

# DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA DEL RÍO PICHUCALCO

## DIAGNOSIS OF WATER EROSION OF THE RIVER BASIN PICHUCALCO

Gerardo Colín-García<sup>1</sup>; Laura A. Ibáñez-Castillo<sup>2</sup>;  
José Reyes-Sánchez<sup>2</sup>; Ramón Arteaga-Ramírez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Egresado de la Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México, C.P. 56230. MÉXICO.

<sup>2</sup>Profesor-Investigador del Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México, C. P. 56230. MÉXICO.  
Correo-e: libacas@gmail.com (\*Autor para correspondencia)

### RESUMEN

**E**n este trabajo se estimó la erosión hídrica en la cuenca del río Pichucalco, México, mediante el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS); el río Pichucalco es un tributario del Río Grijalva. El cálculo de la erosión se realizó mediante la técnica de álgebra de mapas en ArcGIS 9.3. Para estimar el factor de erosividad de la lluvia R se emplearon datos de precipitación diaria de diez estaciones meteorológicas para el periodo 1996-2005. Los usos de suelo fueron encontrados con imágenes de satélite Rapideye con resolución espacial de 5 m. Se concluye, de acuerdo a la clasificación de la FAO, que la erosión actual de clase nula es de 55.47 %, clase ligera de 24.62 %, clase moderada de 18.68 %, clase alta de 0.96 % y clase muy alta de 0.27 %. Es decir, en un 20 % de la cuenca urgen obras de conservación del suelo y prácticas de manejo del agua, ya que el suelo se pierde con valores de entre 10 y 200 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>. Las áreas más afectadas por la erosión se localizan en las partes alta y media de la cuenca en zonas de alta pendiente y con pastizales; las menos afectadas son las áreas bajo bosque y selva y las partes bajas, donde la topografía es prácticamente plana y con zonas pantanosas. Las causas de degradación se relacionan principalmente con la ganadería extensiva en laderas, la cual se lleva a cabo en el 76.20 % de la cuenca.

**PALABRAS CLAVE:** Cuenca río Grijalva, erosión con EUPS, álgebra de mapas.

### ABSTRACT

**I**n this work was estimated the water soil erosion in Pichucalco watershed in Mexico by using the Universal Soil Loss Equation (USLE); Pichucalco river is a tributary of the Grijalva river. The erosion was estimated by using the map algebra technique in ArcGIS 9.3. The rainfall erosivity factor R was estimated with daily rainfall data obtained from ten weather stations for the period 1996-2005. Watershed landuse was that interpreted in satellite images RapidEye with spatial resolution of 5 m. According to FAO classification, it is concluded that actual erosion null class is of 55.47 %, light class is 24.62 %, moderate class is 18.68 %, severe class is 0.96 % and very severe class is 0.27 %. That means that in a 20 % of the watershed is urgent to implement conservation soil and water management practices, because soil is lost with values between 10 and 200 t·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>. These most affected areas by erosion were detected in the middle and upper parts of the basin where there is a combination of high slopes and grasses; the least water erosion affected areas are located in those soils covered with forest and rain-forest and in the lower basin where the topography is almost flat, with the presence of wetlands. The soil loss in this watershed is related to the extensive livestock in hills, which is performed in the 76.2 % of the watershed.

**KEYWORDS:** Grijalva watershed, erosion with USLE, map algebra



Recepción: 26 de abril, 2013  
Aprobación: 11 de junio, 2013  
doi:10.5154/r.inagbi.2013.04.002

## INTRODUCCIÓN

El incremento de la población mundial ha obligado a la apertura de nuevos espacios para solventar las necesidades básicas de alimentación, vivienda, calor, energía, vestido y bienes de consumo. Estas demandas ocasionan un alto requerimiento de recursos naturales. El ser humano, a lo largo del tiempo, ha alterado el medio ambiente, ya sea por el establecimiento de una población, por la apertura de nuevas tierras de cultivo o la práctica de una ganadería extensiva, ocasionado un deterioro en los recursos naturales.

De acuerdo con la SEMARNAT (2005), las principales causas de degradación del suelo en el mundo son la deforestación, las prácticas agrícolas inadecuadas y el sobrepastoreo; el grado de responsabilidad de cada una es de 29, 28 y 35 %, respectivamente. En México, el 22 % de su territorio presenta degradación del suelo por erosión hídrica con una clasificación FAO que va de moderada a extrema, lo que representa pérdidas de 10 a 200 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>.

La erosión de suelos en México es un problema ambiental muy serio que afecta a gran parte del territorio nacional. Es necesario conocer los grados de degradación del suelo, entre los cuales la erosión hídrica es uno de los principales agentes (Montes-León *et al.*, 2011).

El estado de Chiapas ha sufrido en los últimos años fenómenos meteorológicos extremos que han causado graves procesos de erosión hídrica (Pérez-Nieto *et al.*, 2012). Esto debido a los problemas de uso de suelo, deforestación, extensión de cultivos anuales y pastizales en zonas de laderas, manejo deficiente de cultivos y falta de medidas de conservación de suelo. Todo esto acelera el proceso natural de erosión.

