

Ajuste de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en parcelas de escurrimiento ubicadas en una región del centro de México

Adjustment of the Universal Soil Loss Equation in runoff plots located in a region of central Mexico

Oscar Valdivia-Martínez¹ , Gabriel de Jesús Peña-Uribe¹ , Fernando Rufino-Rodríguez² , Jorge Alejandro Torres-González² , Antonio de Jesús Meraz-Jiménez²  y Armando López-Santos¹ 

¹ Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Gómez Palacio km 40, Apdo. Postal 8. 35230 Bermejillo, Durango, México.

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

² Centro de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Av. Universidad #940, Ciudad Universitaria. 20100 Aguascalientes, Aguascalientes, México.

Editora de Sección: Dra. Alejandra Nieto Garibay

RESUMEN

Debido a la falta de métodos para estimar con precisión la pérdida de suelo en México, es necesario realizar estudios experimentales para estimar la erosión basada en datos validados. Por lo que el objetivo de esta investigación fue estimar la Tasa de Erosión Anual (A) para diversas coberturas de suelo empleando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), y ajustada mediante su relación con el índice de Generación de Sedimentos (IGS) obtenido en lotes de escurrimiento. Los resultados muestran que, durante el período y las condiciones de este estudio: EUPS subestima el valor de A al calcular la erosividad de la lluvia con el Índice Modificado de Fournier (R_{IMF}) en los tratamientos con Vegetación Natural (VN) y Roturación con Esquilmo (RE). Los suelos sin coberturas reflejaron mayor IGS. Las ecuaciones obtenidas con la relación IGS vs A, de los tratamientos con Suelo Desnudo (SD) y Roturados (RT), pueden ser empleadas para ajustar la tasa de pérdida edáfica en suelos con características similares a las del estudio, cumpliéndose de forma parcial el objetivo de este trabajo.

Palabras clave: cobertura vegetal, generación de sedimentos, tasa de erosión anual.

SUMMARY

Due to the lack of methods to accurately estimate soil loss in Mexico, experimental studies should be conducted to estimate erosion based on validated data. Therefore, the objective of this research is to estimate the Annual Erosion Rate (A) for various soil covers using the Universal Soil Loss Equation (EUPS) and adjusting its relationship with the Sediment Generation Index (IGS) obtained in experimental batches. The results show that during the period and conditions of this study, EUPS underestimates the value of A, when estimating the erosivity of the rain with the Modified Fournier Index (R_{IMF}), in treatments with Natural Vegetation (VN) and Roturation with Esquilmo (RE). Soils without covers evidenced a higher IGS. Likewise, the equations obtained with the relationship IGS vs A, of the treatments with Bare (SD) and Broken Soil (RT) can be used to adjust the edaphic loss rate in soils with the same characteristics as those of the study, complying partially with the objective of this research.

Index words: vegetation cover, generation of sediments, annual erosion rate.

Cita recomendada:

Valdivia-Martínez, O., Peña-Uribe, G. J., Rufino-Rodríguez, F., Torres-González, J. A., Meraz-Jiménez, A. J. y López-Santos, A. (2022). Ajuste de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en parcelas de escurrimiento ubicadas en una región del centro de México. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-14. e990. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.990>

Recibido: 11 de enero de 2022. Aceptado: 24 de mayo de 2022.
Artículo. Volumen 40, septiembre de 2022.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es uno de los principales procesos de la degradación del suelo que compromete el desarrollo sustentable en multitud de economías y sociedades (Feng, Wang, Chen, Fu y Bai, 2010), particularmente en regiones áridas y semiáridas (Vaezi, Sadeghi, Bahrami y Mahdian, 2008). La pérdida del suelo se desencadena debido al efecto dinámico de la lluvia (Ibañez, Moreno y Gisbert, 2012); dicha degradación es exacerbada por el efecto del cambio climático en magnitud, frecuencia y alcance (Stavi y Lal, 2015).

Las propiedades intrínsecas del suelo son el factor pasivo que interviene en los procesos erosivos; esto es, el tipo de suelo determina la respuesta del terreno frente a los eventos de lluvia (Gisbert-Blanquer, Ibañez y Moreno, 2012). Otra propiedad que influye en la respuesta del suelo al proceso erosivo es el factor topográfico, determinado por la pendiente y su longitud.

Al comprender las fuerzas impulsoras detrás de la erosión del suelo, se pueden identificar más fácilmente las áreas propensas a la erosión dentro de un paisaje para abordar el problema de manera estratégica. Para avanzar en dicha tarea, se han utilizado modelos de erosión del suelo. Uno de los modelos de erosión del suelo más utilizados es la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), por sus siglas en inglés, (Wischmeier y Smith, 1962) y su familia de modelos: la ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE), por sus siglas en inglés, (USDA, 1997) y la ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE), por sus siglas en inglés, (Williams, 1975; Benavidez, Jackson, Maxwell y Norton, 2018).

Sin embargo, los estudios de erosión en México basados en USLE utilizan valores por defecto para determinar los factores de agresividad o erosividad de la lluvia (R) y el de erodabilidad o susceptibilidad a la erosión del suelo (K), llevando consigo errores de estimación sub-valorados (Guerra y López, 2013). Además, Pérez-Salinas *et al.* (2019) encontraron discrepancias mayores a 30% para los valores del factor K, entre las ecuaciones mencionadas anteriormente para la EUPS, así como en tablas reportados por Kirkby y Morgan (1984), donde se muestra solamente el grupo textural y el contenido de materia orgánica para valores de 0.5, 2 y 4%. De igual manera, Montes-León, Uribe y García (2011) reconocen que, ante la falta de datos

detallados del componente edáfico, hubo necesidad de utilizar la metodología de la FAO (2006), la cual se basa en valores generalizados del factor K definidos por la WRBS (Base de Referencia Mundial de Suelos, por las siglas de World Reference Base of Soil), para la creación del mapa nacional de erosión en México.

Becerra (1977) llevó a cabo el cálculo de factor R mediante ecuaciones cuadráticas para 14 regiones hidrológicas de México; en el estudio se obtuvieron las intensidades de los eventos de lluvia calculadas a partir de datos comprendidos en un período de 10 años (1977 - 1987). Los resultados presentan un fenómeno de ciclicidad la cual es cuestionada dado el patrón reciente de las lluvias caracterizado por eventos más intensos y variables, atribuido al cambio climático (Adger, Huq, Brown, Conway y Hulme, 2003; Trenberth, 2011; Kawuma, 2011).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo es un modelo desarrollado para estimar la erosión edáfica y con ello aplicar acciones de conservación, principalmente en ambientes degradados (Römkens, Prasad y Gerits, 1997; Song, Liu, Yan y Cao, 2005). EUPS permite estimar la tasa de erosión edáfica (A) en $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Wischmeier y Smith, 1962).

EUPS es ampliamente utilizada debido a las siguientes propiedades: 1) aplicación relativamente fácil; 2) es un modelo paramétrico, lo que significa que utiliza parámetros o variables que permiten estimar el resultado final de la ecuación; y 3) la bondad de sus resultados depende del rigor en el cálculo de los parámetros. Sin embargo, también presenta las siguientes desventajas: 1) fue desarrollada en territorio de los Estados Unidos de América (EUA); 2) debe validarse para otros países, ecosistemas o suelos probablemente distintos a los de EUA; 3) los estudios de erosión basados en EUPS utilizan valores predeterminados para calcular R y K, llevando consigo errores de estimación; 4) sobreestima la pérdida en zonas planas de precipitación abundante; 5) no estima la deposición del material arrastrado; 6) es totalmente empírico, esto es, tiene una capacidad limitada para extrapolar a ambientes diferentes; se basa en relaciones estadísticamente significativas entre variables. Además, algunas estaciones meteorológicas en el país no cuentan con pluviógrafos, por lo que no se tienen hietogramas, en consecuencia, el cálculo de R podría ser impreciso o limitado; y para calcular I_{30} .

