

Modelación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos: una revisión







Modeling of water erosion and sediment transport: a review

Ericka Picado-Mora¹, Karolina Villagra-Mendoza², Margaret Gitau³

Picado-Mora, E; Villagra-Mendoza, K; Gitau, M. Modelación de la erosión hídrica y transporte de sedimentos: una revisión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° especial Tecnología en Marcha. Marzo, 2026. Vol. 39, N° especial VII Encuentro Bial Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Marzo, 2026. Pág. 34-43.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i6.8571>



- 1 Estudiante de Posgrado Maestría en Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 epicadom@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0008-3160-863X>
- 2 Profesora e Investigadora Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola, Escuela de Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 kvillagra@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2335-0615>
- 3 Profesora del Departamento de Ingeniería Agrícola y Biológica, Purdue University. Estados Unidos.
 mgitau@purdue.edu
 <https://orcid.org/0000-0002-4931-7047>

Palabras clave

Conservación de suelos; degradación del suelo; erosión; modelos; sensores remotos; transporte de sedimentos.

Resumen

La erosión hídrica y el transporte de sedimentos son procesos clave en la degradación del suelo, impactando significativamente la sostenibilidad agrícola en regiones tropicales con alta pendiente como América Latina. Esta revisión analiza el estado del arte en la modelación de dichos procesos, con énfasis en enfoques experimentales a nivel de laboratorio y su integración en estrategias de conservación del suelo. Se aplicó una metodología mixta, utilizando la base de datos Scopus, identificando 64 publicaciones como nivel integrador entre 2020 y 2025. Los modelos más citados fueron SWAT, IBER y SDR-InVEST, por su capacidad de simular pérdida de suelo y transporte de sedimentos a distintas escalas. La teledetección y las parcelas de escorrentía emergen como herramientas clave para la validación de modelos en contextos tropicales. Los resultados evidencian el potencial de la modelación para apoyar el manejo sostenible del suelo y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Sin embargo, persisten desafíos asociados a la calidad de los datos, la validación en condiciones locales y la articulación con marcos de sostenibilidad. Se concluye que es necesario fortalecer los estudios aplicados en zonas tropicales y fomentar la integración de herramientas técnico-científicas en planes de conservación del suelo.

Keywords

Soil conservation; soil degradation; erosion; models; remote sensing; sediment transport.

Abstract

Water erosion and sediment transport are key processes in soil degradation, significantly impacting agricultural sustainability in tropical high-slope regions such as Latin America. This review analyzes the state of the art in the modeling of these processes, with an emphasis on experimental approaches at the laboratory scale and their integration into soil conservation strategies. A mixed methodology was applied using the Scopus database, identifying 64 publications as the integrative level between 2020 and 2025. The most cited models were SWAT, IBER, and SDR-InVEST, recognized for their ability to simulate soil loss and sediment transport across different scales. Remote sensing and runoff plots emerge as key tools for model validation in tropical contexts. The findings highlight the potential of modeling to support sustainable soil management and contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs). However, challenges remain regarding data quality, local validation, and integration with sustainability frameworks. It is concluded that applied research in tropical regions must be strengthened, and the integration of technical and scientific tools into soil conservation planning must be promoted.

Introducción

La degradación del suelo por erosión hídrica representa una amenaza crítica para la sostenibilidad agrícola, especialmente en regiones tropicales de alta pendiente. En Costa Rica, el uso intensivo del suelo y las prácticas agrícolas inadecuadas han agravado esta problemática, que, según la FAO [1], afecta al 33% de los suelos a nivel mundial, siendo América Latina la región con mayor proporción de casos severos. Esta situación genera una reducción

