



Pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca río Estibaná, Panamá*

Soil loss due to water erosion in the Estibaná River sub-basin, Panama

Jorge Alberto Castro-Villarreal¹, José Ezequiel Villarreal-Núñez¹, Juan Adriano Cabrera-Rodríguez²

* Recepción: 6 de mayo, 2024. Aceptación: 13 de agosto, 2024. Tesis para optar al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas del primer autor, financiada por Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá y recursos propios.

¹ Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP). Herrera, Panamá. jacastrovilla@gmail.com (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0009-0001-4779-2725>); jevilla38@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1317-1960>).

² Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). Mayabeque, Cuba. naniadriano1950@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-0850-9050>).

Resumen

Introducción. La degradación del suelo se desarrolla de forma natural a pequeña escala; sin embargo, la intervención del ser humano ha acelerado y maximizado este proceso. La erosión es uno de los principales procesos vinculados a la degradación. Esta, junto con sistemas de explotación no adaptados al medioambiente, constituye la base para la reducción de la productividad y la contaminación de los cuerpos de agua. En Panamá, la degradación del suelo afecta 20 787 km², área que abarca zonas donde se concentra gran parte de la producción agropecuaria del país. **Objetivo.** Determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca río Estibaná mediante la implementación de parcelas de erosión. **Materiales y métodos.** La investigación se llevó a cabo en la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá (Arco Seco), durante la época lluviosa (mayo-diciembre) de los años 2020 y 2021. Se utilizó la metodología de parcelas de erosión, con el empleo de un diseño de bloques completos al azar en tres localidades. Se evaluaron tres tratamientos, con tres repeticiones, donde se determinó la escorrentía total y la masa de sedimentos transportados (suspendidos y precipitados), y se realizó un análisis de varianza multifactorial. **Resultados.** La erosión fue influenciada por factores como la pendiente, la cobertura del suelo y la precipitación. Se determinó que la erosión ascendió a 62,98 Mg/ha/año en suelo desnudo en pendientes de 10 %. Con barreras vivas y cobertura del suelo, se mitigó el daño por erosión. El comportamiento en otras pendientes fue similar. **Conclusiones.** La variación en la frecuencia, intensidad y duración de las precipitaciones, así como las intervenciones antrópicas en el medio natural, son las principales causantes del incremento de la pérdida de suelo dentro de la subcuenca río Estibaná. La implementación de labores de conservación de bajo costo puede mitigar el efecto erosivo de la escorrentía superficial.

Palabras clave: cobertura, escorrentía, sedimentos, contaminación ambiental.

Abstract

Introduction. Soil degradation develops naturally on a small scale; however, human intervention has accelerated and maximized this process. Erosion is one of the main processes linked to degradation; this, combined with exploitation systems not adapted to the environment, is the basis for the reduction of productivity and pollution of



water bodies. In Panama, soil degradation affects 20,787 km², an area that covers zones where much of the country's agricultural production is concentrated. **Objective.** To determine soil loss due to water erosion in the Estibana River sub-basin through the implementation of erosion plots. **Materials and methods.** The research was carried out in the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama (Arco Seco), during the rainy season (May-December) of the years 2020 and 2021. The methodology of erosion plots was applied, using a random complete block design in three locations, evaluating three treatments, with three repetitions, where total runoff, mass of transported sediments (suspended and precipitated), and a multifactorial analysis of variance was performed. **Results.** Erosion was influenced by factors such as slope, soil cover and precipitation. It was determined that erosion amounted to 62.98 Mg/ha/year in bare soil on 10 % slopes. Introducing living barriers and soil cover mitigated erosion damage. The behavior on other slopes was similar. **Conclusions.** The variation in the frequency, intensity and duration of precipitation, as well as anthropogenic interventions in the natural environment, are the main causes of the increase in soil loss within the Estibana River sub-basin. The implementation of low-cost conservation efforts can mitigate the erosive effect of surface runoff.

Keywords: cover, runoff, sediments, environmental contamination.

Introducción

El suelo es el principal elemento para el funcionamiento de cualquier ecosistema. Aporta el soporte y los nutrientes a los cultivos y a la cobertura forestal; además, cumple otras funciones como ente de filtrado y regulador del agua; en él se realizan los ciclos biogeoquímicos esenciales para el reciclaje de nutrientes (Bailon Linares, 2023). A pesar de la importancia que tiene este elemento natural, se encuentra bajo una creciente presión a causa de la implementación de patrones insostenibles de producción y consumo (Bailon Linares, 2023).

La erosión se considera el problema más significativo de la degradación de los suelos a nivel mundial. Esta provoca graves impactos al medioambiente y elevados costos económicos debido a los efectos que ocasiona en la producción agrícola, la infraestructura y la calidad de vida de la población (Nájera González et al., 2016). El 25 % de la superficie terrestre presenta altos niveles de degradación; cada década se pierden 120 millones de hectáreas por la degradación del suelo (Molina & Lozano, 2016).

La cuantificación y zonificación de la pérdida de suelo es fundamental para la implementación de mejores prácticas de conservación, por cuanto se estima que, a escala planetaria, la degradación del suelo por actividades antropogénicas supera los 2000 millones de hectáreas, de las cuales alrededor de 1100 millones son por erosión hídrica (Ganasri & Ramesh, 2016).

La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce la disgregación, transporte y depósito de las partículas del suelo por la acción de la energía cinética de la lluvia, la escorrentía en movimiento y la gravedad (Cisneros et al., 2012). A causa de los efectos tangibles de la erosión, se ha establecido el término “tasa tolerable de pérdida de suelo (T^2)”, la cual se define como el “máximo nivel de erosión del suelo que permite un elevado nivel de productividad del cultivo, sostenible económicamente e indefinidamente” (León Peláez, 2003). Se acepta que el valor para T^2 es de 11,0 Mg/ha/año, debido a la proximidad de este valor con la tasa máxima de desarrollo del horizonte bajo condiciones óptimas (León Peláez, 2003).

En los suelos desnudos la lluvia rompe los agregados del suelo y produce fenómenos como el encostramiento del suelo y el sellado de los macroporos, lo que reduce la capacidad de infiltración y aumenta la escorrentía. Sumado al efecto de la pendiente, esta es la fórmula para un problema erosivo. En la cuenca del río Salado, Argentina, se han destacado los efectos negativos irreversibles del sellado del suelo, incluida la impermeabilización (García Alvarado et al., 2020), y se ha enfatizado en que el sellado y la compactación superficial son relevantes

para la capacidad de infiltración del suelo (Cerquera et al., 2010). El efecto de estos procesos en el suelo incrementa la escorrentía superficial y la probabilidad de que se den eventos erosivos importantes, al reducir la capacidad de infiltración de suelo.

