

Influencia de la Vegetación Forestal en la Retención de Sedimentos y Carbono Orgánico en Presas Filtrantes en Durango, México Influence of Forest Vegetation on Sediment Retention and Organic Carbon in Check Dams in Durango, Mexico

Lorena Amador-Sierra¹, María Elena Pérez-López¹,
José Ángel Prieto-Ruiz² y Gustavo Pérez-Verdín^{1*}

¹ Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Durango. Sigma 119, Fracc. 20 de Nov II, 34220 Durango, Dgo, México; (L.A.S.), (M.E.P.L.), (G.P.V.).

* Autor para correspondencia: guperezv@ipn.mx

² Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Av. Río Papaloapan y Blvd. Durango, s/n, Col. Valle del Sur. 34120 Durango, Durango, México; (J.A.P.R.).

RESUMEN

La remoción de la vegetación, la erosionabilidad del suelo y la erosividad de la lluvia propician el movimiento de partículas del suelo y la formación de cárcavas. Para minimizar los impactos de la erosión, se construyen obras de conservación y restauración a base de piedra, madera u otro tipo de material que sirven para frenar el movimiento de las partículas de suelo y propiciar la filtración del agua. Se evaluó la influencia de la vegetación forestal y la efectividad de las presas filtrantes en la retención de sedimentos en bosques de pino-encino en Durango, México. Se obtuvieron datos de volumen y densidad del suelo para determinar el peso de los sedimentos y se aplicó la prueba de análisis de varianza con la técnica de permutaciones de Monte Carlo para evaluar la efectividad del tipo de material de construcción de las presas en la retención de materia orgánica y carbono. Además, se cuantificó el volumen de los árboles que se encontraron en el área de captación de la presa filtrante y se realizó un análisis de regresión por cuantiles para analizar la relación entre el peso de sedimentos y la vegetación arbórea. Los resultados indican que no existen diferencias significativas en el volumen de retención de sedimentos, pero si en la cantidad de materia orgánica y carbono de acuerdo con el tipo material de construcción. Las presas de madera fueron las de mayor efectividad en comparación con las de piedra acomodada. El peso retenido de suelos tuvo una relación inversa con el volumen del arbolado. Sitios con mayor densidad de vegetación arbórea tienden a proteger mejor el suelo y a disminuir la cantidad de sedimentos que se depositan en las presas. Estos resultados pueden ayudar a realizar planes de manejo forestal compatibles con una menor degradación de los suelos.

Palabras clave: conservación de suelos, cobertura arbórea, erosión del suelo, regresión por cuantiles, regulación del agua.

SUMMARY

Vegetation removal, soil erodibility, and rain erosivity trigger the movement of soil particles and eventually the formation of gullies. To minimize the impacts of soil erosion, conservation and restoration dams are often constructed using stone, wood, or other materials aimed at slowing the movement of soil particles and promoting water infiltration. The performance of these dams was evaluated by estimating the volume and weight of retained soil retained in micro-watersheds with pine-oak forests in Durango, Mexico. Soil density and volume data were obtained to determine the weight of the sediments, as well as the volume of trees found in the catchment area of the check dam. An analysis of variance test with the Monte Carlo permutation



Cita recomendada:

Amador-Sierra, L., Pérez-López, M. E., Prieto-Ruiz, J. A., & Pérez-Verdín, G. (2025). Influencia de la Vegetación Forestal en la Retención de Sedimentos y Carbono Orgánico en Presas Filtrantes en Durango, México. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-13. e2064. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2064>

Recibido: 17 de septiembre de 2024.

Aceptado: 19 de febrero de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Agosto de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Juan Pedro Flores Margez

Editor Técnico:

Dra. Elizabeth Hernández Acosta



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

technique was applied to evaluate the effectiveness of the dam construction material in retaining sediments, organic matter content, and carbon. Quantile regression analysis was performed to analyze the relationship between sediment weight and tree vegetation. Results indicate no significant differences in sediment retention, but there are differences in the amount of retained organic matter and carbon content according to the type of construction material. Wooden dams were the most effective compared to stone dams. The weight of retained soil has an inverse relationship with the volume of trees. Sites with higher tree vegetation density tend to better protect the soil and reduce the amount of sediment deposited in the dams. These results can help develop forest management plans compatible with less soil degradation.

Index words: soil conservation, tree cover, soil erosion, quantile regression, water regulation.

INTRODUCCIÓN

Los suelos cumplen funciones importantes en los ciclos biogeoquímicos que favorecen su fertilidad, crecimiento de plantas y producción de alimentos, ya que regulan el clima a través de la captación de dióxido de carbono, fomentan el hábitat de diversas especies y tienen un rol estructural en el soporte físico de plantas, animales e infraestructura humana, entre otros servicios ecosistémicos (Dominati, Patterson y Mackay, 2010; Adhikari y Hartemink, 2016). Por esta capacidad productiva y regulatoria, los suelos son esenciales para proveer diversos servicios a la sociedad, a costa del uso de prácticas no sustentables, como el cambio de uso del suelo, que propician principalmente erosión y pérdida de fertilidad (Ludwig, Wilmes y Schrader, 2018). La erosión del suelo es un fenómeno natural causado por el agua, viento y agentes bioquímicos, que se acelera en combinación con ciertas actividades inadecuadas humanas (Montgomery, 2007; Dominati *et al.*, 2010). Algunas cifras indican que anualmente en el mundo se pierden alrededor de 36 billones de toneladas de suelo, equivalentes a un promedio de $2.8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Borrelli *et al.*, 2017).

La erosión reduce la capacidad del suelo para retener humedad y acumulación de nutrientes, lo que a su vez, disminuye que la vegetación se establezca (Jiao, Zou, Jia y Wang, 2009). Sin vegetación o escasez de la misma, la lluvia ejerce una alta presión cinética sobre la superficie del suelo, mismo que ya no es retenido por las raíces, así la germinación de semillas y establecimiento de la vegetación se dificulta, y eventualmente pierde estabilidad, lo que hace más susceptible a seguirse erosionando (Lira-Caballero, Martínez, Romero y García, 2018).

En cambio, la restauración es un proceso de detención del deterioro y mejoramiento de la calidad de los suelos para elevar su salud y fertilidad, así como mitigar la erosión, especialmente hídrica, la cual se manifiesta en capas laminares, canalículos pequeños o en forma de cárcavas o bancos aluviales (Poesen, Nachtergaele, Verstraeten y Valentin, 2003; Lucas-Borja *et al.*, 2019). Estas últimas generan una gran concentración de sedimentos en las partes bajas de la cuenca, particularmente en las presas de embalse o, incluso, modifican la forma y el hábitat de ecosistemas riparios (MacDonald, Chen, Palik y Prepas, 2014; Zaimes y Schultz, 2015).

Una de las acciones de restauración factibles para disminuir el arrastre de sedimentos hacia la parte baja de la cuenca, es la construcción de presas filtrantes a base de rocas, gaviones, troncos y ramas, entre otros (Borja, Molina, Govers y Vanacker, 2018), e incluso de llantas, que se instalan de manera transversal a las cárcavas (CONAFOR, 2016). El propósito de estas obras de conservación es detener los sedimentos, estabilizar el cauce de las cárcavas, reducir el gradiente de pendiente del cauce y favorecer el establecimiento de la vegetación riparia (Abbasi, Xu, Lucas, Dang y Liu, 2019). Pese a que la cantidad de estas obras continúa creciendo, el impacto esperado frecuentemente es insuficiente debido a condiciones adversas que prevalecen, como la inapropiada calidad de la construcción, así como el uso de procedimientos de diseño inadecuados y la incorrecta ubicación de las presas (Abbasi *et al.*, 2019). Las presas filtrantes, ya sea permanentes o temporales, son consideradas de alta prioridad para disminuir la degradación de los suelos, propiciar el restablecimiento de la vegetación y fomentar el proceso de sucesión ecológica (Lucas-Borja *et al.*, 2018, 2019).