La cuenca del río Pichucalco, que desemboca en el Grijalva a las afueras de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, ha sufrido un cambio de uso de suelo producto de la conversión de tierras forestales a tierras para el pastoreo de ganado vacuno y equino. Durante octubre del 2007 tuvieron lugar grandes inundaciones en la planicie del río Grijalva originadas por una precipitación continua debido a la mezcla de un frente frío y una masa de aire tropical (Rivera-Trejo *et al.*, 2007; Aparicio *et al.*, 2009). Las corrientes arrastraron grandes cantidades de sedimentos que azolvieron la desembocadura del Grijalva al Golfo de México impidiendo la salida de agua hacia el mar, lo cual derivó en una curva de remanso que empeoró las inundaciones en la ciudad de Villahermosa.

Para la evaluación de la tasa de erosión hídrica existen varios métodos, entre los que destacan la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM), siendo la primera la más utilizada y aceptada en México. Algo que ha sido común en nuestro país es usar la EUPS aplicando la técnica de álgebra de mapas (Figuroa-Jáuregui *et al.*, 2011; Flores López *et al.*, 2003). Por otro lado, existe software

que determina la pérdida de suelo con la EUPSM, como el SWAT (López, 2011), pero se requiere de considerable información de entrada que en México no se encuentra disponible, además de que tiene el inconveniente de que para pendientes medias de cuenca mayores a 25 % arroja resultados erróneos porque no calcula bien la longitud de pendiente (Rivera-Toral *et al.*, 2012).

En este trabajo se tiene como objetivo prioritario realizar un diagnóstico de la erosión hídrica en la cuenca del río Pichucalco aplicando la EUPS con el fin de cuantificar y ubicar las áreas con mayores problemas de erosión, dando prioridad en la atención a las zonas más erosionadas. De manera específica se pretende cuantificar la erosión hídrica mediante la técnica de álgebra de mapas en el marco de los Sistemas de Información Geográfica, ya que el realizarlo de esta manera es más sencillo y directo que usar software como el SWAT, que demanda muchos datos que no siempre se tienen disponibles en México. El SWAT solicita muchos datos de entrada ya que no se limita a calcular erosión hídrica, sino que de entrada realiza balance hidrológico, para calcular variables como escurrimientos, evapotranspiración, infiltración, etc. (Rivera-Toral *et al.*, 2012).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

La precipitación se obtuvo con información histórica contenida en el Sistema de Información Climática Computarizada, CLICOM (SMN, 2010). Para la delimitación de la cuenca se aplicó el Modelo Digital de Elevación (MDE) 1:50,000 bajado del sitio web de INEGI (INEGI, 2011); dicho MDE tiene una resolución de 30 m. Para obtener las texturas y unidades de suelo en la cuenca se utilizó la carta edafológica de INEGI E1508e, serie II, obtenida en el periodo comprendido entre 2002 y 2007 (INEGI, 2007).

### Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en la Región Hidrológica Núm. 30, en la cuenca Grijalva-Usumacinta, donde la corriente del río Grijalva se nutre principalmente de tres ríos, entre ellos el Pichucalco, debido a lo cual la zona de estudio se refiere a la cuenca del río Pichucalco, que se encuentra entre las coordenadas 17° 56' 42" y 17° 14' 28" de latitud Norte y 93° 13' 31" y 93° 53' 14" de longitud Oeste; en la Figura 1 se muestran detalles de la localización. La precipitación media anual de la cuenca es de 2,842 mm, pero un 15 % de su área recibe más de 4,200 mm anuales de lluvia, la cual se concentra en los meses de junio a diciembre.

El río Pichucalco se origina a unos 12 kilómetros de la cabecera municipal de Chapultenango. La longitud total del río a lo largo de su cauce principal es de aproximadamente 157.4 km, y su cuenca total es aproximadamente de 1,313.18 km<sup>2</sup> hasta su desembocadura en el río Grijalva;

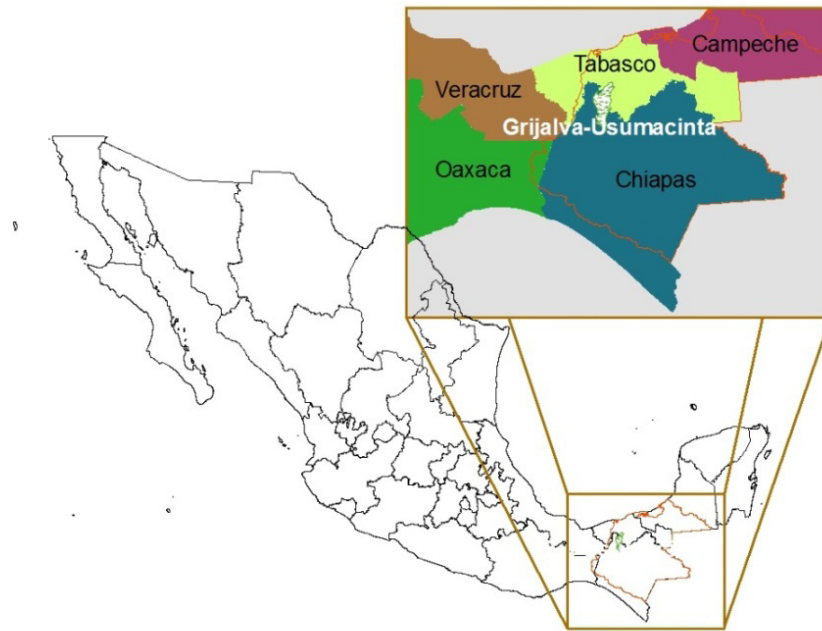


FIGURA 1. Ubicación general de la zona de estudio.

se compone de escorrentías, aguas subterráneas y múltiples cursos de agua dirigidos casi todos en la misma dirección de la corriente principal.

