

Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos negros del centro de México: estudio de un Phaeozem

Erodibility and erosion risk of black soils of central Mexico: study of a Phaeozem

Jesús Emmanuel Pérez-Salinas¹, Fernando Rufino Rodríguez², Armando López-Santos^{1,3‡},
Jorge Alejandro Torres-González², Antonio de Jesús Meraz-Jiménez²,
Abraham Díaz-Romo² y Oscar Valdivia-Martínez¹

¹ Programa de Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo. 56230 Texcoco, Edo. de México, México.

² Maestría en Ciencias con opciones a Agronómicas o Veterinarias, Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Avenida Universidad 940, C.U. 20130 Aguascalientes, Ags., México.

³ Science Policy Interface, United Nations Convention to Combat Desertification (SPI-UNCCD), Bonn, Gr.

‡ Autor para correspondencia (alopez@chapingo.uruz.edu.mx)

RESUMEN

Estimaciones de erosión para los suelos negros de México basados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), presentan discrepancias debido a generalizaciones que conducen a errores en los límites permisibles, siendo el factor erodabilidad o K (FK) el más sensible. El objetivo de la presente investigación fue obtener el rango razonable FK para un Phaeozem (PH) del centro de México mediante el contraste de dos ecuaciones basadas en la EUPS. Se obtuvieron muestras en forma aleatoria en tres sitios (P1, P2, P3) de una superficie de 3 hectáreas. Se determinó porcentaje de materia orgánica, clase textural, tipos de estructura y permeabilidad. Los resultados revelan diferencias entre FK estimada (FKe) y FK de referencia (FKr), ambas derivadas del método tradicional; sus valores fueron: +0.014, +0.0149 y +0.0152, para P3, P2 y P1, respectivamente. Diferencias que representan subestimaciones 1.25 veces en magnitud para FKr con respecto a FKe . Además de ello, del análisis estadístico se descarta la hipótesis nula (H_0) de similitud para los promedios de cada sitio evaluado ($P1 = P2 = P3$). Aunque las diferencias entre los factores de erodabilidad obtenidos con la ecuación específica para los Molisoles en la Provincia de Yunan, China y la nomografía de referencia desarrollada primordialmente en Estados Unidos de América, son estadísticamente diferentes

($\alpha \geq 0.001$), una combinación de ambas podría dar un rango de máximo y mínimo en las estimaciones de FK, y tendría mejores resultados que con valores por defecto que subestiman los resultados sobre tasas de erosión.

Palabras clave: erosión hídrica, factor K/USLE, molisoles.

SUMMARY

Erosion estimates for black soils in Mexico based on the Universal Soil Loss Equation (USLE) present discrepancies due to generalizations that lead to errors in permissible limits, with the erodibility factor or K factor (FK) being the most sensitive. The objective of the present investigation was to obtain a reasonable FK range for a Phaeozem (PH) from central Mexico by contrasting two equations based on the USLE. Samples were randomly obtained at three sites (P1, P2, P3) of a four-hectare area. The percentage of organic matter, textural class, soil structure, and profile permeability were determined. The results reveal differences between the estimated FK (FKe) and reference FK (FKr), whose values were +0.015, +0.028, and +0.029 for P1, P2, and P3, respectively. The differences represent underestimations that are up to 1.7 times greater in magnitude for FKr with respect to FKe .

Cita recomendada:

Pérez-Salinas, J. E., F. R. Rodríguez, A. López-Santos, J. A. Torres-González, A. de J. Meraz-Jiménez, A. Díaz-Romo y O. Valdivia-Martínez. 2019. Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos negros del centro de México: estudio de un Phaeozem. *Terra Latinoamericana* 37: 391-400. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.531>

Recibido: 08 de abril 2019.

Aceptado: 18 de junio de 2019.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 37: 391-400.

The statistical analysis rejects the null hypothesis (H_0) that the means of each site evaluated are the same ($P_1 = P_2 = P_3$). Although the variances between the factors of erodibility obtained using the equation specific to the Mollisols in Yunnan Province, China, and the reference nomography developed primarily in United States are significantly different ($\alpha \geq 0.01$), a combination of both could provide a range of maximums and minimums in the FK estimates and would yield better results than with the use of default values that tend to underestimate erosion rates.

Index words: *water erosion, K/USLE factor, mollisols.*

INTRODUCCIÓN

La erodabilidad se refiere a la susceptibilidad del suelo a la erosión por el agua o el viento, y este se identifica como un controlador secundario en la intensidad de los factores ambientales (USDA-ARS, 1997; Shabani *et al.*, 2014). La susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica (*SEH*) es determinada primordialmente por el potencial erosivo de la lluvia, por la inclinación del terreno o grado de pendiente, por la superficie y posición de captación o (área) de impacto de la lluvia, por las cubiertas en su superficie (FAO and ITPS, 2015) y por la acción antrópica (Wang *et al.*, 2015; Darvishan *et al.*, 2016).

Los suelos negros, conocidos también como Molisoles en la taxonomía americana (USDA), debido a su origen de ambientes de pastizal, presentan un horizonte rico en humus (molico), que les impone una coloración oscura que al combinarse con minerales básicos normalmente son muy fértiles, y por tanto muy apreciados para la producción de alimentos (Osman, 2013). Este grupo, con una extensión global del 6.9% incluye: Chersonzem (*CH*), Kastanozem (*KS*) y Phaeozem (*PH*); se utilizan principalmente en la producción de granos pequeños en las regiones más secas, así como en la producción de maíz y soja en la región más cálida y húmeda (Osman, 2013; Kharytonov *et al.*, 2016).