Diversos estudios han descrito el uso de las presas filtrantes en proyectos de manejo de cuencas. Abbasi *et al.* (2019) examinaron la efectividad de estas obras y describieron 22 estudios sobre la operación de 7700 presas en varias partes del mundo. Sus conclusiones fueron que, aunque existen diferencias en la concepción de las presas en distintos países, la forma de construcción es común y su efectividad es significativa en la restauración de cuencas hidrográficas. Otros estudios concluyen que en áreas montañosas, la construcción de presas filtrantes tiene muchos beneficios en la geomorfología, hidrología y ecología de los ecosistemas riparios, lo que a su vez, beneficia la estabilización del cauce y la distribución transversal de la vegetación (Zema, Bombino, Denisi, Lucas y Zimbone, 2018; Bombino, Gurnell, Tamburino, Zema y Zimbone, 2019).

La construcción de estas obras requiere de apoyos económicos, mano de obra, disponibilidad del material y conocimientos hidrológicos, entre otros. En México, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) es la institución del gobierno federal que administra los fondos necesarios y aporta la asesoría técnica para construir presas filtrantes. En menor proporción, existen fondos concurrentes donde varias empresas privadas aportan recursos para ello. La CONAFOR, junto con los fondos concurrentes, mantiene el registro de estas obras que incluye la distribución y número de estas obras, el tipo de material con las que se construyen, año de ejecución, predios beneficiados y costos de construcción, entre otros. Sin embargo, no contempla un programa de monitoreo que permita evaluar la eficiencia de las presas en los distintos ecosistemas del país. Esta falta de monitoreo incrementa la incertidumbre respecto a la efectividad de este tipo de apoyos que generan beneficios a la sociedad y a otros servicios ecosistémicos (Cotler *et al.*, 2007).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de la vegetación forestal y la efectividad de las presas filtrantes para retener sedimentos en los suelos de los bosques de pino-encino del estado de Durango, México. Con base en los datos de la CONAFOR se identificaron presas filtrantes que actualmente son funcionales y que se han construido a base de morillos de madera y piedra. Específicamente, se evaluó la cantidad de sedimentos retenidos (en volumen y peso), el contenido de materia orgánica y carbono. Además, se analizó la relación entre los sedimentos, la vegetación arbórea circundante y la pendiente del cauce. Las hipótesis planteadas fueron las siguientes: (i) no existen diferencias significativas en la cantidad de sedimentos retenidos en función del tipo de material de construcción y ii) la vegetación arbórea no tiene un efecto en la cantidad de sedimentos retenidos en las presas filtrantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se localiza al noroeste del estado de Durango, principalmente en el municipio de Santiago Papasquiaro. El clima de la región es templado, subhúmedo, con lluvias moderadas en el verano y ocasionales en el invierno. La precipitación promedio anual es de 985 mm y la temperatura promedio de 13.3 °C (Silva-Flores, Perez y Wehenkel, 2014). El terreno es accidentado, con elevaciones entre 1800 y 2800 m y pendientes entre 10 y 60 por ciento.

La vegetación está compuesta de bosques de pino y encino, con algunas áreas cubiertas con pastizales naturales o inducidos (Figura 1). Las especies arbóreas más importantes son *Pinus durangensis* Martínez, *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., *P. teocote* Schltdl. & Cham., *P. engelmannii* Carr., *P. lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald, *Quercus sideroxyla* Bonpl., *Q. rugosa* Neé, *Q. convallata* Trel., *Q. brachystachys* Benth., *Q. urbanii* Trel., *Q. durifolia* Seemen, *Juniperus deppeana* Steud. y *Arbutus madrensis* S. González (González-Elizondo, González, Tena, Ruacho y López, 2012).

Selección de la Muestra

Con base en el listado de ejidos y predios particulares que han sido beneficiados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y el proyecto *Irritila*, uno de los fondos concurrentes de apoyo a la restauración de suelos y que agrupa varias empresas privadas, gobierno federal y usuarios del agua, se ubicaron 360 presas filtrantes construidas en el periodo 2011 a 2021 en la zona de estudio. Se seleccionaron presas integrales y funcionales al momento de la toma de información. Se hizo un pre-muestreo de ocho presas para estimar la varianza y error estándar, considerando el volumen y peso de sedimentos por presa. Con estos datos, utilizando la ecuación de tamaño de muestra, se escogieron 76 presas distribuidas de forma representativa, como sigue: 58 de piedra acomodada y 18 de morillos de madera.

Para compensar el desigual tamaño de muestras y evaluar diferencias, se hizo un análisis de varianza (ANOVA) con la prueba de permutaciones Monte Carlo con el fin de evaluar el efecto del material de construcción en la retención de sedimentos. Esta prueba evalúa las diferencias entre los tipos de material, reordenando sus datos con todas las posibles agrupaciones y volviendo a calcular el promedio de esas diferencias (Fraker y Peacor, 2008). En este caso, no es necesario cumplir con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas que se exige en el ANOVA paramétrico, ya que la prueba de permutaciones genera una distribución empírica, mediante múltiples reorganizaciones aleatorias de los datos. Esto permite evaluar la significancia estadística de manera robusta, incluso en condiciones donde los datos no cumplen dichos supuestos (Janssen y Pauls, 2003). Las simulaciones se hicieron con 10 000 repeticiones al utilizar la muestra total de 76 presas, con los dos tipos de material como factores y el peso de sedimentos, peso de materia orgánica y carbono, como variables de respuesta.

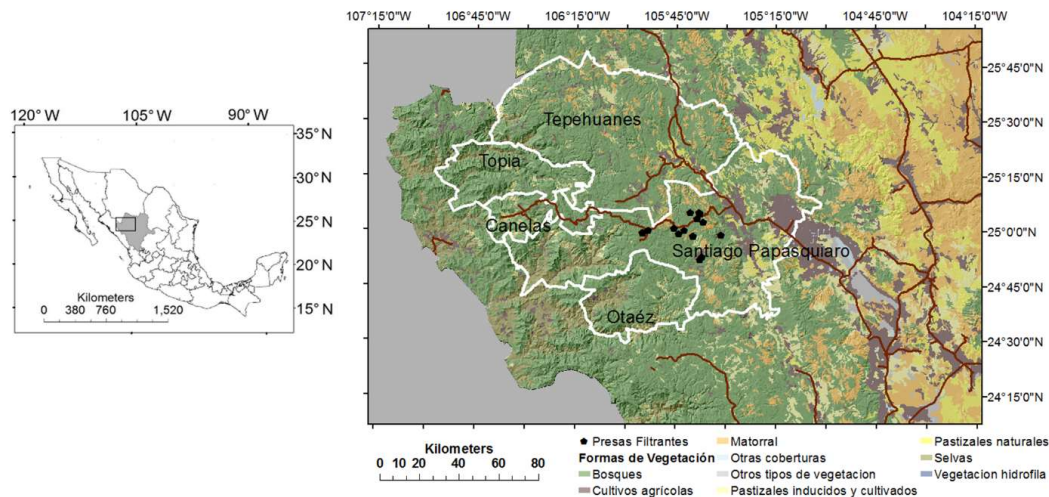


Figura 1. Ubicación del área de estudio y de las presas filtrantes evaluadas en el noroeste de Durango, México. Fuente: elaboración propia.