significativa en la productividad agrícola, pérdidas económicas y una presión creciente sobre la sostenibilidad ambiental. Además de su papel en la producción de alimentos, el suelo cumple funciones esenciales en la regulación del clima, al actuar como reservorio de carbono, por lo que su conservación es clave para avanzar hacia el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 2: Hambre Cero, que promueve una agricultura resiliente frente al cambio climático y la degradación de los recursos naturales [2]. En respuesta a esta problemática, se han desarrollado diversas metodologías para monitorear y modelar los procesos de erosión y transporte de sedimentos. Entre las más destacadas se encuentran la teledetección, la modelación computacional y los enfoques experimentales en laboratorio, como el uso de parcelas de escorrentía y simuladores de lluvia. Estas herramientas permiten generar datos precisos y contextualizados, esenciales para diseñar estrategias efectivas de conservación del suelo. Sin embargo, persisten vacíos en la validación de modelos en condiciones tropicales y en su articulación explícita con los ODS. En este contexto, la presente revisión de literatura analiza los avances científicos recientes en la modelación de la erosión hídrica y el transporte de sedimentos, con énfasis en enfoques experimentales y su potencial para mitigar la degradación del suelo en el marco del desarrollo sostenible. Abordando tres ejes principales: (i) el impacto de estos procesos en la sostenibilidad agrícola, (ii) los modelos más utilizados a nivel de laboratorio, y (iii) su aplicación en estrategias de conservación del suelo y manejo del agua ante el cambio climático.

Materiales y métodos

Se aplicó un diseño de investigación documental, con enfoque mixto: revisión narrativa y análisis bibliométrico. La búsqueda se realizó en la base de datos Scopus, en donde se definieron cuatro niveles de búsqueda temáticos: (i) erosión y sostenibilidad (1598 resultados), (ii) técnicas experimentales como parcelas de escorrentía y sensores remotos (136 y 836 resultados), (iii) modelos como SWAT, IBER y EUROSEM (109 resultados), y (iv) nivel integrador bajo criterios de sostenibilidad (64 resultados), basado en la cadena: (“soil erosion” OR “land degradation” OR “sediment transport”) AND (“runoff plots” OR “rainfall simulator” OR “remote sensing” OR “satellite imagery”) AND (“modeling” OR “erosion model” OR “sediment model”) AND (“sustainability” OR “climate change” OR “soil conservation”). Se aplicaron filtros por idioma (español/inglés), tipo de documento (artículos y revisiones), área temática (ciencias ambientales, agrícolas e ingeniería), y periodo (2020–2025). Se analizaron 64 publicaciones mediante el paquete *bibliometrix* en RStudio, identificando redes de coocurrencia, autores, instituciones y evolución de conceptos. Los resultados fueron organizados según los objetivos planteados, identificando tendencias, vacíos y oportunidades para futuras investigaciones en conservación del suelo. Adicionalmente, se consultó la base ampliada de más de 1000 artículos sin el filtro de sostenibilidad, con el fin de identificar patrones específicos en la aplicación de modelos empíricos y computacionales en diferentes regiones.

Resultados

Panorama general de la producción científica

Entre 2020 y 2025 se identificaron 64 publicaciones indexadas en Scopus relacionadas con la erosión hídrica, el transporte de sedimentos, sus técnicas de modelación y su aplicación en sostenibilidad, siendo este el nivel integrador. Las palabras clave más frecuentes fueron: “sensores remotos”, “erosión hídrica”, “degradación del suelo” y “cambio climático” (Figura 1).

distribución revela una brecha regional en la investigación, vinculada a una menor inversión en investigación ambiental, acceso limitado a tecnologías de modelación y débil articulación entre ciencia y políticas públicas en varios países latinoamericanos [3].

