

Pérdida de suelo evaluada por el método USLE en la subcuenca del río Estibaná, Panamá

Soil loss evaluated by the USLE method in the Estibana river sub-basin, Panama

Jorge Alberto Castro Villarreal^{1,3}, Juan Adriano Cabrera Rodríguez^{2,4}, José Ezequiel Villarreal Núñez^{1,5}.

¹Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá – IDIAP. Panamá. ²Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas – INCA. San José de las Lajas, Cuba. ³✉ jacastrovilla@gmail.com; ⁴✉ naniadriano1950@gmail.com; ⁵✉ jevilla38@gmail.com



<https://doi.org/10.15446/acag.v71n4.108071>

2022 | 71-4 p 369-376 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2023-03-29 Acep.: 2023-05-16

Resumen

La pérdida de suelo por efecto de la erosión es una de las formas principales de la degradación del suelo. El objetivo de esta investigación fue determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica en el tiempo en la subcuenca río Estibaná mediante la implementación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Para ello se utilizó una data de precipitaciones pluviométricas de once años de registros, se realizaron muestreos de suelo, mediciones de pendiente y evaluaciones de cobertura vegetal. Se seleccionaron tres áreas dentro de la subcuenca con pendientes diferentes y en cada una se estableció un ensayo con tres bloques y tres tratamientos: cobertura natural (CN), sin cobertura + barrera viva con *Chrysopogon zizanioides* (SC+BV) y sin cobertura (SC). La investigación se dividió en dos etapas: la primera en campo, donde se realizaron la toma de muestras de suelo y la evaluación de cobertura vegetal; la segunda abarcó trabajo de laboratorio y análisis e interpretación de datos. Se determinó que en la subcuenca la pérdida estimada de suelo osciló entre 0.021 - 70.670 t ha⁻¹ año⁻¹ y que los suelos sin cobertura en pendientes >6 % sobrepasaron la tasa tolerable de pérdida de suelo.

Palabras clave: cobertura vegetal, erosión, pendiente, prácticas de conservación, precipitaciones, USLE.

Abstract

Soil loss due to erosion is one of the main forms of soil degradation. The objective of this research was to determine soil loss due to water erosion over time in the Estibana river sub-basin by implementing the Universal Soil Loss Equation (USLE). For this purpose, rainfall data from records of eleven-years were used, and soil sampling, slope measurements and vegetation cover assessments were carried out. Three areas with different slopes were selected within the sub-basin, in each one, a trial with three blocks and three treatments was established: natural cover (NC), no cover + live barrier with *Chrysopogon zizanioides* (WC+LB), and no cover (WC). The research was divided into two stages, the first in the field, where soil sampling and vegetation cover assessment were carried out, while the second covered laboratory work, data analysis and interpretation. It was determined that, in the sub-basin, the estimated soil loss ranged from 0.021 - 70.67 t ha⁻¹ year⁻¹ and that WC on slopes >6% exceeded the tolerable rate of soil loss.

Keywords: vegetation cover, erosion, slope, conservation practices, rainfall, USLE.

Introducción

La degradación del suelo provoca, con el tiempo, cambios antagónicos en sus propiedades y procesos; estos pueden ser por la alteración del equilibrio del suelo con el medio ambiente debido a perturbaciones de origen natural o antropogénicas. En condiciones naturales las perturbaciones, por lo general, son de bajo impacto, lo cual permite al suelo adaptarse; sin embargo, algunas de estas perturbaciones naturales pueden ser rápidas y con cambios drásticos. Por otro lado, las actividades antrópicas provocan cambios rápidos, afectando el equilibrio entre el suelo y el medio natural (Ramírez *et al.*, 2011). Los procesos de degradación inician con el deterioro de la estructura del suelo, que pierde la capacidad de transferir y retener agua, y limita el desarrollo radical de las plantas. Dicha degradación se manifiesta con la formación de costras superficiales, compactación, drenaje insuficiente, aumento de la escorrentía y erosión hídrica o eólica (Jiménez, 2001). La erosión hídrica es el proceso mediante el cual se genera el desprendimiento, transporte y depósito de las partículas de suelo por acción de la energía cinética de la lluvia, escorrentía en movimiento y gravedad (Cisneros *et al.*, 2012).