Figure 1. Location of the study area and check dams in northwestern Durango, Mexico. Source: own information.

Las presas se ubican en 15 cárcavas y en cada una de ellas, con un dispositivo de navegación portátil (GPS 60), se delimitó el área de captación de la microcuenca, identificando el parteaguas y su cauce principal. Se cuantificó la cantidad de sedimentos arrastrados hacia el cauce principal y depositados en las presas filtrantes. En cada microcuenca, con un sistema de información geográfica, se calculó el área y perímetro, y se registraron datos de los árboles, como especie arbórea, diámetro normal, diámetro de copa y altura; con esa información se calculó el porcentaje de cobertura (o área ocupada por los árboles), densidad ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) y volumen ($\text{m}^3 \text{rollo ha}^{-1}$) de los árboles existentes, para relacionar esta información con la cantidad de sedimentos en la presa filtrante. También, se registró la precipitación anual promedio de la zona con datos de la Comisión Nacional del Agua y, con un clinómetro se midió la pendiente del cauce principal donde se establecieron las presas. La efectividad de las presas filtrantes se evaluó a través de la cantidad de sedimentos, material orgánico y carbono retenidos.

Dado que esta efectividad depende de las características específicas del sitio, se consideró el efecto de la cantidad de lluvia recibida y la pendiente del terreno (CONAFOR, 2023). Por ello, se establecieron dos clases de presas: aquellas que estuvieran por debajo de los 1000 mm de precipitación que es la mediana de la zona, y las que estuvieran por arriba de esa cantidad. En el segundo caso, se clasificaron utilizando un 23% de pendiente como punto de división, que es también la mediana de los datos. Esto permitió ubicar 44 presas con precipitación menor a 1000 mm y 32 mayor a esa cantidad; así como 42 presas en la clase 1 de pendiente (menor al 23%) y 34 en la clase 2 (mayor al 23%). Las diferencias en los sedimentos retenidos se evaluaron a través de un análisis de varianza con permutación de tres vías: tipo de material, precipitación y pendiente.

Estimación de Sedimentos y Carbono Orgánico

El volumen de los sedimentos en la presa filtrante se estimó asumiendo figuras geométricas como el prisma asimétrico con forma de triángulo irregular (Mejía-Bojórquez, Javier, Graciano y Cruz, 2015). En este caso, se midió el área frontal de la presa, dividiéndola en secciones rectangulares o triangulares, y se multiplicó por el largo o el límite de acumulación de sedimentos (Figura 2). La ecuación para estimar el volumen de sedimentos (V_s) se hizo de la siguiente manera:

$$V_s = \frac{1}{3} Ab \times h \quad (1)$$

Donde Ab es el área frontal de la presa (m^2) y h es la longitud de sedimentos acumulados (m). Con los datos de densidad de las muestras de suelo se obtuvo el peso total de sedimentos acumulados en la presa.

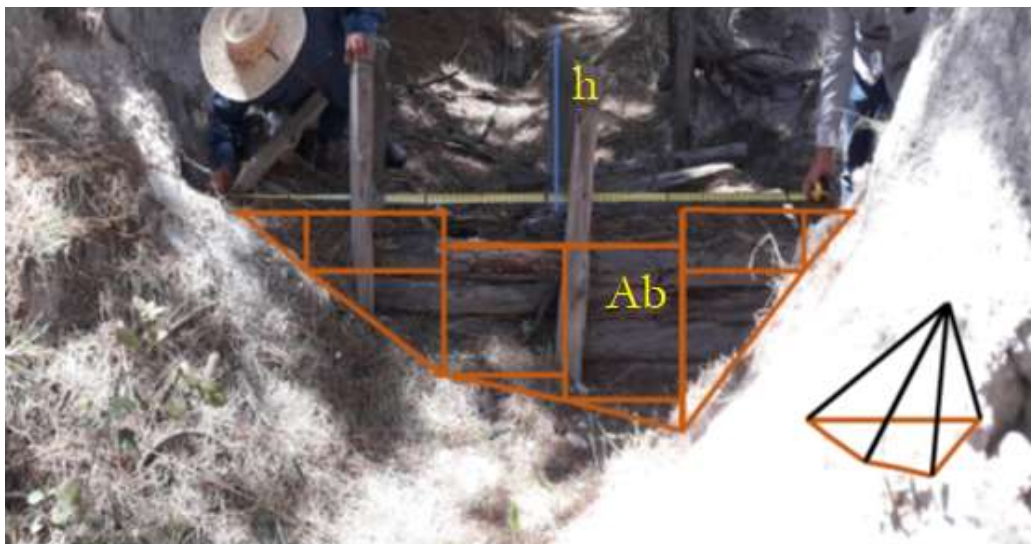


Figura 2. Estimación del volumen de sedimentos del suelo en una presa de morillos de madera en el noroeste de Durango. *Ab* es el área frontal de la presa y *h* es el largo de acumulación de sedimentos (Foto cortesía: Lorena Amador Sierra).

Figure 2. Volume estimation of soil sediments in a wood-made check dam in northwestern Durango. *Ab* is frontal area of the check dam and *h* is the length of sediment accumulation (Photo courtesy: Lorena Amador Sierra).

En cada presa, se obtuvo una muestra compuesta de tres submuestras de suelo colectadas a diferentes niveles de profundidad, con lo que se determinó su densidad. La muestra se pasó por una malla de distintos anchos para separar por tamaños y estimar la granulometría de las partículas de suelo. Al material filtrado se le determinó la textura, contenido de materia orgánica y carbono; los análisis se realizaron en laboratorios del Instituto Politécnico Nacional en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango. La textura del suelo se determinó mediante el método táctil sugerido por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1999), que consiste en humedecer una muestra de suelo, manipularla manualmente y evaluar su comportamiento al tacto, como la formación de bolas o cintas y la sensación predominante. A partir de estas observaciones se identificaron las proporciones relativas de arena, limo y arcilla, clasificando el suelo en distintas categorías texturales. Para el cálculo de densidad del suelo se utilizaron tubos de cloruro de polivinilo (PVC) de un litro de capacidad, de 11 cm de diámetro y 10.52 cm de largo. Los tubos se insertaron en el sedimento y la muestra se extrajo luego de ser secada al aire y pesada para calcular su densidad.

