each plot ( $D_i$ ) was obtained by averaging for each test sequence, the total measurements from each plot(17). The interrill soil parameter ( $K_i$ ) for each plot was obtained solving the equations (1) and (2) for  $K_i$ (21,22)

$$D_i = K_i I^2 S_f \dots\dots\dots (1)$$

Where  $D_i$  is the interrill detachment rate ( $\text{kg m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ ),  $K_i$  is the interrill erodibility constant ( $\text{kg sec m}^{-4}$ ),  $I$  is the effective rainfall intensity ( $\text{m sec}^{-1}$ ), and  $S_f$  is the slope adjustment factor expressed as:

$$S_f = 1.5 - 0.85 \exp(-4 \sin \alpha) \dots\dots\dots (2)$$

Where  $\alpha$  is the slope angle that drains to the next rill. For this case, the slope angle ( $\sin \alpha$ ) to the neighboring rill fluctuated between 3.4 and 5.9°.

Data obtained from the third phase, which consisted in the provision of artificial rainfall plus superficial clean water, were used to determine the rill erosion parameter and the critical-hydraulic shear. The rill erosion was related to the detachment rate by the mean hydraulic shear value. The hydraulic shear ( $t$ ) was obtained using the following equation:

$$\tau = \gamma R S \dots\dots\dots (3)$$

Where ( $\gamma$ ) is the specific weight of water ( $\text{N m}^{-3}$ ),  $R$  is hydraulic radius (m), and  $S$  is the rill slope (%). The detachment rate ( $D_r$ ) of flowing water was determined dividing the sediment transport rate between the rill length and wideness, whose quotient was adjusted by the interrill erodibility to detached sediment ( $E$ ); it was found by the following equation:

$$E = D_i \frac{\text{Spacing between rills} - w}{w} \dots\dots\dots (4)$$

Where  $w$  is the rill width. The average hydraulic shear was related to the detachment rate of flowing water ( $D_r$ ).

contribución de la erosionabilidad laminar (E), la cual se determinó utilizando la siguiente expresión:

$$E = D_i \frac{\text{Separación entre canalillos} - w}{w} \dots\dots\dots (4)$$

donde w es el ancho del canalillo. El esfuerzo-hidráulico-cortante promedio fue relacionado con la tasa de desprendimiento por flujo acanalado ( $D_r$ ).

Con base en los estudios de Foster *et al*(23), donde se propone una relación lineal entre la tasa de desprendimiento por flujo concentrado y el esfuerzo-hidráulico cortante, se estableció que el parámetro de erosionabilidad acanalada es igual a la pendiente de la línea de regresión, y el esfuerzo-cortante crítico se determina, cuando la tasa de desprendimiento por flujo concentrado es igual a cero(17,24). Existen estudios donde se reportan procedimientos de optimización para resolver la ecuación de continuidad de la erosión por medio de un proceso matemático(25); sin embargo, los resultados obtenidos no han sido mejores que los que ofrece el método de regresión empleado en el presente trabajo (W. Elliot; Comunicación personal, 2001).

En las parcelas experimentales la cobertura vegetal presente fue de 35 a 48 %. Estudios de erosión muestran que una cobertura mayor de 30 % puede reducir el impacto de la lluvia y el efecto erosivo del escurrimiento(4). En las pruebas de erosionabilidad laminar la intensidad de la lluvia simulada fluctuó entre 69.6 y 75.9 mm h<sup>-1</sup>, con

Based on Foster *et al*(23) studies, in which a linear relationship between the rill detachment rate and the hydraulic shear was proposed, it was established that the soil rill erodibility parameter is equal to the regression slope, and that the critical-hydraulic shear is determined when the detachment rate is equal to zero(17,24). Some studies reported optimization procedures to solve the erosion equation of continuity by means of a mathematical process(25); however, the results obtained using that procedure have not been better than those offered by the regression method used herein (W. Elliot; personal communication, 2001).