Se ha establecido el término *tasa tolerable de pérdida de suelo* (T^2), cuya definición resulta compleja; con el paso del tiempo esta ha pasado por enfoques soportados en la fertilidad del suelo, en su profundidad o en consideraciones económicas. Sin embargo, en términos generales se toma la definición dada por Wischmeier (1976) que definió la T^2 como el “máximo nivel de erosión del suelo que permite un elevado nivel de productividad del cultivo, sostenible económicamente e indefinidamente”. La tasa tolerable de pérdida de suelo se acepta en $11.0 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, por la proximidad de este valor a la tasa máxima de desarrollo del horizonte bajo condiciones óptimas (Peláez, 2003).

La medición de la pérdida de suelo se puede realizar por métodos directos o indirectos. Los métodos directos consisten en la instalación de unidades experimentales en campo de área conocida, donde se mide el volumen de escorrentía y la masa de sedimentos. Los métodos indirectos son sistemas de modelación que se basan en principios matemáticos o en el uso de *softwares* modernos. Entre los modelos matemáticos más utilizados se encuentra la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) desarrollada por Wischmeier (1976); esta es un diseño estadístico de regresión múltiple que tiene como variables independientes las precipitaciones, al suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo. Este fue desarrollado para predecir el movimiento del suelo en pendientes específicas, bajo condiciones y usos de suelo específicos, orientar la selección de prácticas de conservación y determinar el largo máximo de pendiente tolerable para un sistema de cultivo determinado.

A partir del modelo USLE, el departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), con la cooperación de investigadores universitarios, desarrollaron un nuevo modelo RUSLE (USLE revisado); este mantiene los seis valores originales requeridos, y emplea nuevas relaciones para estimar los valores de los componentes. Requiere de tres bases de datos: datos climáticos, datos de cultivo y datos de operaciones de campo; en muchos casos los usuarios deben completar o modificar las bases de datos (Renard y Ferreira, 1993).

El modelo RUSLE requiere de una serie de subfactores para calcular algunos de sus componentes: un ejemplo es el factor C, que requiere de cinco subfactores para sus cálculos. Estos datos están establecidos en bases de datos que fueron desarrolladas a partir de información proveniente de las condiciones específicas de los Estados Unidos.

Según Ramírez *et al.* (2023), en la última década (2012-2022) se han publicado 56 trabajos relacionados con la escorrentía superficial y erosión, de los cuales 19.6 % (11) son procedentes de Argentina, 14.3 % (8) de la India y el 7.1 % (4) de Estados Unidos. Sin embargo, los estudios relacionados con la escorrentía o la pérdida de suelo son escasos en Panamá; la información más reciente sobre la superficie de suelo afectada por erosión fue publicada hace 36 años y afirmaba que en Panamá existían 2 018 000 hectáreas afectadas en algún nivel por erosión (Morales, 2017).

Por otro lado, la subcuenca del río Estibaná se encuentra ubicada en la península de Azuero, la cual está enmarcada en la zona de interés conocida como “Arco Seco”. Esta zona comparte condiciones climáticas, edáficas y de manejo similares. Las evaluaciones de pérdida de suelo son escasas a nivel nacional y en la zona de estudio no se reporta ninguna evaluación en el tema.

De tal manera, el objetivo de esta investigación fue determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca del río Estibaná mediante la implementación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

Materiales y métodos

Localización: el ensayo se realizó en la subcuenca río Estibaná ubicado en la península de Azuero, provincia de Los Santos, Panamá, durante la época lluviosa de 2020 y 2021 (Figura 1). Esta es una zona intervenida por fuentes antrópicas, y las actividades principales son las explotaciones agropecuarias, que presentan una tasa elevada de deforestación, lo que la hace susceptible al efecto erosivo de las precipitaciones. La subcuenca tiene un área de 197.0 km^2 en la zona central de la península de Azuero (ANAM, 2013). Los suelos dentro de la subcuenca pertenecen al orden Inceptisol, formados por depósitos fluviales y suelos residuales (IDIAP, 2010). Los suelos evaluados dentro