La estimación de materia orgánica se hizo a través del método de calcinación (Schultey y Hopkins, 1996), consistente en secar los sedimentos a una temperatura de 105 °C durante 24 horas. Luego, las muestras se depositaron en un desecador de plástico para ser pesadas y posteriormente se introdujeron a una mufla a una temperatura de 360°C por cinco horas. El porcentaje de materia orgánica en el suelo (*MOS*) se calculó como la diferencia entre el peso inicial y final dividido por el peso de la muestra inicial, como sigue (Izquierdo-Bautista y Arévalo, 2021):

$$MOS(\%) = \frac{(\text{Peso } 105^{\circ}\text{C} - \text{Peso } T^{\circ}\text{calcínación})}{\text{Peso } 105^{\circ}\text{C}} * 100 \quad (2)$$

Para estimar el carbono orgánico en el suelo se utilizó el factor de Van Bemmelen de 0.58, el cual asume que la materia orgánica contiene un 58% de carbón orgánico (Heaton, Fullen y Bhattacharyya, 2016). La razón de incluir materia orgánica en el análisis fue porque las presas pueden ser receptoras de carbono orgánico y, eventualmente, ser contabilizadas en proyectos que comercializan bonos de carbono en suelos y bosques. El peso total (P_t), expresado en toneladas, de la materia orgánica y carbono retenido en las presas filtrantes se calculó utilizando la ecuación de densidad (D), multiplicando ésta por el volumen total de sedimentos (V_s).

$$P_t = D \times V_s \quad (3)$$

Evaluación de la Relación entre la Vegetación Arbórea y la Retención de Sedimentos

Para evaluar la relación entre el peso de los sedimentos retenidos y el volumen de la vegetación forestal, por clases de precipitación y pendiente del cauce, se consideraron los procedimientos estadísticos de regresión lineal paramétrica y no paramétrica. Se utilizó el volumen del arbolado (expresado en m³ rollo) para evaluar la influencia de la vegetación arbolada en la retención de sedimentos. La razón es que es una variable que los técnicos forestales pueden modificar a través de la aplicación de tratamientos silvícolas. Para cotejar si las variables volumen del arbolado y sedimentos en peso seco (t) tuvieron una distribución normal, se hicieron pruebas de Shapiro-Wilk. Los valores para volumen del arbolado y peso del sedimento fueron 6.04 ($P < 0.001$), 5.25 ($P < 0.001$), respectivamente. Por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula de que los datos asumían una distribución normal.

En consecuencia, se revaluó esta relación con un modelo de regresión por cuantiles con la prueba de *bootstrapping*, la cual es una técnica de remuestreo que ayuda a obtener coeficientes e intervalos de confianza en grupos con tamaño desigual (Chihara y Hesterberg, 2018). A diferencia del método de ajuste por mínimos cuadrados para la regresión lineal, la regresión por cuantiles no asume estrictamente una distribución normal y tampoco una varianza constante. Además, es resistente a valores atípicos y ofrece una mejor estimación de parámetros ante cambios en los cuantiles en la distribución de las variables (Cade y Noon, 2003).

La regresión por cuantiles es una herramienta útil para estudios de erosión del suelo donde existen múltiples y complejas interacciones entre agentes causantes y protectores (Van Zijl, Ellism y Rozanov, 2014). Es efectiva para evaluar la variabilidad de condiciones de escurrimientos superficiales, y eventualmente de arrastre de sedimentos extremos. Esto se observa cuando se grafican los valores de los parámetros de regresión en todos los niveles a través de sus respectivos intervalos de confianza (Cade y Noon, 2003). El modelo utilizado para la regresión por cuantiles que se adecuó más a los datos fue el siguiente:

$$PS_q = \beta_q + \tau_q(VOL) + \varepsilon \quad 0 \leq q \leq 1 \quad (4)$$

Donde PS es peso de sedimentos (t), VOL es volumen del arbolado (m³ rollo ha⁻¹), β_q y τ_q son los coeficientes de regresión del cuantil q y ε es el error del modelo. Los datos fueron capturados en hojas de cálculo y posteriormente procesados en el paquete estadístico STATA (StataCorp LLC, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El área de las microcuencas varió de 0.05 a 5.3 ha, con un promedio de 0.72 ha (Cuadro 1). La pendiente promedio fue 21% y la precipitación 985 mm anuales. La textura dominante de los sedimentos fue de tipo franco arenoso, con una proporción arena-limo-arcilla de 80%-15%-5%, seguido por el tipo franco arcilloso, con una relación de 35%-30%-35%. Por la dominancia en la composición de partículas, los suelos arenosos son más propensos a ser erosionados y, eventualmente, a ser retenidos en las presas filtrantes. La densidad de los sedimentos varió entre 1.35 y 1.45 Mg m⁻³, con un promedio de 1.41 toneladas por metro cúbico.

El tamaño de la microcuenca, o área de captación de la presa, influyó en la retención de sedimentos. El Cuadro 1 indica que las presas encontradas en microcuencas pequeñas (menores de 1 ha) retuvieron en promedio 15.1 toneladas de sedimentos en comparación con las microcuencas poco más grandes (mayores a 1 ha), las cuales almacenaron 37.0 toneladas ($F = 8.85$, $P = 0.0125$).

Efectividad del Material de Construcción

La cantidad de sedimentos varió de 0.02 a 24.9 toneladas con una media 4.01 toneladas. El peso total de los sedimentos fue 283.6 toneladas, en una superficie total de 11.1 ha, lo cual arroja un promedio de 2.55 Mg ha⁻¹ año⁻¹. En promedio, se almacenó 0.20 toneladas (± 0.196 toneladas) de material orgánico y 0.11 toneladas (± 0.11 toneladas) de carbono orgánico por presa.

Con relación a los costos de construcción, presas de morillos de madera son las de menor costo, en promedio MEX \$155 por presa, mientras que las de piedra acomodada tienen un costo de MEX \$570 m³ construido (CONAFOR, 2016). La información de costos da una ligera ventaja a las presas de madera; sin embargo, como se comenta adelante, se debe analizar la efectividad y duración del material de construcción.

Los resultados de la prueba de permutación Monte Carlo indican que no existieron diferencias significativas en la retención de sedimentos de acuerdo con el tipo de material de construcción de las presas filtrantes; en cambio, se encontraron diferencias significativas en la eficiencia del tipo de material para retener materia orgánica y carbono. Las presas de morillos de madera retuvieron más material orgánico, y eventualmente de carbono, debido al tipo de material de construcción y reducción de espacios (Figura 3). Estas estructuras de retención se distinguen por su diseño compacto y baja porosidad, lo que deja pocos espacios libres entre las uniones de piezas y favorece la captura de partículas finas como sedimentos y material orgánico (CONAFOR, 2023).

Cuadro 1. Caracterización de las presas filtrantes para la retención de sedimentos del suelo en Durango, México. †
Table 1. Characterization of check dams for soil sediment retention in Durango, Mexico. †

No. de cárcava	Predio	Número de Presas	Microcuenca		Año de construcción	Material de construcción	Peso sedimentos	Longitud cárcava	Altura máxima	Altura mínima	Pendiente
			Área	Perímetro							
			ha	m			Mg	- - - - -	m - - - - -		%
1	Altares	7	0.36	245.73	2018	Piedra	40.61	116.69	2498	2491	4.3
2	Altares	4	0.37	237.61	2018	Piedra	16.61	46.68	2493	2491	4.4
3	Altares	3	0.15	160.39	2018	Morillos	12.16	46.38	2513	2510	4.4
4	Ciénega de Salpicalagua	3	5.29	976.03	2013	Piedra	15.62	43.52	2579	2575	32.5
5	Ciénega de Salpicalagua	5	1.4	662.21	2013	Piedra	56.07	135.41	2574	2559	37.4
6	Bajíos del Pinto	12	0.36	414.35	2018	Piedra	14.48	126.72	2472	2469	4.3
7	El Cambray	8	1.39	504.52	2013	Piedra	31.66	70.5	2802	2798	21.2
8	El Cambray	3	0.13	147.39	2013	Morillos	9.85	25.33	2704	2702	31.5
9	Laguna de la Chaparra	4	0.16	295.89	2018	Piedra	11.83	35.3	2708	2704	41.2
10	Laguna de la Chaparra	3	0.26	200.58	2013	Piedra	6.64	17.42	2655	2654	41.2
11	San Nicolás de Arriba	5	0.11	148.18	2014	Piedra	4.21	27.78	2431	2430	9.6
12	San Nicolás de Arriba	3	0.06	114.13	2014	Piedra	2.4	30.33	2373	2370	7.2
13	San José de la Chaparra	4	0.05	85	2013	Piedra	6.83	21	2643	2640	36.4
14	San José de la Chaparra	1	0.08	118.23	2013	Morillos	2.34	18.11	2526	2525	4.3
15	Silvestre Revueltas	11	1.14	420.65	2014	Morillos	52.26	69.58	2722	2714	46.0

† Fuente: Información propia.