#### Procesamiento de las imágenes de satélite

Para la determinación del uso del suelo se emplearon imágenes de satélite Rapid Eye de resolución espacial de 5 m de mayo de 2009. La clasificación se realizó utilizando el método supervisado con el software ERDAS IMAGINE versión 9.1 (Leica Geosystems, 2009). Este método consistió en la selección de áreas representativas de cada cobertura del suelo para obtener su valor espectral, conocidas como campos de entrenamiento, en donde se conoce su localización UTM y tipo de cobertura. Se utilizó el criterio de máxima verosimilitud para construir la imagen espectral que permitió clasificar las imágenes según las siguientes coberturas: 1) pastizal o uso extensivo, 2) selva perennifolia, 3) cuerpos de agua, 4) áreas urbanas, 5) áreas sin vegetación, 6) bosque mesófilo de montaña y 7) vegetación hidrófila. Para cada tipo de vegetación se tomaron cinco puntos de muestreo, sumando en total 30 puntos de control en el terreno (CONAGUA, 2009).

#### Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Para estimar la erosión hídrica en la cuenca se empleó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) (Haan *et al.*, 1994). La ecuación se usa en cualquier región geográfica modificando sus factores de acuerdo a las características propias de la región de estudio. La EUPS calcula el promedio anual de erosión usando una relación funcional de varios factores expresados en la ecuación 1:

$$A=RKLS C P \quad (1)$$

Donde:

A es el promedio anual de pérdida de suelo ( $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ ), R es el factor de erosividad de la lluvia ( $MJ \text{ mm} \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot año^{-1}$ ), K es el factor de erosionabilidad del suelo ( $t \cdot ha^{-1} \cdot h$ ) ( $MJ \text{ mm} \cdot ha^{-1}$ ), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional), S es el factor del grado de la pendiente (adimensional), C es el factor de manejo del cultivo (adimensional), P es el factor de prácticas mecánicas para el control de la erosión (adimensional).

#### Álgebra de mapas

En México, para calcular la pérdida de suelos por erosión hídrica es más común aplicar la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS, ecuación 1) usando la técnica de álgebra de mapas en el marco del software ArcGIS (ESRI, 2008; Figueroa-Jáuregui *et al.*, 2011; Flores López *et al.*, 2003) que realizarlo en SWAT ((Rivera-Toral *et al.*, 2012; López, 2011). La técnica de álgebra de mapas en ArcGIS, consiste en crear un mapa raster para cada uno de los componentes de la EUPS; una vez creados los mapas, se realiza una multiplicación entre ellos. Esto se hace con la extensión Spatial Analyst de ArcGIS por medio del uso de la herramienta Raster Calculator. A continuación el trabajo se centra en el desarrollo de cada uno de los mapas raster de la EUPS, para al final aplicar la multiplicación entre ellos.

#### Factor de erosividad de la lluvia R

El factor de la erosividad de la lluvia R, definida como la capacidad potencial de ésta para causar erosión, es medida por medio de los índices de erosividad (Figueroa *et al.*, 1991). En México se tiene poca información sobre la intensidad de lluvia, por lo que se han desarrollado modelos empíricos alternativos para la estimación del

factor R en función de otros parámetros de la lluvia. Para estimar el factor R se emplea la expresión propuesta por Figueroa *et al.* (1991) para la zona en la que se encuentra la cuenca Pichucalco (entre Chiapas y Tabasco), la cual es la ecuación 2:

$$R = 2.4619P + 0.006067P^{(2.055-0.000061P)} \quad (2)$$

Donde:

R = Factor de erosividad de la lluvia en MJ mm·ha<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>;  
P = Precipitación media anual en mm.

La precipitación de la zona de estudio se caracterizó mediante información histórica del periodo 1996-2005 (SMN, 2010); para ello se seleccionaron diez estaciones climatológicas que rodean la cuenca del río Pichucalco, y que se describen en el Cuadro 1.

**CUADRO 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas**

Nombre	Latitud			Longitud		
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos
Teapa	17	32	56	92	57	12
Puyacatengo	17	30	48	92	55	12
Pichucalco	17	30	31	93	07	12
Solosuchiapa	17	25	42	93	01	43
Jalapa	17	43	24	92	48	42
Francisco Rueda	17	50	12	93	56	30
Pueblo Nuevo	17	51	15	93	52	45
Las Peñitas	17	24	03	93	27	00
Bochil	16	59	11	92	53	29
Villahermosa	17	59	48	92	55	42

Los datos faltantes se obtuvieron con base en los datos de las estaciones cercanas con el método del Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos (método del U. S. Nacional Weather Service).

El mapa raster de la precipitación fue obtenido mediante el método de las isoyetas para determinar una precipitación media anual para un periodo de 10 años, 1995-2004.

#### Factor de erodabilidad del suelo K

El factor de erodabilidad del suelo K, es un factor que toma en cuenta el tipo de suelo. Para su determinación se consideró la metodología de la FAO (1980) que utiliza unidades de suelos de acuerdo a su clasificación y considera tres tipos de textura superficial del suelo.