Debido a la falta de información para estimar con precisión la pérdida de suelo en México, es necesario

realizar estudios detallados para cuantificar la erosión sustentada con información experimental validada (Prado, Rivera, León, Carrillo y Martínez, 2017). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo es estimar la tasa de erosión anual para diversas coberturas de suelo empleando la ecuación universal de pérdida de suelo ajustada mediante su relación con el índice de generación de sedimentos obtenido en parcelas o lotes experimentales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El presente estudio se realizó sobre una Unidad de Suelo de tipo Phaeozem Álbico Epiléptico (FAO, 2015) en un predio de la Universidad Autónoma de Aguascalientes en las coordenadas 21° 57' 40" N y 102° 20' 36" O, a una altitud de 1 880 m (INAFED, 2010). El área de estudio se encuentra inmersa en la región fisiográfica de la Sierra Madre Occidental y en la subprovincia de las sierras y valles Zacatecanos,

con suelos dominantes en el área de tipo Phaeozem y Leptosol con textura media, siendo el uso de suelo principalmente para agricultura de temporal y riego. Presenta un clima templado seco o templado semiárido (BSkw), con temperaturas medias anuales de 18 °C y una precipitación media anual de 540 mm (INEGI, 2010). La vegetación predominante en las parcelas experimentales es de tipo herbácea, con presencia de las familias: Poáceas, Asteráceas y Fabáceas.

Lotes de Escurrimiento

Se establecieron 12 lotes de escurrimiento, los cuales consisten en un marco de madera de 6 m de largo por 2 m de ancho y altura de 0.3 m, orientados en dirección de la pendiente aguas abajo. Cada parcela se compone de un área de captación y una bandeja de flujo superficial conectada en el extremo inferior, cuya función es concentrar el escurrimiento hacia un contenedor colocado por debajo del nivel del suelo (Figura 1).

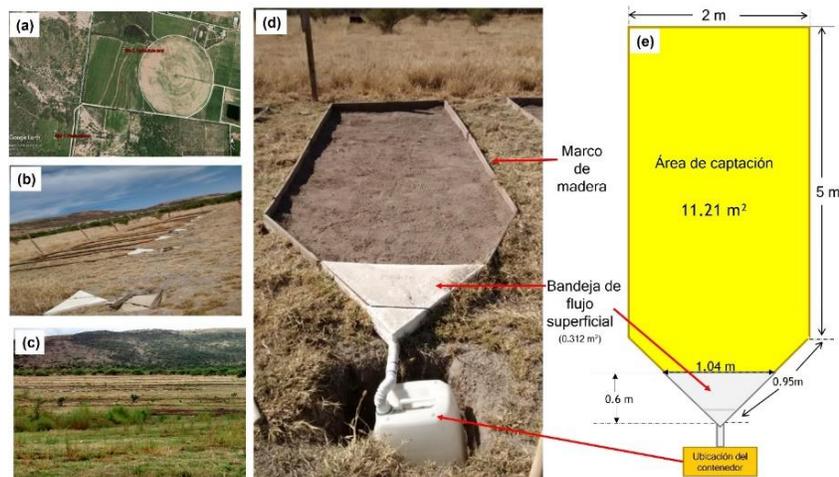


Figura 1. Vista del sitio experimental (a, b, c) y diseño de los lotes (d, e) establecidos en el Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, México. La bandeja de flujo superficial fue diseñada para operar en condiciones naturales; se denomina Bandeja de Flujo Superficial para estudios de erosión hídrica, fue registrada como modelo de utilidad MX/u/2018/000353, en el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) el 16 de julio de 2020. Ver más detalles en: <https://sites.google.com/view/lopezsantos/investigaci%C3%B3n/erosion-cc/bandeja>.

Figure 1. View of the study site (a, b, c) and design of experimental plots (d, e) developed in the Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, México. The surface flux tray to water erosion studies was registered as utility model MX/u/2018/000353 in the Instituto de la Propiedad Industrial (IMPI) on July 16, 2020. More details: <https://sites.google.com/view/lopezsantos/investigaci%C3%B3n/erosion-cc/bandeja>.

Diseño Experimental y Tratamientos

Para evaluar el efecto erosivo de la lluvia en la capa superficial del suelo se utilizó un diseño de parcelas al azar con tres repeticiones. El diseño de tratamientos (Ti) para cada unidad se describe a continuación:

T1 (SD): Suelo desnudo: suelo en condición natural, con remoción de vegetación. Se realizó un desyerbe y se retiró todo rastro de la vegetación que tenía la zona anteriormente (pastizal denso), incluyendo la raíz.

T2 (VN): Vegetación natural: suelo en condición natural con presencia de vegetación arbustiva; el suelo se tomó en su condición natural sin remover la escasa presencia de vegetación.

T3 (RT): Roturación: suelo desnudo y roturado. Se retiró la vegetación de raíz y después se realizó una única roturación antes de la época de lluvia para simular la condición de laboreo de la parcela.

T4 (RE): Roturación con esquilmo: suelo desnudo, roturado y con agregación de esquilmo. Se retiró todo rastro de vegetación de raíz y después se realizó una única roturación antes de la época de lluvia sobre la parcela, añadiendo residuos de pastizal hasta cubrir toda la superficie de la parcela.

Los lotes se instalaron al principio para la generación de sedimentos (marcos, bandejas y colectores) y posteriormente los tratamientos con sus repeticiones se aplicaron al azar.

Implementación, Mantenimiento y Mediciones

El periodo de mediciones comprendió de enero de 2017 a diciembre de 2020. En una fase preliminar se realizó un recorrido en campo y caracterización del suelo con determinaciones de humedad, pruebas infiltración, evaluación de la estructura, así como de toma de muestras para análisis en laboratorio con la finalidad de determinar densidad aparente, densidad real, textura y materia orgánica; todos esto se realizó conforme a la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Se tomaron tres muestras en forma de suelo de modo aleatorio del área experimental, y se obtuvo una muestra compuesta por el método del cuarteo. Los análisis en laboratorio se realizaron por triplicado. Con los datos obtenidos de sólidos sedimentables, se obtuvo el IGS, el cual se expresa en Mg año⁻¹ lote⁻¹.

Se instalaron pluviómetros para medir la precipitación, registrando la cantidad de agua acumulada en los contenedores y se tomaron muestras

de 1 L de los escurrimientos colectados en los contenedores. Los datos se registraron inmediatamente después de las lluvias diurnas y a la mañana siguiente en las precipitaciones nocturnas. Las mediciones de sedimentos se realizaron en el laboratorio de suelos del Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, mediante la técnica de sólidos sedimentables de la norma oficial mexicana NMX-AA-004-SCFI-2013 (CONAGUA, 2013).

Los datos de precipitación fueron proporcionados en el laboratorio nacional de modelaje y sensores remotos (LNMySR) del INIFAP de dos estaciones meteorológicas localizadas en el campus: La Posta (21.9728° N, 102.3628° O) y La Posta 2 (21.9701° N, 102.3825° O).

Cálculo de las Tasas de Erosión (A) Mediante EUPS

Para estimar la tasa de erosión anual se empleó EUPS, conformada por el producto de los siguientes factores: agresividad o erosividad de la lluvia (R), erodabilidad o susceptibilidad del suelo (K), longitud (L), pendiente (S), prácticas de cultivo o cubierta vegetal (C), y prácticas para el control de la erosión (P).