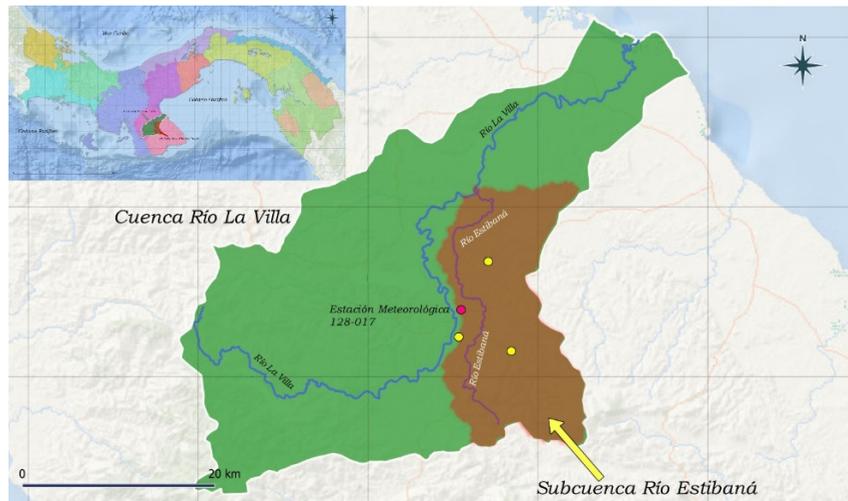


Figura 1. Ubicación de la subcuenca río Estibaná con respecto a la República de Panamá. En rojo estación 128-017 y en amarillo parcelas de campo (IDIAP, 2023).

de la subcuenca, según el análisis de textura, están clasificados como suelos franco-arcillosos, lo que los hace suelos con una infiltración de media-baja, retención de agua de media-alta y una susceptibilidad a la erosión de media-alta.

Las localidades de estudio fueron El Cedro (7°47'19.0" N - 80°31'36.9" O) con una pendiente de 10 % y elevación de 134 m s.n.m.; Los Rastrojos (7°42'16.7" N - 80°30'19.2" O) con pendiente de 4.4 % y elevación de 112 m s.n.m.; y Macaracas (7°42'59.9" N - 80°33'15.6" O) que tiene una pendiente de 2.5 % y una elevación de 118 m s.n.m. (Figura 1).

Ecuación Universal de Pérdida de Suelos: se utilizó la metodología propuesta por Wischmeier (1976), la cual responde a una ecuación de cinco variables.

$$A=R*K*LS*C*P$$

donde:

A= pérdida de suelo en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$, **R**= factor de erosividad de la lluvia ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$), **K**= factor de erodabilidad del suelo ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$), **LS**= factor topográfico, **C**= factor de cobertura del terreno, **P**= factor de prácticas de conservación.

Factor de erosividad de la lluvia (R): es la sumatoria de los valores individuales de la erosividad de las tormentas durante un periodo determinado y depende de la intensidad máxima (I_{30}) y la energía cinética de la lluvia (E).

Este factor se estimó para cada tormenta significativa que tuvo una precipitación mínima de 12.5 mm, a menos que cayeran 6.25 mm en un periodo de 15 minutos. El tiempo mínimo requerido para separar un evento lluvioso de otro fue de 4.0 horas. Los registros pluviométricos fueron de 11 años.

El cálculo del factor R se debe realizar para todas las tormentas significativas del día, luego se suman los valores de R diarios y posteriormente se suman los resultados de cada día para obtener un valor para el mes, y luego los valores mensuales se suman para obtener el factor R total.

Factor de erosividad (R)

$$R = \sum E * I_{30}$$

Energía cinética (E)

$$E = 0.119 + 0.0873 * \log I$$

Intensidad Máxima en 30 min. (I_{30})

$$I_{30} = P_p \frac{a}{b}$$

donde: I_{30} = intensidad máxima ($mm\ h^{-1}$), P_p = precipitación del intervalo conocido (mm), a = intervalo de tiempo deseado (min), b = intervalo de tiempo de la lectura (min).

Los datos de precipitaciones se obtuvieron de la estación meteorológica tipo A automática 128-017 de la Empresa de Transmisión Eléctrica (ETESA) ubicada en la ciudad de Macaracas en las coordenadas geográficas 7°44'37" N - 80°33'09" O a una cota de elevación de 95 m s.n.m. (Figura 1). La información suministrada correspondió a los registros de precipitaciones de once años (2010 - 2020), los cuales fueron registrados cada 15 minutos.

Factor de erodabilidad de suelo (K): representa la vulnerabilidad propia del suelo a la erosión y se calcula en función de: porcentaje de limo + arena muy fina (0.100 mm - 0.002 mm), porcentaje de arcilla y de materia orgánica, del índice de permeabilidad y del índice de estructura del suelo. Se estimó mediante la ecuación:

$$100K=2.71M^{1.14} (10^4)(12-a) + 4.20(b-2)+3.23(c-3)$$

donde: M = (% limo + % arena muy fina) * (100 - % arcilla), a = % de materia orgánica, b = código de estructura (Wischmeier y Smith, 1978), c = código de permeabilidad (Wischmeier y Smith, 1978).