En México, los Molisoles cubren poco más de 29 millones de hectáreas (MMha), lo que representa el 14.8% de su superficie continental, de los que destacan los *PH* con 11.7% (SEMARNAT, 2000); la importancia de estos suelos se sustenta en al menos tres consideraciones de uso, distribución y servicio ambiental, como se indica brevemente a continuación: 1) primordialmente se utilizan en la agricultura de

secano para la producción de maíz y frijol, y en la ganadería extensiva de bovino (SEMARNAT, 2000); 2) su distribución se extiende a zonas templadas aledañas a la Sierra Madre Occidental y en la discontinuidad de la Sierra de Tamaulipas, así como en las llanuras aluviales semiáridas de la Mesa del Centro (Krasilnikov *et al.*, 2013); y 3) como servicio ambiental, al conformar importantes almacenes de carbono tienen una triple función: en la producción de alimentos, en el clima y en los sistemas hidrológicos (FAO and ITPS, 2015; FAO, 2017).

Para los Molisoles el carbono orgánico en el suelo (*COS*) y la lluvia generalmente tienen una relación positiva, lo que les daría una alta resistencia a la erosión, pero la presión de uso sobre los *PH*, tanto para obtener cosechas como para apacentar ganado los coloca en un nivel de susceptibilidad mayor y un riesgo permanente a la erosión (Wawer *et al.*, 2005; Chaudhury *et al.*, 2016). En México, debido a sus características ecológico-geográficas, donde se combinan ambientes de montaña y planicie, la erosión hídrica (*EH*) ocupa el primer lugar en ésta problemática con 49.4 MMha que representan aproximadamente el 25.4% del territorio nacional (Bolaños-González *et al.*, 2016; López-Santos, 2016).

Derivado de la importancia de la *EH*, se han realizado estudios a distintas escalas mediante técnicas de modelación principalmente a partir de la EUPS, cuyas discrepancias son frecuentes (Wawer *et al.*, 2005; Montes-León *et al.*, 2011; Prado-Hernández *et al.*, 2017), entre otras cosas, debido a la generalización de la información disponible, como la asociada a la erodabilidad edáfica (FK); por ejemplo, Montes-León *et al.* (2011) para la creación del mapa nacional de erosión potencial mencionan que: “...debido a que no se cuenta con información detallada y completa (sobre el componente edáfico) para el empleo de la metodología tradicional, se aplicó la metodología descrita por la FAO” (FAO, 1996).

De manera que en el caso citado (Montes-León *et al.*, 2011) los autores solamente se basaron en datos de tipo de suelo y textura. Como consecuencia de ello, los estudios podrían conducir a errores en la estimación de las tasas de erosión, así como en los criterios de permisividad o tolerancia a la erosión para los grupos de suelo principales (GSP) sometidos a los diferentes usos a lo largo del territorio nacional. Es así que el objetivo de la presente investigación fue obtener el rango razonable FK para un Phaeozem (*PH*)

del Centro de México mediante el contraste de dos ecuaciones basadas en la EUPS.

MATERIALES Y MÉTODOS

Unidad de Estudio (UE)

La UE (Figura 1) corresponde a un potrero dedicado a la cría de ganado bovino, representativo de las áreas de pastizal, donde también se asienta la agricultura de secano del Bajío del Centro de México (Montiel-González *et al.*, 2017). Se ubica en el área experimental (21.973° N y 102.374° O) del Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (CCA-UAA). En términos fisiográficos, éste lugar se sitúa en la Sub-Provincia Sierras y Valles Zacatecanos de la Región Sierra Madre Occidental. El clima predominante es seco (BSkw),

con promedios anuales de temperaturas y precipitación de 18 °C y 540 mm, respectivamente (INEGI, 2017).

De acuerdo al inventario edafológico nacional de la serie II del INEGI (INEGI, 2000), el estudio se centró en un Phaeozem álbico-epiléptico con textura media (*PHablep/2*), además en forma contigua se identificaron Leptosoles (*LE*), de textura media. La vegetación predominante del lugar para los estratos medio e inferior comprende especies introducidas desde hace 10 años, de la familia *Poaceae*, primordialmente se identificaron: Buffel (*Pennisetum ciliare*), Rhodes (*Chloris gayana*), Bermuda (*Cynodon dactylon*), y *Chloris vigata*. Para la familia *Asteraceae* se encontró: *Adenophyllum porophyllum* y *Verbesina serrata*; además, para la Fabaceas, algunas especies predominantes son: Huizache (*Acacia farnesiana*, *Acacia schaffneri*), Mezquite (*Prosopis laevigata*) y Garruño (*Mimosa monancistra*).