La caracterización morfológica del perfil del suelo se realizó mediante un protocolo de campo a 30 cm de profundidad, para lo cual se evaluaron los siguientes parámetros: 1) permeabilidad del suelo mediante el método del mini-infiltrómetro de doble anillo (Turf-Tec International, Tallahassee, FL) (Castellanos-Navarrete *et al.*, 2013); 2) color del suelo, tanto seco como húmedo, mediante una tabla de color Munsell; 3) se identificó la cobertura vegetal en tres estratos; y 4) las pendientes de cada lote de escurrimiento se cuantificaron con un inclinómetro digital (BOSCH, mod Gim 60l, Gerlingen, Gr.).

El factor de erosividad (R) se determinó empleando el Índice Modificado de Fournier (Arnoldus, 1977) mediante la siguiente ecuación:

$$R_{IMFj} = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{ij}^2}{P_m} \quad (1)$$

Donde: R_{IMFj} : Factor de erosividad determinado mediante el Índice Modificado de Fournier para el año j (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹), P_{ij} : Precipitación mensual del mes i (mm), del año j, P_m : Precipitación acumulada anual (mm).

El factor de erodabilidad (K) se determinó mediante la siguiente ecuación (USDA, 1997):

$$K_{Foster} = \frac{1.313[(2.1 \times 10^{-4}) * (12 - MO) * (M^{1.14}) + 3.25 * (S - 2) + 2.5 * (P - 3)]}{100} \quad (2)$$

Donde: K_{Foster} : Factor de erodabilidad del suelo determinado por el método de Foster, MO: Porcentaje de materia orgánica en el suelo, M: Factor resultante del producto de la suma de los porcentajes de limo y arena muy fina con la suma de los porcentajes de arena y limo (% limo + % arena muy fina) * (100 - % arcilla), S: estructura del suelo, P: permeabilidad del suelo.

La determinación de los porcentajes de materia orgánica, arena, limo y arcilla se realizaron mediante los métodos descritos en la Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002); a su vez, la determinación de estructura del suelo se realizó con el método de evaluación visual (Shepherd, 2003). Dichas determinaciones se realizaron en el laboratorio de suelos del Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

El factor topográfico que comprende longitud y grado de pendiente (LS) de los lotes se determinó mediante el método de Arnoldus (1980), mediante la siguiente ecuación:

$$LS = (L \div 22.1)^{0.6} * (S \div 9)^{1.4} \quad (3)$$

Donde: L: está expresado en metros (m), para este caso $L = 4$ m, S: expresada en porcentaje.

Para el cálculo de la tasa de erosión (A), el valor de P es igual a 1 ya que no se tienen prácticas de conservación. Los valores del factor C para VN y RE, se obtuvieron respectivamente de la tabla: factor C para pastos permanentes, pastizales y tierras ociosas (Wischmeier y Smith, 1978) y del valor sugerido por Mitchell y Bubenzer (1984).

Análisis de Datos

Se aplicó el análisis de varianza y dos pruebas de comparación de medias para evaluar significancia estadística entre tratamientos para evaluar el Índice de Generación de Sedimentos: Tukey y t-Student. Asimismo, se realizó un análisis de regresión lineal para establecer la relación entre IGS como variable dependiente y la tasa de erosión como variable independiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo del presente estudio fue estimar la tasa de erosión anual (A) para diversas coberturas de suelo empleando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), y ajustada mediante su relación con el Índice de generación de sedimentos (IGS) obtenido en lotes de escurrimiento donde se aplicaron los tratamientos anteriormente descritos.

En el Cuadro 1 se presentan los resultados del IGS, los valores de los factores R, K, LS, C, P y la tasa de erosión obtenida a partir de EUPS, además de la relación A/IGS. En la columna de IGS se muestra que en los lotes de suelo desnudo (SD) y roturación (RT) se presentó la mayor generación de sedimentos. Además, se registró una menor producción de sedimentos en los tratamientos de vegetación natural (VN) y roturación con esquilmo (RE).

La tasa de erosión anual muestra valores notoriamente menores en los tratamientos VN y RE de los cuatro años de datos considerados. Mediante la relación A/IGS se encontró que EUPS sobreestima el valor de A respecto a IGS en todos los tratamientos, excepto para los tratamientos VN y RE en el año 2017, ya que dichos valores son subestimados en 15% y 12%, respectivamente (Cuadro 1).

La cubierta vegetal es uno de los principales factores que determinan la respuesta del terreno a los eventos de lluvia, brindando sustentabilidad al suelo (FAO, 1993). El factor C sólo se consideró en los tratamientos VN y RE, siendo de 0.003 y 0.004, respectivamente. Así, dichos valores tienen efecto significativo en la determinación del valor de A. Los valores de C empleados para esta estimación subestiman mil veces la tasa de erosión hídrica. Lo anterior es debido a la propia naturaleza de los tratamientos, en este contexto, la vegetación natural del suelo y la aplicación de esquilmo o residuos vegetales sobre el suelo contrarrestan el efecto de la caída de las gotas de lluvia y protege los suelos de la acción erosiva del agua. Sin una cobertura vegetal, el suelo se vuelve susceptible a este efecto.

En el presente estudio no se aplicó ninguna práctica de protección del suelo. Lo anterior implica que el factor P tiene el valor de la unidad para todos los lotes-tratamientos de modo que dicho factor no tiene efecto en la estimación de A.

Cuadro 1. Resultados de IGS, de A y de los valores de los factores usados en EUPS y la relación entre A e IGS en lotes de escurrimiento.
Table 1. Results of IGS, A and the values of the factors used in EUPS and the relationship between A and IGS in runoff lots.

| AÑO | TTO | IGS | PAA | R_{IMF} | K | LS | C | P | A | $A*IGS^{-1}$ |
|------|-----|---------------------------------------|-----|-----------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------------|--------------|
| | | Mg año ⁻¹ ha ⁻¹ | | | | | | | Mg año ⁻¹ ha ⁻¹ | |
| 2017 | SD | 4.466 | | | 0.514 | 0.310 | 1.000 | 1.000 | 20.519 | 4.59 |
| | VN | 0.390 | 432 | 128.6 | 0.514 | 0.299 | 0.003 | 1.000 | 0.059 | 0.15 |
| | RT | 2.035 | | | 0.532 | 0.277 | 1.000 | 1.000 | 18.975 | 9.32 |
| | RE | 0.732 | | | 0.561 | 0.298 | 0.004 | 1.000 | 0.086 | 0.12 |
| 2018 | SD | 6.031 | | | 0.466 | 0.310 | 1.000 | 1.000 | 19.985 | 3.31 |
| | VN | 0.019 | 597 | 138.4 | 0.440 | 0.299 | 0.003 | 1.000 | 0.055 | 2.91 |
| | RT | 2.213 | | | 0.459 | 0.277 | 1.000 | 1.000 | 17.626 | 7.96 |
| | RE | 0.047 | | | 0.452 | 0.298 | 0.004 | 1.000 | 0.075 | 1.58 |
| 2019 | SD | 1.292 | | | 0.478 | 0.310 | 1.000 | 1.000 | 14.514 | 11.23 |
| | VN | 0.003 | 426 | 97.81 | 0.446 | 0.299 | 0.003 | 1.000 | 0.039 | 11.21 |
| | RT | 0.496 | | | 0.462 | 0.277 | 1.000 | 1.000 | 12.524 | 25.24 |
| | RE | 0.007 | | | 0.450 | 0.298 | 0.004 | 1.000 | 0.052 | 7.66 |
| 2020 | SD | 2.604 | | | 0.488 | 0.310 | 1.000 | 1.000 | 15.657 | 6.01 |
| | VN | 0.016 | 358 | 103.5 | 0.443 | 0.299 | 0.003 | 1.000 | 0.041 | 2.63 |
| | RT | 0.465 | | | 0.476 | 0.277 | 1.000 | 1.000 | 13.647 | 29.35 |
| | RE | 0.018 | | | 0.443 | 0.298 | 0.004 | 1.000 | 0.055 | 2.98 |

TTO = tratamiento; PAA = precipitación anual acumulada; R_{IMF} = factor de erosividad determinado mediante el índice modificado de Fournier para el año; K = factor de erodabilidad; LS = factor topográfico; C = factor relacionado con las cubiertas de suelo; P = factor de manejo de suelo; A = tasa de erosión; A/IGS = relación tasa de erosión e índice de generación de sedimentos.