Los procesos de erosión hídrica están regidos por factores como el volumen y la intensidad de las lluvias, la pendiente, el tipo de cobertura, la falta de prácticas de conservación y las características físicas del suelo (Álvarez Tiellasuca, 2020), ya que, para que se genere el fenómeno de escorrentía superficial, se requiere que los agregados se rompan y que se sobrepase la capacidad de infiltración de los suelos. El volumen y la intensidad de las lluvias son factores críticos que no se pueden controlar y, junto con la pendiente, pueden generar flujos superficiales con capacidad erosiva.

Los análisis de la relación erosión del suelo-productividad sugieren que una pérdida media de 0,3 % del rendimiento anual de los cultivos sucede por la erosión de los suelos. De llegar a mantenerse esta tasa en el futuro, una reducción del 10 % del rendimiento potencial podría ocurrir para el 2050; esto puede ser equivalente a la eliminación de 150 millones de hectáreas de suelo de cultivo o a 4,5 millones de hectáreas por año (Pennock & McKenzie, 2015).

Las investigaciones dirigidas a calcular la pérdida de suelo por efecto de la erosión hídrica *in situ* requieren de una fuerte inversión de recursos económicos y técnicos. Además, su ejecución es compleja, ya que implica múltiples tomas de datos en la zona de estudio y se debe tomar en consideración la accesibilidad de área.

La tasa de erosión en Panamá es elevada. En 1960, el total de suelos erosionados sumaba 500 000 hectáreas. Para 1970, las áreas erosionadas cubrían alrededor de 748 000 hectáreas, y en 1987 el total ascendía a 2 018 000 hectáreas (Ruíz Morales, 2017). La degradación de los suelos es un proceso creciente y acumulativo. En la actualidad, hay una superficie de 20 787,57 km² (27 % del territorio nacional) afectada por algún proceso de degradación (Mejía et al., 2023). La evaluación mundial de la degradación de las tierras para América Latina y el Caribe (GLADA) estimó que en Panamá la pérdida de suelo fue de 14 millones de toneladas al año, con un costo estimado de \$10,00 ha/año, lo que representa un total de 140 millones de dólares o 0,90 % del producto interno bruto (Mejía et al., 2023).

Se determinó que en suelos Ultisoles en cultivo de piña, la pérdida por erosión hídrica fue de 4,28 Mg/ha, en parcelas de siembra convencional con uso de barreras vivas de hierba limón (*Cymbopogon citratus*), 13,72 Mg/ha para siembra convencional y 200,08 Mg/ha para suelos desnudos (Mejía Gutiérrez, 2018). En el distrito de Tierras Altas se evaluó la pérdida de suelo en campos de cultivo con pendientes entre 30 %-50 % y se determinó una tasa de erosión entre 64,50-344,0 Mg/ha, mientras que en áreas boscosas con pendientes entre 30 %-40 % la pérdida de suelo fue de 0,78-1,47 Mg/ha (Happ, 2014).

La conservación del suelo es fundamental en la agricultura moderna, ya que su degradación puede tener impactos negativos en la productividad agrícola y en el medioambiente. En la actualidad, existe una amplia variedad de técnicas de conservación de suelos. La selección de una o más de estas dependerá del recurso económico disponible. Según el costo de las actividades de conservación, las más accesible para los agricultores son la que requieren poca o ninguna mecanización del terreno, entre las cuales están la siembra en contorno, las coberturas muertas (Mulch) y las barreras vivas o muertas.

El establecimiento de una barrera viva depende de la pendiente del terreno. En suelos con una pendiente de 2,0 %, las barreras vivas se colocan cada 30,5 m, mientras que, en terrenos con una pendiente de 10,0 %, se deben instalar cada 12,2 m, y en pendientes de 15,0 %, las barreras se disponen cada 9,7 m (Cubero, 1999).

En Panamá, se han identificado cuatro áreas que se encuentran sometidas a procesos de sequía y degradación de suelos: Arco Seco, Cerro Punta, Comarca Ngöbe Buglé y Sabana Veragüense. Arco Seco (Coclé, Herrera y Los Santos) se ubica en la costa del océano Pacífico y es una zona dedicada a la producción agropecuaria, donde se producen granos básicos (arroz y maíz) y se practica la ganadería (carne y leche) en explotaciones extensivas (Autoridad Nacional del Ambiente [ANAM], 2009).

Arco Seco está afectado por el uso inadecuado del recurso suelo, lo que aumenta los riesgos de erosión. Sin embargo, no se han realizado investigaciones orientadas a determinar la pérdida de suelo en esta zona. Debido a esto, se estableció el objetivo de determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca río Estibaná mediante la implementación de parcelas de erosión.

Materiales y métodos

Ubicación

La investigación se desarrolló en fincas de productores colaboradores del Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), ubicadas dentro de la subcuenca río Estibaná en la provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá, durante la época lluviosa (mayo-diciembre) de 2020 y 2021 (Figura 1). La península de Azuero, situada en la costa pacífica panameña, posee un clima tropical de sabana con un promedio anual de precipitación de 1054 mm (Abrego-Bonilla & Guccione, 2023).

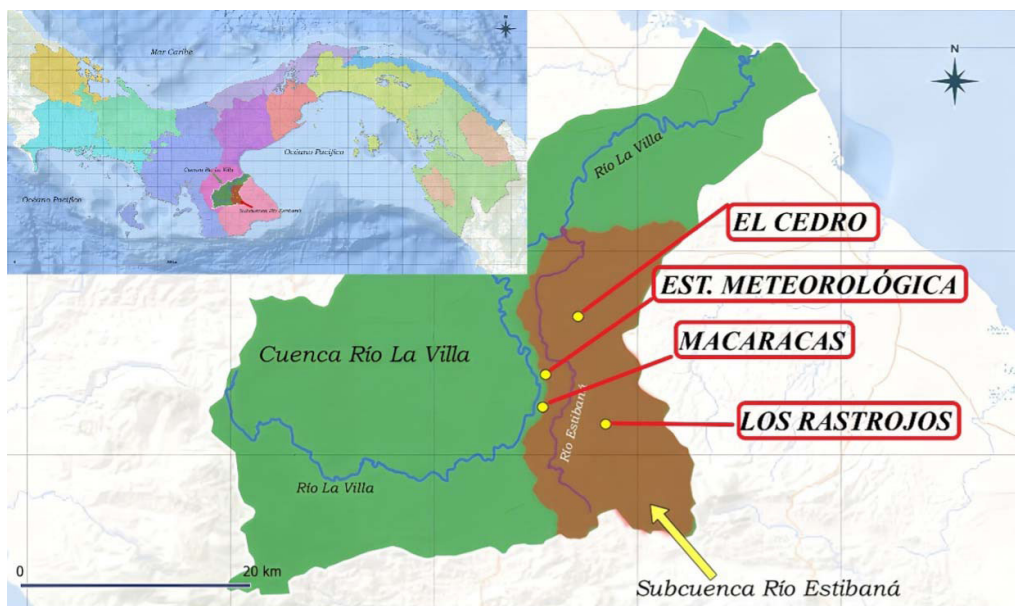


Figura 1. Ubicación geográfica de la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, Arco Seco, Panamá (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá [IDIAP], 2023).