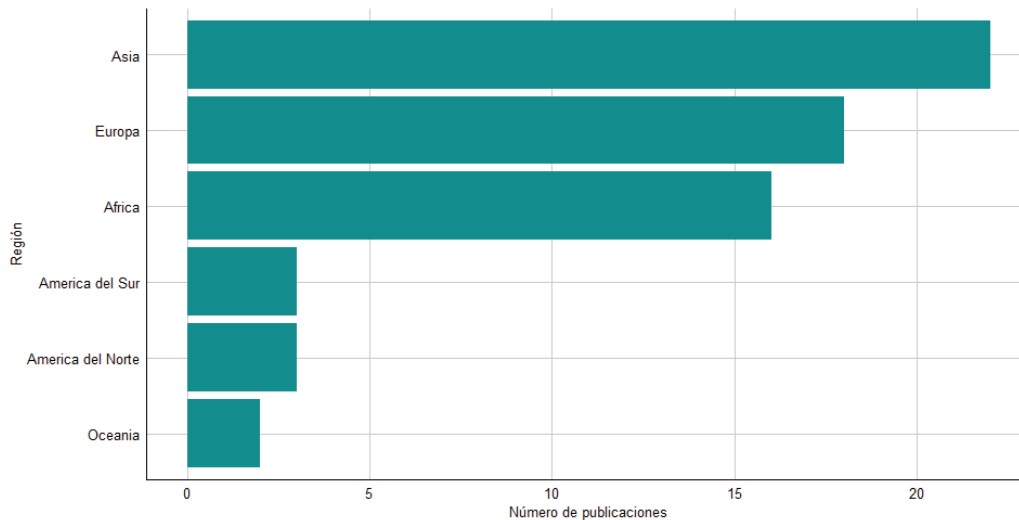


Figura 3. Producción científica por región en el nivel integrador.

Modelación de la erosión hídrica: clasificación, aplicaciones y avances recientes

Se identificaron cinco tipos de modelos aplicados a la cuantificación de la erosión hídrica: físicos, empíricos, conceptuales, digitales y analógicos. Entre ellos, los modelos empíricos son los más aplicados, destacando la ecuación RUSLE, en la búsqueda ampliada de más de 1000 artículos publicados entre 2020 y 2025 (sin el filtro de sostenibilidad), RUSLE aparece presente en más de 600 estudios en Asia y al menos 150 en América (Figura 4). Esta ecuación considera variables como textura del suelo, pendiente, cobertura vegetal y régimen hídrico, y ha sido ampliamente empleada en zonas agrícolas, combinada con datos de sensores remotos para mejorar la precisión espacial [4]. Por su parte, la ecuación MUSLE ha ganado importancia por su capacidad para estimar la producción de sedimentos en eventos hidrológicos específicos [4]. No obstante, solo alrededor del 25% de los estudios analizados incorporan explícitamente el transporte de sedimentos, lo que constituye una limitación significativa, considerando que muchas aplicaciones se enfocan únicamente en la pérdida de suelo superficial. Aunque RUSLE y MUSLE han sido validadas en contextos agrícolas generales, su precisión en ambientes tropicales altamente degradados es aún incierta. Estudios como el de Quincke Walden et al. [5] evidencian que estas ecuaciones tienden a subestimar las pérdidas en suelos severamente erosionados, resaltando la necesidad de validaciones experimentales.