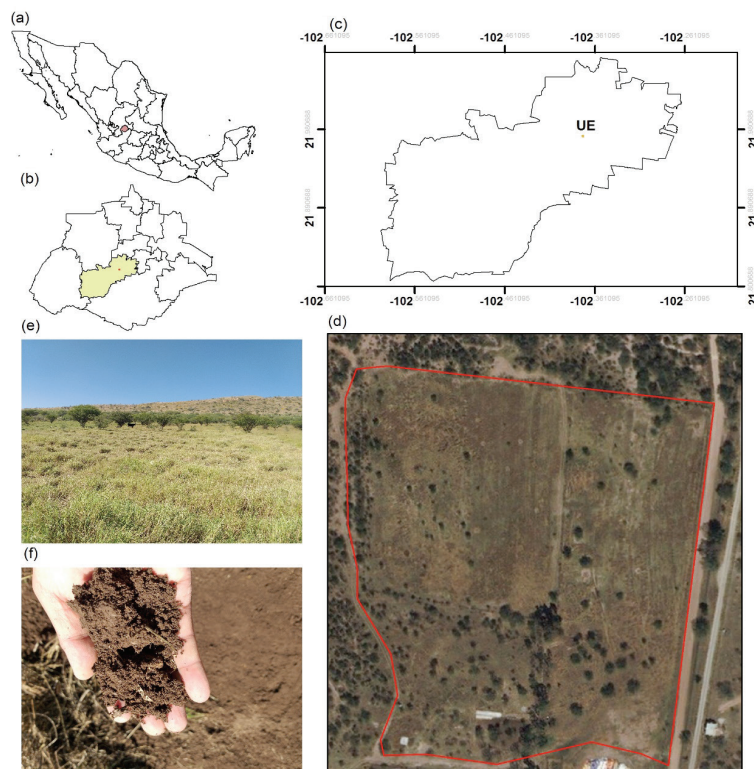


Figura 1. Referencia nacional (a), estatal (b) y municipal donde se localiza la UE (c); vista aérea de la UE (d), cubierta predominante de la UE (e) y vista del color y agregados de muestra de suelo húmedo (f).

Figure 1. National (a), state (b) and municipal reference where the EU (c) is located; EU aerial view (d), predominant EU cover (e) and color view and aggregates of wet soil sample (f).

Diseño Experimental y Obtención de los Parámetros FK

Se definieron tres parcelas o sitios (P1, P2, P3) al azar. De cada sitio se obtuvo una muestra compuesta a partir de sub-muestras elegidas al azar tras un recorrido en zigzag. FK fue estimada (FK_e) con base en la ecuación (1) propuesta por Yang (1999), en tanto que, FK de referencia (FK_r) se determinó con base en la ecuación (2) propuesta Wischmeier y Smith (1978), cuyas expresiones son:

$$FK_e = \left[\frac{2.737 \times 10^{-4} (12 - MOS) M^{1.14} + 4.236(S - 2) + 2.259(P - 3)}{100} \right] \times 0.317 \quad (1)$$

$$FK_r = \left[\frac{2.1 \times 10^{-4} (12 - MOS) M^{1.14} + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)}{100} \right] \times 0.317 \quad (2)$$

donde: MOS es el porcentaje de materia orgánica en el horizonte superficial; M es el parámetro que se define por la notación como $M = \% \text{ de arena fina} + \% \text{ de limo} \times 100 - \% \text{ de arcilla}$; S se refiere al tipo de estructura, que puede tomar los siguientes valores: 1 (gránulo muy fino y grumo fino), 2 (gránulo fino y grumo fino), 3 (gránulo medio y grueso, grumo medio), 4 (gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso); P define el tipo de permeabilidad, que cuyos valores pueden ser los siguientes: 1 (muy rápida a rápida), 2 (medianamente rápida), 3 (moderada), 4 (moderadamente lenta), 5 (lenta), 6 (muy lenta).

Además, se utilizó 0.1317 como coeficiente de conversión de unidades del sistema inglés al sistema métrico descrito por Foster *et al.* (1981), y así obtener FK en $t h MJ^{-1} mm^{-1}$.

Los parámetros de las ecuaciones 1 y 2, con excepción de P, fueron determinados en base a lo descrito en la Norma Oficial Mexicana-021 (NOM-021-RECNAT-2000, 2002). El tipo de estructura, S fue determinado a partir de observaciones de campo sobre el perfil a la profundidad antes indicada, lo cual, fue complementado con el análisis de agregados de una parte de las muestras por medio tamices a diferentes graduaciones menores y mayores de 2 mm. Estos resultados se correlacionaron con los datos de densidad aparente (da), determinada por la técnica de muestras inalteradas con barrena de núcleos. Con la da obtenida se estimó la porosidad total (Pt), como se indica a

continuación (Ecuación 3):

$$Pt = 1 - \frac{da}{dr} \quad (3)$$

donde: dr corresponde a la densidad real y se consideró como valor constante igual a 2.65 g cm^{-3} . El valor la permeabilidad; P del suelo en cada una de las parcelas se determinó a partir de la conductividad hidráulica saturada (Khs) mediante de pruebas de infiltración *in situ* con el uso de un Mini-Infiltrómetro de doble anillo (TURF-TEC, mod. 76946). Para representar el movimiento vertical del agua a través del perfil de suelo como fenómeno físico, los datos obtenidos fueron tratados con base en modelo Kostiakov-Lewis (K-L) empleado en estudios semejantes (Fotouhi *et al.*, 2012), cuya Ecuación (4) es la siguiente:

$$I = K \times t^n \quad (4)$$

donde: I se define como la tasa de infiltración en $cm h^{-1}$; K es un parámetro que depende de las características físicas intrínsecas de la capa edáfica en estudio; t se refiere al tiempo instantáneo en minutos dentro del rango de duración de la prueba y sus valores serán de $t = 0$ hasta $t = t$; n es un exponente del tiempo que representa la manera como decrece la tasa de infiltración, cuyos valores deberán ser menores a 0. Los valores de referencia para determinar P, se muestran a continuación (Cuadro 1).