El valor K se expresa en unidades inglesas, por lo que se multiplicó por el factor de conversión 1.317 para convertir los datos al sistema internacional (SI); el factor se representa en t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹, que expresa la resistencia del suelo en superficie y tiempo respecto a la energía de la lluvia. Es importante mencionar que esta ecuación solo es válida para suelos que poseen una fracción limosa menor al 70 %.

Por otra parte, el contenido de materia orgánica del suelo se determinó por digestión, de acuerdo con el método de Walkley & Black, según el *Manual de técnica analíticas del laboratorio de suelos de IDIAP* (Villarreal et al., 2015). Se realizaron muestreos de suelo en las tres localidades a una profundidad de 0.20 m en cada tratamiento evaluado y se tomaron dos muestras compuestas por diez submuestras que se secaron y homogenizaron.

Código de estructura del suelo: su determinación se efectuó mediante la observación y el tacto, asignando valores de 1-4. En la Tabla 1 se presentan las categorías y códigos empleados de acuerdo con la USLE.

Código de permeabilidad de suelo: se determinó en campo a partir de pruebas de infiltración y se le asignaron valores entre 1-6 según la permeabilidad en el suelo. Esta clasificación se encuentra en la Tabla 1.

Factor topográfico (LS): la USLE no fue desarrollada para aplicarse bajo escenarios extremos de topografía. El factor combina el efecto de la pendiente con la longitud del flujo, y este se calcula a través de la ecuación:

$$LS=(l/22.13)^m (0.006541 s^2+0.0456 s+0.065)$$

Tabla 1. Códigos de estructura y permeabilidad del suelo para USLE (Jaramillo-Véliz, 2021)

Estructura del suelo	Código	Permeabilidad del suelo	Código
Granular muy fina (<1 mm)	1	Rápida a muy rápida	1
Granular fina (1-2 mm)	2	Moderada a rápida	2
Granular media o gruesa (2-10 mm)	3	Moderada	3
Bloque, laminar o maciza	4	Moderadamente lenta	4
		Lenta	5
		Muy lenta o nula	6

donde: **l** = longitud de la pendiente, **m**= 0.5 pendientes ≥5 %; 0.4 pendientes entre 3.5 - 4.5 %; 0.3 pendientes entre 1.0 - 3.0 % y 0.2 pendientes <1.0 % y **s**= valor de la pendiente en %.

La pendiente del terreno se calculó por el método planimétrico, que consiste en determinar la diferencia de elevación entre el punto más alto y el más bajo de la parcela. Para ello se utilizó cinta métrica, cuerda de nailon y nivel de burbuja para cuerda; se colocó el hilo desde la parte superior de la parcela hasta la parte inferior, se procedió a nivelarlo y se midió la distancia del hilo hasta la superficie del suelo en la parte inferior de la parcela.

El porcentaje de pendiente se obtiene de la siguiente razón trigonométrica,

$$S(\%) = \frac{a}{b} * 100$$

donde: **S**= pendiente (%), **a**= diferencia de altura (m), **b**= distancia (m) y **100**= factor de conversión a porcentaje.

Factor de cobertura vegetal (C): es un factor constante para cultivos permanentes y variable para cultivos de ciclo anual. Este se puede determinar mediante las tablas desarrolladas por Wischmeier y Smith (1978); dichas tablas han sido enriquecidas por autores posteriores como Mitchell y Burbenzer (1984). La Tabla 2 presenta los valores de C según el tipo de cultivo y de cobertura del terreno para cultivos permanentes y anuales. Para determinar el valor de la cobertura vegetal se evaluó la cobertura y se establecieron parámetros como: estado general de la cobertura, altura y porcentaje de cobertura.

Tabla 2. Índices del factor C para la cobertura vegetal en relación con las prácticas agrícolas utilizadas

Prácticas agrícolas	Valor C
Suelo desnudo	1.0
Bosque o matorral denso con alto contenido de M.O.	0.001
Pradera (pastizal), en buenas condiciones	0.01
Pastizal o pradera sobrepastoreada	0.10
Cereales en producción: maíz, sorgo, mijo	0.40 - 0.90
Algodón o tabaco	0.50 - 0.70
Maní en producción	0.40 - 0.80
Palma de aceite, café y cacao, este último con cobertura	0.10 - 0.30
Piña sembrada en contorno (con residuo superficial)	0.20 - 0.80
Arroz (con fertilización intensiva)	0.10 - 0.20
Cultivos de desarrollo lento (primer año)	0.30 - 0.80
Cultivos de desarrollo lento (segundo año)	0.01 - 0.10
Cultivo de desarrollo rápido (primer año)	0.01 - 0.10

Fuente: Mitchell y Burbenzer (1984).