El factor de erodabilidad del suelo K, es un factor que indica la susceptibilidad de los suelos a erosionarse.

Para un suelo particular, K se define como la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad cuando

es medido en una parcela estándar. La parcela estándar es de 22.1 m de longitud, con pendiente uniforme de 9 %, de labranza continua y a lo largo de la pendiente (Wischmeier y Smith, 1978).

La erosionabilidad de los suelos está influida por algunas propiedades de los mismos, tales como: distribución del tamaño de las partículas primarias, materia orgánica, estructura del suelo, óxidos de hierro y aluminio, uniones electroquímicas, contenido inicial de humedad y procesos de humedecimiento y secado (Wischmeier y Smith, 1978).

Wischmeier *et al.* (1971) elaboraron un nomograma que permitió evaluar el factor K usando cinco parámetros del suelo: (i) % de limos + arenas muy finas; (ii) % de arena; (iii) % de materia orgánica; (iv) estructura; y (v) permeabilidad.

Cuando no se disponga de información para hacer uso del nomograma, Figueroa *et al.* (1991) sugirieron el método propuesto por FAO (1980) para determinar el valor de K; sólo requiere conocer la unidad de suelo y su textura. Éstas se obtuvieron de la carta edafológica de INEGI.

#### Factor de longitud y grado de la pendiente LS

El factor LS integra la pendiente media de la ladera, su longitud considera el efecto de la topografía sobre la erosión. La pendiente (S) refleja la influencia del gradiente de la pendiente en la erosión ya que el potencial de erosión incrementa con la pendiente, la longitud (L) se define como la distancia horizontal entre el punto donde inicia el escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente al grado de producir la sedimentación o hasta el punto donde el escurrimiento encuentra un curso bien definido (Foster *et al.*, 1977).

Para calcular el factor de longitud de la pendiente (L) se utilizó la ecuación 3:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \quad (3)$$

Donde:

$\lambda$  es la longitud de la pendiente en metros,  $m$  es un exponente con la modificación hecha por Foster *et al.* (1977), calculado con la ecuación 4:

$$m = \frac{\beta}{(\beta+1)} \quad (4)$$

Los valores de  $\beta$  para condiciones donde los suelos son moderadamente susceptibles a la erosión entre canalillos y en canalillos fueron calculados por McCool *et al.* (1989), utilizando la ecuación 5:

$$\beta = \frac{\frac{\text{sen}\theta}{0.0896}}{3.0(\text{sen}\theta)^{0.8} + 0.56} \quad (5)$$

Donde:

$\theta$  es el ángulo de la pendiente. El valor de  $\lambda$  se obtuvo a partir de la metodología expuesta por Flores López *et al.* (2003):

$$\lambda = \frac{30}{\cos\theta} \quad (6)$$

Se utilizó el modelo de elevación digital de INEGI con una distancia entre pixeles de 30 m (de ahí viene el 30 de la ecuación 6), y el ángulo se obtuvo en ArcGIS9.3 (ESRI, 2008) con la extensión Spatial Analyst, herramienta Surface, opción slope; se le pide la pendiente en grados, lo cual genera un raster de pendiente en grados.

El factor inclinación de la pendiente (S), se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$S = 13.8 \text{ Sen}\theta + 0.03, \text{ para } S < 9\%, \text{ y} \quad (7)$$

$$S = 16.8 \text{ Sen}\theta - 0.50, \text{ si } S \geq 9\% \quad (8)$$

### Factor de manejo y cobertura C

El factor C de manejo de cultivo y cobertura, es la relación de pérdidas de un terreno cultivado en condiciones específicas, con respecto a las pérdidas de un suelo desnudo y con barbecho continuo en las mismas condiciones de suelo, pendiente y lluvia (Wischmeier y Smith, 1978).

El valor de C depende de las combinaciones entre cobertura, secuencia de cultivos y prácticas de manejo de un lugar en particular. También depende del estado de crecimiento y desarrollo de la cobertura vegetal en el momento en que actúa el agente erosivo. Figueroa *et al.* (1991) presentan tablas con los valores de C de acuerdo a la cobertura vegetal, y este trabajo tomó dichos valores.

### Factor por prácticas de conservación P

El factor por prácticas de conservación P es la relación entre la pérdida de suelo con una práctica de conservación a la pérdida correspondiente en un terreno bajo cultivo en el sentido de la pendiente (Figueroa *et al.*, 1991).

Este factor es utilizado para reflejar el efecto de las prácticas mecánicas como lo son: el surcado en contorno, el cultivo en fajas en contorno y las terrazas en los cultivos y las prácticas de manejo utilizadas para reducir el escurrimiento de agua en las tasas de erosión. En el caso de la cuenca en estudio se consideró que no se realiza alguna de estas prácticas, y por lo tanto este factor toma el valor de P= 1.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización morfométrica de la cuenca

El área de estudio de la cuenca del río Pichucalco es de 1313.18 km<sup>2</sup>, y el perímetro del parteaguas es de 260.71 km; tiene una forma alargada, y la red de drenaje escurre principalmente hacia el río Pichucalco, aunque en la parte baja de la cuenca, debido a la morfología, hay zonas pantanosas. La elevación media de la cuenca es de 100 msnm, y su pendiente media es de 10.40 %, esto debido a que la parte baja tiene elevaciones menores a 20 m. Aunque la pendiente media de toda la cuenca es de 10.4 %, si se dividiera en subcuencas (que es como trabaja el SWAT), tres subcuencas de la parte alta tendrían pendientes entre el 30 y 45 %, lo cual sería un problema para el SWAT ya que dicho software presenta dificultades de cálculo para pendientes mayores del 25 % (Rivera-Toral *et al.*, 2012).