Cuadro 1. Definición de clases de infiltración y conductividad hidráulica saturada.

Table 1. Definition of infiltration classes and saturated hydraulic conductivity.

Clase	Khs	
	$cm h^{-1}$	$m día^{-1}$
Muy lenta	0.1	0.03
Lenta	0.1-0.5	0.03-0.12
Moderadamente lenta	0.5-2	0.12-0.50
Moderada	2-6	0.5-1.50
Moderadamente rápida	2-12	1.50-3
Rápida	12-18	3-4.5
Muy rápida	> 18	> 4.5

Fuente: USDA-NCR, 1999.

Source: USDA-NCR, 1999.

Para definir la clase de infiltración (Cuadro 1), las Khs estimadas con base en el modelo K-L antes descrito, fueron convertidos mediante logaritmo base 10, como producto; esto en virtud de que se trata de expresión matemática de forma potencial (Ecuación 3).

Análisis Estadístico

El análisis estadístico comprendió la sistematización de información de campo y laboratorio en tablas de Excel. Para determinar diferencias estadísticas, se llevó a cabo un análisis de varianza al 99% ($\alpha = 0.001$), considerando como única fuente de variación el valor FK obtenido por parcela mediante la Ecuación 1 de Yang (1999) para FK_e y la Ecuación 2 de Wischmeier y Smith (1978) para obtener factores de erodabilidad de referencia FK_r .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización Edáfica

La caracterización edáfica, se llevó a cabo a partir cuatro propiedades claves en la determinación de su erodabilidad de acuerdo a lo descrito anteriormente (Sección 2.2): 1) proporción relativa de minerales primarios (arena, limo y arcilla), 2) relación masa/volumen (da y Pt), y 3) materia orgánica del suelo. Los resultados indican que debido al predominio de arena (50%) y proporciones de limo y arcilla cercanas entre sí, la clase textural de los sitios P1 y P2 es Francosa (C), en tanto que para el sitio P3 con casi 54% de arena, la clase textural corresponde a la Franco arenosa (Ca) y debido a que los porcentajes de MOS son de alrededor del 4%, los tres sitios califican como alta. La da tuvo

una variación de 100 kg con respecto al promedio de las tres parcelas (Cuadro 2).

Las constantes de humedad para capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) tuvieron una variación de 0.7 y 0.4%, respectivamente. Para ambas variables, las diferencias más importantes se dieron entre los sitios P1 y P3 que fueron de 1.4% para CC y 0.7% para PMP (Cuadro 2).

Además, como parte de la descripción morfológica se determinó el color del suelo, tanto en seco como en húmedo, de cuya visualización mediante el uso de la tabla de colores Munsell, presentó una variación de café (7.5 YR 5/2) a negro muy oscuro (7.5 YR 3/1), respectivamente (Figura 2).

Permeabilidad

La clase de permeabilidad definida a partir de pruebas de infiltración *in situ* permitió distinguir el movimiento del agua en condiciones insaturadas y saturadas. La primera, se reconoce como flujo dinámico o transitorio (Ft), en tanto que la segunda como flujo estacionario (Fe). La duración de las pruebas fueron de 45 min para cada sitio, de manera que los cambios de sucesión de Ft a Fe , delimitadas por una línea roja vertical, tuvieron un rango de alrededor de 0-20 min (Figura 3).

Como parte de las pruebas de infiltración, se tomaron muestras para determinar humedad inicial (hi) y final (hf). El promedio de la hi en los tres sitios fue 2.7% ($\pm 1\%$), en tanto que el promedio de la hf fue de 26.1% ($\pm 6.7\%$). El sitio P2 mostró la mayor capacidad de humedad a saturación, al superar al P1 y P3 en 1.4 y 1.8 veces respectivamente (Cuadro 3).

Cuadro 2. Caracterización inicial para determinar erodabilidad por sitio muestreado.

Table 2. Initial characterization to determine erodability by sampled site.

Sitio	1	2	3	Textura Clase	da	Pt	CC	PMP	MOS	
	kg				$kg\ m^{-3}$	%			Clase	
P1	50.8	29.2	19.9	C	1003	61	19.5	9.7	4.07	Alto
P2	51.8	29.8	18.3	C	1230	53	18.7	9.0	3.94	Alto
P3	53.8	28.2	17.9	Ca	1130	57	18.1	9.0	3.94	Alto

1 = arena; 2 = limo; 3 = arcilla; C = francosa; Ca = franco arenosa; MOS = materia orgánica del suelo; da = densidad aparente; Pt = porosidad total; CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente.

1 = sand; 2 = silt; 3 = clay; C = loam; Ca = sandy loam; MOS = soil organic matter; da = apparent density; Pt = total porosity; CC = field capacity; PMP = permanent wilting point.