TTO = treatment; PAA = annual accumulated precipitation; R_{IMF} = erosivity factor determined by the modified Fournier index for the year; K = erodability factor; LS = topographic factor; C = factor related with soil cover; P = soil management factor; A = erosion rate; A/IGS = relationship of erosion and sediment generation rates.

Los resultados de la prueba de Tukey (Cuadro 2) para comparar los valores de IGS entre tratamientos muestran que existe una diferencia significativa ($\alpha = 0.05$) sólo entre los tratamientos SD con VN y SD con RE. Dicha prueba también muestra que existe diferencia significativa para los valores de A en las comparaciones entre los tratamientos SD vs VN, SD vs RE, VN vs RT y RT vs RE. La Figura 2 muestra el comportamiento del IGS durante los cuatro años evaluados, presentando el mayor valor en los tratamientos SD y RT durante este período de estudio. La mayor generación de sedimentos se observa en SD y RT. Sin embargo, SD es el único que presenta diferencia en los valores de IGS con respecto a los otros tratamientos (Cuadro 2). Dicho resultado obedece a que la falta de cobertura propicia un mayor desprendimiento y arrastre de sedimentos a causa de la energía directa de la lluvia. Lo anterior contrasta con los valores de IGS en VN y RE, los cuales presentan valores que fluctúan entre las décimas y milésimas de

unidad, mientras que los de SD y RT varían entre la unidad y la decena.

El gráfico de la Figura 3 relaciona el IGS y la PAA, donde se observa que, a una PAA de 597 mm en el 2018, se presentaron los valores mayores de IGS en los tratamientos SD y RT en los cuatro años, donde no se detecta una relación lineal entre ambas variables. La tendencia de los valores de IGS en SD y RT, se explica por un incremento de la energía para cada evento de lluvia impacta el suelo, así como por mayor escurrimiento de la lámina de agua. Asimismo, el incrementarse de la magnitud PAA no implica que los eventos de lluvia hayan sido de mayor energía; es decir, en un ciclo anual podrían ocurrir pocos eventos de lluvia, aunque con mayor intensidad (Myhre *et al.*, 2019).

El gráfico de la Figura 4a muestra la tendencia del IGS respecto al factor de erosividad de la lluvia, según el método del Índice Modificado de Fournier (R_{IMF}) para las repeticiones de los tratamientos. La Figura 4b

Cuadro 2. Comparación entre tratamientos de datos de IGS y A.
Table 2. Comparison between IGS and A.

| Tratamientos comparados | | IGS | | A | |
|-------------------------|----|-----------------|----------------|-----------|----------------|
| | | α (0.05) | Significación* | p-valor | Significación* |
| SD | VN | 0.0053 | * | 0.0000004 | * |
| SD | RT | 0.0673 | ns | 0.5851857 | ns |
| SD | RE | 0.0065 | * | 0.0000004 | * |
| VN | RT | 0.4914 | ns | 0.0000015 | * |
| VN | RE | 0.9994 | ns | 0.9999993 | ns |
| RT | RE | 0.5561 | ns | 0.0000015 | * |

*Valor de significación estadística a 5% (α); SD = suelo desnudo; VN = vegetación natural; RT = roturación del terreno; RE = roturación con esquilmos; IGS (índice de generación de sedimentos), A (tasa de erosión anual); ns = no significativo.

*Statistical significance value at 5% (α). SD = bare soil, VN = natural vegetation; RT = soil plowed; RE = rupture with shear; IGS (sediment generation rate); A (annual erosion rate); ns = not significant.

presenta la relación entre los valores de IGS de las medias de los tratamientos y el factor R_{IMF} , en la que puede observarse relación directamente proporcional entre ambas variables en los tratamientos SD y RT. Esto es, al aumentar el factor R_{IMF} se presenta incremento en el IGS. El comportamiento de esta relación en los tratamientos VN y RE no se consideran lineales, esto con base en los factores de determinación (R^2).

Un patrón que muestra una tendencia más lineal entre IGS y R_{IMF} en los tratamientos SD y RT (Figura 4b), obedece a que la generación de sedimentos es causada por el efecto directo de la lluvia sin la intervención de otros factores (como sucede en los casos de VN y RE). Lo anterior se explica por los valores de las pendientes, 0.1048 para SD y 0.0479 para RT. El tratamiento que menos es descrito por la ecuación lineal es VN.

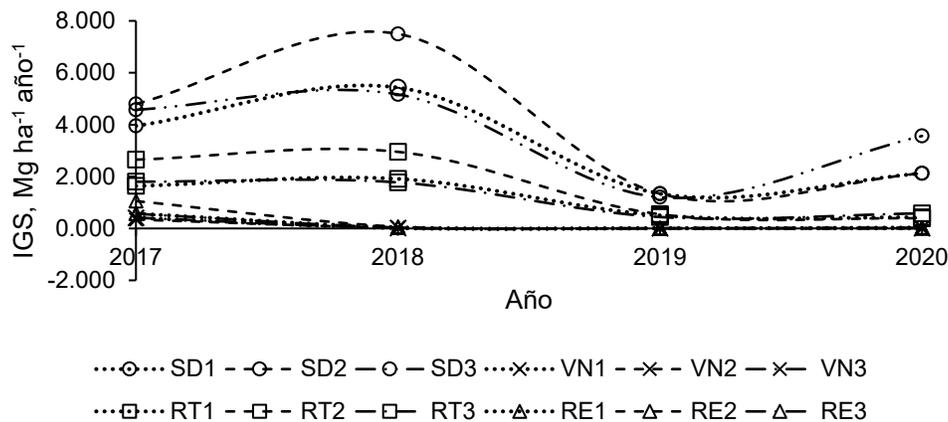


Figura 2. Comportamiento del IGS (índice de generación de sedimentos) en un período de 4 años en los lotes de escurrimiento. SD1, SD2, SD3 = suelo desnudo en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; VN1, VN2, VN3 = vegetación natural en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; RT1, RT2, RT3 = roturación del terreno en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; RE1, RE2, RE3 = roturación con esquilmos en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente.

Figure 2. Behavior of the IGS (sediment generation rate) in a period of four years in the runoff lots. SD1, SD2, SD3 = bare soil in treatments 1, 2 and 3, respectively; VN1, VN2, VN3 = natural vegetation in treatments 1, 2 and 3, respectively; RT1, RT2, RT3 = soil plowed in treatments 1, 2 and 3, respectively; RE1, RE2, RE3 = rupture with shears in treatments 1, 2 and 3, respectively.