CUADRO 2. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Pichucalco.

Parámetro	Unidades	Valor
Área de la cuenca	km <sup>2</sup>	1,313.18
Perímetro del parteaguas	km	260.71
Índice de Gravelius	Adimensional	2.01
Elevación media de la cuenca	Msnm	100
Pendiente media de la cuenca	%	10.40
Total de corrientes	Adimensional	2,876
Longitud de corrientes	km	2,552.76
Densidad de drenaje	km-km <sup>-2</sup>	1.94
Densidad de corrientes	Adimensional	2.19
Orden	Adimensional	6
Longitud de la corriente principal	km	157.4
Pendiente media del cauce principal	%	0.44

El Cuadro 2 resume varios parámetros morfométricos de la cuenca bajo estudio.

### Factor de erosividad de la lluvia R

El factor R define en qué medida las lluvias erosionan la superficie del suelo desnudo. Para ello se realizó un análisis climatológico a nivel regional considerando las estaciones climatológicas ubicadas en la zona de estudio. Se obtuvo la lluvia para el periodo 1996-2005, donde se observa claramente el grado de importancia que tiene en esta zona del país, donde existen precipitaciones mayores a 4,000 mm, excediendo en más de cinco veces la media nacional.

En la Figura 2 se muestra la distribución espacial de la precipitación de la cuenca para la cual se empleó el método de isoyetas, esto con el fin de determinar rangos de precipitación en la zona de estudio.

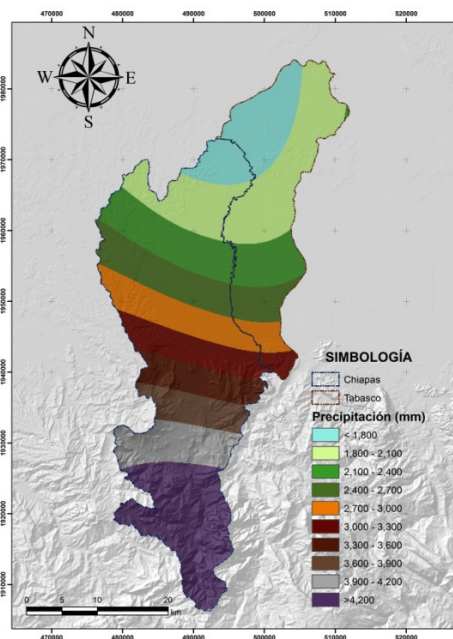


FIGURA 2. Distribución espacial de la precipitación

Con base en el mapa de precipitación se generó el mapa de erosividad de la lluvia R con valores que van de 15,152.30 a 30,450.20  $\text{MJ mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ . En la Figura 3 se puede observar cómo los valores mayores se presentan en la parte alta de la cuenca y disminuyen gradualmente.

### Factor de erodabilidad del suelo K

Con base en las cartas edafológicas de INEGI se encontró que en la zona de estudio se tienen los siguientes tipos de suelos: Cambisoles, seguido de Acrisoles y unas pequeñas motas de Andosoles, Gleysoles, Litosoles y Rendzina. Cabe mencionar que en las zonas de alta pendiente predominaban los suelos Cambisoles. En la parte baja de la cuenca, por lo plana que es, se encuentran dos pequeños pantanos, los cuales fueron tratados como si fueran cuerpos de agua; pero en realidad, esos pantanos representan aproximadamente el 0.2 % del área total de la cuenca.

En la Figura 4 se muestra la distribución del factor de erodabilidad del suelo; K presenta valores de 0.000 a 0.079 ( $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) ( $\text{MJ mm} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), donde de manera general se tiene una susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica.

### Factor de longitud y grado de la pendiente LS

El factor de longitud y pendiente LS cuenta con áreas que no son tan propensas a la erosión, las cuales se encuentran en la parte baja de la cuenca, mientras en la parte alta son zonas totalmente factibles. El factor LS de longitud y grado de la pendiente varía de 0.03 a 38.51. La Figura 5 muestra que los valores más altos se localizan en la parte alta de la cuenca, y en la parte más baja los valores

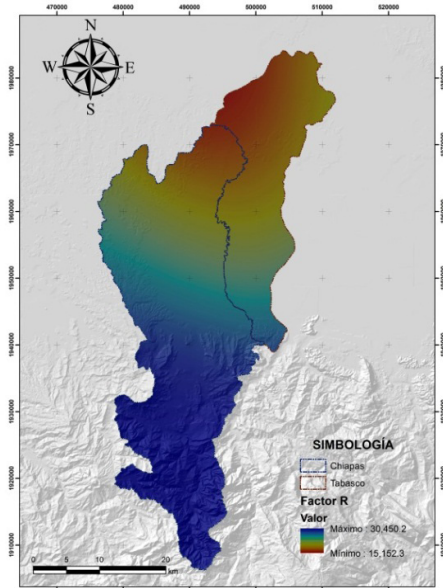


FIGURA 3. Distribución espacial del factor de erosividad de la lluvia.