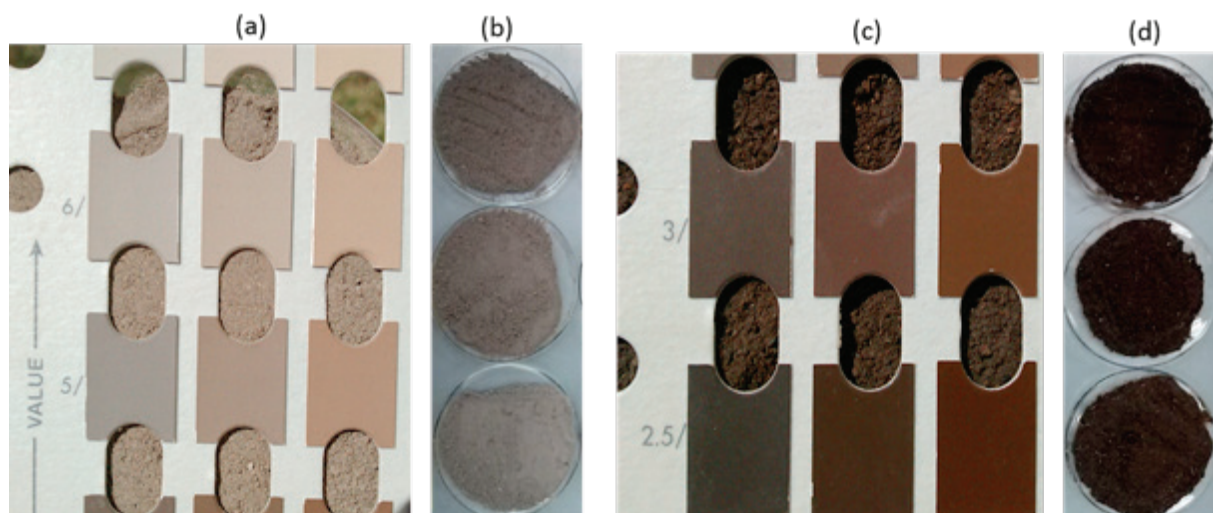


Figura 2. Hojas de la tabla de colores Munsell (a y c), y muestras de suelo evaluadas en seco (b) y húmedo (d).
Figure 2. Munsell color chart sheets (a and c), and soil samples evaluated dry (b) and wet (d).

Con base en los valores medidos en campo desde $t = 0$ hasta $t = 30$ (min), para los tres sitios (P1, P2, P3) se obtuvieron los modelos potenciales (negativos), cuyos coeficientes de estimación resultaron suficientemente confiables por tener valores (R^2) ≥ 0.82 . A partir de éstos modelos se calcularon las tasas de infiltración en cm h^{-1} para las condiciones de flujo transitorio o dinámico (Kh_{te}) y para el flujo estacionario (Kh_{se}). Al final, con esta prueba, se observó que la conductividad hidráulica en el sitio P1 es dos veces menor que la registrada en P2 y P3 (Cuadro 3).

Erodabilidad o Factor K

La erodabilidad edáfica o factor K, fue calculada a partir de los parámetros anteriormente definidos, y conforme a lo descrito en la metodología los valores del factor K estimados (FKe) fueron semejantes para los tres sitios muestreados, ya que promediaron $0.071 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (± 0.001); al comparar éstos valores con los obtenidos a partir de la Ecuación (2) propuesta por Wischmeier y Smith (1978), los valores promedio fueron de $0.057 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, cuya diferencia para C y Ca, fue de 3 milésimas (0.003) (Cuadro 4).

El análisis de los datos del Cuadro 4, revelan diferencias importantes entre FKe y FKr que son de +0.014, +0.0149 y +0.0152, para P1, P2 y P3, respectivamente. Diferencias que representan subestimaciones en una magnitud 1.25 veces menores

para FKr con respecto a FKe . Además de ello, del análisis estadístico se descarta la hipótesis nula (H_0) de similitud para los promedios de cada sitio evaluado ($P1 = P2 = P3$); es decir, se observaron diferencias altamente significativas con una probabilidad del 99% considerando la comparación entre los grupos KFr y KFe (Cuadro 5).

La erodabilidad es un proceso dinámico que varía por la interacción de factores físicos, químicos y mineralógicos del suelo. Diversos mecanismos de la erosión operan al mismo tiempo y cada uno está relacionado con una propiedad específica del suelo (USDA-ARS, 1997; Fotouhi *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2018), refieren que la valoración de FK, además de ser necesaria para predecir pérdida de suelo, también lleva a comprender los mecanismos y procesos erosivos que describen la resistencia al impacto de la lluvia debido a propiedades internas o intrínsecas del mismo suelo.

Los Molisoles, presenta un horizonte superficial de color oscuro derivado de su riqueza en materiales húmicos finamente divididos que contribuyen en el oscurecimiento de la capa superficial del suelo, generalmente en el horizonte A, saturado en cationes bivalentes con predominio del catión calcio (Ca^{2+}), bien estructurado, suave y espeso (Bhattacharyya *et al.* 2006); descripción que coincide con los horizontes de diagnóstico identificados en campo con base en la metodología de la WRB (IUSS, 2015): *PHablep/2*;