† Source: Own information.

La efectividad de las presas en mucho depende del tiempo de vida (periodo útil) y en algunas presas de morillos de madera, la capacidad de retención es afectada por la descomposición del material. En este sentido, las presas de piedra acomodada, aun cuando tienden a retener menor cantidad de sedimentos, soportan mejor las condiciones de intemperismo a la que están expuestas a través del tiempo (Leyew, G/Michael, Mullu y Melesse, 2021).

Una de las grandes ventajas que tiene la construcción de piedra acomodada es su abundancia, ya que es un material relativamente disponible y de bajo costo en las zonas forestales. Sin embargo, son susceptibles a la presencia de socavones alrededor de la estructura o el desplazamiento de las rocas aguas abajo cuando se presentan escurrimientos de gran magnitud (Nichols y Polyakov, 2019). Eventualmente, en las presas de piedra acomodada puede existir más erosión cuando el agua desborda la presa y erosiona la base posterior de las presas (Castillo *et al.*, 2007).

Las estructuras hechas a base de madera tienen la ventaja de que el material es abundante y de más bajo costo. Sin embargo, su efectividad puede disminuir debido a la descomposición por efecto del tiempo, la cual se acelera por las altas temperaturas, humedad e, incluso, por la presencia de plagas que utilizan la madera como nido, alimento o reproducción (Akita, Kitahara y Ono, 2014). En el área de estudio, alrededor de un 20% de las presas hechas a base de morillos de madera presentaban signos de descomposición y pudrición. Existen algunas presas de llantas, cuyo material es perdurable, de bajo costo (al ser de desecho) y, por lo general, se utilizan cerca de las localidades. Su eficiencia es alta y resiste mejor los altos escurrimientos, pero no son abundantes. En el estudio, se encontraron solo tres presas de llantas, pero no fueron incluidas en el análisis.

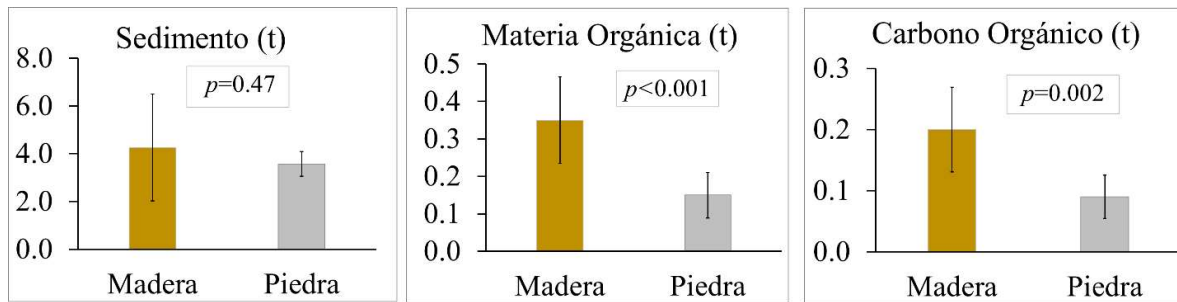


Figura 3. Efectividad del tipo de construcción de presas filtrantes para controlar sedimentos y retener materia orgánica y carbono. Comparaciones hechas a través de la prueba de Permutación Monte Carlo (10 000 repeticiones).
Figure 3. Efficiency of the type of construction of check dams to control sediments and retain organic matter and carbon. Comparisons made using a Monte Carlo Permutation test (10 000 replication).

La pendiente del cauce y precipitación son factores que influyen en el escurrimiento y movimiento de partículas del suelo. Generalmente, la construcción de presas en cauces con pendientes altas reduce la velocidad del agua, lo cual propicia la acumulación de sedimentos detrás de la presa, proceso que se conoce como agradación (Bombino *et al.*, 2008). Se hizo otro análisis de varianza de tres vías incluyendo el tipo de material, la pendiente y la precipitación. El Cuadro 2 confirma las similitudes en los tipos de material que se usan para detener sedimentos (peso), mismo que se comentó anteriormente. Asimismo, la precipitación no tuvo efecto en la capacidad de retención de sedimentos en estas presas, quizás porque es poca la variación en la zona de estudio, pero si existe un incremento significativo en el peso de sedimentos retenidos en las presas en aquellas con pendientes mayores al 25% (4.77 toneladas). La interacción conjunta entre el tipo de material de construcción, precipitación y la pendiente no fue significativa; es decir, el efecto combinado de estos tres factores no tiene impacto en la retención de sedimentos en las presas evaluadas.

Otros estudios han documentado la efectividad de las presas en la retención de sedimentos. Mejía-Bojórquez *et al.* (2015), utilizando también figuras geométricas, encontraron que el promedio de azolves retenidos en algunos predios del estado de Durango varió de 3.24 a 16.3 m³ (equivalentes entre 4 y 23 toneladas).

Cuadro 2. Análisis de varianza del efecto individual e interacciones entre el tipo de material de construcción de presas filtrantes, precipitación y pendiente del terreno en la retención del suelo en el noroeste de Durango, México.

Table 2. Analysis of variance of the individual effects e interactions among types of construction of check dams, precipitation, and slope to control soil sediments in northwestern Durango, Mexico.

Sedimento retenido [†]	Valor promedio	Valor de F observada	Significancia
	Mg		
Interacción entre tipos de material		1.33	0.25
1 Piedra acomodada	3.56		
2 Madera	4.25		
Interacción entre clases de pendiente		5.12	0.02
4 Menos de 23%	2.88		
5 Más de 23%	4.77		
Interacción entre clases de Precipitación		0.91	0.34
6 Más de 1000 mm	3.86		
7 Menor (o igual) 1000 mm	3.64		
Interacción Tipo material Precipitación		0.06	0.80
Interacción Tipo material Pendiente		0.36	0.56

[†] Fuente: Información propia.

[†] Source: Own information.

Estas cantidades coinciden con el rango estimado en este estudio; sin embargo, se desconoce el tipo de material de construcción y el tamaño de las obras evaluadas. También, Lira-Caballero *et al.*, (2020), en la Mixteca Alta de Oaxaca, encontraron que solo una presa de piedra acomodada capturó 35 toneladas de sedimentos provenientes de una microcuenca de 37 hectáreas.

Los resultados indican que en promedio cerca de 0.19 toneladas de material orgánico y 0.11 toneladas de carbono orgánico se almacenan por presa filtrante. La importancia de las presas filtrantes es que además de retener sedimentos, contribuyen a la retención de materia orgánica y secuestro de carbono (Aguirre-Salado, Pérez, Aguirre, Monterroso y Gallardo, 2023). Lü, Sun, Fu y Wang (2012) encontraron que las presas filtrantes construidas hasta el 2009, en la región central de China, habían retenido cerca de 42.3 millones de toneladas de carbono orgánico. Esta cantidad es alta debido al número y tamaño de presas que ese país ha construido en las últimas décadas. De manera similar, Addisu y Mekomen (2019) reportaron que las presas filtrantes construidas en el noroeste de Etiopía han retenido cerca de 4.47 millones de toneladas de carbono. En el caso de México, no se encontraron datos de la cantidad de carbono orgánico retenidos en todas las presas de manera agregada, pero los datos de este estudio podrían ayudar a hacer estimaciones generales.