Figure 1. Geographic location of the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Arco Seco, Panama (IDIAP, 2023).

La subcuenca, según las zonas de vida de Holdridge, se clasifica como bosque seco tropical, con precipitaciones entre 1000-1500 mm/año y una evapotranspiración potencial entre 1300-1350 mm/año (ANAM, 2009). Presenta una configuración orográfica con predominancia de colinas de baja altitud y sabanas, con pendientes entre leves y moderadas (ANAM, 2013).

Durante el estudio, se evaluó la pérdida de suelo por escorrentía superficial en tres porcentajes de pendientes representativas de la subcuenca (2,5 %, 4,4 %, 10,0 %). En cada pendiente se estableció una parcela de escorrentía con tres repeticiones y tres tratamientos: sin cobertura (SC), sin cobertura + barrera viva (SC+BV) y cobertura natural (CN) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Datos generales de las localidades evaluadas en la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. 2020-2021.

Table 1. General data of the localities evaluated in the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama. 2020-2021.

Localidades	Elevación (m s. n. m.)	Coordenadas		Cobertura del suelo	S (%)	M. O. (%)	
		Norte	Oeste			SC	CN
Macaracas	118,0	7°42'59,9"	80°33'15,6"	Pasto	2,50	1,65	2,08
Los Rastrojos	112,0	7°42'167"	80°30'19,2"	Pasto	4,40	1,65	2,30
El Cedro	138,0	7°47'19,0"	80°31'36,9"	Pasto	10,0	1,14	2,64

S: Pendiente. M. O.: Materia orgánica. SC: Sin cobertura. CN: Cobertura natural. / S: Slope. M. O.: Organic matter. SC: No cover. CN: Natural cover.

Las parcelas experimentales se ubicaron en fincas pecuarias con pasturas mejoradas (*Brachiaria brizantha*). Se seleccionaron áreas con una cobertura igual o superior al 95 %, la cual se determinó mediante el método del cuadrante. Para las parcelas que requerían no tener cobertura, se eliminó la cobertura de forma manual y con el uso de herbicidas sistémicos. La barrera viva evaluada fue de vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), la cual se ubicó a 1,0 m del colector de sedimentos, a una distancia entre plantas de 0,20 m.

Caracterización de suelos y pendiente

Para la caracterización de los suelos, se seleccionaron pruebas fisicoquímicas con el objetivo de determinar las características relacionadas con la erosión. Se determinó el contenido de materia orgánica del suelo por medio del método Walkley y Black (1934) de digestión húmeda con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido sulfúrico (H_2SO_4). Se evaluó el grado de compactación del suelo utilizando el método del cilindro para determinar la densidad de volumen. También, se estimó la textura del suelo mediante el método de Bouyoucos y los resultados se interpretaron a través del triángulo textural del USDA.

En las localidades seleccionadas se determinó el comportamiento de la infiltración del suelo por medio del infiltrómetro de doble anillo en suelos con cobertura natural y en suelos desnudos. La prueba se desarrolló con un tiempo acumulado de 205 min. Se midió la pendiente del terreno mediante un método matemático basado en la distancia y la diferencia de elevación entre dos puntos conocidos. Para ello, se utilizó cinta métrica, estacas, hilo y nivel de burbuja.

Mediciones pluviométricas

En cada localidad evaluada, se instaló un pluviómetro totalizador a cargo de colaboradores residentes cercanos a la parcela de investigación, quienes tomaron lecturas cada 12 horas (6:00 a. m.-6:00 p. m.). El pluviómetro se instaló en una zona despejada con un radio de 10,0 m y a una altura de 1,50 m.

Tratamientos

Durante el desarrollo de esta investigación, se evaluaron tres tratamientos: sin cobertura (SC), que consistió en la eliminación de la cobertura vegetal por medio de controles manuales y el uso de herbicidas sistémicos; sin cobertura + barrera viva (SC+BV), basada en la eliminación de la cobertura del suelo mediante la misma metodología del tratamiento SC, con la variante de utilizar una barrera viva de vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en la parte inferior de la parcela a 1,0 m del colector de escorrentía; y cobertura natural (CN), que contempló mantener la cobertura natural del terreno de pastura mejorada (*Brachiaria brizantha*).

Parcelas de escorrentía

El método utilizado para el establecimiento de las parcelas de escorrentía fue el propuesto por Da Veiga y Do Prado (1993), mediante el cual se establecieron nueve parcelas de área conocida (22,35 m²) en cada una de las zonas seleccionadas. Estas parcelas fueron aisladas con barreras de láminas de polietileno de 0,30 m de altura. En la parte baja de cada parcela se colocó un colector metálico para recoger el agua de escorrentía y el material erosionado. Este colector se conectaba con un sistema de almacenamiento para cada tratamiento, compuesto por dos bidones metálicos de 0,21 m³ (Figura 2).

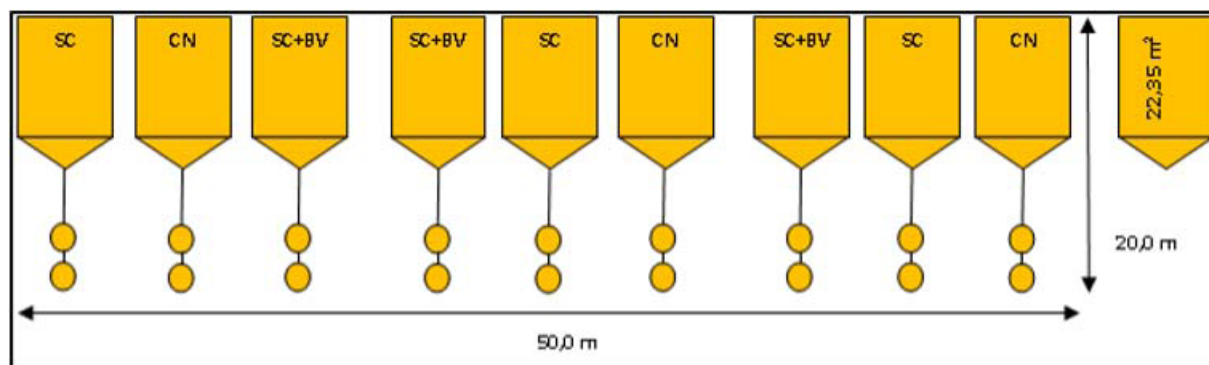


Figura 2. Esquema utilizado para la instalación de las parcelas de escorrentía en la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. Mayo-diciembre, 2020-2021.

SC: Sin cobertura. SC+BV: Sin cobertura + barrera viva. CN: Cobertura natural.