Los valores de cobertura vegetal del terreno se dan en un rango de 0-1; si el valor se encuentra próximo a 1, significa que el suelo carece de cobertura, y si está próximo a 0, representa la presencia de una buena cobertura del suelo.

Factor de prácticas de conservación (P): expresa el efecto de las prácticas de conservación de suelos que tienden a modificar la topografía, tales como: curvas a nivel, cultivos en fajas o terrazas. Wischmeier y Smith (1978) determinaron los valores más comunes de P, basados en la práctica de conservación y la pendiente. También Núñez (2001) presentó la actualización de valores P realizada por Mitchell y Burbenzer (1984).

Para poder determinar el valor de P es necesario conocer el porcentaje de pendiente del suelo en estudio, de igual forma se debe establecer el tipo de práctica de conservación presente. La Tabla 3 muestra los valores de P para diferentes prácticas de conservación y grado de pendiente; entre más cercano el valor a 0, más eficiente es la práctica de conservación. Dichos valores se aproximaron para obtener un valor más exacto, ya que estaban establecidos para un rango de pendiente.

Diseño experimental: se establecieron tres áreas de investigación diferenciadas por el grado de pendiente donde se encuentran, y en cada una se utilizaron tres tratamientos con tres repeticiones en un arreglo de bloques completos al azar (BCA). Las parcelas contaron con 11.0 m de largo por 2.0 m de ancho; estuvieron delimitadas con manta de polietileno negro o con lámina de metal introducida en el suelo a 0.15 m. Los tratamientos empleados fueron: sin cobertura (SC), cobertura natural (CN) y sin cobertura + barrera viva (SC+BV) de valeriana (*Chrysopogon zizanioides*). Para efecto de la modelación se evaluó la pérdida de suelo bajo dos condiciones de manejo de la cobertura vegetal (CN y SC) y también se estudió el uso de una barrera viva en suelos sin cobertura (SC+BV), con el objeto de medir el efecto de estas en la mitigación de la erosión hídrica.

Procesamiento de datos: se utilizó el software Microsoft Office Excel 2019® para la tabulación de los datos climáticos, datos de suelos (campo y laboratorio).

Tabla 3. Índices utilizados para el factor P, prácticas de conservación de suelo

Pendiente del terreno (%)	Cultivo en contorno con surcos irrigados	Cultivo en franjas de contorno y en terraceo	Valor utilizado
1.0-2.0	0.60	0.30 0.12	0.38
3.0-8.0	0.50	0.25 0.10	0.25
9.0-12.0	0.60	0.30 0.12	0.30
13.0-16.0	0.70	0.35 0.14	
17.0-20.0	0.80	0.40 0.16	
21.0-25.0	0.90	0.45 0.18	

Fuente: Mitchell y Burbenzer (1984).

Resultados y discusión

La evaluación de los datos climáticos generados por la estación 128-017 para el periodo 2010-2020 arrojaron un promedio anual de precipitación de 1306.40 mm, los cuales presentaron una distribución irregular a lo largo de año. En la Figura 2 se muestra la precipitación promedio mensual y el valor calculado del factor R.

Se observó que las lluvias se concentraron entre los meses de abril a diciembre, cuando precipitó 99.8 % de ellas; agosto y noviembre corresponden a los meses de mayores precipitaciones.

El factor R no mostró total correspondencia con el volumen de precipitaciones, tal como se encontró para los meses de julio, agosto y octubre. Esto pudiera ser una razón por la que en el cálculo del factor solo se consideran la intensidad y la energía cinética de las lluvias.

La Tabla 4 muestra los valores del factor R para cada año evaluado (2010 - 2020). El valor promedio del factor para el periodo estudiado fue de 202.23 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

La erodabilidad del suelo (factor K) se considera como el más importante para la modelación de la pérdida de suelo. En la Tabla 5 se presentan el contenido de materia orgánica, el análisis de textura y los valores del factor K para la subcuenca río Estibaná.



Figura 2. Distribución de las precipitaciones mensuales promedio estación 128-017 (ETESA, 2021) y valor promedio mensual del Factor R para el periodo comprendido desde 2010 hasta 2020.