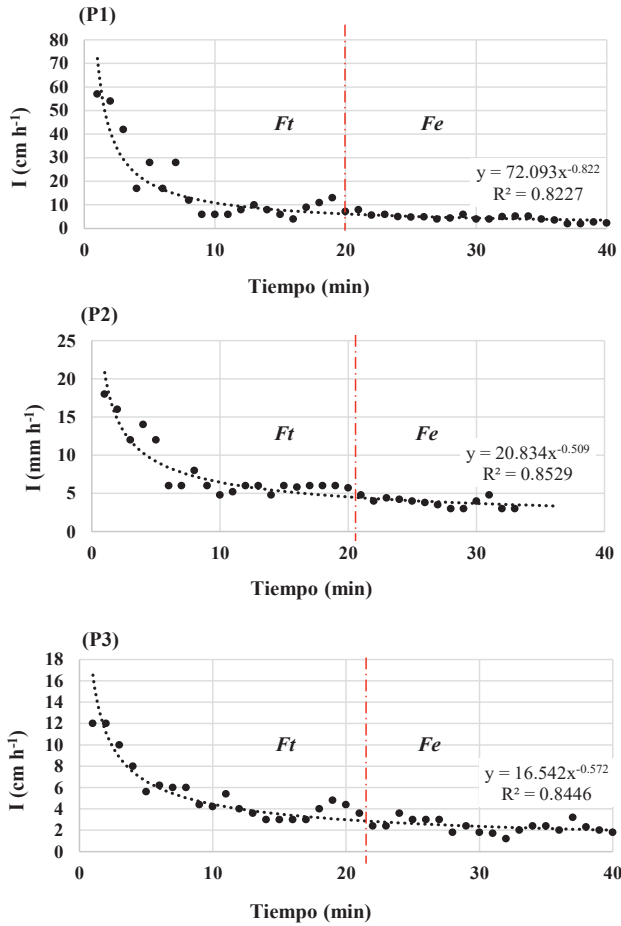


Figura 3. Comportamiento gráfico promedio del movimiento del agua a través del perfil a 30 cm de profundidad en los tres sitios de prueba (parcelas: P1, P2 y P3).
 Figure 3. Average graphical behavior of water movement through the profile at 30 cm depth at the three test sites (plots: P1, P2 and P3).

donde *ab* significa que éste suelo tiene un color “albico” o blanco y *le* de “leptico” que significa presencia de material parental; ambos calificadores coinciden que se localizan a una profundidad mínima de 1 m.

De acuerdo a lo antes descrito, los valores obtenidos para *FKe* parecen más razonables que los de *FKr*, ya que para el *PH* hay cuatro aspectos intrínsecos definidos (Ecuaciones 1 y 2) que funcionan como limitantes principales para puntualizar su capacidad de resistencia a la erosión, justamente los mismos que mencionan Bonilla y Johnson (2012) para Molisoles de la región Central de Chile, de un total de 535 series de suelo, en el 67% los valores *FK* fueron entre 0.03 and 0.05 t h MJ⁻¹ mm⁻¹. Además, Wang *et al.* (2018) reportan como indicadores anti-erodabilidad para los suelos negros (“heitu”) de Loess Plateau (China) valores *FK* medidos a nivel de parcela en un rango de 0.713 a 4.467 t h MJ⁻¹ mm⁻¹.

Las discrepancias mostradas (Cuadro 4) entre *FKr* y *FKe*, son razonables considerando los gradientes que se presentan para las variables que definen la erodabilidad edáfica, sobre todo tomando en cuenta también muchos otros factores y propiedades que influyen la erodabilidad, así como la incompleta e inadecuada base de datos de estudios antes realizados (Wang *et al.*, 2014). Con base en éste razonamiento, sería cuestionable emplear, al menos para Molisoles, valores *FK* basados solamente en la textura, ya que se minimizarían en gran medida las estimaciones de erosión; por ejemplo Montes-León *et al.* (2011) para crear el mapa de erosión potencial emplearon valores de *FK* para suelos *PH* solo en función de la textura

Cuadro 3. Parámetros que caracterizan la conductividad hidráulica en los tres sitios de prueba.
 Table 3. Parameters that characterize the hydraulic conductivity at the three test sites.

Sitio	Modelo K-L	R ²	Humedad		Medidos				Estimados			
			<i>hi</i>	<i>hf</i>	<i>t_i</i>	<i>t_f</i>	<i>Kh_{im}</i>	<i>Kh_{sm}</i>	<i>Kh_{te}</i>	<i>Kh_{se}</i>	<i>Ft</i>	<i>Fe</i>
			---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
			hi	hf	<i>t_i</i>	<i>t_f</i>	<i>Kh_{im}</i>	<i>Kh_{sm}</i>	<i>Kh_{te}</i>	<i>Kh_{se}</i>	<i>Ft</i>	<i>Fe</i>
			---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
			hi	hf	<i>t_i</i>	<i>t_f</i>	<i>Kh_{im}</i>	<i>Kh_{sm}</i>	<i>Kh_{te}</i>	<i>Kh_{se}</i>	<i>Ft</i>	<i>Fe</i>
			---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
P1	$I = 70.093x^{-0.822}$	0.82	1.8	24.5	1	30	13.7	3.8	4.7	2.3	0.7	0.3
P2	$I = 20.834x^{-0.509}$	0.85	2.6	33.5	1	30	7	3.7	6.6	3.8	0.8	0.6
P3	$I = 16.542x^{-0.572}$	0.84	3.7	20.3	1	30	4.7	2.3	12.9	4.3	1.1	0.6

I = tasa de infiltración; *hi* = humedad inicial; *hf* = humedad final; *t_i* = tiempo inicial; *t_f* = tiempo final; min = minutos; *Kh_{im}* = conductividad hidráulica inicial medida; *Kh_{sm}* = conductividad hidráulica a saturación medida; *Kh_{te}* = conductividad hidráulica transitoria estimada; *Kh_{se}* = conductividad hidráulica saturada estimada; log = logaritmo con base 10; *Ft* = flujo transitorio; *Fe* = flujo estable.