Vegetation cover on the experimental plots varied from 35 to 48 %. Erosion studies have been demonstrated that a vegetal cover greater than 30 % might reduce the rainfall impact and the runoff erosive effects(4). In the soil interrill erosion tests, the rainfall-simulation intensities fluctuated from 69.6 to 75.9 mm h<sup>-1</sup>, presenting a mean value of 72.3 mm h<sup>-1</sup>. The initial infiltration rate averaged 50.4 mm h<sup>-1</sup> and the final infiltration rate was 22.2 mm h<sup>-1</sup> ( $P < 0.01$ , CV=14.3).

Antecedent soil moisture condition influenced the runoff (Table 2). Runoff increased as the gravimetric soil water content increased ( $P = 0.002$ , CV=12.2) from dry soil (26 % water content) to wet soil (45 %) or very wet soil (58 %). Soil losses followed the same trend. The mean runoff coefficient value was 0.51, 0.70, and 0.85 for dry, wet, and very wet respectively, but only the dry condition was different

Cuadro 2. Escurrimiento superficial y coeficientes de escurrimiento para tres condiciones del suelo

Table 2. Runoff and runoff coefficients for three soil wet conditions

Repetition	Runoff (mm h <sup>-1</sup> )			Runoff coefficients		
	Dry	Wet	Very wet	Dry	Wet	Very wet
1	47.3	50.8	67.6	0.62	0.69	0.96
2	36.7	48.2	51.1	0.48	0.52	0.73
3	32.3	58.8	62.8	0.41	0.81	0.89
4	38.4	56.8	60.4	0.53	0.78	0.85
Average	38.7 <sup>b</sup>	53.6 <sup>a</sup>	60.5 <sup>a</sup>	0.51 <sup>b</sup>	0.70 <sup>a</sup>	0.85 <sup>a</sup>

ab Values without a common letter among soil-wet conditions for runoff and runoff coefficients are different ( $P < 0.05$ ).

un valor medio de 72.3 mm h<sup>-1</sup>. La velocidad promedio de infiltración inicial y final fue de 50.4 y 22.2 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente ( $P < 0.01$ , CV=14.3).

La condición antecedente del contenido de humedad del suelo influyó sobre el escurrimiento (Cuadro 2). El escurrimiento se incrementó a medida que la humedad gravimétrica del suelo aumentó ( $P = 0.002$ , CV= 12.2) de suelo seco (contenido de humedad: 26 %) a suelo húmedo (45 %) o muy húmedo (58 %). Esta tendencia también se mantuvo para las pérdidas de suelo. El valor promedio del coeficiente de escurrimiento fue de 0.51, 0.70 y 0.85 para las condiciones seca, húmeda y muy húmeda, respectivamente; empero, sólo la condición seca fue diferente de las otras condiciones de humedad (Cuadro 2,  $P = 0.004$ , CV=15.4).

El desprendimiento laminar del suelo aumentó ( $P = 0.03$ , CV=34.6) al pasar de la condición seca a la húmeda, sin embargo, éste no se incrementó bajo la condición muy húmeda (Cuadro 3). Este comportamiento probablemente se explica porque, la altura de la lámina de agua que se formó en la superficie durante la condición húmeda, probablemente afectó el impacto de las gotas de lluvia y con ello el desprendimiento laminar. Diversos autores han reportado que el desprendimiento laminar ocurre cuando esta capa de agua es muy superficial o está ausente<sup>(26,27)</sup>, y cuando la capa de agua es mayor

from the other wet conditions (Table 2,  $P = 0.004$ , CV=15.4).