Tabla 4. Valor calculado del factor R para una data de 11 años (2010 - 2020) de la estación 128-017 ubicada en la ciudad de Macaracas, Los Santos, Panamá

Año	Factor R	Año	Factor R
2010	273.17	2016	204.24
2011	201.51	2017	144.49
2012	226.88	2018	210.80
2013	148.87	2019	228.01
2014	248.93	2020	202.37
2015	138.53		
Factor R		202.53	

Los suelos evaluados presentaron una textura franco-arcillosa con un contenido de materia orgánica (MO) de medio a bajo. La MO en el suelo es un factor clave debido a su capacidad de mejorar la estructura del suelo y la permeabilidad. De tal manera que, si el valor de K tendiente a 0 indica que el suelo presenta baja susceptibilidad a la erodabilidad. En esta investigación los suelos dentro de la subcuenca presentaron valores estimados para el factor K entre 0.152 - 0.421 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹.

Por su parte, en la Tabla 6 se presentan los valores del factor topográfico (LS). Los resultados indicaron que en la medida en que la pendiente resultó menor, mayor fue el efecto atenuante sobre la masa de suelo erosionable, debido a que este factor es determinante en la velocidad y capacidad disgregadora de la escorrentía, así como en el transporte del suelo erosionado.

Tabla 5. Factor K (t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹) calculado a partir de la ecuación con datos obtenidos a partir de muestras de suelo provenientes de las localidades en estudios dentro de la subcuenca río Estibaná

Parámetro	Macaracas	Los Rastrojos	El Cedro
% Arena	40	31	44
% Limo	24	28	32
% Arcilla	36	40	24
% M.O.	2.08	2.30	1.14
C. Est.	2	2	3
C. Per.	3	3	5
Factor K			0.421
0.152			
0.165			

Tabla 6. Valor del factor LS calculado a partir de datos obtenidos de campo

Macaracas 2.5 %	Los Rastrojos 4.4 %	El Cedro 10 %
l = 11.0	l = 11.0	l = 11.0
m = 0.30	m = 0.40	m = 0.50
s = 2.5	s = 4.4	s = 10.0
Factor LS 0.178	Factor LS 0.297	Factor LS 0.828

l: longitud de la pendiente, m: factor según pendiente, s: pendiente.

Tabla 7. Valor estimado del modelo USLE para pérdida de suelo (t ha⁻¹ año⁻¹) en las pendientes predominantes en la subcuenca río Estibaná, Los Santos Panamá

Localidad	Tratamiento	Factores USLE					A (t ha ⁻¹ año ⁻¹)
		R	K	LS	C	P	
Macaracas (2.5 %)	CN	202.53	0.152	0.178	0.01	0.38	0.021
	SC+BV	202.53	0.158	0.178	1.00	0.25	2.146
	SC	202.53	0.158	0.178	1.00	1.00	5.722
Los Rastrojos (4.4 %)	CN	202.53	0.168	0.297	0.01	0.25	0.025
	SC+BV	202.53	0.176	0.297	1.00	0.25	2.636
	SC	202.53	0.176	0.297	1.00	1.00	10.544
El Cedro (10 %)	CN	202.53	0.382	0.828	0.01	0.30	0.192
	SC+BV	202.53	0.421	0.828	1.00	0.30	21.201
	SC	202.53	0.421	0.828	1.00	1.00	70.670

CN: cobertura natural, SC+BV: sin cobertura + barrera viva, SC: sin cobertura, R: erosividad de la lluvia, K: erodabilidad del suelo, LS: factor topográfico, C: cobertura del suelo, P: prácticas de conservación, A: pérdida de suelo.

Los factores de cobertura (C) y prácticas de conservación (P) se evalúan directamente en campo. La Tabla 2 muestra los valores establecidos para diferentes tipos de cobertura. Para SC el valor C fue de 1.0, lo que indicó la ausencia de atenuante para la pérdida de suelo generada por la lluvia; por otro lado, para CN el valor fue de 0.01, lo cual representó un fuerte atenuante para la erosión hídrica.

Los valores calculados del factor P (Tabla 3) para las pendientes evaluadas oscilaron entre 0.25- 1.00; entre más cercano el valor de P a 1.0, menor fue el efecto de las prácticas de conservación sobre la pérdida de suelo.

Ahora bien, en la Tabla 7 se resumen los valores calculados en cada factor necesario para el modelo USLE, para cada tratamiento evaluado y cada pendiente; también presenta el valor de salida del modelo en t ha⁻¹ año⁻¹.