I = infiltration rate; *hi* = initial humidity; *hf* = final humidity; *t_i* = initial time; *t_f* = final time; min = minutes; *Kh_{im}* = measured initial hydraulic conductivity; *Kh_{sm}* = hydraulic conductivity at measured saturation; *Kh_{te}* = estimated transient hydraulic conductivity; *Kh_{se}* = estimated saturated hydraulic conductivity; log = logarithm with base 10; *Ft* = transient flow; *Fe* = stable flow.

Cuadro 4. Parámetros empleados para calcular FK de referencia (*FKr*) y Factor K estimado (*FKe*) de cada sitio.
Table 4. Parameters used to calculate reference FK (*FKr*) and estimated K Factor (*FKe*) of each site.

Sitio	Textura Clase	Parámetros considerados				<i>FKr</i>	<i>FKe</i>
		MOS	M	S	P		
		%				- - - t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹ - - -	
P1	C	4	6408	2	5	0.05495	0.06899
P2	C	3.9	6666.7	2	5	0.05782	0.07272
P3	Ca	3.9	6732.2	2	5	0.05839	0.07347

FKr basado en Wischmeier y Smith (1978); *FKe* estimado con la ecuación revisada por Yang (1999). MOS = materia orgánica del suelo; M = % de arena fina + % de limo × 100 - % de arcilla; S = tipo de estructura (2 = gránulo fino y grumo fino); P = define el tipo de permeabilidad (5 = lenta).

FKr based on Wischmeier and Smith (1978); *FKe* estimated with the equation reviewed by Yang (1999). MOS = soil organic matter; M = % fine sand + % silt × 100 - % clay; S = type of structure (2 = fine granule and fine lump); P = defines the type of permeability (5 = slow).

(gruesa = 0.013; media = 0.02 y fina = 0.007 t h MJ⁻¹ mm⁻¹), los cuales están muy por debajo de lo que se reporta en el presente estudio.

Por último, es importante mencionar que Yang (1999) obtuvo la ecuación empleada en el presente estudio (1), a partir numerosos experimentos, basados en la nomografía de Wischmeier y Smith (1978), mediante parcelas de escurrimiento bajo condiciones naturales en la Provincia de Yunan, China.

CONCLUSIONES

- La erodabilidad o susceptibilidad a la erosión de los suelos negros o Molisoles del caso estudiado, es mucho mayor a la estimada en estudios similares enfocados al cálculo de tasas de erosión. La resistencia a la erosión del grupo de suelos Phaozem además de ser una función de sus propiedades intrínsecas como

la textura, estructura, contenido de materia orgánica, permeabilidad y agregación, están sometidos a una presión adicional por causa de utilidad o uso derivado de sus características de fertilidad. El no considerar esto, podría conducir a subestimaciones y a crear una permisividad o tolerancia de pérdida de suelo muy por encima de un manejo sustentable.

- Aunque las diferencias entre los factores de erodabilidad obtenidos con la ecuación específica para los Molisoles en la Provincia de Yunan, China y la nomografía de referencia desarrollada primordialmente en los Estados Unidos de América, son estadísticamente diferentes, una combinación de ambas podría dar un rango de máximo y mínimo en las estimaciones de FK, y tendría mejores resultados que emplear valores por defecto que enfatizan solo en la textura del suelo y que subestiman de sobremanera los resultados en cuanto a tasas de erosión.

Cuadro 5. Resultados del ANOVA para un factor de variación.
Table 5. Results of the ANOVA for a variation factor.

OV	SC	GL	PC	F	P	VCF
Entre grupos	0.000323	1	0.000323	70.53088211	0.001100065	21.19768958
Dentro de los grupos	1.83182E-05	4	4.57955E-06			
Total	0.000341318	5				

OV = origen de la variación; SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; PC = promedio de cuadrados; F = valor de F; P = probabilidad; VCF = valor crítico para F.

OV = origin of the variation; SC = sum of squares; GL = degrees of freedom; PC = average of squares; F = F value; P = probability; VCF = critical value for F.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo, ha sido posible gracias al trabajo conjunto entre los grupos académicos de la Universidad Autónoma de Aguascalientes y de la Universidad Autónoma Chapingo. Además, de manera muy especial se agradece a la colega Jia Xiaoxia del Programa Oficial de Ciencia, Tecnología e Implementación de las Naciones Unidas de Combate contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés), quien nos ayudó a obtener el artículo original (en Chino) de Yang (1999).