Figure 2. Scheme used for the installation of runoff plots in the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama. May-December, 2020-2021.

SC: No cover. SC+BV: No cover + living barrier. CN: Natural cover.

Volumen de escorrentía

Se determinó el volumen total de la escorrentía en cada una de las localidades bajo estudio. Para ello, se recuperó el efluente de cada parcela; esto se realizó mediante un colector y un sistema de almacenamiento compuesto de dos bidones de 0,21 m³. El segundo bidón contaba con un sistema de fraccionamiento que permitía coleccionar la tercera parte de la escorrentía que salía del primer envase de almacenamiento. Se determinó el volumen total de escorrentía (m³ ha⁻¹) para cada tratamiento en las diferentes localidades evaluadas dentro de la subcuenca río Estibaná.

Toma y procesamiento de muestras

Los muestreos se realizaron con intervalos de 15 días. Si las condiciones climáticas lo justificaban, el intervalo se redujo para evitar la pérdida de la escorrentía almacenada. Durante los muestreos, se tomaron muestras por duplicado de agua de escorrentía y sedimentos gruesos. Se midió el volumen de escorrentía y la masa de sedimentos húmedos.

Las muestras de agua de escorrentía se sedimentaron por decantación; luego, se filtró el producto y se secaron a 105 °C hasta peso constante; posteriormente, se determinó la masa de sedimentos suspendidos. Se tomaron muestras duplicadas de sedimento grueso húmedo, que se secaron bajo los mismos.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los datos presentados son el resultado de dos ciclos de recolección de datos, correspondientes a la época lluviosa de los años 2020 y 2021. A los datos obtenidos se les aplicó un análisis de varianza (ANDEVA) multifactorial, utilizando el paquete estadístico Statgraphics Centurion XVI (StatPoint Technologies, Inc., 2009).

Resultados

Precipitación pluvial y escorrentía superficial 2020-2021

Las precipitaciones dentro de la subcuenca no fueron homogéneas durante todo el año. En 2020, la época lluviosa comenzó en abril y se extendió hasta diciembre; los meses con mayor precipitación fueron los comprendidos entre agosto y noviembre (Figura 3).

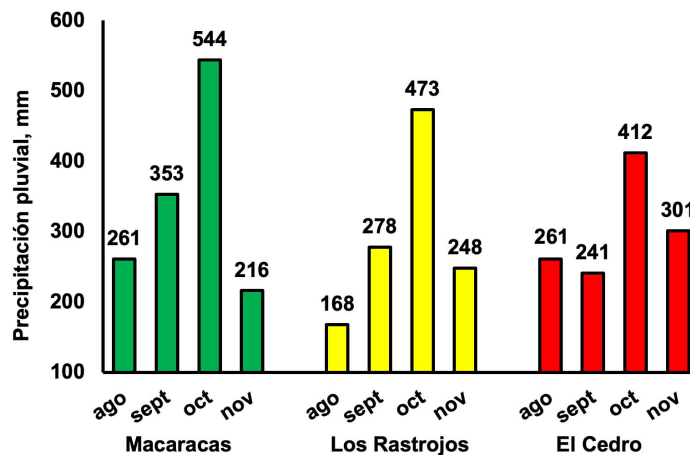


Figura 3. Precipitación pluvial total de los meses más lluviosos en las áreas evaluadas dentro de la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. Época lluviosa, 2020.

Figure 3. Total rainfall of the rainiest months in the evaluated areas within the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama. Rainy season, 2020.

Durante el análisis de los datos de escorrentía superficial, se encontró que hubo diferencias entre los años de toma de datos, y se determinó que esta diferencia estaba relacionada con la variación de las precipitaciones ocurridas en los dos años evaluados. Además, para el año 2020 se encontró que el volumen de escorrentía varió entre tratamientos y en las tres localidades el mayor valor se obtuvo en sitios sin cobertura, aunque dicha estimación no difirió en las localidades de Macaracas y Los rastrojos con el tratamiento SC+BV (Figura 4).

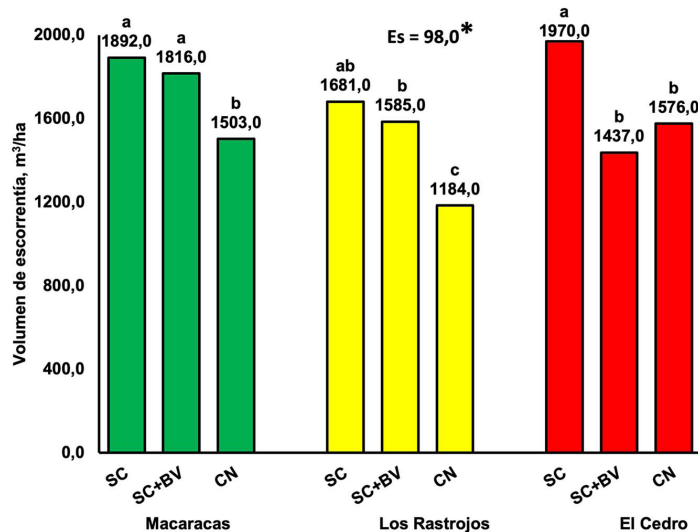


Figura 4. Volumen de escorrentía registrado en cada localidad investigada de la subcuenca río Estibaná según el tratamiento ensayado, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. 2020.

* Nivel de significancia obtenido en el análisis de varianza ($p < 0,05$). ^{ab} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos.

SC: Sin cobertura. SC+BV: Sin cobertura + barrera viva. CN: Cobertura natural.

Figure 4. Volume of runoff recorded in each investigated location of the Estibana River sub-basin according to the treatment tested, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama. 2020.

* Significance level obtained in the analysis of variance ($p < 0.05$). ^{ab} Letters within the graph represent homogeneous groups.

SC: No cover. SC+BV: No cover + living barrier. CN: Natural cover.

Para el ciclo de lluvias de 2021, los meses más lluviosos fueron mayo, junio, agosto, octubre y noviembre (Figura 5). Durante las épocas lluviosas evaluadas, las localidades recibieron precipitaciones totales entre 1500-2100 mm anuales.

Mediante el análisis de los datos, se determinó que la escorrentía superficial en las localidades evaluadas está relacionada con las precipitaciones ocurridas y se encontró diferencia entre los tratamientos evaluados (Figura 6).

Durante el periodo comprendido entre abril y diciembre de la época lluviosa de 2020, se registró el 99,87 % de las precipitaciones, mientras que para el mismo periodo de la época lluviosa de 2021 se registró el 97,0 % de las lluvias. Los meses más lluviosos en la zona de estudio fueron los comprendidos entre julio y noviembre, en los que, para el ciclo 2020, llovió el 71,5 %, y para el ciclo 2021, cayó el 58,4 % de la precipitación total.