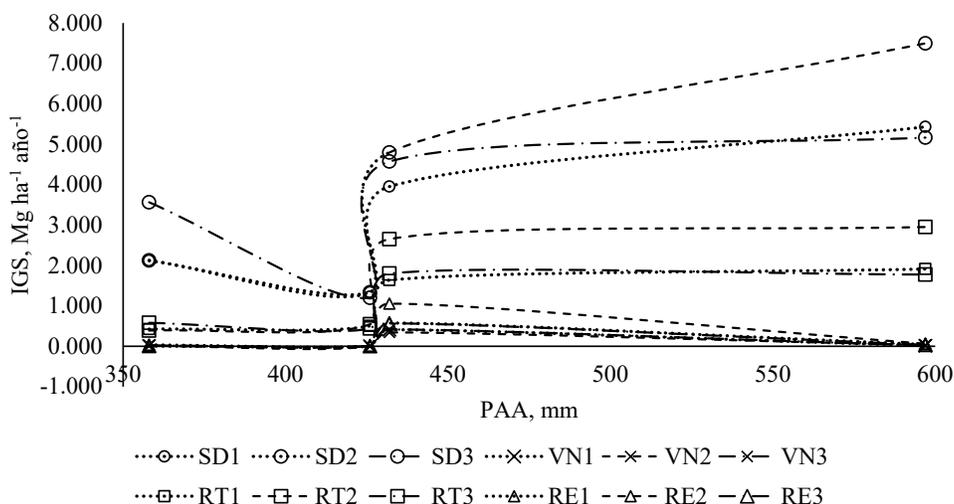


Figura 3. Relación entre el IGS (índice de generación de sedimentos) y la PAA (precipitación acumulada anual). SD1, SD2, SD3 = suelo desnudo en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; VN1, VN2, VN3 = vegetación natural en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; RT1, RT2, RT3 = roturación del terreno en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; RE1, RE2, RE3 = roturación con esquilmos en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente.

Figure 3. Relationship between IGS (sediment generation rate) and PAA (annual accumulated precipitation). SD1, SD2, SD3 = bare soil in treatments 1, 2 and 3, respectively; VN1, VN2, VN3 = natural vegetation in treatments 1, 2 and 3, respectively; RT1, RT2, RT3 = soil plowed in treatments 1, 2 and 3, respectively; RE1, RE2, RE3 = rupture with shears in treatments 1, 2 and 3, respectively.

Los valores de las pendientes indican qué tanto responde la variable IGS al cambio de R_{IMF} , lo que en este caso se le llama sensibilidad.

Según los resultados, la sensibilidad de fluctuación de IGS al cambio de la erodabilidad se puede expresar de la siguiente forma: $SD > RT > RE > VN$. Lo anterior indica que el suelo con tratamiento SD es el más sensible al efecto erosivo de la lluvia y el suelo con el tratamiento VN es el menos afectado. Tomando en cuenta los valores de coeficiente de determinación, se puede decir que la ecuación que mejor describe el comportamiento lineal de IGS es la del tratamiento SD. El mismo comportamiento se observa en los valores de A sólo para los tratamientos SD y RT, no así para los tratamientos VN y RE, donde las coberturas afectan significativamente el valor de A.

En la Figura 5 se presenta la relación entre la tasa anual de pérdida de suelo (A) y el factor erosivo de la lluvia (R_{IMF}). Se observa que los valores de A en los tratamientos SD y RT son mucho mayores que en los tratamientos VN y RE, en una escala de centenas; se sugiere que dicha relación muestra cierta tendencia lineal. Lo anterior indica que el valor de A incrementa conforme aumenta el valor de R_{IMF} .

La Figura 6 muestra la relación entre R_{IMF} y PAA, así como la ecuación lineal que describe dicha relación y su coeficiente de determinación. La relación entre el factor R_{IMF} y la PAA presenta un incremento del primero respecto al segundo. Este incremento o relación no es precisamente lineal. A diferencia del PAA, el R_{IMF} está más relacionado con la intensidad de los eventos de lluvia. Lo anterior obedece a que una mayor cantidad de lluvia no implica una mayor intensidad, por el contrario, se ha demostrado que efectos del cambio climático tienden a mantener la misma cantidad de lluvia anual, sólo que menos distribuida, más estacional y con mayor intensidad (Trenberth, 2011).

Los resultados de la prueba de t-Student para la comparación entre los valores de IGS y A para SD, VN, RT y RE se muestran en el Cuadro 3, en la que se observa que los valores de t-observado son mayores que t-crítico en las comparaciones de IGS y A entre los tratamientos SD y RT ($\alpha = 0.05$). Lo anterior sugiere que en estos tratamientos existen diferencias significativas entre los resultados de IGS y los valores de A calculados mediante EUPS usando R_{IMF} . El valor de A estimada mediante EUPS empleando el R_{IMF} es sobreestimado en los tratamientos con suelo desnudo (SD) y suelo roturado (RT), en tanto que es

Cuadro 3. Resultados de la prueba de t-Student para la comparación entre los valores de IGS y A para las repeticiones de los cuatro tratamientos.**Table 3. Results of the Student's t test for the comparison between the IGS and A values for the repetitions of the four treatments.**

| Prueba de t-Student para: | p-valor | t-estadístico | t-crítico | Significación* |
|---------------------------|------------|---------------|-----------|----------------|
| IGS vs A en SD | 4.9134E-10 | -10.50219 | 2.07387 | * |
| IGS vs A en VN | 0.27966 | 1.13711 | 2.20099 | ns |
| IGS vs A en RT | 2.5351E-13 | -15.49993 | 2.07397 | * |
| IGS vs A en RE | 0.26162 | 1.18333 | 2.20099 | ns |

*Valor de significación estadística $\alpha = 0.05$. IGS = índice de generación de sedimento; A = tasa de erosión anual, SD = suelo desnudo; VN = vegetación natural; RT = suelo roturado; RE = roturación con esquilmo; ns = no significativa.

*Statistical significance value at $\alpha = 0.05$. IGS = sediment generation index; A = annual erosion rate; SD = bare soil; VN = natural vegetation; RT = soil plowed; RE = rupture with shear; ns = not significant.

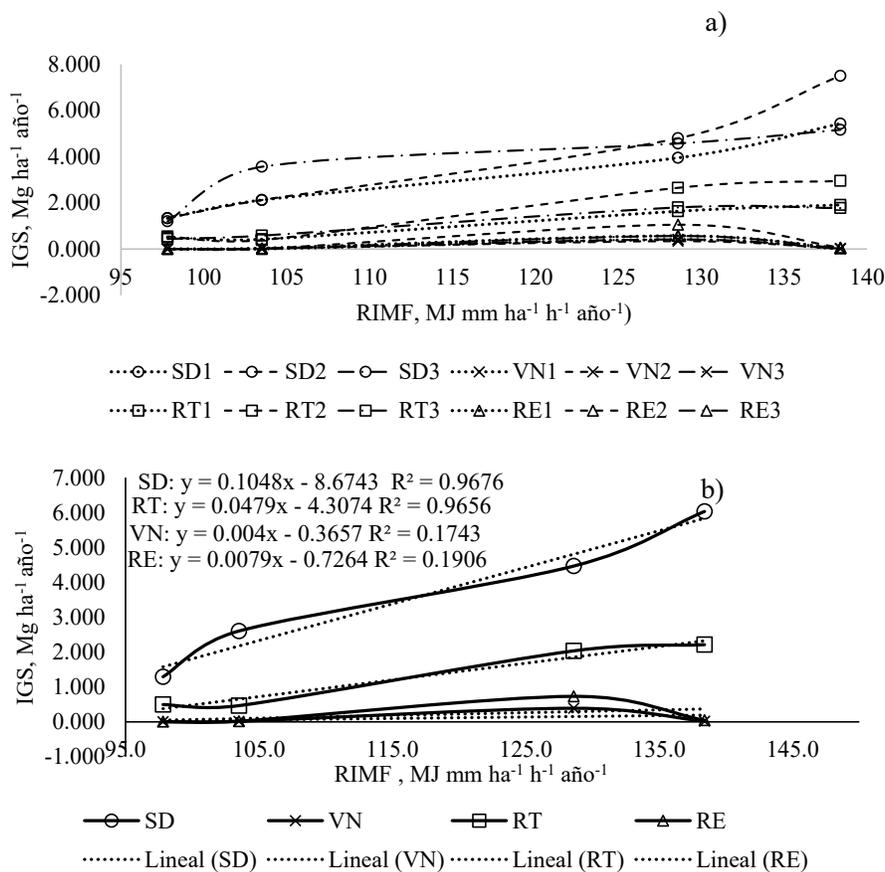


Figura 4. a) Relación entre el IGS (índice de generación de sedimento) y el factor R obtenido por método del Índice de Fournier (R_{IMF}), para las repeticiones de los cuatro tratamientos; 4. b) Relación entre los valores de IGS de las medias de los tratamientos y el factor R_{IMF} . SD1, SD2, SD3 = suelo desnudo en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; VN1, VN2, VN3 = vegetación natural en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; RT1, RT2, RT3 = roturación del terreno en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; RE1, RE2, RE3 = roturación con esquilmos en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente.