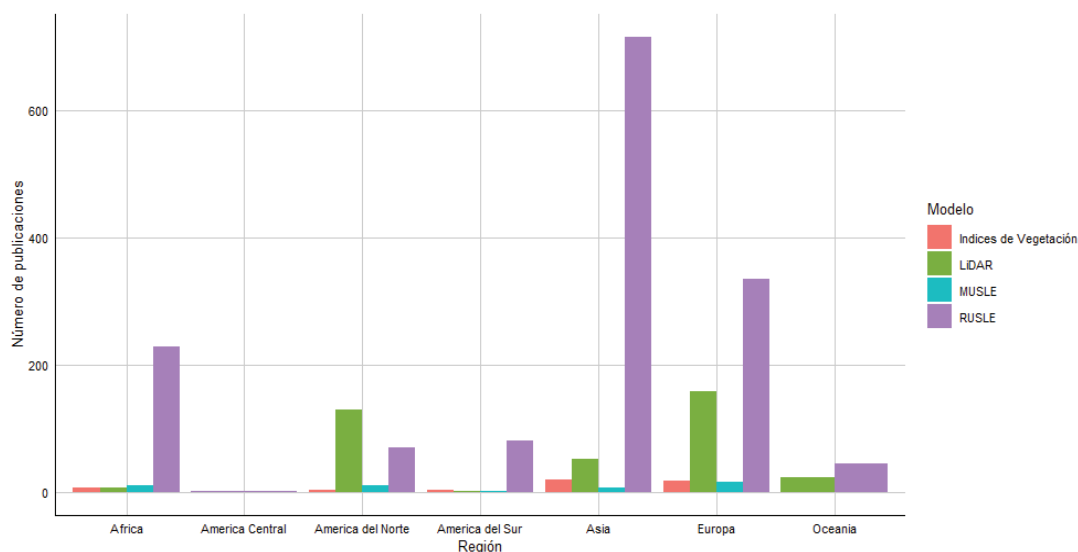


Figura 4. Uso de modelos de erosión por región.

La integración de sensores remotos ha mejorado la resolución espacial de los modelos. Vehículos Aéreos no Tripulados (UAVs por sus siglas en inglés), imágenes multiespectrales, sensores láser de teledetección (conocidos como LiDAR) y análisis de índices de vegetación han sido aplicados para estimar pérdida de suelo y evaluar zonas de acumulación de sedimentos. Estas herramientas permiten generar modelos 2D y 3D de alta precisión, aunque requieren calibración con datos de campo y experimentación en laboratorio para asegurar su aplicabilidad en contextos específicos [6], [7]. Según Alexiou et al. [8], los datos de alta resolución sobre deposición de sedimentos respaldan el uso de sensores remotos como herramienta clave para cuantificar la erosión. A pesar del avance tecnológico, existe una baja integración entre modelos predictivos y validación empírica mediante parcelas de escorrentía o simuladores de lluvia, los cuales resultan esenciales para observar los procesos en tiempo real bajo condiciones controladas. La falta de estandarización metodológica limita la transferencia de resultados entre regiones o escalas [2]. En este contexto, la sostenibilidad se posiciona como un criterio transversal, la capacidad de anticipar pérdidas de suelo y sedimentos con modelos validados localmente es crucial para el diseño de estrategias de conservación efectivas, especialmente en zonas agrícolas vulnerables. Sin embargo, el número limitado de estudios que combinan validación experimental, modelación matemática y teledetección revela una brecha metodológica significativa [9].

Modelación del transporte de sedimentos

El análisis bibliográfico identificó más de 150 estudios que utilizaron el modelo SWAT para simular el transporte de sedimentos, consolidándolo como el modelo más empleado a nivel global en las últimas dos décadas (Figura 5). Este hallazgo coincide con lo señalado por Colín-García et al. [10], quienes destacan su versatilidad para simular procesos hidrológicos, calidad del agua y transporte de sedimentos a múltiples escalas. SWAT integra variables como uso del suelo, cobertura vegetal, clima y topografía, e implementa la ecuación MUSLE junto con otras ampliamente reconocidas como Bagnold, Molinas y Wu, y Yang [11].