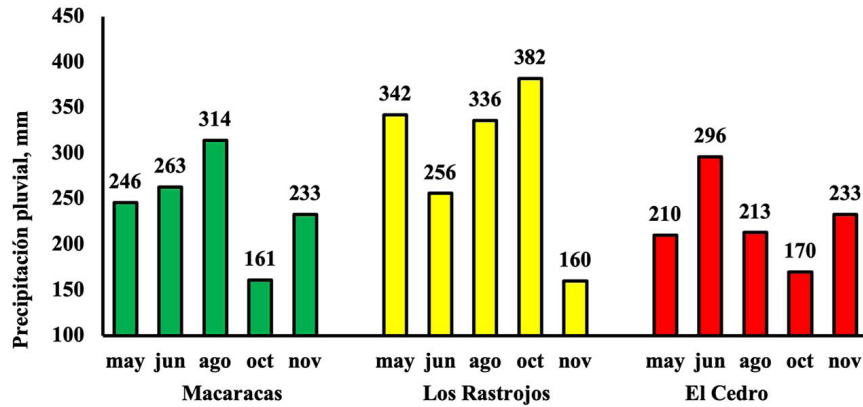


Figura 5. Precipitaciones pluviales registradas durante los meses de mayor ocurrencia en las localidades investigadas de la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. 2021.

Figure 5. Rainfall recorded during the months of greatest occurrence in the investigated localities of the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama. 2021.

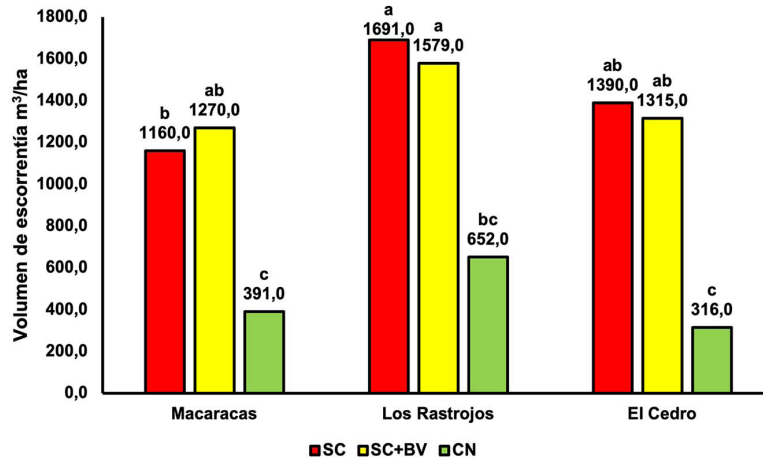


Figura 6. Volumen de escorrentía registrado en cada localidad investigada de la subcuenca río Estibaná según el tratamiento ensayado, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. 2021.

* Nivel de significancia obtenido en el análisis de varianza ($p < 0,05$). ^{abc} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos.

SC: Sin cobertura. SC+BV: Sin cobertura + barrera viva. CN: Cobertura natural.

Figure 6. Volume of runoff recorded in each investigated location of the Estibana River sub-basin according to the treatment tested, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama. 2021.

* Significance level obtained in the analysis of variance ($p < 0.05$). ^{abc} Letters within the graph represent homogeneous groups.

SC: No cover. SC+BV: No cover + living barrier. CN: Natural cover.

Características de suelos evaluados

Se determinó que las tres localidades seleccionadas cumplían con el criterio de tener porcentajes de pendientes que fueran representativos de la orografía de la subcuenca río Estibaná. Los valores de contenido de materia orgánica del suelo fueron considerados como pobres (<2 %), lo que coincide con lo reportado por Villarreal et al. (2013) para los suelos de la región de Azuero. La densidad aparente de los suelos presentó valores que se clasifican como normales para la clase textural de los suelos evaluados. Dado que la densidad aparente es un indicador de la compactación de los suelos, se determinó que estos no sufren problemas graves de compactación en sus horizontes superficiales. Con el análisis de datos de materia orgánica y densidad aparente, se determinó que no hubo diferencias en la densidad entre las localidades, mientras que para el contenido de materia orgánica sí se encontraron diferencias entre ellas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores determinados para las variables de caracterización de los suelos evaluados en la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. 2020-2021.

Table 2. Values determined for the characterization variables of the soils evaluated in the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama. 2020-2021.

Localidad	Pendiente (%)	Tratamiento	M. O. (%)	D. A. (g·cm ⁻³)
El Cedro	10,0	SC	2,28 ^{ab}	1,19
		CN	2,67 ^a	0,98
Los Rastrojos	4,40	SC	0,89 ^c	1,04
		CN	1,22 ^{bc}	0,97
Macaracas	2,50	SC	1,44 ^{bc}	0,93
		CN	1,60 ^{abc}	0,93

M. O.: Materia orgánica. **D. A.:** Densidad aparente. **SC:** Sin cobertura. **CN:** Cobertura natural. / **M. O.:** Organic matter. **D. A.:** Apparent density. **SC:** No cover. **CN:** Natural cover.

^{abc} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos ($p < 0,05$). / ^{abc} Letters within the graph represent homogeneous groups ($p < 0,05$).

Capacidad de infiltración del suelo

La infiltración de agua en los suelos está influenciada por varios factores, como la resistencia de la capa superficial del suelo a la penetración del agua al inicio de la precipitación, la cobertura del suelo y sus tratamientos superficiales del suelo. En las localidades evaluadas dentro de la subcuenca río Estibaná, se observó que los suelos sin cobertura vegetal (SC) presentaron una menor capacidad de infiltración promedio que los mismos suelos bajo cobertura natural (CN). Esto fue un indicador importante sobre el efecto que tiene la cobertura en la capacidad de infiltración del suelo. Además, se observó que la infiltración, cuando el suelo se mantuvo desnudo, fue menor con el aumento de la pendiente, con inclinaciones del terreno entre 8 y 20 %, lo que sugiere que la pendiente del terreno provoca este efecto (Figura 7).

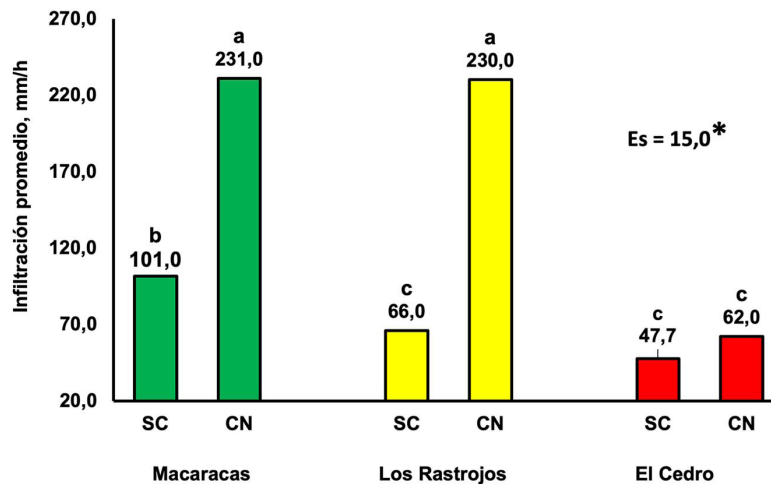


Figura 7. Infiltración promedio del suelo en las localidades evaluadas en la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. 2020-2021.