Soil interrill detachment rate increased ( $P = 0.03$ , CV=34.6) when going from the dry to wet condition, however, detachment did not increase when going to very wet condition (Table 3). Probably, this soil behavior may be due to the fact that the depth of the water layer formed on the soil surface during the time it was under wet condition affected the rain drops impact and therefore the interrill detachment. Several authors have reported that interrill detachment occurs when that depth of the flow is very shallow or it does not exist<sup>(26,27)</sup>. When the flow depth is over 2 mm, the splash diminishes, as well as the interrill detachment. Studies carried out in other parts of the world to determine the cattle grazing effect showed that the potential runoff (suspended solids and nutrients) and the water erosion may be influenced by animal type, vegetal cover of the rangeland, cattle stocking density, grazing time length, soil texture and structure, and soil organic matter content<sup>(29)</sup>. Also the soil water content at the moment of animal trampling is critical<sup>(30,31)</sup>.

Average values of the soil interrill erodibility parameter ( $K_i$ ) measured in this study were: 407.2 x 10<sup>3</sup>, 937.5 x 10<sup>3</sup>, and 979.6 x 10<sup>3</sup> kg sec m<sup>-4</sup> for dry, wet, and very wet soil condition, respectively (Table 3). Considering Laflen *et al.*<sup>(17)</sup>

Cuadro 3. Tasas de desprendimiento laminar y valores del parámetro de erosionabilidad laminar para tres condiciones del suelo

Table 3. Interrill detachment rates and interrill erodibility parameter values for three soil wet conditions

Repetition	Interrill detachment rate $D_i$ (g m <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> )			Interrill erodibility parameter $K_i$ (kg seg m <sup>-4</sup> )		
	Dry	Wet	Very wet	Dry	Wet	Very wet
1	1.08	2.26	3.06	422,180	917,280	1,390,850
2	0.90	1.64	1.13	341,265	729,670	513,980
3	0.81	2.48	1.71	471,700	1,223,960	1,008,550
4	0.70	1.53	1.75	393,720	879,080	1,005,220
Average	0.87 <sup>b</sup>	1.98 <sup>a</sup>	1.91 <sup>a</sup>	407,216 <sup>b</sup>	937,497 <sup>a</sup>	979,650 <sup>a</sup>

<sup>ab</sup> Values without a common letter among soil-wet conditions for delivery of sediment and interrill erodibilities are different ( $P < 0.05$ ).



que 2 mm, el salpicado disminuye e igualmente se reduce la tasa de desprendimiento laminar<sup>(28)</sup>. En estudios realizados en otras partes del mundo para dilucidar el efecto del ganado pastando, muestran que el escurrimiento potencial (sólidos suspendidos y nutrientes) y la erosión hídrica pueden ser influidos por el tipo de animales, la cobertura de la pradera, la carga animal y la duración del pastoreo, la textura y estructura del suelo, y el contenido de materia orgánica<sup>(29)</sup>. También la humedad del suelo al momento del pisoteo del animal es crítica<sup>(30,31)</sup>.

Los valores promedio del parámetro de erosionabilidad laminar ( $K_i$ ) medidos en este estudio fueron de  $407.2 \times 10^3$ ,  $937.5 \times 10^3$  y  $979.6 \times 10^3$  kg seg  $m^{-4}$  para suelo seco, húmedo y muy húmedo, respectivamente (Cuadro 3). Considerando la propuesta de Laflen *et al*<sup>(17)</sup>, el valor final de  $K_i$  se obtuvo utilizando los promedios obtenidos para cada condición o periodo. Es decir, el parámetro  $K_i$  con uso pecuario fue de  $774.7 \times 10^3$  kg seg  $m^{-4}$ . Para suelos de textura arenosa a franco arenosa, en la base de datos del modelo WEPP<sup>(17)</sup>, se reportaron valores de  $K_i$  que varían de  $145 \times 10^3$  a  $939.7 \times 10^3$  kg seg  $m^{-4}$ . En la cuenca del Lago de Pátzcuaro para un andosol con uso agrícola y labranza tradicional, se determinó un valor promedio del