El factor topográfico (LS), el factor de cobertura (C) y el factor de prácticas de conservación (P) tuvieron alta influencia en la mitigación del efecto de la erosividad de la lluvia sobre el suelo.

Las estimaciones de pérdida de suelo para la subcuenca río Estibaná resultaron 51.4 % menores de los valores máximos informados por Zúñiga (2017) para la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca - Arequipa, que ascendieron a 145.50 t ha⁻¹ año⁻¹. Por otro lado, Santillán (2023) reportó que en la microcuenca del río Muchacho, en Ecuador, la pérdida de suelo ascendió a 74.4 t ha⁻¹ año⁻¹. Mientras que Pérez *et al.* (2000) informaron que en suelos del orden Inceptisol en la zona andina en Venezuela la erosión fue de 69.8 t ha⁻¹ año⁻¹, lo que quiere decir que estos suelos son similares a los presentes en la subcuenca río Estibaná.

En Panamá el trabajo realizado por Mejía-Gutiérrez (2018) reportó que en suelos Ultisoles desnudos de la provincia de Panamá Oeste, la pérdida de suelo fue de 200.08 t ha⁻¹ año⁻¹ mientras que la erosión en suelos Inceptisoles de la subcuenca fue 64.7 % menor. Los suelos Inceptisoles presentan variación con

Tabla 8. Rangos de tasas de erosión para zonas tropicales, donde el valor de pérdida de suelo tolerable está por debajo de 10 t ha⁻¹ año⁻¹ (Santillán, 2023)

Categoría	Rango (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Interpretación
Muy baja	0.0 – 5.0	Suelos no susceptibles al proceso erosivo
Baja	5.0 – 10.0	Suelos con niveles de erosión baja y pérdidas tolerables
Moderada	10.0 – 25.0	Zonas con procesos erosivos leves
Media	25.0 – 50.0	Zonas con pérdida de suelo poco tolerables
Alta	50.0 – 100.0	Suelos con procesos de erosión graves
Muy alta	100.0 – 200.0	Sitios donde la erosión se aprecia con frecuencia
Crítica	> 200.0	Zonas con procesos erosivos extremos

respecto a los suelos Ultisoles, sin embargo, la falta de investigaciones realizadas en Panamá sobre erosión en suelos Inceptisoles motiva el uso de referencias con otros órdenes de suelo.

En la Tabla 8 se detallan los rangos de tasas de erosión para suelos tropicales (Santillán, 2023). Según esta clasificación los suelos que tenían una cobertura natural (CN) en buenas condiciones presentaron valores de pérdida de suelos clasificados como muy bajos (0.0–5.0 t ha⁻¹ año⁻¹), sin que el porcentaje de pendiente del terreno fuese relevante.

Cuando se evaluó un tratamiento sin coberturas más uso de barrera viva (SC+BV) en las localidades de Macaracas y Los Rastrojos se determinó que la pérdida seguía clasificándose como muy baja, ya que los valores reportados no superaron los 5.0 t ha⁻¹ año⁻¹, sin embargo, para pendientes mayores del 6 % se determinó que la pérdida de suelo fue de 21.20 t ha⁻¹ año⁻¹, lo que coloca a estos suelos en la categoría de erosión moderada (10.0–25.0 t ha⁻¹ año⁻¹) con procesos erosivos leves.

El uso de labores agropecuarias que implican la total eliminación de la cobertura vegetal del suelo es una práctica ampliamente empleada en la subcuenca río Estibaná, ya sea para el control de malezas en terrenos de pastoreo o para la limpieza del barbecho previo a la siembra. Bajo condiciones de sin coberturas (SC) se determinó que para pendientes entre 0–3 % la pérdida de suelo fue de 5.72 t ha⁻¹ año⁻¹, lo cual es clasificado como erosión baja; en cuanto a pendientes entre 3–6 %, se estableció que la pérdida de suelo fue de 10.54 t ha⁻¹ año⁻¹, con una erosión moderada. Para las pendientes >6 %, se determinó que la pérdida de suelo fue de 70.67 t ha⁻¹ año⁻¹, por lo cual son clasificadas como zonas de erosión alta con procesos erosivos graves.