* Nivel de significancia obtenido en el análisis de varianza ($p < 0,05$). ^{abc} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos.

SC: Sin cobertura. CN: Cobertura natural.

Figure 7. Average soil infiltration in the locations evaluated in the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama. 2020-2021.

* Significance level obtained in the analysis of variance ($p < 0.05$). ^{abc} Letters within the graph represent homogeneous groups.

SC: No cover. CN: Natural cover.

Pérdida de suelo

Durante el periodo lluvioso (mayo-diciembre) de 2020, se observó que la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en la subcuenca río Estibaná fue influenciada por la pendiente, el estado de cobertura del suelo y las precipitaciones. Los datos de masa total de suelo erosionado en las localidades de Los Rastrojos y Macaracas mostraron una mayor pérdida de suelo bajo el tratamiento de SC+BV, atribuida al laboreo realizado durante la instalación de las parcelas de escorrentía. En la localidad de El Cedro, no se observó este efecto debido a que el proceso de instalación de las parcelas requirió de un menor laboreo del terreno (Figura 8).

Se observó que la pérdida de suelo durante la época lluviosa 2020, en los tratamientos evaluados en localidad de Macaracas, no mostró diferencias con respecto a la pérdida de suelo en las otras localidades (Los Rastrojos y El Cedro) cuando se aplicó el tratamiento CN. Las mayores pérdidas de suelo se presentaron bajo los tratamientos SC+BV y SC en las localidades de Los Rastrojos y El Cedro (Figura 8). En El Cedro, donde la pendiente del suelo ascendía a 10,0 %, durante el 2020 se determinó que la mayor pérdida de suelo ocurrió en las parcelas bajo tratamiento sin cobertura con 12,40 Mg/ha/año. En la misma localidad, con el empleo de una barrera viva, se observó una disminución del 25,5 % (3,16 Mg/ha/año). En cuanto al efecto de la cobertura natural, esta redujo la erosión en un 87,9 % (10,90 Mg/ha/año).

Durante la época lluviosa de 2021, no se presentó diferencia en la pérdida de suelo entre las localidades de Macaracas y Los Rastrojos en ninguno de los tratamientos evaluados. En la localidad del El Cedro, se observó que, con los tratamientos SC y SC+BV, la pérdida de suelo fue superior a la producida en las otras localidades bajo los mismos tratamientos (Figura 9).

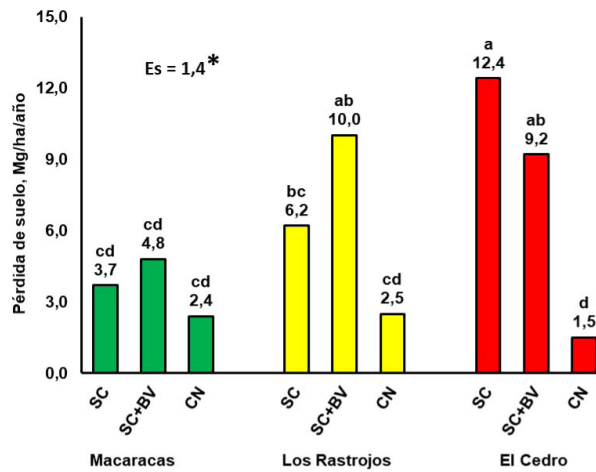


Figura 8. Pérdida de suelo en las localidades evaluadas según el tratamiento empleado en la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. 2020.

* Nivel de significancia obtenido en el análisis de varianza ($p < 0,05$). ^{abcd} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos.

SC: Sin cobertura. SC+BV: Sin cobertura + barrera viva. CN: Cobertura natural.

Figure 8. Soil loss in the localities evaluated according to the treatment used in the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama. 2020.

* Significance level obtained in the analysis of variance ($p < 0.05$). ^{abcd} Letters within the graph represent homogeneous groups.

SC: No cover. SC+BV: No cover + living barrier. CN: Natural cover.

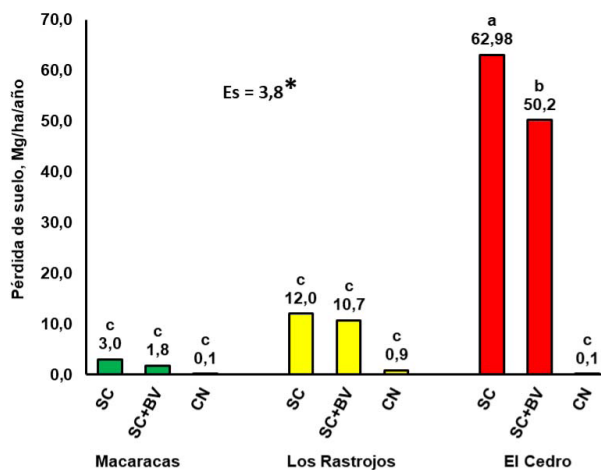


Figura 9. Pérdida de suelo en las localidades evaluadas según el tratamiento empleado en la subcuenca río Estibaná, provincia de Los Santos, península de Azuero, Panamá. 2021.

* Nivel de significancia obtenido en el análisis de varianza ($p < 0,05$). ^{abc} Las letras dentro del gráfico representan los grupos homogéneos.

SC: Sin cobertura. SC+BV: Sin cobertura + barrera viva. CN: Cobertura natural.

Figure 9. Soil loss in the localities evaluated according to the treatment used in the Estibana River sub-basin, province of Los Santos, Azuero Peninsula, Panama. 2021.

* Significance level obtained in the analysis of variance ($p < 0.05$). ^{abc} Letters within the graph represent homogeneous groups.

SC: No cover. SC+BV: No cover + living barrier. CN: Natural cover.

Con base en la tasa tolerable de pérdida de suelo (11,0 Mg/ha/año), se determinó que, en la localidad de Los Rastrojos, los suelos bajo el tratamiento SC superan dicha tasa y se consideraron suelos en riesgo. Por otro lado, en El Cedro, se observó que los suelos bajo los tratamientos SC y SC+BV presentaron una pérdida de suelo elevada y se valoró que son suelos que, bajo estos manejos, tienen un alto riesgo de degradación por erosión hídrica. En la localidad de Macaracas, no se registraron valores de erosión que se consideraran perjudiciales para el suelo, ya que bajo el tratamiento SC la pérdida fue de 3,0 Mg/ha/año, con una mitigación del 41,3 % (1,24 Mg/ha/año) cuando se implementó el uso de barreras vivas, y del 97,6 % (2,93 Mg/ha/año) cuando se mantuvo una adecuada cobertura vegetal del suelo.