Figure 4. a) Relationship between the IGS (sediment generation index) and the R factor obtained by the Fournier Index method (R_{IMF}), for the repetitions of the four treatments; 4. b) Relationship between the IGS values of the means of the treatments and the R_{IMF} factor. SD1, SD2, SD3 = bare soil in treatments 1, 2 and 3, respectively; VN1, VN2, VN3 = natural vegetation in treatments 1, 2 and 3, respectively; RT1, RT2, RT3 = soil plowed in treatments 1, 2 and 3, respectively; RE1, RE2, RE3 = rupture with shears in treatments 1, 2 and 3, respectively.

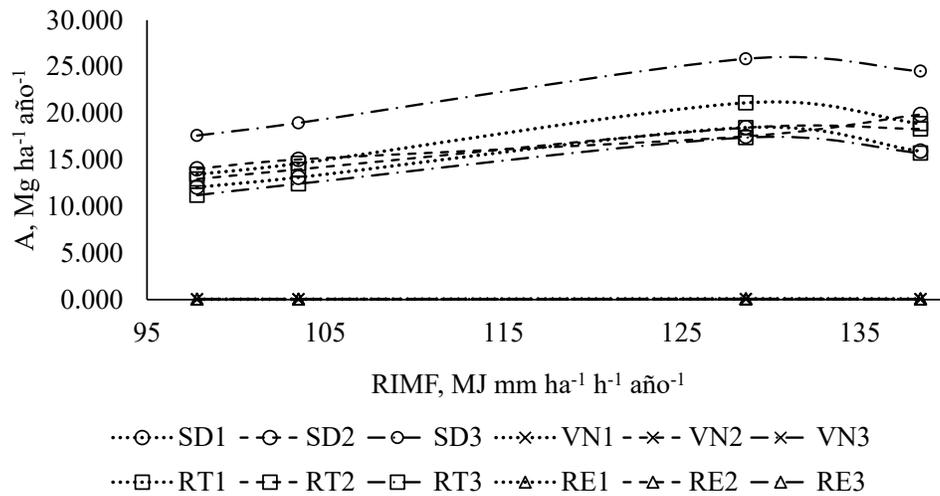


Figura 5. Relación entre los valores de A (tasa de erosión anual) y R_{IMF} (factor R obtenido por método del índice de Fournier SD1, SD2, SD3 = suelo desnudo en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; VN1, VN2, VN3 = vegetación natural en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; RT1, RT2, RT3 = roturación del terreno en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente; RE1, RE2, RE3 = roturación con esquilmos en tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente).

Figure 5. Relationship between the values of A (annual erosion rate) and R_{IMF} (R factor obtained by the Fournier index method). SD1, SD2, SD3 = bare soil in treatments 1, 2 and 3, respectively; VN1, VN2, VN3 = natural vegetation in treatments 1, 2 and 3, respectively; RT1, RT2, RT3 = soil plowed in treatments 1, 2 and 3, respectively; RE1, RE2, RE3 = rupture with shears in treatments 1, 2 and 3, respectively.

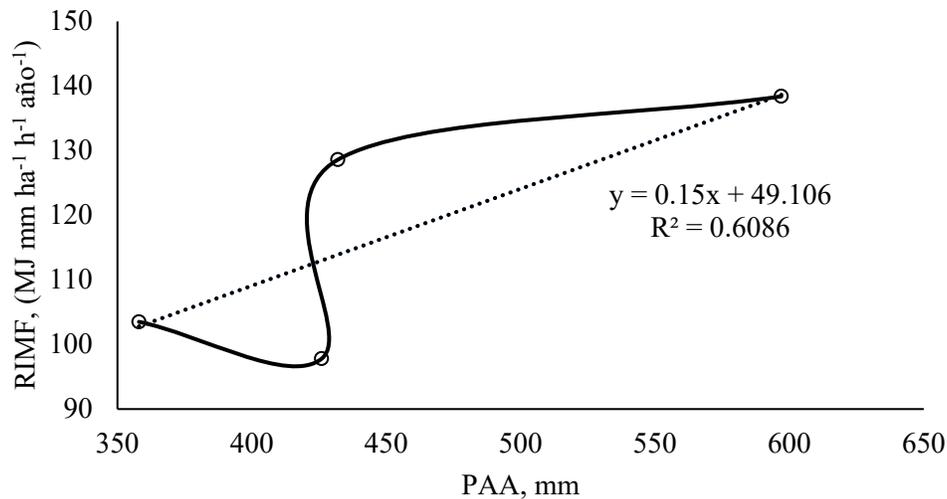


Figura 6. Relación entre R_{IMF} (factor R estimado mediante el método de Fournier) y PAA (precipitación acumulada anual). R^2 = coeficiente de determinación.

Figure 6. Relationship between R_{IMF} (R factor obtained by the Fournier Index method) and PAA (accumulated annual precipitation). R^2 = coefficient of determination.

subestimado en los lotes con vegetación natural (VN) y suelo roturado con esquilmo (RE) en este tipo de suelo y bajo las condiciones de clima del sitio de estudio. La explicación de esta diferencia es el hecho de que EUPS se desarrolló en otras latitudes, lo cual implica que debe ser ajustada para otras regiones.

Los gráficos de la Figura 7 muestran la relación entre IGS y A, y las ecuaciones lineales que la describen; así como el coeficiente de determinación para cada tratamiento. La ecuación que mejor describe dicha relación es la del tratamiento RT; las ecuaciones generadas pueden ser utilizadas para corregir la estimación de la tasa de pérdida de suelo. El valor de la tasa de erosión se obtiene estimando A mediante EUPS. Posteriormente, el valor de A se sustituye en la variable X de la ecuación asociada a la característica superficial del suelo (SD, VN, RT o RE). El valor obtenido de Y es el valor corregido de A

El Cuadro 4 muestra los valores de la tasa de erosión anual corregida (A_{CORR}), obtenidos con las ecuaciones de los gráficos de la Figura 7. Las ecuaciones obtenidas en las gráficas de correlación IGS-A para cada tratamiento fueron probadas. La prueba se realizó sustituyendo un valor de A de cada tratamiento en el Cuadro 1 para

resolver las operaciones. Los resultados obtenidos con las ecuaciones se relacionaron con los valores de IGS para obtener $A_{CORR} * IGS^{-1}$ y posteriormente se compararon con los valores de $A * IGS^{-1}$. Valores de $A_{CORR} * IGS^{-1}$ o $A * IGS^{-1}$ cercanos a 1, sugieren que el valor de A_{CORR} se aproxima al valor de IGS. Los valores de $A_{CORR} * IGS^{-1}$ de los tratamientos SD y RT en los cuatro años son más cercanos a la unidad y a los valores de IGS. A diferencia de los tratamientos VN y RE, los cuales presentan mayor variabilidad de un año a otro, así como con respecto a los valores de $A * IGS^{-1}$.

Las diferencias observadas entre los valores de $A_{CORR} * IGS^{-1}$ y $A * IGS^{-1}$ de los tratamientos VN y RE se explican por el efecto de los factores de protección, los cuales generan una gama de resultados erráticos. Lo anterior implica que las ecuaciones de estos tratamientos no se puedan emplear para ajustar los valores de A obtenidos con EUPS. Los valores de $A_{CORR} * IGS^{-1}$ de los tratamientos SD y RE son más cercanos a la unidad, lo cual significa que las ecuaciones de dichos tratamientos describen mejor la relación IGS-A por lo que pueden ser empleadas para ajustar los valores de A estimados mediante EUPS para suelos con características similares.