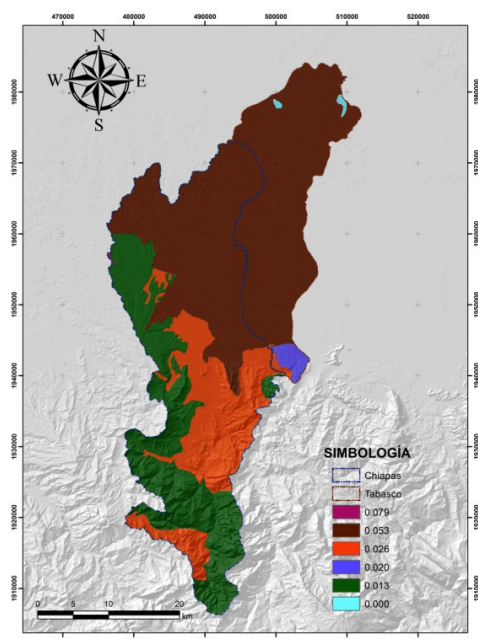


FIGURA 4. Distribución espacial del factor de erodabilidad del suelo.

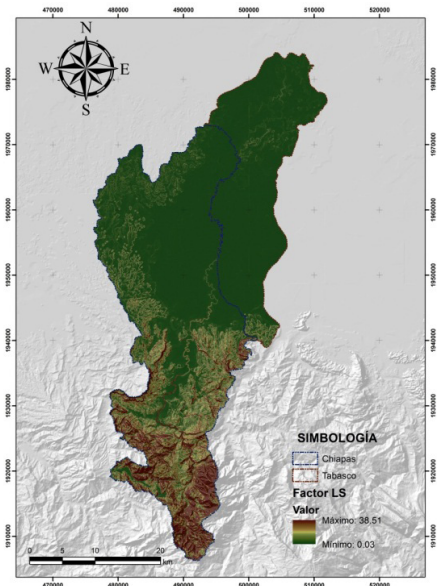


FIGURA 5. Distribución espacial del factor LS o Longitud y Pendiente.

menores, los cuales corresponden a la parte plana, lo que muestra un bajo potencial a la erosión.

#### Tasa de erosión potencial

Los factores que determinan la tasa de erosión potencial son R, K y LS. En los análisis en los cuales se determinó individualmente cada factor, se observó que presentan valores que favorecen a la erosión hídrica, sobre todo en las partes alta y media de la cuenca del río Pichualco.

De acuerdo a la clasificación de la FAO que se muestra en el Cuadro 3, de los grados de erosión potencial que existe en la cuenca, el mayor porcentaje corresponde a una clase de erosión muy alta, con un 54.32 %.

En la Figura 6 se observa que prácticamente no existe erosión potencial hídrica de clase nula y ligera, y el 45.17 % se concentra en erosión alta y moderada, siendo mayor la segunda.

De acuerdo con esto, la cuenca tiene un potencial de erosión hídrica muy alto si se sustituye la vegetación actual.

#### Factor de manejo y cobertura C

Sin duda alguna, el factor de manejo y cobertura es uno de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo que puede modificarse para disminuir la erosión actual en cualquier terreno; de ahí que sea de suma importancia conocer con exactitud el valor correspondiente de C. El uso de suelo predominante que se tienen en la cuenca es pastizal, con un 76.20 %, seguido de la selva perennifolia, con un 12.76 %. En recorridos de campo por la cuenca se pudo detectar que en zonas de pendiente alta y media cubierta con pastizales, se practica una ganadería en laderas que ha ido degradando el suelo.

CUADRO 3. Erosión potencial hídrica en la cuenca del río Pichualco.

Clase	Rango de erosión	Superficie afectada	
	(t·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )	km <sup>2</sup>	%
Nula	<2	3.23	0.25
Ligera	2 – 10	3.57	0.27
Moderada	10 – 50	433.72	33.03
Alta	50 – 200	159.4	12.14
Muy Alta	>200	713.25	54.32
<b>Total</b>		<b>1313.18</b>	<b>100</b>

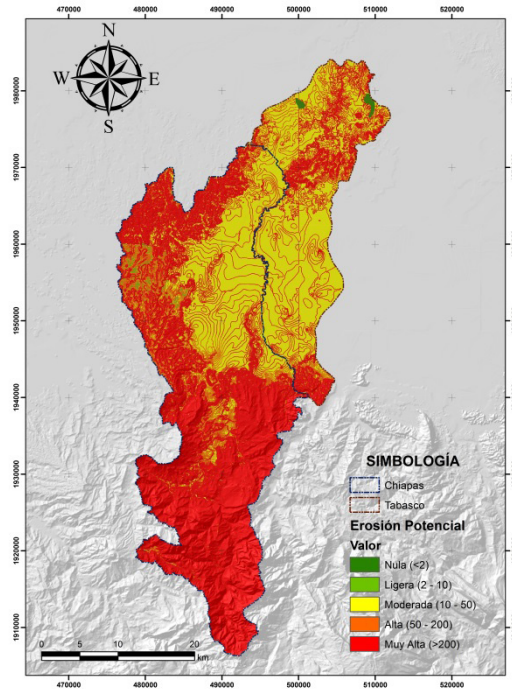


FIGURA 6. Distribución espacial de la erosión potencial hídrica.