Las presas requieren de una planeación y mantenimiento adecuados para evitar problemas en su funcionamiento. Factores como el anclaje al suelo, ausencia de un vertedor, espaciamiento óptimo y falta de obras complementarias aguas arriba de las presas influyen en la buena retención de sedimentos (Leyew *et al.*, 2021). Abbasi *et al.* (2019), Lira-Caballero *et al.* (2018, 2020) y Lucas-Borja *et al.* (2019) indican que algunas presas fallan cuando el drenaje, o microcuenca de captación es grande, la pendiente longitudinal es alta y éstas se construyen ignorando especificaciones técnicas, como anclado, calidad de material y tamaño requerido. Ellos mismos recomiendan, basado en una extensiva revisión de literatura, hacer una correcta selección del sitio donde se construirán las presas, revisar la historia y magnitud de las precipitaciones y escurrimientos, así como complementar estas presas con otras actividades de restauración como la reforestación y obras de protección al suelo.

Relación de los Sedimentos con el Volumen de los Árboles

La regresión con la técnica de *bootstrapping* para los cuantiles 0.25, 0.5 y 0.75, muestran que el valor de τ_q de la variable volumen del arbolado es siempre negativo (Ecuación 4), lo que indica que la cantidad de sedimentos retenidos en las presas filtrantes disminuye a medida que el volumen del arbolado aumenta (aproximadamente 0.30 Mg m⁻³ de arbolado) (Cuadro 3). La regresión por cuantiles muestra también que, aunque la variable

**Cuadro 3. Regresión por cuantiles del peso de sedimentos en presas filtrantes en función del volumen del arbolado en Durango, México[†].
Table 3. Quantile regression of soil sediments weight for check dams as a function of tree volume in Durango, Mexico[†].**

Cuantil/Variable	Parámetros de la regresión por cuantiles			
	Coefficiente	Error estándar [‡]	Valor de p	Pseudo r ²
Cuantil 0.25				0.296
Vol Arb (m3 ha ⁻¹)	-0.209	0.098	0.05	
Constante	22.514	4.664	0.00	
Cuantil 0.50				0.230
Vol Arb (m3 ha ⁻¹)	-0.294	0.170	0.10	
Constante	30.596	11.117	0.02	
Cuantil 0.75				0.323
Vol Arb (m3 ha ⁻¹)	-0.557	0.205	0.02	
Constante	58.033	15.055	0.002	

[†] Número de observaciones = 15, número de repeticiones = 1 000, [‡] Error estándar (bootstrapping).

[†] Number of observations = 15, number of repetitions = 1 000, [‡] Standard errors (bootstrapping).

independiente es negativa, ésta tiene diferentes tasas de cambio, especialmente cuando cambia del cuantil 0.50 ($\tau_{0.5}=-0.294$) al 0.75 ($\tau_{0.75}=-0.557$). Lo anterior sugiere que el volumen del arbolado tiene un efecto inverso en el peso de los sedimentos retenidos, particularmente en las presas con mayor retención o tamaño. El efecto del cambio se estabiliza un poco entre los cuantiles 0.25 y 0.50, donde la diferencia en las tasas de cambio es menor. En este caso, se trata de presas de menor tamaño y menor acumulación de sedimentos (Figura 4). Generalmente, el peso de los sedimentos tiene una relación directa con el contenido de materia orgánica y carbono; en consecuencia, bosques más densos tienden a incrementar el nivel de carbono, tanto en la biomasa aérea, como en el suelo (Boča, Van Miegroet y Gruselle, 2014; Paz-Pellat, Argumedo, Cruz, Etchevers y de Jong, 2016).

En la Figura 5 se observa que existe una alta dispersión de los parámetros de regresión en los cuantiles mayores a 0.5. Las diferencias en las tasas de cambio de los cuantiles en diferentes partes de la distribución son útiles para evaluar los efectos de factores ecológicos que pueden estar ocultos en una regresión lineal simple (Cade y Noon, 2003).

Los resultados confirman el rol de la cubierta forestal para reducir la erosión del suelo. Cruz-García, Monárrez, Tecle, Wehenkel y Perez (2020) utilizaron este tipo de regresión para evaluar la relación entre la densidad arbolada y el escurrimiento superficial en bosques templados de Durango, México. Ellos concluyeron que los bosques más densos tienen menor escurrimiento superficial del agua. Monárrez-González, Lopez, Marquez y Perez (2023) también encontraron una relación inversa entre el escurrimiento del agua y la densidad arbórea y sugieren que escurrimientos altos propician una mayor erosión del suelo. Lucas-Borja *et al.*, (2018) encontraron que la erosión del suelo es más susceptible que se manifieste en terrenos con baja cobertura forestal.

Por lo que se recomienda que, para incrementar la efectividad de las presas, se deben combinar prácticas de restauración como la reforestación con plantas nativas con buen sistema radicular fibroso y buena resistencia a la tensión longitudinal, obras de conservación del suelo como líneas clave, subsoleo, acordonamiento con residuos forestales o piedras, e incluso, cuando las condiciones lo permitan, con siembra de pastizales para incrementar la cohesión de las partículas del suelo (Lira-Caballero *et al.*, 2018, 2020). Aunque todas estas acciones requieren una inversión económica, su eficacia en la retención de sedimentos y los beneficios ambientales que se generan en las cuencas, pueden reducir el impacto económico ambiental en las presas de embalse y zonas que se localizan aguas abajo (Mekonnen, Keesstra, Baartman, Ritsema y Melesse, 2015).

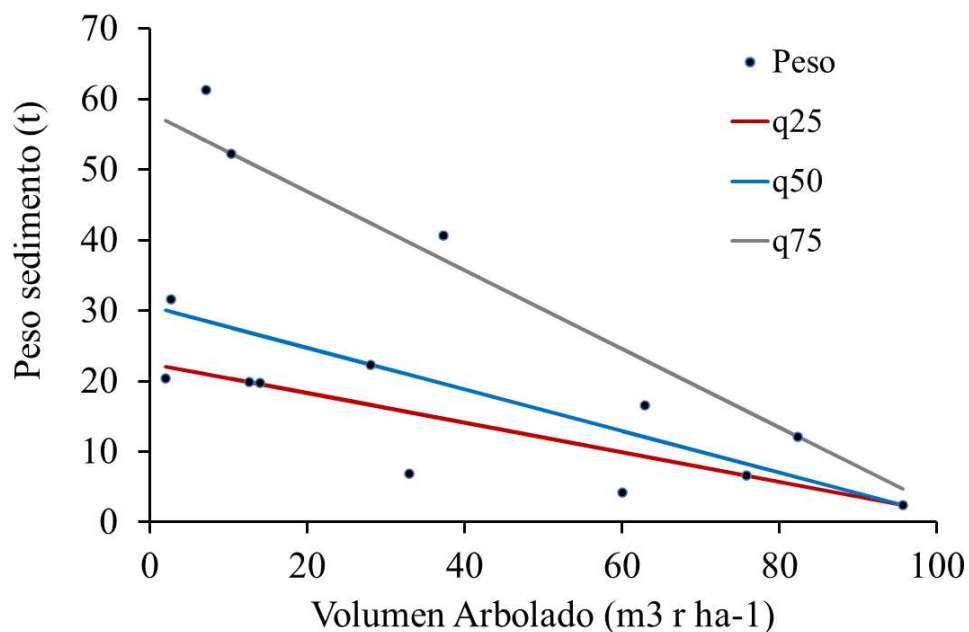


Figura 4. Dispersión de datos originales y líneas de regresión por cuantiles del modelo global para las presas filtrantes en el noroeste de Durango, México. Los puntos de color negro indican los datos originales y las líneas representan la regresión para los cuantiles 0.25, 0.50 y 0.75.