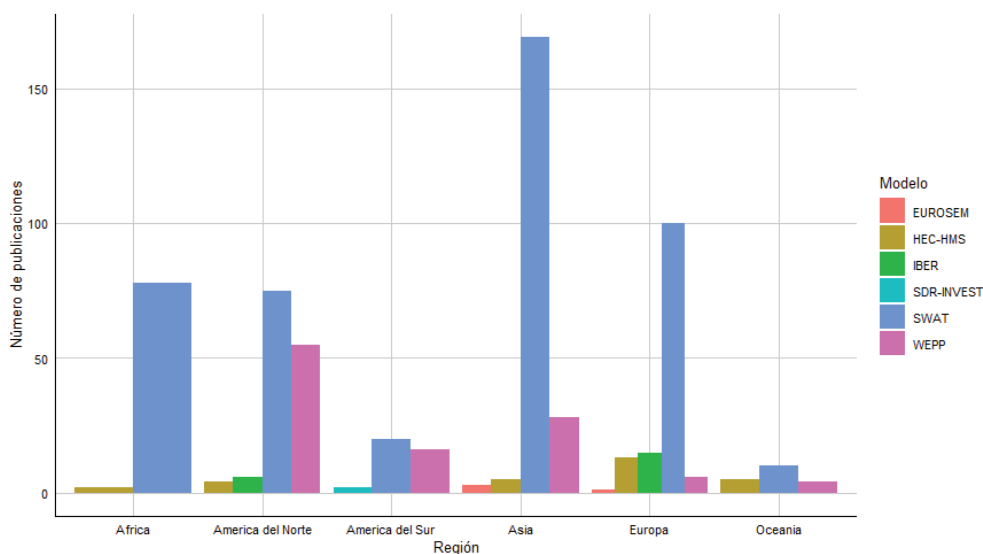


Figura 5. Aplicación de los modelos de transporte de sedimentos por región.

Otros modelos relevantes incluyen WEPP, IBER, y SDR-InVEST, utilizados principalmente en América y Europa. SDR-InVEST ha cobrado notoriedad recientemente por su enfoque ecosistémico, y ha sido empleado en estudios enfocados en la valoración de servicios ambientales, especialmente en Estados Unidos [12]. De los modelos analizados, SWAT, WEPP, SDR-InVEST, KINEROS e IBER cuentan con módulos específicos para la erosión y el transporte de sedimentos. En contraste, ecuaciones como RUSLE y MUSLE se utilizan para estimar la pérdida de suelo, sin simular transporte de sedimentos en cauces, y más bien contribuyen al complementar los modelos computacionales mencionados. El análisis temporal (Figura 6) muestra una transición metodológica clara: modelos como EUROSEM y WEPP fueron dominantes hasta 2005, mientras que a partir de 2010 se incrementó el uso de modelos computacionales más avanzados, como SWAT y SDR-InVEST. Entre 2020 y 2025 se observa una tendencia hacia enfoques integrados, que combinan modelación, sensores remotos y simulaciones en laboratorio. Sin embargo, menos del 20% de los estudios combinó dos o más modelos, siendo las combinaciones más frecuentes SWAT + RUSLE y SWAT + SDR-InVEST, empleadas para validar resultados o cubrir diferentes escalas de análisis, enfocadas principalmente a formaciones fluviales y no ha parcelas de escorrentía superficial [13], [14].

Respecto al contexto de validación, los modelos han sido principalmente calibrados y validados en cuencas templadas, lo cual limita su aplicabilidad directa en regiones tropicales. En este contexto, SWAT se posiciona como el modelo con mayor potencial de adaptación, por su capacidad para simular flujos en pendientes pronunciadas e integrar múltiples ecuaciones de transporte adaptables a escenarios topográficos y edafológicos variables [10], [11]. No obstante, persisten limitaciones importantes: escasa validación con datos obtenidos en condiciones tropicales o mediante parcelas de escorrentía simuladas, baja integración entre modelos y técnicas de teledetección, y limitada disponibilidad de datos de alta resolución. Estos factores reducen la precisión de las proyecciones y dificultan su extrapolación a largo plazo [10], [11]. A pesar de ello, la integración de modelos de transporte de sedimentos con sensores remotos representa una oportunidad significativa para avanzar en la planificación sostenible del uso del suelo y la conservación hídrica. Siempre que estos modelos se adapten a condiciones locales y sean adecuadamente calibrados, pueden contribuir al desarrollo de sistemas de alerta temprana, diseño eficiente de obras de conservación y formulación de políticas basadas en evidencia.