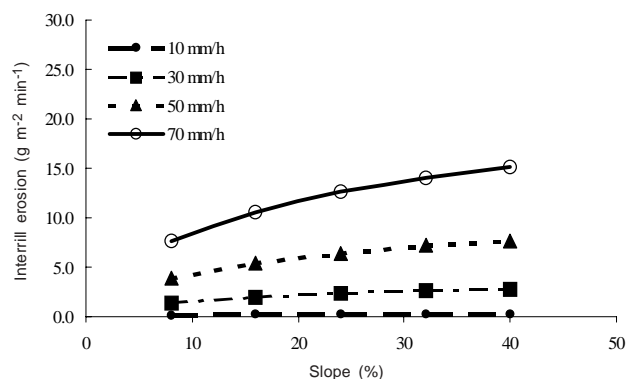
proposal, the final  $K_i$  value was obtained using the average values obtained for each condition or period. That is,  $K_i$  parameter for the rangeland soil was  $774.7 \times 10^3$  kg sec  $m^{-4}$ . For sandy and sandy loam soils,  $K_i$  values reported in the WEPP model data base<sup>(17)</sup> varied from  $145 \times 10^3$  to  $939.7 \times 10^3$  kg sec  $m^{-4}$ . A rill erodibility parameter average value of  $1,262 \times 10^3$  kg sec  $m^{-4}$  <sup>(32)</sup> was determined for an Andisol under agricultural use farmed with traditional tillage in the Patzcuaro Lake watershed. These results suggest that in the rangeland use of Andisols, detachment rates due to rainfall impact were moderate and lower than those for Andisols under cropland use.

High intensities in natural rainfall events, like those applied with the rainfall simulator, are not frequent in the region; however, scenarios with different slope, and increasing rainfall intensities were simulated to determine their effect on interrill erosion (Figure 2). Based on the scenarios interpretation, it is confirmed that interrill erosion rates on grazing hill slope lands are moderate even if intense rainfalls of short duration occur.

In the experiments of this study, in a notorious way, particle soil detachment by flowing water was not in incision forms or rills. Bulk density is a physical characteristic that influence porosity and soil compaction. An 18 cm deep superficial compacted layer created by the cattle trampling (Table 4) may have limited the rill formation and

Figura 2. Efecto de la pendiente del suelo y la intensidad de lluvia sobre la erosión laminar en un suelo andosol con uso pecuario

Figure 2. Effect of soil slope and rainfall intensity on interrill erosion of an Andisol under rangeland use



Cuadro 4. Densidad aparente para dos usos del suelo andosol y tres profundidades

Table 4. Soil bulk density for an Andisol under two landuses and three deepness

Deepness (cm)	Rangeland use (g cm <sup>-3</sup> )	Cropland use (g cm <sup>-3</sup> )
0 - 6.0	0.83 a	0.71 b
6.0 - 12.0	0.92 a	0.71 b
12.0 - 18.0	0.92 a	0.71 b
Average	0.89	0.71

ab Values without a common letter among soil depths for rangeland and cropland are different ( $P < 0.05$ ).

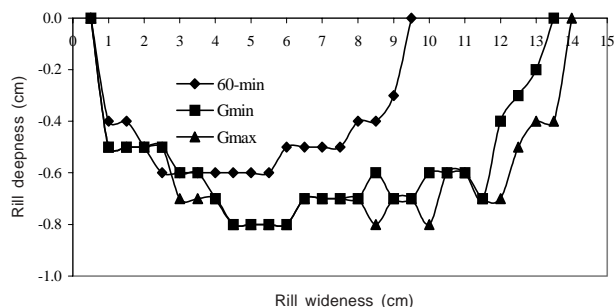
parámetro de erosionabilidad acanalada de  $1,262 \times 10^3 \text{ kg seg m}^{-4}$ (32). Estos resultados sugieren que, en los andosoles con uso pecuario, las tasas de desprendimiento por impacto de la lluvia fueron moderadas y menores que con uso agrícola.