Figure 4. Dispersion of observed data and quantile regression lines of the global model for check dams in northwestern Durango, Mexico. Black points represent observed data and lines indicate results for the 0.25, 0.50, and 0.75 regression quantiles.

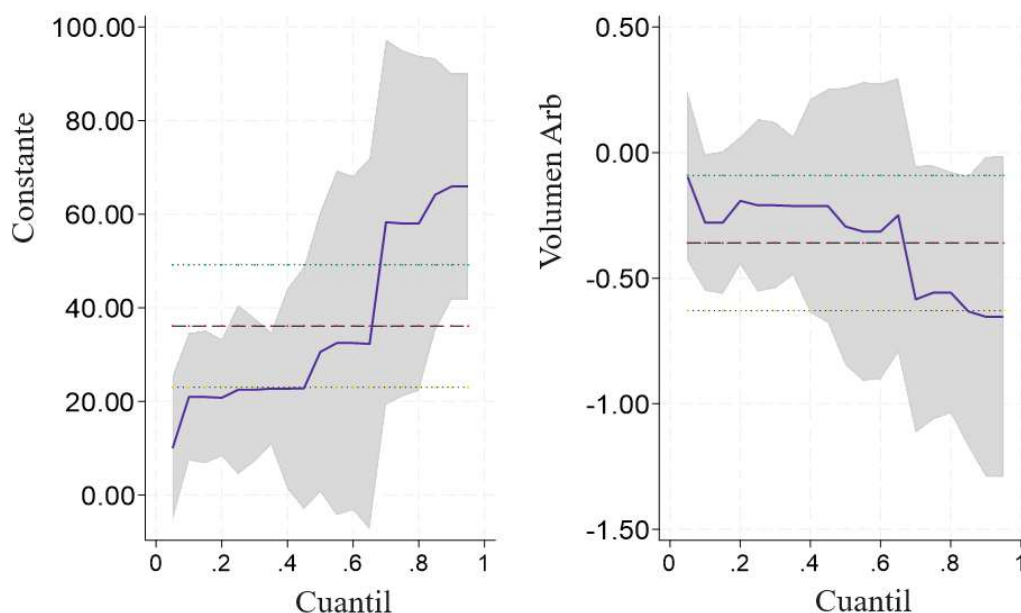


Figura 5. Intervalos de confianza para los parámetros de la regresión por cuantiles del modelo global. La grafica de la izquierda muestra los valores para la constante (β_q) y la de la derecha para el volumen del arbolado (τ_q) (Ecuación 4). Las líneas discontinuas en color indican el valor de la regresión y sus intervalos de confianza según el método de mínimos cuadrados.

Figure 5. Confidence intervals for the quantile regression parameters of the global model. Left figure shows the values for the constant (β_q), while the right shows the tree volume values (τ_q) (Equation 4). Dashed, colored lines indicate regression values and confidence intervals resulting from ordinary least squares method.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de la vegetación forestal y la efectividad de las presas filtrantes como obras de conservación para retener sedimentos y carbono orgánico en los suelos de los bosques de pino-encino del noroeste del estado de Durango, México.

Se concluye que el tipo de material con el que se construyen las presas filtrantes no influye en la retención de sedimentos. Sin embargo, las presas de morillos de madera tuvieron mejores resultados que las de piedra acomodada en la retención de materia orgánica y carbono. Además, la pendiente del cauce tuvo cierto efecto en la retención de sedimentos, pero no fue significativa para construir un modelo de regresión.

El arbolado desempeña un papel importante en la reducción de la erosión del suelo, ya que sitios con mayor densidad de vegetación arbórea tienden a proteger mejor el suelo y en consecuencia a disminuir la cantidad de sedimentos que se depositan en las presas filtrantes. Por lo tanto, con el propósito de disminuir los efectos de la erosión, además de la construcción de presas filtrantes, es importante realizar acciones integrales de restauración del suelo, a través del mantenimiento de una cobertura vegetal adecuada, reforestación y buenas prácticas de manejo forestal y conservación del suelo.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

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.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Metodología, investigación, escritura y preparación del borrador original: G.P.V. y L.A.S. Conceptualización, escritura, revisión del borrador final y adquisición de fondos: G.P.V., L.A.S. y M.E.P.L. Análisis formal, curación de datos y revisión y edición: G.P.V., L.A.S., J.A.P.R. y M.E.P.L.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo financiero recibido a través del proyecto SIP 2021-0692 y 2024-1367. A Fernando Salazar Jiménez, representante de la Consultoría Unidad de Administración Forestal Santiago Papasquiaro, así como a los comisariados de los ejidos participantes, por las facilidades prestadas y el interés en desarrollar este estudio.

LITERATURA CITADA

- Abbasi, N. A., Xu, X., Lucas-Borja, M. E., Dang, W., & Liu, B. (2019). The use of check dams in watershed management projects: Examples from around the world. *Science of The Total Environment*, 676, 683-691. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.249>
- Addisu, S., & Mekonnen, M. (2019). Check dams and storages beyond trapping sediment, carbon sequestration for climate change mitigation, Northwest Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 1-4. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0120-1>
- Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services-A global review. *Geoderma*, 262, 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Aguirre-Salado, O. T., Pérez-Nieto, J., Aguirre-Salado, C. A., Monterroso-Rivas, A. I., & Gallardo-Lancho, J. F. (2023). Erosión hídrica, redistribución del carbono orgánico del suelo y conservación del suelo y agua: Una revisión. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(3), 47-60. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.10.075>
- Akita, H., Kitahara, H., & Ono, H. (2014). Effect of climate and structure on the progression of wooden check dam decay. *Journal of Forest Research*, 19(5), 450-460. <https://doi.org/10.1007/s10310-013-0434-x>
- Boča, A., Van Mieghroet, H., & Gruselle, M. C. (2014). Forest overstory effect on soil organic carbon storage: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 78(S1), S35-S47. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.08.0332nafsc>
- Bombino, G., Gurnell, A. M., Tamburino, V., Zema, D. A., & Zimbone, S. M. (2008). Sediment size variation in torrents with check dams: Effects on riparian vegetation. *Ecological Engineering*, 32(2), 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.10.011>
- Bombino, G., Zema, D. A., Denisi, P., Lucas-Borja, M. E., Labate, A., & Zimbone, S. M. (2019). Assessment of riparian vegetation characteristics in Mediterranean headwaters regulated by check dams using multivariate statistical techniques. *Science of The Total Environment*, 657, 597-607. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.045>
- Borja, P., Molina, A., Govers, G., & Vanacker, V. (2018). Check dams and afforestation reducing sediment mobilization in active gully systems in the Andean mountains. *CATENA*, 165, 42-53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.013>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Cade, B. S., & Noon, B. R. (2003). A gentle introduction to quantile regression for ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(8), 412-420. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0412:agitqr\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0412:agitqr]2.0.co;2)
- Castillo, V. M., Mosch, W. M., García, C. C., Barberá, G. G., Cano, J. A. N., & López-Bermúdez, F. (2007). Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid Mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *CATENA*, 70(3), 416-427. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.11.009>
- Chihara, L. M., & Hesterberg, T. C. (2018). Introduction to Confidence Intervals: The bootstrap. En *Mathematical Statistics with Resampling and R* (pp. 103-148). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119505969.ch5>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2016). *Manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales* (4.ª ed., reimpresión 2016). México: Comisión Nacional Forestal.
- CONAFOR Comisión Nacional Forestal. (2023). *Manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales* (6.ª ed.). México: Comisión Nacional Forestal. ISBN: 978-607-8383-46-7
- Cotler, H., Sotelo, E., Zorrilla, M., Quiñones, L., Domínguez, J., & Cortina, S. (2007). La conservación de suelos: Un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83, 5-71.
- Cruz-García, F., Monárrez-González, J. C., Tecle, A., Wehenkel, C., & Perez-Verdin, G. (2020). Effects of stand variables on stemflow and surface runoff in pine-oak forests in northern Mexico. *PLoS One*, 15(6), e0235320. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235320>
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858-1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>