Conclusiones

Los valores de pérdida de suelo estimados por el modelo USLE mostraron que en la subcuenca río Estibaná, bajo las condiciones evaluadas, la erosión hídrica es un proceso de degradación de mucha relevancia en el desarrollo de futuros planes de manejo. Basándose en los valores estimados de pérdida de suelo y en la tasa tolerable, se observó que

suelos con pendientes <6 % no presentan riesgo de erosión que afecte la sostenibilidad y la productividad de los cultivos. La cobertura de suelo es de mucha importancia para mitigar los efectos erosivos de la lluvia; los resultados de esta investigación demostraron que la práctica de eliminar la cobertura vegetal del terreno tiene efectos graves sobre el medio edáfico. Es necesario el desarrollo de planes de manejo y capacitaciones orientadas a concientizar a la población de la subcuenca río Estibaná en el adecuado manejo del suelo, en miras a mantener productividad y mejorar la sostenibilidad.

Referencias

- ANAM (Autoridad Nacional del Ambiente). (2013). *Diagnóstico ambiental participativo de la subcuenca río Estibaná*. República de Panamá.
- Cisneros, J.; Cholaky, C.; Cantero, A.; González, J.; Reyner, M.; Diez, A. y Degioanni, A. (2012). *Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo*. Córdoba: Ed. UniRío.
- ETESA (Empresa de Transmisión Eléctrica S.A.). (2020). Registro meteorológico de la estación 128-017 (Macaracas). Gerencia de Investigación y Aplicaciones Climáticas.
- IDIAF (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá). (2023). Mapas de la cuenca 128 – río La Villa y su afluente principal río Estibaná. Sección de sistemas de información geográfica (SIG). <https://cuencas.miambiente.gob.pa/mapas-de-cuencas/>
- Jaramillo-Véliz, J. J. (2021). Diagnóstico de la erosión hídrica del suelo aplicando modelo USLE mediante herramientas SIG. *Polo del Conocimiento*, 6(4), 609-631. <https://orcid.org/0000-0001-8715-0789>
- Santillán, J. (2023). Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 15(1), 26-39. <https://doi.org/10.29166/revfig.v15i1.4269>
- Jiménez, A. C. A. (2001). *Suelos tropicales*. San José, CR: EUNED.
- Mejía-Gutiérrez, J. I. (2018). Evaluación de la pérdida de suelo y nutrientes por erosión hídrica en el cultivo de piña en La Chorrera, Panamá Oeste, Panamá. Tesis de Maestría, Universidad de Panamá. Panamá, PA. <http://up-rid.up.ac.pa/1419/>
- Mitchell, J. K. y Burbenzer, G. D. (1984). *Estimación de la pérdida del suelo*. Kirby, M. J y Morgan, R. P. C. (compiladores). México: Limusa.
- Morales, G. A. R. (2017). La erosión de los suelos en Panamá y sus impactos. *El Tecnológico*, 28(1), 14-16.
- Núñez-Solís, J. (2001). *Manejo y conservación de suelos*. San José, CR: EUNED.
- Peláez, J. D. L. (2003). Métodos experimentales para el seguimiento y estudio de la erosión hídrica. *Gestión y Ambiente*, 6(1), 39-56. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/89005>
- Pérez, U. y López, R. (2000). Estudio preliminar de la erosión hídrica en un Inceptisol de los andes venezolanos bajo uso agrícola. *Revista Forestal Venezolana*, 44(2), 11-19. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/24160>
- Ramírez, M. E.; Limas, E. A.; Ortiz, P. R. y Díaz, A. R. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía*, 53-54, 77-88. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/143451>

- Ramírez, P. G.; Cejudo, L. C. A. y Peña, L. C. B. (2023). Modelos de escorrentía superficial en la última década. Una revisión bibliográfica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 7726-7750. <https://doi.org/10.2134/jeq1993.00472425002200030009x>
- Renard, K. G. y Ferreira, V. A. (1993). RUSLE model description and database sensitivity. *Journal of Environmental Quality*, 22(3), 458-466. <https://doi.org/10.2134/jeq1993.00472425002200030009x>
- Villarreal, J.; Name, B. y Barahona, L. (2015). *Manual de técnicas analíticas del laboratorio de suelos de IDIAP*. Panamá: Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP).
- Wischmeier, W. H. (1976). Use and misuse of the universal soil loss equation. *Journal of Soil Water Conservation*, 31(1), 5-9.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (N.º 537). Washington: Department of Agriculture, Science and Education Administration. https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/64080530/rusle/ah_703.pdf
- Zúñiga-Huaco, J. E. (2017). Determinación de la pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca-Arequipa aplicando USLE y técnicas geoespaciales. Escuela de Posgrado - Universidad Agraria La Molina. Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3072>