En la región no son comunes los eventos de lluvias con alta intensidad como las utilizadas durante los experimentos con lluvia artificial, sin embargo, se simularon escenarios con diferente pendiente e intensidad de lluvia creciente para conocer su efecto sobre la erosión laminar (Figura 2). Con base en la interpretación de estos escenarios, se confirma que las tasas de erosión laminar en suelos escarpados sujetos al pastoreo son moderadas, incluso si ocurren intensidades de lluvia altas por periodos breves.

En los experimentos del presente trabajo, el desprendimiento del suelo no fue, de manera notoria, en forma de incisión o en canalillos. La densidad aparente es una propiedad física que tiene influencia en la porosidad y compactación del suelo. La presencia de una capa superficial compactada, creada por el pisoteo del ganado en los primeros 18 cm de profundidad del suelo (Cuadro 4), probablemente limitó la formación de canalillos y

Figura 3. Sección transversal de un canalillo formado: después de aplicar una lluvia simulada por 60 min (60-min), después de aplicar la simulación de lluvia más gasto mínimo (Gmin), y después de aplicar lluvia simulada más gasto máximo (Gmax)

Figure 3. Cross sectional shape of a rill: after applying a simulated rainfall during 60 minutes (60-min), after rainfall simulation plus minimal clean-water flow (Gmin), and after rainfall simulation plus maximum clean-water flow (Gmax)

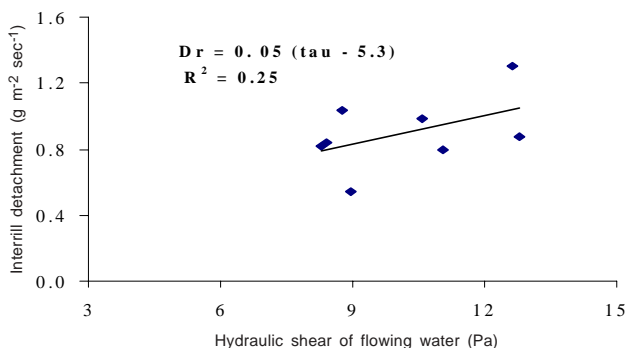


therefore smaller rill erosion occurred. This compacted upper layer, whose deepness differences on Andisols devoted to cattle production were significantly higher than those occurred under cropland use, has been also reported for silt loam soils(33). However, the cross-sectional area of rills in the experimental plots where they were observed is showed in Figure 3. In the periods with simulated rainfall plus clean-water applied (Gmin and Gmax), rill wideness increased, also their deepness increased but in smaller proportion. In a rainfall simulation study, carried out in 6 % agricultural plots, it was found that in plots where rills were formed, soil losses were 3.4 times higher than those in plots where no rills were formed(34).

The hydraulic shear did not contribute to predict the soil rill detachment, as shown by the low multiple determination coefficient of this relationship (Figure 4). The critical-hydraulic shear ( $\tau_c$ ) was 5.3 Pa and the soil rill erodibility value was  $0.5 \times 10^4 \text{ sec m}^{-1}$ . A rill erodibility average value of  $0.083 \text{ sec m}^{-1}$ (32) was reported in the region of Patzcuaro Lake basin with traditional tillage. In the WEPP model data base,  $\tau_c$  values vary between 0.14 to 5.71 Pa, and the soil rill erodibility parameter varies from  $1.1 \times 10^{-4} \text{ sec m}^{-1}$  to  $6.4 \times 10^{-4} \text{ sec m}^{-1}$  for sandy soils. Through several works conducted on untilled soils, it has been confirmed that the critical-hydraulic shear increases significantly, and the rill erodibility behaves differently due to either soil consolidation

Figura 4. Relación entre la tasa de desprendimiento por flujo concentrado y el esfuerzo-hidráulico cortante