En Los Rastrojos, se observó que bajo el tratamiento SC la pérdida de suelo fue de 12,0 Mg/ha/año; mediante la implementación de barreras vivas se logró reducir la erosión en 10,8 % (1,30 Mg/ha/año), y con una adecuada cobertura vegetal sobre el suelo se logró mitigar la pérdida en 92,5 % (11,1 Mg/ha/año). Para la localidad de El Cedro, la pérdida de suelo bajo el tratamiento SC fue de 62,98 Mg/ha/año; con una barrera viva se redujo la pérdida de suelo en 20,3 % (12,78 Mg/ha/año), y al mantener la cobertura vegetal de suelo se mitigó la erosión en 99,84 % (62,88 Mg/ha/año).

Discusión

En la subcuenca río Estibaná, las mayores pérdidas de suelo durante el ciclo lluvioso de 2020 se registraron en los suelos desnudos con pendientes de 10 % (El Cedro). Sin embargo, no se encontró diferencia entre los tratamientos SC (sin cobertura) y SC+BV (sin cobertura + barrera viva) en las localidades de Los Rastrojos y El Cedro (Figura 8). Durante la época lluviosa de 2021, se mantuvo la tendencia en la pérdida de suelo; la mayor pérdida se observó en los suelos bajo los tratamientos SC y SC+BV con pendientes de 10 % (Figura 9). El efecto erosivo de las precipitaciones se presentó con mayor intensidad en los tratamientos SC, debido a que estos, al estar desprotegidos del efecto disgregante de las gotas de lluvia, fueron más afectados. Se ha reportado que la pérdida de vegetación, ya sea por actividades urbanas, agrícolas o deforestación, puede agravar la erosión hídrica al disminuir la capacidad del suelo para retener la humedad y protegerse de la acción erosiva del agua (Zhou et al., 2017).

La subcuenca río Estibaná ha sido clasificada como una cuenca pequeña para las dimensiones geográficas de Panamá. En ella, se encontró poca diferencia en cuanto a la textura del suelo, la densidad aparente y el contenido de materia orgánica (Cuadro 2). Se determinó que los suelos estudiados pertenecen a los grupos texturales franco o franco arcilloso, debido a que comparten el mismo tipo de material parental. Se trata de suelos pobres en materia orgánica, producto de décadas de manejo inadecuado y de la deforestación para fines agrícolas y ganaderos (ANAM, 2009).

Durante la evaluación de capacidad de infiltración, se observó que los suelos con cobertura natural mostraron una mayor capacidad de infiltración (Figura 7), atribuible a la presencia de macro poros y a una buena agregación del suelo. La existencia de macroporos en el suelo es crucial para facilitar la infiltración de agua, el crecimiento de las raíces y el intercambio de aire (Gómez-Calderón, 2018).

Las precipitaciones en Panamá responden a una estacionalidad climática, con una época seca y una época lluviosa bien definidas. La dependencia de la producción agropecuaria de las precipitaciones es un aspecto crítico de la sostenibilidad agroalimentaria del país (ANAM, 2013), ya que pocas zonas cuentan con sistemas de riego diseñados para proveer el recurso hídrico necesario para el desarrollo de los cultivos durante todo el año. El sistema de producción es la siembra estacional, que depende de las precipitaciones pluviales, lo cual hace al sistema productivo nacional vulnerable ante los efectos del cambio climático y los fenómenos del Niño y la Niña.

La región de la península de Azuero, parte del Arco Seco, ha sido catalogada como una de las zonas más secas de Panamá, considerada entre las tierras secas y degradadas del país (ANAM, 2009). En la subcuenca río Estibaná,

las primeras lluvias iniciaron en abril y se extendieron hasta diciembre. Los registros pluviométricos indicaron que los meses más lluviosos fueron entre agosto y noviembre (Figuras 3 y 5). Los análisis de datos mostraron que la presencia de una adecuada cobertura vegetal del suelo fue capaz de reducir el volumen de escorrentía superficial.

Las prácticas de conservación y el manejo adecuado de la cobertura del suelo son actividades fundamentales para mitigar los efectos erosivos de la escorrentía. Las prácticas de conservación pueden interrumpir la continuidad de la pendiente y disminuir la velocidad de la escorrentía, mientras que el manejo adecuado de la cobertura del suelo puede actuar como una barrera física que reduce la velocidad de las gotas de lluvia y, por ende, mitiga la disgregación de los agregados del suelo.

La interacción de los factores mencionados subraya la importancia de una gestión integral del recurso suelo que considere tanto las condiciones naturales como las intervenciones humanas, para mitigar la magnitud y la severidad de los procesos erosivos. Se observó que el proceso de escorrentía no comenzó desde el inicio de las lluvias, debido al bajo contenido de humedad en las capas superficiales del suelo que absorben las precipitaciones sin que se den efectos erosivos apreciables. Resultados similares han sido reportados por García Ruiz et al. (2013) acerca del comportamiento de las primeras lluvias después del verano (época seca) y su impacto sobre la escorrentía. Su estudio destacó que las primeras precipitaciones fueron absorbidas sin generar cambios significativos en la superficie del suelo.

En la subcuenca río Estibaná, se observó que las precipitaciones iniciaron en abril-mayo. Sin embargo, la escorrentía fue apreciable a partir de junio, cuando las primeras precipitaciones fueron infiltradas con facilidad por el suelo, a causa de la baja humedad retenida por el suelo producto de la estación seca. El volumen de escorrentía observado en la subcuenca mostró diferencias entre los ciclos lluviosos de 2020 y 2021, debido a la variabilidad en las precipitaciones de las épocas evaluadas. Otros autores han mencionado que la variabilidad climática y los cambios subyacentes en la superficie están asociados con las alteraciones de la escorrentía (Xin et al., 2021). También se ha reportado que el comportamiento de la escorrentía superficial en microcuencas andinas con regímenes de precipitación y cobertura diferentes mostraron variaciones en el flujo superficial, lo que indica la influencia de la precipitación y la cobertura en la dinámica de la escorrentía (Martínez et al., 2017).

El análisis de los datos indicó que la presencia de una adecuada cobertura vegetal (CN) mermó el volumen de escorrentía superficial en comparación con los tratamientos SC y SC+BV (Figura 4 y 6). Se ha observado que los cambios en la cobertura y el uso del suelo pueden condicionar el escurrimiento superficial, y afectar la humedad del suelo, la evapotranspiración natural y la generación de escorrentía (García et al., 2018). Los suelos con una adecuada cobertura vegetal presentan una buena proporción de poros, los cuales favorecen la infiltración y, por consiguiente, disminuyen la escorrentía superficial.