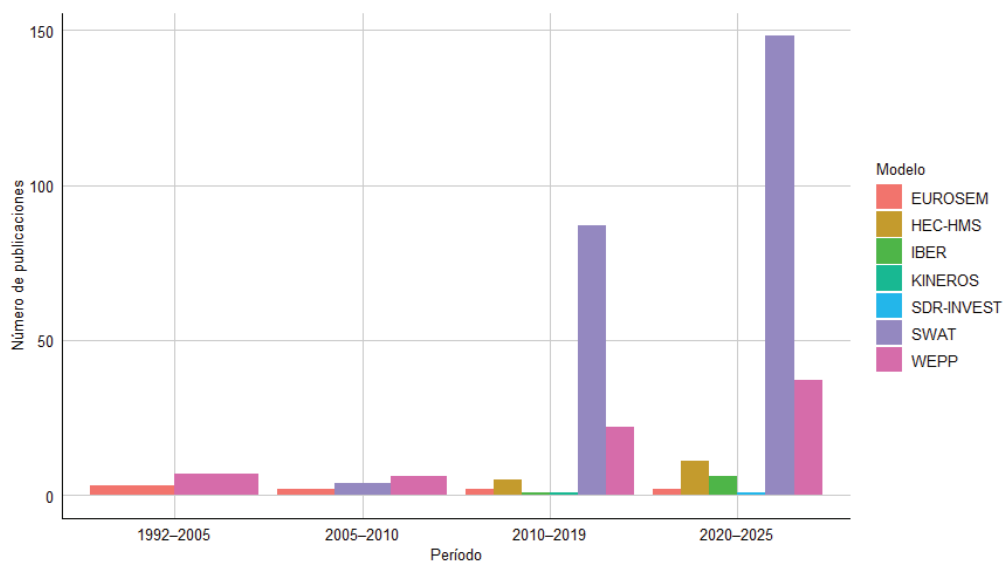


Figura 6. Evolución de la aplicación de los modelos de transporte de sedimentos a nivel mundial.

Aplicación de la modelación en estrategias de conservación y sostenibilidad

La modelación hidro-sedimentológica, combinada con herramientas como la teledetección, representa una base técnica clave para diseñar estrategias de conservación del suelo. Modelos como SWAT, IBER y SDR-InVEST, al integrar ecuaciones validadas como RUSLE y MUSLE, generan resultados cuantificables y representaciones visuales que facilitan la toma de decisiones técnicas y políticas [15]. Estas herramientas también permiten caracterizar el uso del suelo y monitorear condiciones climáticas variables con mayor precisión, lo que resulta particularmente útil en regiones donde el monitoreo de campo es limitado [12], [16]. En América Latina, la aplicación de modelos ha permitido reducir significativamente la pérdida de suelo, como evidencian casos documentados en Argentina, Paraguay y Brasil [17]. En Costa Rica, por ejemplo, la cuenca del río Jesús María ha sido objeto de intervenciones basadas en modelaciones, como las acequias de ladera y gavetas de infiltración, con resultados positivos en la conservación del suelo [18]. Estas experiencias reflejan el aporte de la modelación al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2 y 13, al fomentar el uso racional del suelo y fortalecer la capacidad de adaptación al cambio climático. Sin embargo, persisten desafíos relevantes, como la calidad y disponibilidad de los datos de entrada, la necesidad de validación local de modelos, y su limitada integración con marcos de sostenibilidad global [19]. El análisis bibliométrico refuerza esta brecha, al evidenciar que términos como “SWAT”, “erosion”, “soil conservation” y “remote sensing” dominan la literatura reciente, mientras que la mención directa a los ODS es limitada. Esto señala la necesidad de fortalecer los vínculos entre ciencia aplicada y agendas internacionales, particularmente en regiones como Centroamérica, donde la degradación del suelo avanza rápidamente y la investigación aplicada aún es escasa.