Figure 4. Relation between interrill detachment rate and the hydraulic shear



con ello una mayor erosión acanalada. Esta capa superficial compactada, cuya diferencia para cada profundidad fue significativamente mayor en el uso pecuario respecto del agrícola, también ha sido reportada para suelos areno-limosos<sup>(33)</sup>. Sin embargo, en las parcelas donde se observaron estos canalillos, su geometría fue como se muestra en la Figura 3. En los periodos con lluvia simulada más gastos de agua aplicados superficialmente ( $G_{min}$  y  $G_{max}$ ), los canalillos aumentaron el ancho y en menor proporción la profundidad. En estudios de simulación de lluvia, realizados en parcelas agrícolas con pendiente de 6 %, se encontró que en las parcelas donde hubo formación de canalillos se produjeron 3.4 veces más pérdida de suelo que en aquellas parcelas donde no se formaron canalillos<sup>(34)</sup>.

El esfuerzo-hidráulico cortante no contribuyó a predecir el desprendimiento en canalillos, así lo muestra el bajo coeficiente de determinación múltiple de esta relación (Figura 4). El esfuerzo-cortante crítico ( $t_c$ ) fue de 5.3 Pa y la erosionabilidad acanalada de  $0.5 \times 10^{-4}$   $\text{seg m}^{-1}$ . En la región, con labranza tradicional fue reportado un valor promedio de erosionabilidad acanalada de  $0.083 \text{ seg m}^{-1}$ <sup>(32)</sup>. En la base de datos WEPP los valores de  $t_c$  fluctúan entre 0.14 y 5.71 Pa, y la erosionabilidad acanalada entre  $1.1 \times 10^{-4}$  y  $6.4 \times 10^{-4}$   $\text{seg m}^{-1}$  para suelos arenosos. Existen diversos trabajos que confirman que en suelos sin laboreo, el esfuerzo-cortante crítico se incrementa significativamente, y la erosionabilidad acanalada se comporta de manera diferente por efectos de consolidación o de compactación del suelo<sup>(34,35)</sup>. En las condiciones del presente estudio, el desprendimiento en canalillos comenzó con flujos iguales que en los suelos menos sensibles a la erosión caracterizados para la base WEPP, lo cual sugiere que el suelo estudiado, en su uso pecuario, debido a procesos de consolidación inducida por el pisoteo del ganado, fue capaz de resistir un mayor esfuerzo cortante del flujo, y por ende, fue menos propenso a la erosión acanalada. Al comparar los valores de erosionabilidad acanalada obtenidos en el presente estudio, con los reportados con uso agrícola para la región<sup>(32)</sup>, se confirma que el impacto de la erosividad del flujo concentrado en andosoles es mayor cuando este suelo tiene un uso agrícola que cuando tiene un uso pecuario.

or compaction<sup>(34,35)</sup>. Under the conditions of this study, the rill detachment started with flow rates equal to those soils less sensitive to erosion characterized in the WEPP model data base. This suggests that the studied soil under rangeland use was capable to resist a higher hydraulic shear due to consolidation process induced by the animal trampling, thus it was less propense to rill erosion. When comparing the rill erodibility values obtained in this study with those reported for soils devoted to agriculture use in the region<sup>(32)</sup>, it is confirmed that the erosivity impact of the flowing water on the Andisols is greater when it is under cropland than when it is under rangeland use.

Based on the results obtained for the soil-erodibility parameters:  $K_i$  ( $774 \times 10^3 \text{ kg sec m}^{-4}$ ),  $K_r$  ( $0.5 \times 10^{-4} \text{ seg m}^{-1}$ ), and  $t_c$  ( $5.3 \text{ N m}^{-2}$ ), it is concluded that the Andisol under rangeland use, characterized by a consolidated soil condition (without tilling) showed a moderate susceptibility to soil interrill erodibility, and a low one to rill detachment. Soil compaction caused by animal trampling limited the concentrated flow erosivity, and with this, probably the soil rill erosion.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was done with CONACYT financial support (Support Program for Research Projects: Installation Modality). Thanks to Mr. Mario Amaya from San Juan Tumbio, Michoacan Community for the use of his rangeland, and to J. Efrain Morales, COTECOCA-Michoacan, technician for the identification of the gramineous plants.