En la Figura 7 se muestra la distribución espacial del factor de manejo y cobertura, que va de 0.01 hasta 1.00; el máximo corresponde a las zonas donde se ubican asentamientos urbanos e infraestructura, mientras que el mínimo corresponde a la zona con bosque mesófilo de montaña. El cambio de uso de suelo se da principalmente en las zonas altas, donde los bosques se transforman en pastizales para la introducción de ganado, principalmente bovino y equino, lo que trae consigo que el área quede más propensa a la erosión hídrica. Desafortunadamente esta actividad ganadera se generaliza en toda la cuenca.

#### Tasa de erosión hídrica

La tasa de erosión hídrica actual es el resultado que se busca para recomendar prácticas de conservación de la cuenca. Para la obtención de la erosión hídrica actual se multiplicaron todos los factores anteriormente descritos mediante la técnica de álgebra de mapas en ArcGIS.

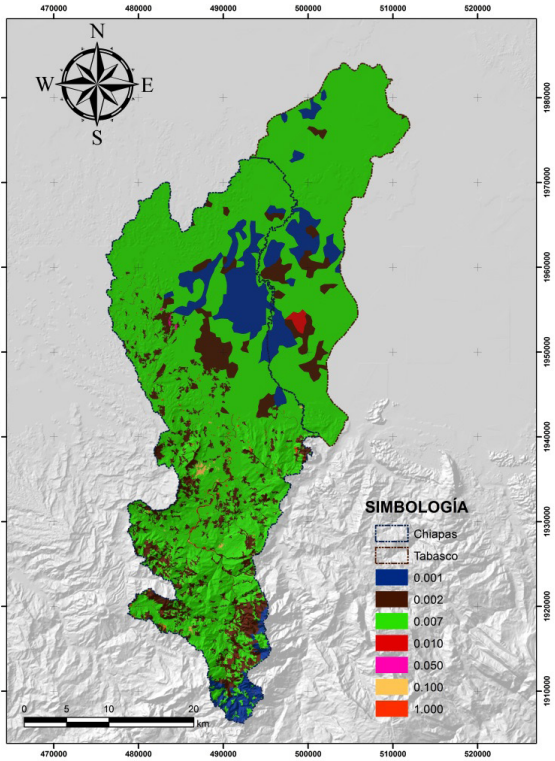


FIGURA 7. Mapa del factor de manejo y cobertura C.

La integración de los factores R, K y LS en la erosión potencial favorece a la erosión hídrica de la cuenca, y ésta puede aumentar o disminuir dependiendo de los factores de cobertura y prácticas de manejo del agua y conservación del suelo.

De acuerdo a la clasificación de la FAO que se muestra en el Cuadro 4 los grados de erosión actual que existe en la cuenca.

En la Figura 8 se muestra la distribución de la erosión hídrica real o actual en la cuenca, donde se puede observar que la clase de erosión nula corresponde en gran parte a la zona plana, mientras que, por el contrario, en la zona alta se pueden encontrar las clases de ligera a moderada. Se observa que en un 20 % de la cuenca del río Pichualco se requiere atención prioritaria de prácticas de conservación del suelo, ya que presenta valores de erosión de entre 10 y 200 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>. Cabe destacar que los valores encontrados como pérdida de suelo por erosión hídrica coinciden con los valores medios nacionales. Por ejemplo, en el comportamiento medio nacional un 22 % de los suelos presentan erosión hídrica, con valores que oscilan entre los 10 y 200 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, mientras que en la cuenca Pichualco de estudio, 20 % de los suelos presentan esos valores. Por todo ello, atender esta problemática en la cuenca Pichualco resulta prioritario, porque de no hacerlo sus cauces naturales serán azolvados y perderán la capacidad de conducción natural del agua, empeorando con esto las inundaciones que ya de por sí presenta la parte baja del río Grijalva, en la cual se encuentra Villahermosa con 350,000 pobladores y una sustancial inversión de PEMEX en esta zona.

CUADRO 4. Erosión hídrica en la cuenca Pichualco.

Clase	Rango de erosión	Superficie afectada	
	(t·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )	km <sup>2</sup>	%
Nula	<2	728.48	55.47
Ligera	2 – 10	323.32	24.62
Moderada	10 – 50	245.26	18.68
Alta	50 – 200	12.56	0.96
Muy Alta	>200	3.56	0.27
Total		1,313.18	100

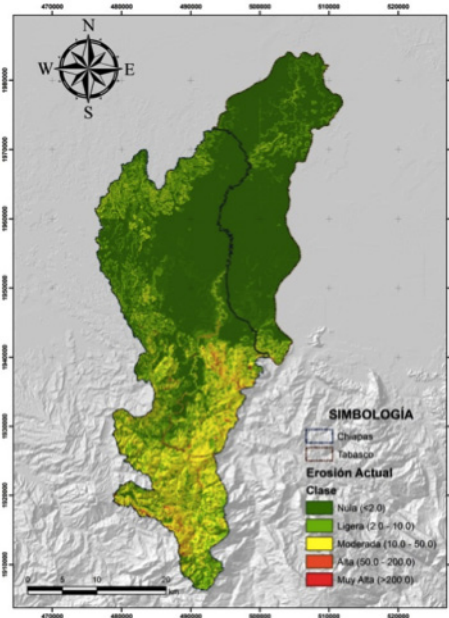


FIGURA 8. Distribución espacial de la erosión hídrica en la cuenca Pichualco.