La implementación de barreras vivas, si bien produjo un efecto al mitigar la pérdida de suelo en las localidades evaluadas, no fue efectiva en reducir la erosión a valores aceptables. Por ello, es necesario que la implementación de barreras vivas esté asociada a barreras muertas temporales que protejan el suelo de la erosión, mientras se logra el adecuado establecimiento de la barrera viva.

Conclusiones

El volumen de la escorrentía, el arrastre de sedimentos y la magnitud de la erosión estuvieron determinados por las precipitaciones, la pendiente, la cobertura y las propiedades físicas del suelo. La escorrentía y la erosión del suelo incrementaron a medida que aumentó la pendiente del terreno y la cobertura del suelo se redujo. La utilización de sistemas de manejo con coberturas apropiadas del suelo demostró ser la mejor alternativa para mitigar la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. La aplicación del método de parcelas de erosión resultó ser una

buena herramienta para determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la región estudiada, ya que permitió la recolección de datos a largo plazo y bajo diferentes sistemas de manejo.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto de Innovaciones Agropecuarias de Panamá (IDIAP) por financiar la investigación y proporcionar la orientación técnica. También agradecen al Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) de Cuba por su apoyo en la orientación técnica.

Referencias

- Abrego-Bonilla, J., & Guccione, M. (2023). Rol de la precipitación en la cuenca del río Guararé (costa pacífica de Panamá), 1981 – 2020. En L. Morales Maure, B. Zachrisson Salamina, & J. Sánchez Galán (Eds.), *XIX Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología. APANAC 2023. Panamá, Hub de las ciencias. Libro del congreso* (pp. 175–182). Asociación Panameña para el Avance de la Ciencia. <https://doi.org/10.33412/apanac.2023.3932>
- Álvarez Ticllasuca, A. (2020). Análisis temporal del nivel de la erosión hídrica de la subcuenca del río Ichu 2013 y 2017. *Tayacaja*, 3(2) 7–21. <https://doi.org/10.46908/rict.v3i2.97>
- Autoridad Nacional del Ambiente. (2013). *Diagnóstico ambiental participativo de la subcuenca río Estibaná*. Editorial ANAM.
- Autoridad Nacional del Ambiente. (2009). *Atlas de tierras secas y degradadas de Panamá*. Editorial ANAM.
- Bailon Linares, J. (2023). *Análisis de las prácticas de conservación de suelos para la evaluación de la erosión hídrica en la subcuenca Presa Jalpan* [Tesis de maestría, no publicada]. Universidad de Querétaro.
- Cerquera, Y. A., López, G. A., & Ramos, L. J. (2010). Diseño de un sistema electrónico digital para automatizar la prueba de capacidad de infiltración del suelo en campo. *Ingeniería y Región*, 7, 45–56. <https://doi.org/10.25054/22161325.799>
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero, A., González, J., Reynero, M., Diez, A., & Degioanni, A. (2012). *Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo*. UniRío.
- Cubero, D. (1999, octubre 18-22). Las barreras vivas y su aplicación en la agricultura conservacionista [Conferencia n.º 67]. En F. Bertsch Hernández (Ed.), *Memoria del XI Concurso Nacional Agronómico / III Congreso Nacional de Suelos* (pp. 3–10). EUNED. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a50-6907-III.pdf>
- Da Veiga, M., & Do Prado, W. (1993). *Manual para la instalación y conducción de experimentos de pérdida de suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ganasri, B. P., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953–961. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>
- García, P. E., Badano, N. D., Menéndez, Á. N., Bert, F., García, G., Podestá, G., Rovere, S., Verdín, A., Rajagopalan, R., & Arora, P. (2018). Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. caso de estudio: cuenca del río Salado, Buenos Aires, Argentina. *Ribagua*, 5(2), 92–106. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1495990>

- García Alvarado, J. M., Pérez González, M. E., & García Rodríguez, M. P. (2020). Sellado de suelos, fragmentación y conectividad ecológica en la conurbación de Madrid (España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (85), Artículo 2884. <https://doi.org/10.21138/bage.2884>
- García Ruiz, J. M., Martí-Bono, C., Arnáez Vadillo, J., Beguería Portugués, S., Lorente Grima, A., & Seeger, M. (2013). Las cuencas experimentales de Arnás y San Salvador en el Pirineo Central Español: escorrentía y transporte de sedimento. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 26, 23–40. <https://doi.org/10.18172/cig.1061>
- Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K., & Solórzano-Quintana, M. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 167–177. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>
- Happ, M. (2014). *Impacts of land-cover change and high rainfall on soil erosion among three farms in Cerro Punta, Chiriquí, Panamá*. School for International Training Digital Collections. https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/2002
- León Peláez, J. D. (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/89005/75544>
- Martínez, E., Coello, C., & Feyen, J. (2017). Análisis comparativo del comportamiento de la escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal. *Maskana*, 8(1), 129–144. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.01.12>
- Mejía, J. I., Valdés, E., & De La Cruz, G. (2023). Erosión hídrica y uso de barreras vivas en el cultivo de piña. *Ciencia Agropecuaria*, (37), 62–88. <http://revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/616>
- 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* [Tesis de maestría, Universidad de Panamá]. Repositorio Institucional Digital de la Universidad de Panamá. <https://up-rid.up.ac.pa/1419/>
- Molina, L. D., & Lozano, L. P. (2016). La desertificación del suelo, aspectos y estrategias de lucha. *Publicaciones e Investigación*, 10, 117–127. <https://doi.org/10.22490/25394088.1591>
- Nájera González, O., Bojórquez Serrano, J. I., Flores Vilchez, F., Murray Núñez, R. M., & González García-Sancho, A. (2016). Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. *Cultivos Tropicales*, 37(2), 45–55. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3942.5527>
- Pennock, D., & McKenzie, N. (2015). *Estado mundial del recurso suelo* [Resumen técnico]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ruíz Morales, G. (2017). La erosión de los suelos en Panamá y sus impactos. *El Tecnológico*, 28(1), 14–16. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/el-tecnologico/article/view/2116>
- StatPoint Technologies, Inc. (2009). *Statgraphics® Centurion* (Versión XVI). StatPoint Technologies Inc.
- Villarreal, J. E., Name, B., & García, R. (2013). Zonificación de suelos de Panamá en base a niveles de nutrientes. *Ciencia Agropecuaria*, (21), 71–89. <http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/184>
- Xin, J., Sun, X., Liu, L., Li, H., Liu, X., Li, X., Cheng, L., & Xu, Z. (2021). Quantifying the contribution of climate and underlying surface changes to alpine runoff alterations associated with glacier melting. *Hydrological Processes*, 35(3) Article e14069. <https://doi.org/10.1002/hyp.14069>
- Zhou, H. Y., Pan, X. Y., & Zhou, W. Z. (2017). Assessing spatial distribution of soil erosion in a karst region in southwestern china: a case study in jinpo mountains. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 52, Article 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/52/1/012047>