Conclusiones

La revisión evidencia que la erosión hídrica y el transporte de sedimentos son procesos críticos en la degradación del suelo, especialmente en regiones tropicales de alta pendiente como América Latina. Esta problemática representa una amenaza directa para la sostenibilidad agrícola y la seguridad alimentaria, y requiere enfoques integrales basados en evidencia científica. Los

resultados muestran que modelos hidro-sedimentológicos como SWAT, IBER y SDR-InVEST han ganado relevancia por su capacidad de simular escenarios de pérdida de suelo y escorrentía. Estos modelos, al incorporar ecuaciones validadas y generar salidas visualmente interpretables, contribuyen al diseño y optimización de estrategias de conservación del suelo. Su integración con herramientas como la teledetección ha fortalecido el diagnóstico territorial, especialmente en contextos con acceso limitado a monitoreo directo. Del mismo modo, el análisis bibliométrico confirma el protagonismo de enfoques técnico-computacionales en la literatura reciente, aunque también pone en evidencia la baja vinculación explícita de estos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esta desconexión representa una oportunidad para alinear la producción científica con metas globales de sostenibilidad. Finalmente, la modelación de la erosión hídrica y el transporte de sedimentos se consolida como una herramienta estratégica para el manejo sostenible del suelo. No obstante, su efectividad depende de la calidad y disponibilidad de los datos, la validación en condiciones locales y su articulación con enfoques experimentales. En regiones como Centroamérica, donde los procesos de degradación son acelerados y la investigación aplicada sigue siendo limitada, es urgente fortalecer la generación de información contextualizada, promover estudios experimentales y consolidar la integración de estas herramientas en planes técnicos de conservación del suelo.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (código 1421040). Los autores agradecen a la Maestría en Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) y al Instituto Tecnológico de Costa Rica por el apoyo académico vinculado a esta iniciativa.

Referencias

- [1] FAO, *Global Soil Partnership 2012-2022-Sustainable soil management in action*. Rome: FAO, 2022. doi: [10.4060/cc0921en](https://doi.org/10.4060/cc0921en).
- [2] T. Palominos-Rizzo, M. Villatoro-Sánchez, A. Alvarado-Hernández, V. Cortés-Granados, and D. Paguada-Pérez, "Dinámica temporal de erosión del suelo en café (*Coffea arabica*), Llano Brenes, Costa Rica," *Agronomía Mesoamericana*, vol. 33, no. 13, p. 49736, Ago. 2022, doi: [10.15517/am.v33i3.49736](https://doi.org/10.15517/am.v33i3.49736).
- [3] D. M. Santin and S. E. Caregnato, "Concentración y desigualdad científica en América Latina y el Caribe a principios del siglo XXI: un estudio cuantitativo," *Información, cultura y sociedad*, no. 43, pp. 13–30, Oct. 2020, doi: [10.34096/ics.i43.8131](https://doi.org/10.34096/ics.i43.8131).
- [4] Y. A. Bocanegra Alza and Y. E. Guzman Ventura, "Determinación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Chicama, 2021," Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo, 2023. [Online]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14414/16439>. [Accedido Ene. 30, 2025].
- [5] J. A. Quincke Walden *et al.*, "Informe final publicable de proyecto Determinación de tasas de erosión por técnicas nucleares en el experimento agrícola de largo plazo más antiguo de Latinoamérica," Universidad de la República, 2023. [Online]. Disponible en: https://redi.anii.org.uy/jspui/bitstream/20.500.12381/3942/1/Informe_final_publicable_FMV_1_2019_1_156244.pdf. [Accedido May 15, 2025].
- [6] S. Arriola-Valverde, L. C. Villalobos-Avellan, K. Villagra-Mendoza, and R. Rimolo-Donadio, "Erosion Quantification in Runoff Agriculture Plots by Multitemporal High-Resolution UAS Digital Photogrammetry," *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, vol. 13, pp. 6326–6336, 2020, doi: [10.1109/JSTARS.2020.3027880](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3027880).
- [7] S. Polovina, B. Radić, R. Ristić, and V. Milčanović, "Application of Remote Sensing for Identifying Soil Erosion Processes on a Regional Scale: An Innovative Approach to Enhance the Erosion Potential Model," *Remote Sens (Basel)*, vol. 16, no. 13, p. 2390, Jun. 2024, doi: [10.3390/rs16132390](https://doi.org/10.3390/rs16132390).
- [8] S. Alexiou, I. Papanikolaou, S. Schneiderwind, V. Kehrlé, and K. Reicherter, "Monitoring and Quantifying Soil Erosion and Sedimentation Rates in Centimeter Accuracy Using UAV-Photogrammetry, GNSS, and t-LiDAR in a Post-Fire Setting," *Remote Sens (Basel)*, vol. 16, no. 5, p. 802, Feb. 2024, doi: [10.3390/rs16050802](https://doi.org/10.3390/rs16050802).