- Fraker, M. E., & Peacor, S. D. (2008). Statistical tests for biological interactions: A comparison of permutation tests and analysis of variance. *Acta Oecologica*, 33(1), 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2007.09.001>
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. (2012). Vegetación de la sierra madre occidental, México: Una síntesis. *Acta Botanica Mexicana*, 100(1), 351-404.
- Heaton, L., Fullen, M., & Bhattacharyya, R. (2016). Critical analysis of the van Bemmelen conversion factor used to convert soil organic matter data to soil organic carbon data: Comparative analyses in a UK loamy sand soil. *Espazo Aberto*, 6, 35-44. <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2016.5244>
- Izquierdo-Bautista, J., & Arévalo-Hernández, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26, 20-28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Janssen, A., & Pauls, T. (2003). How do bootstrap and permutation tests work? *The Annals of Statistics*, 31(3), 768-806. <https://doi.org/10.1214/aos/1056562462>
- Jiao, J., Zou, H., Jia, Y., & Wang, N. (2009). Research progress on the effects of soil erosion on vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 29(2), 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2009.05.001>
- Leyew, S. M., G/Michael, T., Mullu, A., & Melesse, A. M. (2021). Soil and Water Conservation Technology and Sediment Retention Assessment. En A. M. Melesse, W. Abtew, & S. A. Moges (Eds.), *Nile and Grand Ethiopian Renaissance Dam: Past, Present and Future* (pp. 315-343). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76437-1_17
- Lira-Caballero, V. G., Martínez-Menez, M. R., Romero-Manzanares, A., & García-Moya, E. (2018). Initial floristic composition of rehabilitated gullies through bioengineering in the Mixteca Region, Sierra Madre del Sur, Mexico. *Journal of Mountain Science*, 15(10), 2120-2135. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-4899-0>
- Lira-Caballero, V. G., Martínez-Menez, M. R., Romero-Manzanares, A., García-Moya, E., Ríos-Berber, J. D., & Rubio-Granados, E. (2020). Morphometry of gullies and bioengineering for sediment retention in the Mixteca Region of Oaxaca, Mexico. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20(2), 289-300. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.03.001>
- Lü, Y., Sun, R., Fu, B., & Wang, Y. (2012). Carbon retention by check dams: Regional scale estimation. *Ecological Engineering*, 44, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.020>
- Lucas-Borja, M. E., Piton, G., Nichols, M., Castillo, C., Yang, Y., & Zema, D. A. (2019). The use of check dams for soil restoration at watershed level: A century of history and perspectives. *Science of The Total Environment*, 692, 37-38. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.248>
- Lucas-Borja, M. E., Zema, D. A., Guzman, M. D. H., Yang, Y., Hernández, A. C., Xiangzhou, X., ... & Cerdá, A. (2018). Exploring the influence of vegetation cover, sediment storage capacity and channel dimensions on stone check dam conditions and effectiveness in a large regulated river in México. *Ecological Engineering*, 122, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.025>
- Ludwig, M., Wilmes, P., & Schrader, S. (2018). Measuring soil sustainability via soil resilience. *Science of The Total Environment*, 626, 1484-1493. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.043>
- MacDonald, R. L., Chen, H. Y. H., Palik, B. P., & Prepas, E. E. (2014). Influence of harvesting on understory vegetation along a boreal riparian-upland gradient. *Forest Ecology and Management*, 312(0), 138-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.10.011>
- Mejía-Bojórquez, J. M., Javier-Hernández, F., Graciano-Luna, J. J., & Cruz-Cobos, F. (2015). La EUPS en la evaluación de obras de conservación de suelos en Durango. *Reaxion*, 2(2), 1-9.
- Mekonnen, M., Keesstra, S. D., Baartman, J. E., Ritsema, C. J., & Melesse, A. M. (2015). Evaluating sediment storage dams: Structural off-site sediment trapping measures in northwest Ethiopia. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 41(1), 7-22. <https://doi.org/10.18172/cig.2643>
- Monárrez-González, J. C., Lopez-Gonzalez, C., Marquez-Linares, M. A., & Perez-Verdin, G. (2023). Response of water yield to silvicultural treatments in a temperate forest in northern Mexico. *Plos One*, 18(12), e0291094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291094>
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(33), 13268-13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Nichols, M. H., & Polyakov, V. O. (2019). The impacts of porous rock check dams on a semiarid alluvial fan. *Science of The Total Environment*, 664, 576-582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.429>
- Paz-Pellat, F., Argumedo-Espinoza, J., Cruz-Gaistardo, C. O., Etchevers, J. D., & de Jong, B. (2016). Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 289-310.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. *Catena*, 50(2), 91-133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)
- Schulte, E. E., & Hopkins, B. G. (1996). Estimation of organic matter by weight loss-on-ignition. En F. R. Magdoff (Ed.), *Soil organic matter: Analysis and interpretation* (pp. 21-31). Madison, WI, USA: SSSA.
- Silva-Flores, R., Perez-Verdin, G., & Wehenkel, C. (2014). Patterns of tree species diversity in relation to climatic factors in the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Plos One*, 9(8), e105034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105034>
- StataCorp LLC (2023). *Stata Statistical Software: Release 18: User's Guide*. College Station, TX, USA: StataCorp LLC.
- USDA (United States Department of Agriculture). (1999). *Soil Quality Test Kit Guide*. Ames, IA: U.S. Department of Agriculture.
- Van Zijl, G. M., Ellis, F., & Rozanov, A. (2014). Understanding the combined effect of soil properties on gully erosion using quantile regression. *South African Journal of Plant and Soil*, 31(3), 163-172. <https://doi.org/10.1080/02571862.2014.944228>
- Zaimes, G. N., & Schultz, R. C. (2015). Riparian land-use impacts on bank erosion and deposition of an incised stream in north-central Iowa, USA. *Catena*, 125, 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.013>
- Zema, D. A., Bombino, G., Denisi, P., Lucas-Borja, M. E., & Zimbone, S. M. (2018). Evaluating the effects of check dams on channel geometry, bed sediment size and riparian vegetation in Mediterranean mountain torrents. *Science of The Total Environment*, 642, 327-340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.035>