*End of english version*

---

Con base en los resultados obtenidos para los parámetros de erosionabilidad del suelo:  $K_i$  ( $774.7 \times 10^3 \text{ kg seg m}^{-4}$ ),  $K_r$  ( $0.5 \times 10^{-4} \text{ seg m}^{-1}$ ) y  $t_c$  ( $5.3 \text{ N m}^{-2}$ ), se concluye que el andosol en su uso pecuario, caracterizado por una condición de suelo consolidado (sin roturar), presentó una

susceptibilidad moderada a la erosionabilidad laminar y baja a la erosión acanalada. La compactación del suelo provocada por el pisoteo del ganado, limitó la erosividad del flujo concentrado y con ello, probablemente, la erosión acanalada del suelo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo económico del CONACYT (Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación: Modalidad Instalación). Se agradece al Sr. Mario Amaya de la comunidad de San Juan Tumbio, Mich., por facilitar sus agostaderos, y al Ing. J. Efraín Morales, Técnico de COTECOCA-Michoacán, por apoyar en la identificación de las gramíneas.

## LITERATURA CITADA

- CAST. Council for Agricultural Science and Technology. Animal agriculture and global food supply. Task Force Report No. 135. Ames IA; 1999.
- Mueller JP, Pezo DA. Conflicts between conservation agriculture and livestock over the utilization of crop residues. First Electronic Conference of FAO on Livestock in Conservation Agriculture [on line]: [http://prs.stat.iastate.edu/ifafs/archive/FAOMail/FAO\\_index.html](http://prs.stat.iastate.edu/ifafs/archive/FAOMail/FAO_index.html) (article 22 English). Accessed May 30, 2004.
- de Haan C, Steinfeld H, Blackburn H. Livestock and the environment: finding a balance. European Commission Directorate-General for Development. Development Policy Sustainable Development and Natural Resources. WRENmedia, Suffolk, UK; 1997.
- Simanton JR, Renard KG. Upland erosion research on rangelands. In: Parson AJ, Abrahams AD editors. *Overland Flow: Hydraulics and erosion mechanics*. New York NY: Chapman&Hall; 1992: 335-375.
- SEMARNAT-INEGI. Estadísticas del medio ambiente, México 1997/Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección del ambiente 1995-1996 [en línea] [http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas\\_ambientales/compendio/02medio\\_ambiente/suelos.shtml](http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas_ambientales/compendio/02medio_ambiente/suelos.shtml). Consultado Dic 17, 2004.
- Alcalá MJ, Ortiz SCA, Gutiérrez CMC. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra* 2001;19:227-239.
- Echavarría CHF, Medina GG, Gutiérrez LR, Serna PA. Identificación de áreas susceptibles de reconversión de suelos agrícolas hacia agostadero y su conservación en el Ejido Pánuco, Zacatecas. *Tec Pecu Méx* 2004;42(1):39-53.
- Serna PA, Echavarría CHFG. Caracterización hidrológica de un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. I Pérdidas de suelo. *Tec Pecu Méx* 2002;40(1):37-53.
- Laflen JM, Lane LJ, Foster GR. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. *J Soil Water Cons* 1991;46:34-38.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Anuario estadístico del Estado de Michoacán. Aguascalientes, Ags; 2000.
- Alvarez IP, Garibay C. Producción agropecuaria y forestal. En: Toledo VM, Alvarez IP, Avila P editores. *Plan Pátzcuaro 2000: Investigación multidisciplinaria para el desarrollo sostenido*. México DF: Fundación Friedrich Ebert; 1992.
- SAGARPA. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Inventario ganadero del Estado de Michoacán. Subdelegación Agropecuaria. Morelia, Mich; 2003.
- García E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koeppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía. México, DF; Universidad Nacional Autónoma de México; 1973.
- Barrera BN. La cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán; una aproximación al análisis de una región natural [tesis licenciatura]. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México; 1986.
- Barrera BN. Ecogeografía. En: Toledo VM, Alvarez-Icaza P, Avila P editores. *Plan Pátzcuaro 2000: Investigación multidisciplinaria para el desarrollo sostenido*. México, DF; 1992;11-35.
- SAGAR-COTECOCA. Los coeficientes de agostadero del estado de Michoacán. Morelia, Mich; 2000.
- Laflen JM, Elliot WJ, Simanton JR, Holzhey CS, Kohl KD. WEPP: Soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils. *J Soil Water Cons* 1991;46:39-44.
- Simanton JR, West LT, Weltz MA, Wingate GD. Rangeland experiments for water erosion prediction project. International Winter Meeting of ASAE, Paper 87-2545; St. Joseph MI; 1987.
- Miller WP. A solenoid-operated, variable intensity rainfall simulator. *Soil Sci Am J* 1987;51:832-834.
- Elliot WJ, Liebenow AM, Laflen JM, Kohl KD. A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988. NSERL Report No. 3. Ohio State University and USD-ARS. West Lafayette, IN; 1989.
- Watson DA, Laflen JM. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. *Trans. of the ASAE* 1986;29:98-102.
- Zhang XC, Nearing MA, Miller WP, Norton LD, West LT. Modeling interrill sediment delivery. *Soil Sci Soc Am J* 1998;62:438-444.
- Foster GR, Huggins EP, Meyer LD. A laboratory study of rill hydraulics; II Shear stress relationships. *Trans of the ASAE* 1984;27(3):797-804.
- King KW, Flanagan DC, Norton LD, Laflen JM. Rill erodibility parameters influenced by long-term management practices. *Trans. of the ASAE* 1995;38:159-164.
- Nearing MA, Page DI, Simanton JR, Lane LJ. Determining erodibility parameters from rangeland field data for a process-based erosion model. *Trans. of the ASAE* 1989;32:919-925.
- Ghadiri H, Payne D. Raindrop impact stress. *J Soil Sci* 1981;32:41-49.
- Torri D, Sfalanga M, Del Sette M. Splash detachment: runoff depth and soil cohesion. *Catena* 1987;14:149-155.
- Schultz JP, Jarrett AR, Hoover JR. Detachment and splash of a cohesive soil by rainfall. *Trans. of the ASAE* 1985;28:1878-1884.