Cuadro 4. Valores de A corregidos con base en los valores de IGS empleando las ecuaciones de relación IGS-A.
Table 4. A value corrected based on the IGS values using the IGS-A relationship equations.

| TTO | AÑO | A | IGS | A_{CORR} | $A_{CORR} * IGS^{-1}$ | $A * IGS^{-1}$ |
|-----|------|---------|--------|------------|-----------------------|----------------|
| SD | 2017 | 20.5193 | 4.4661 | 5.4014 | 1.21 | 4.59 |
| | 2018 | 19.9852 | 6.0310 | 5.0635 | 0.84 | 0.15 |
| | 2019 | 14.5145 | 1.2920 | 1.6033 | 1.24 | 9.32 |
| | 2020 | 15.6575 | 2.6036 | 2.3263 | 0.89 | 0.12 |
| VN | 2017 | 0.0592 | 0.3899 | 0.2552 | 0.65 | 3.31 |
| | 2018 | 0.0546 | 0.0156 | 0.1919 | 12.26 | 2.91 |
| | 2019 | 0.0391 | 0.0035 | -0.0238 | -6.84 | 7.96 |
| | 2020 | 0.0411 | 0.0188 | 0.0047 | 0.25 | 1.58 |
| RT | 2017 | 18.9753 | 2.0353 | 2.2661 | 1.11 | 11.23 |
| | 2018 | 17.6257 | 2.2130 | 1.8700 | 0.85 | 11.21 |
| | 2019 | 12.5237 | 0.4961 | 0.3726 | 0.75 | 25.24 |
| | 2020 | 13.6467 | 0.4650 | 0.7022 | 1.51 | 7.66 |
| RE | 2017 | 0.0859 | 0.7317 | 0.5420 | 0.74 | 6.01 |
| | 2018 | 0.0745 | 0.0471 | 0.3381 | 7.17 | 2.63 |
| | 2019 | 0.0524 | 0.0068 | -0.0584 | -8.55 | 29.35 |
| | 2020 | 0.0547 | 0.0184 | -0.0177 | -0.96 | 2.98 |

TTO = tratamiento; IGS = índice de generación de sedimento; A = tasa de erosión anual; A_{CORR} = tasa de erosión anual corregida; SD = suelo desnudo; VN = vegetación natural; RT = suelo roturado; RE = roturación con esquilmo.

TTO = treatment; IGS = sediment generation index; A = annual erosion rate; A_{CORR} = corrected annual erosion rate; SD = bare soil; VN = natural vegetation; RT = soil plowed; RE = rupture with shear.

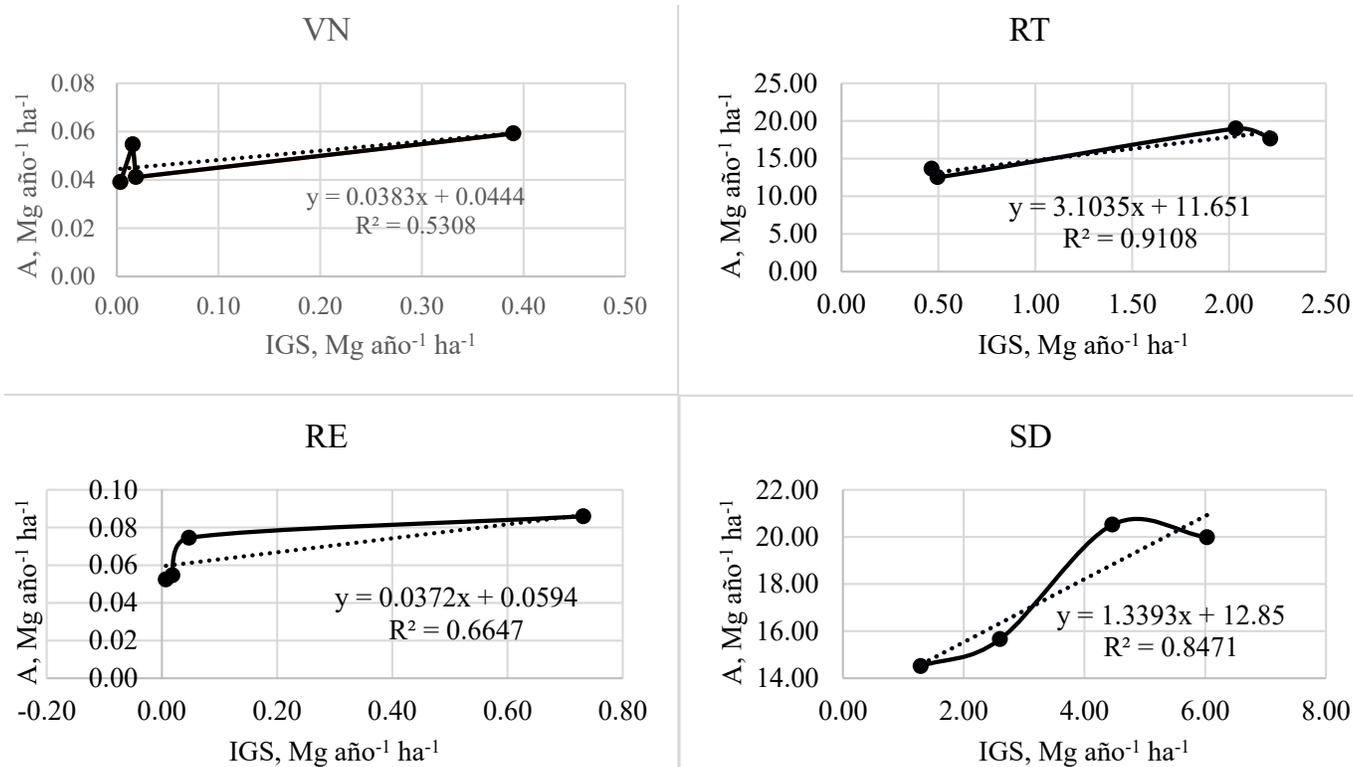


Figura 7. Gráficos que muestran la relación entre IGS y A para cada tratamiento. IGS = índice de generación de sedimento; A = tasa de erosión anual, SD = suelo desnudo; VN = vegetación natural; RT = suelo roturado; RE = roturación con esquilmo. R² = coeficiente de determinación.

Figure 7. Graphs showing the relationship between IGS and A for each treatment. IGS = sediment generation index; A = annual erosion rate; SD = bare soil; VN = natural vegetation; RT = soil plowed; RE = rupture with shear. R² = coefficient of determination.

CONCLUSIONES

Para el período y las condiciones de este estudio se observó que los suelos más sensibles a la erosión hídrica por presentar los valores IGS de mayor magnitud fueron los desprovistos de vegetación (SD), así como los roturados (RT), toda vez que presentan mayores valores de IGS. Además, se observó un incremento de IGS al incrementar RIMF en los tratamientos SD y RT presentando un comportamiento lineal. Por lo tanto, la EUPS subestima el valor de A empleando RIMF en los tratamientos VN y RE con respecto a IGS.

Por otro lado, es importante destacar que la sensibilidad de IGS en los suelos tratados al cambio de RIMF se expresa mediante la siguiente desigualdad: SD>RT>RE>VN. Las ecuaciones establecidas pueden ser empleadas para ajustar la tasa de pérdida edáfica en suelos con tales características, una vez determinado el valor de A con un valor de coeficiente de determinación aceptable.