## CONCLUSIONES

Los resultados alcanzados permiten obtener una visión global a gran escala de los sectores más susceptibles a la erosión hídrica en la cuenca del río Pichualco, y orientan en la toma de decisiones para la conservación y desarrollo sustentable del recurso suelo.

De acuerdo a los valores de erosión hídrica encontrados con la EUPS, se requiere de manera prioritaria de obras para manejo del agua y prácticas para la conservación del suelo aproximadamente en un 20 % del área de la cuenca del río Pichualco; dichas áreas están localizadas en las partes alta y media de la cuenca, y su protección permitirá disminuir los efectos en las partes bajas.

Las causas principales de la erosión hídrica en la cuenca Pichualco se relacionan con la ganadería extensiva en laderas, la cual se lleva a cabo en el 76.2 % de la cuenca.

El procedimiento de integración de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) con factores expresados en imágenes tipo raster y procesadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG), permite el análisis, evaluación y representación cartográfica de la distribución espacial de

la erosión hídrica, localizando geográficamente las áreas más afectadas. Por esto se puede decir que es factible la modelación de la pérdida de suelo cuando los factores de EUPS sean funciones matemáticas o que puedan expresarse con valores en una imagen raster.

En México, para estimar la pérdida de suelo, algunas veces es preferible hacerlo con la técnica de un SIG con álgebra de mapas, ya que software especializado como el SWAT demanda más información que no siempre se tiene.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Comisión Nacional del Agua de México, Oficinas Centrales, por el apoyo recibido para el desarrollo de este trabajo.

## LITERATURA CITADA

- Aparicio, J.; Martínez-Austria P. F.; Güitrón, A. I.; Ramírez A. 2009. Floods in Tabasco, México: a diagnosis and proposal for courses of action. *J. of Flood Risk Management* 2(2): 132-138.
- CONAGUA, 2009. Restauración hidrológica-ambiental de la parte media y alta de la cuenca del Río Pichucalco, comprendida entre los estados de Tabasco y Chiapas. Editor: SEMARNAT. México, D.F.
- ESRI. 2008. ArcGIS 9.3. Redlands, CA. USA.
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO. Roma. 86 p.
- Figueroa-Jáuregui, M. L.; Ibáñez-Castillo, L. A.; Arteaga-Ramírez, R.; Arellano-Monterrosas J. L.; Vázquez-Peña, M. 2011. Cambio de Uso de Suelo en la Cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia* 45: 531-544.
- Figueroa S., B.; Amante O. A.; Cortés T. H.; Pimentel L. J.; Osuna C. E.; Rodríguez O. J.; Morales F. F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Postgraduados, México.
- Flores López, H. E.; Martínez Menes, M.; Oropeza Mota, J. L.; Mejía Sáenz E.; López Carrillo R. 2003. Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. *Terra* 21: 233-244.
- Foster, G. R.; Meyer, L. D., Onstad, C. A. 1977. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Trans. ASAE*. 20 (4): 683-687.
- Haan, C. T.; Barfield, B. J.; Hayes J. C. 1994. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. Academic Press. San Diego, CA. USA. 588 p.
- INEGI. 2007. Carta Edafológica E1508e-Villahermosa, Serie 2, actualizada entre los años 2002 y 2007.
- INEGI. 2011. Continental-Continuo de Elevaciones Mexicano, CEM, 1:50,000, Versión 2.0. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>. Consultado el 12 de Diciembre del 2011.
- Leica Geosystems. 2009. ERDAS IMAGINE 9.1, Software. Atlanta, GA., USA.
- López, R. S. 2011. *Calibración del modelo SWAT para el balance hidrológico de la parte alta de la cuenca del río Pichucalco*, Chis. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 91 p.
- McCool, D. K.; Foster, G. R.; Mutchler, C. K.; Meyer L. D. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans. ASAE*. 32 (5): 1571-1576.
- Montes-León, M. L.; Uribe-Alcantara, E. M.; García-Celis, E. 2011. Mapa Nacional de erosión potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. II (1): 5-17.
- Pérez-Nieto S.; Arellano-Monterrosas, J. L.; Ibáñez-Castillo, L. A.; Hernández-Saucedo, F. R. 2012. Estimación de la Erosión Hídrica provocada por el Huracán Stan en las Cuencas Costeras de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana* 30: 103-110.
- Rivera-Toral, F.; Pérez-Nieto, S.; Ibáñez-Castillo, L. A.; Hernández-Saucedo, F. R. 2012. Aplicabilidad del Modelo SWAT para la Estimación de la Erosión Hídrica en las Cuencas de México. *Agrociencia* 46: 101-105.
- Rivera-Trejo, F.; Soto-Cortés, G.; Barajas-Fernández, J. 2009. La Inundación de 2007 en Tabasco, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XXIV, Núm. 4: 159-166
- SEMARNAT, 2005. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. México.
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN. 2010. Sistema de Información Climática Computadorizada, CLICOM
- Wischmeier W., H.; Johnson, C. B.; Cross, B. U. 1971. A soil erodability nomograph for farmland and construction sites. *Soil water Cons.* 26: 189 – 193 p.
- Wischmeier W., H.; Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agr. Handbook* 537. U.S. Dept. Agr. Washington, D.C.