## PARÁMETROS DE EROSIONABILIDAD DEL MODELO WEPP

29. Nguyen ML, Sheath GW, Smith CM, Cooper AB. Impact of cattle treading on hill land. 2 Soil physical properties and contaminant runoff. *N Z J Agric Res* 1998;41:279-290.
30. Gradwell MW. Compaction of pasture top soils under winter grazing. In: Proc. of the Ninth International Congress of Soil Science, vol. 4. Adelaide, South Australia; 1968.
31. Climo WJ, Richardson MA. Factors affecting the susceptibility of 3 soils in the Manawatu to stock treading. *N Z J Agric Res* 1984;27:247-253.
32. Tiscareño LM, Tapia VM, Báez GAD, Velásquez VM. Simulación de lluvia para la caracterización hidrológica y de erosión de suelos bajo labranza convencional y labranza cero. En: Sánchez, CI, Stone J. editores. *Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos hidrológicos*. SAGAR-INIFAP-CENID RASPA-IRD ORSTOM. Libro Científico No. 1, Gomez Palacio, Dgo; 1999:99-114.
33. Mulholland B, Fullen MA. Cattle trampling and compaction on loamy sands. *Soil Use Manage* 1991;4:189-193.
34. Meyer LD, Foster GR, Romkens MJM. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: USDA-ARS editors. *Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*. Proc Sediment-Yield Workshop on Rainfall Simulators. ARM-W-10. Publ. ARS-S40. Washington DC; 1975.
35. Alberts EE, Moldenhauer WC, Foster GR. Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill erosion. *Soil Sci Soc Am J* 1980;44(3):590-595.