Se alcanzó el objetivo de este estudio de forma parcial, debido a que las ecuaciones desarrolladas para ajustar EUPS sólo podían ser aplicadas de forma efectiva en suelos Phaozem, o suelos con características muy parecidas a los mismos, sin cobertura vegetal.

Es recomendable continuar los estudios experimentales para evaluar y ajustar previamente EUPS antes de tomar decisiones o aplicar acciones para prevenir o corregir la pérdida de suelo en regiones o suelos diferentes de aquellos en los que se desarrolló EUPS.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable. La información presentada proviene de fuentes bibliográficas ya publicadas incluidas en la literatura citada.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización e idea principal: A.L.S., O.V.M., A.J.M.J. Métodos, trabajo de campo y el análisis de muestras: F.R.R., J.A.H. Validación: A.L.S., A.J.M.J. Análisis formal: O.V.M., A.L.S. Investigación: A.L.S., O.V.M. Recursos: A.L.S., A.J.M.J. Escritura, preparación del borrador original: O.V.M., G.J.P.U. Escritura, revisión y edición: O.V.M., G.J.P.U., A.L.S.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CONACYT, institución que brindó becas a los autores primero de doctorado y al tercero de maestría en su rol como estudiantes de los programas de Recursos Bióticos de Zonas Áridas de la URUZA-Chapingo, y de Maestría en Ciencias con opción a Agronómicas o Veterinarias del Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (CCA-UAA), México. Así mismo agradecemos el apoyo otorgado por la M.C. Liliana Raquel Barba de Alba, responsable del laboratorio de suelos del CCA-UAA. Los recursos empleados para los trabajos experimentales de campo y laboratorio fueron proporcionados por fondos de la Universidad Autónoma Chapingo y la Universidad Autónoma de Aguascalientes, mediante proyecto convencional, clave 19213-C60.

LITERATURA CITADA

- Adger, W. N., Huq, S., Brown, K., Conway, D., & Hulme, M. (2003). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in Development Studies*, 3(3), 179–195. <https://doi.org/10.1191/1464993403ps060oa>
- Arnoldus, H. M. J. (1977). Predicting Soil Losses Due to Sheet and Rill Erosion. In S. Kunkle, & J. Thames (Eds). *Guidelines for watershed management* (pp. 99-123). Roma, Italia: FAO
- Arnoldus, H. M. (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In M. Boodst, & D. Gabriels (Eds.). *Assessment of erosion*. (pp. 127-132). Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc.
- Becerra, M. A. (1977). *Erosión de suelos*. Estado de México, México: UACH
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R) USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- Castellanos-Navarrete, A., Chocobar-Guerra, A., Cox, R., Fonteyne, S., Govaerts, B., Jespers, N., ... Verhulst, N. (2013). *Infiltración: Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo*. D.F., México: CIMMYT
- CONAGUA. (Comisión Nacional del Agua). (2013). Norma oficial mexicana. NMX-AA-004-SCFI-2013, Análisis de agua – medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. *Diario Oficial de la federación*. D.F.: SEGOB.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1993). Influencia del pastoreo y la vegetación en los rendimientos del agua y en la erosión. Consultado el 11 de mayo, 2021, desde <http://www.fao.org/3/X5320S/x5320s00.htm#Contents>
- FAO (Food and Agriculture Organization of The United Nations). (2006). *World Reference Base for Soil Resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication*. Rome, Italy: FAO. ISBN: 92-5-105511-4
- FAO (Food and Agriculture Organization of The United Nations). (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*. Rome, Italy: FAO. ISBN: 978-92-5-108369-7
- Feng, X., Wang, Y., Chen, L., Fu, B., & Bai, G. (2010). Modeling soil erosion and its response to land use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *J. Geomorphol*, 118, 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.01.004>
- Gisbert-Blanquer, J. M., Ibañez-Asensio, S., & Moreno-Ramón, H. (2012). *El factor K de la ecuación universal de pérdidas de suelo (usle)*. Consultado el 20 de mayo, 2020, desde <http://hdl.handle.net/10251/16850>
- Guerra, J., & López-Vera, F. (2013). Análisis y aplicación del factor climático de Fournier en la estimación de la erosión específica en la región de Madrid. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 11, 149-160. <https://doi.org/10.18172/cig.951>
- Ibañez-Asensio, S., Moreno-Ramón, H., & Gisbert-Blanquer, J. M. (2012). *El factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE)*. Consultado el 6 de junio, 2019, desde <https://riunet.upv.es/handle/10251/16847>
- INAFED. (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). (2010). *Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México, Aguascalientes*. Consultado el 24 de abril, 2020, desde <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM01aguascalientes/municipios/municipios.html>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). *Compendio de Información Geográfica Municipal 2010, Rincón de Romos, Aguascalientes*. Consultado el 23 de

- abril, 2020, desde https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/01/01007.pdf
- Kawuma, C. (2011). *Rainfall variation due to climate change: an inter-temporal investigation into its impact on subsistence crop net revenue*. Consultado el 16 de mayo, 2020, desde <http://hdl.handle.net/11250/187225>
- Kirkby, M. J., & Morgan, R. P. C. (1984). *Erosión de suelos*. México: Limusa
- Montes-León, M. A. L., Uribe-Alcántara, E. M., & García-Celis, Efraín. (2011). Mapa nacional de erosión potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(1), 05-17.
- Mitchell, J. K., & Bubenzer, G. D. (1984). Estimación de la pérdida de Suelo. En M. J. Kirkby, & R. P. C. Morgan (Eds.). *Erosión de suelos* (pp. 35-88). Mexico: Limusa.
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C.W., Hodnebrog, Ø., Marelle, L., Samset, B. H., ... Stohl, A. (2019). Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>
- Pérez-Salinas, J. E., Rufino-Rodríguez, F., López-Santos, A., Torres-González J. A., Meraz-Jimenez, A. J., Díaz-Romo, A., & Valdivia-Martínez, O. (2019). Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos negros del centro de México: estudio de un Phaozem. *Terra Latinoamericana*, 37(4), 391-400. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.531>
- Prado-Hernández, J. V., Rivera-Ruiz, P., León-Mojarro, B., Carrillo-García, M., & Martínez-Ruiz, A. (2017). Calibración de los modelos de pérdidas de suelo usle y musle en una cuenca forestal de México: caso El Malacate. *Agrociencia*, 51(3), 265-284.
- Römkens, M. J. M., Prasad, S. N., & Gerits, J. J. P. (1997). Soil erosion modes of sealing soils: a phenomenological study. *Soil Technology*, 11(1), 31-41. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(96\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(96)00113-4)
- Shepherd, T. G. (2003). Assessing soil quality using visual soil assessment. Tools for nutrient and pollutant management: applications to agriculture and environmental quality. *Occasional Report*, 17, 153-166.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. D.F.: SEGOB
- Song, Y., Liu, L., Yan, P., & Cao, T. (2005). A review of soil erodibility in water and wind erosion research. *Journal of Geographical Sciences*, 15(2), 167-176. <https://doi.org/10.1007/BF02872682>
- Stavi, I., & Lal, R. (2015). Achieving Zero Net Land Degradation: Challenges and opportunities. *Journal of Arid Environments*, 112, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.01.016>
- Trenberth, K. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47, 123-138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- USDA (United States Department of Agriculture). (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook Number 703. (pp. 34-407). Washington, DC, USA: United States Department of Agriculture.
- Vaezi, A. R., Sadeghi, S. H. R., Bahrami, H. A., & Mahdian, M. H. (2008). Modeling the USLE K factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*, 97, 414-423. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.017>
- Williams, J. R. (1975). *Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor*. (pp. 244-252). Washington, DC, USA: United States Department of Agriculture.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1962). Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning. *International Association of Scientific Hydrology Publication*, 59, 148-59.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Washington, DC, USA: United States Department of Agriculture.