LITERATURA CITADA

- Bhattacharyya, T., D. K. Pal, S. Lal, P. Chandran, and S. K. Ray. 2006. Formation and persistence of mollisols on zeolitic deccan basalt of humid tropical India. *Geoderma* 136: 609-620. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.04.021>.
- Bolaños González, M. A., F. Paz Pellat, C. O. Cruz Gaistardo, J. A. Argumedo Espinoza, V. M. Romero Benitez, and J. C. de la Cruz Cabrera. 2016. Erosion map of Mexico soils and its possible implications for soil organic carbon pool. *Terra Latinoamericana* 34: 271-288.
- Bonilla, C. A. and O. I. Johnson. 2012. Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in central Chile. *Geoderma* 189-190: 116-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.005>.
- Chaudhury, S., T. Bhattacharyya, S. Wani, D. Pal, K. Sahrawat, A. Nimje, P. Chandran, Mv. Venugopalan, and B. Telpande. 2016. Land use and cropping effects on carbon in black soils of semi-arid tropical India. 110: 1692-1698. doi: <http://dx.doi.org/10.18520/cs/v110/i9/1692-1698>.
- Darvishan, A. K., V. Homayounfar, and S. H. Sadeghi. 2016. The impact of standard preparation practice on the runoff and soil erosion rates under laboratory conditions. *Solid Earth* 7: 1293-1302. doi: <https://doi.org/10.5194/se-7-1293-2016>.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2017. *Soil Organic Carbon: The hidden potential*. FAO. Rome, Italy. ISBN 978-92-5-109681-9.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1996. *Land husbandry - Components and strategy*. Soil Resources Management and Conservation Service Land and Water Development Division, FAO Soils Bulletin 70. ISBN 92-5-103451-6. <http://www.fao.org/3/T1765E/t1765e00.htm#Contents> (Consulta: septiembre 7, 2019).
- FAO and ITPS (Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils). 2015. *Status of the World's soil resources: Main report*. FAO. Rome, Italy: FAO. ISBN: 978-92-5-109004-6.
- Foster, G. R., D. K. McCool, K. G. Renard, and W. C. Moldenhauer. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Soils Water Conserv.* 355-359.
- Fotouhi, F., H. R. Azimzadeh, A. Talebi, and M. R. Ekhtesasi. 2012. Analyzing the changes of soil erodibility index (K) in the soils of arid regions and the effective factors in central Iran (Case Study: Yazd-Ardakan Plain). *Desert* 17: 65-75. doi: 10.22059/JDESERT.2012.32012.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2000. *Conjunto de datos vectoriales edafológicos, Serie II*. 2000. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/> (Consulta: septiembre 8, 2019).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2017. *Anuario estadístico y geográfico de Aguascalientes 2017*. INEGI. Aguascalientes, Ags., México. https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/AGS_ANUARIO_PDF.pdf (Consulta: febrero 2, 2019).
- IUSS Working Group WRB. 2015. *World reference base for soil resources 2014, update 2015*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome. E-ISBN 978-92-5-108370-3 (PDF).
- Kharytonov, M. M., V. T. Pashova, M. O. Bagorka, V. I. Kosechko, and T. O. Dudar. 2016. Arable lands degradation in the northern steppe zone of ukraine summary. *Agric. For.* 62: 71-80. doi: <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.62.2.05>.
- Krasilnikov, P., M. C. Gutierrez-Castorena, R. J. Ahrens, C. O. Cruz-Gaistardo, S. Sedov, and E. Solleiro-Rebolledo. 2013. *The soils of Mexico (World soils book series)*. Springer. ISBN-13: 978-9400756595.
- López Santos, A. 2016. Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México? *Terra Latinoamericana* 34: 239-249.
- Montes-León, M. A. L., E. M. Uribe-Alcántara y E. García-Celis. 2011. Mapa nacional de erosión potencial. *Tecnol. Cienc. Agua* 2: 5-17.
- Montiel-González, I., S. Martínez-Santiago, A. López-Santos y G. García-Herrera. 2017. Impacto del cambio climático en la agricultura de secano de Aguascalientes, México para un futuro cercano (2015-2039). *Rev. Chapingo Serie Zonas Áridas* 16: 1-13. doi: 10.5154/r.rchsza.2017.01.001.
- NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). 2002. *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos*. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. México, D. F.
- Osman, K. T. 2013. *Soils. Principles, properties and management*. Springer. Netherlands. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2>. ISBN: 978-94-007-5662-5.
- Prado-Hernández, J. V., P. Rivera-Ruiz, B. de León-Mojarro, M. Carrillo-García y A. Martínez-Ruiz. 2017. Calibración de los modelos de pérdidas de suelo usle y musle en una cuenca forestal de México: Caso El Malacate. *Agrociencia* 265-284.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2000. *Suelos*. SEMARNAT. http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf (Consulta: noviembre 20, 2018).
- Shabani, F., L. Kumar, and A. Esmaeili. 2014. Improvement to the prediction of the USLE K Factor. *Geomorphology* 204: 229-234. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.008>.
- USDA-ARS (United States Department of Agriculture-Agriculture Research Service). 1997. *Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. *Agricultural Handbook 730*. USDA-ARS. ARS. Washington, DC, USA. ISBN: 0-16-048938-5. (Consulta: noviembre 25, 2018).
- USDA-NCR (United States Department of Agriculture-National Capital Region). 1999. *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. USDA-NRCS. Washington, DC, USA.

- Wang, B., S. Y. Pan, R. Y. Ke, K. Wang, and Y. M. Wei. 2014. An overview of climate change vulnerability: A bibliometric analysis based on web of science database. *Nat. Hazards* 74: 1649-1666. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1260-y>.
- Wang, G., Q. Fang, B. Wu, H. Yang, and Z. Xu. 2015. Relationship between soil erodibility and modeled infiltration rate in different soils. *J. Hydrol.* 528: 408-418. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.044>.
- Wang, H., G. Zhang, N. Li, B. Zhang, and H. Yang. 2018. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China. *Geoderma* 325: 18-27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.037>.
- Wawer, R., E. Nowocień, and B. Podolski. 2005. Real and calculated K-USLE erodibility factor for selected polish soils. *Pol. J. Environ. Stud.* 14: 655-658.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook no. 537. U.S. Government Printing Office. Washington, DC, USA.
- Yang, Z. 1999. Soil erodibility factor of sloping cultivated land in the northeast mountain region of Yunnan Province. *J. Mountain Res.* 17: 10-15.