- [9] D. Dunkerley, "The case for increased validation of rainfall simulation as a tool for researching runoff, soil erosion, and related processes," *Catena (Amst)*, vol. 202, p. 105283, Jul. 2021, doi: [10.1016/j.catena.2021.105283](https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105283).
- [10] G. Colín-García *et al.*, "Modelación hidrológica con el modelo SWAT empleando diferentes distribuciones espaciales del tipo suelo en la cuenca del Río Mixteco," *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, vol. 41, Mar. 2023, doi: [10.28940/terra.v41i0.1566](https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1566).
- [11] V. J. Vargas Caba, "Simulación hidrológica de cuencas aplicando el modelo hidrológico SWAT," *Revista Técnica de la Construcción*, vol. 1, no. 21, pp. 36–41, 2024, [Online]. Disponible en: <https://revistas.usfx.bo/index.php/revistatecnicaconstruccion/article/view/1298>. [Accedido Abr. 05, 2025].
- [12] H. B. G. D. M. P. Ekanayaka, N. S. Abeysingha, T. Amarasekara, R. L. Ray, and D. K. Samarathunga, "The use of InVEST-SDR model to evaluate soil erosion and sedimentation in the closer catchment of a proposed tropical reservoir in Sri Lanka," *International Journal of Sediment Research*, vol. 40, no. 2, pp. 253–268, Abr. 2025, doi: [10.1016/j.ijsrc.2024.12.005](https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.12.005).
- [13] P. Garcia Ramirez, L. C. Alatorre Cejudo, and L. C. Bravo Peña, "Modelos de escorrentía superficial en la última década. Una revisión bibliográfica," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 1, pp. 7726–7750, Mar. 2023, doi: [10.37811/cl_rcm.v7i1.5001](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5001).
- [14] T. Selim, M. Hesham, and M. Elkiki, "Effect of sediment transport on flow characteristics in non-prismatic compound channels," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 6, p. 101771, Nov. 2022, doi: [10.1016/j.asej.2022.101771](https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101771).
- [15] D. Gutierrez Pacco, J. Supo Espinoza, and M. Alvarez Tapara, "Estimación de la retención de sedimentos con el modelo INVEST (SDR), en la cuenca Huancané," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 4, pp. 1611–1624, Jul. 2023, doi: [10.37811/cl_rcm.v7i4.6979](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.6979).
- [16] S. Senanayake, B. Pradhan, A. Huete, and J. Brennan, "Spatial modeling of soil erosion hazards and crop diversity change with rainfall variation in the Central Highlands of Sri Lanka," *Science of The Total Environment*, vol. 806, p. 150405, Feb. 2022, doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.150405](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150405).
- [17] P. Borrelli *et al.*, "An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion," *Nat Commun*, vol. 8, no. 1, p. 2013, Dic. 2017, doi: [10.1038/s41467-017-02142-7](https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7).
- [18] D. A. Chacón Gómez, "Análisis de la Intervención en Obras de Conservación de Suelo y Agua y su Relación con la Calidad del Suelo en Dos Fincas Productoras de Café en la Cuenca Alta del Río Jesús María," Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José, 2022. [Online]. Disponible en: [https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/TFG-DiegoChaconGomez.pdf#:~:text=La%20cuenca%20del%20R%C3%ADo%20Jes%C3%BA%20Mar%C3%ADa%20fue,la%20zona%20con%20planes%20de%20conservaci%C3%B3n%20\(1\)](https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/TFG-DiegoChaconGomez.pdf#:~:text=La%20cuenca%20del%20R%C3%ADo%20Jes%C3%BA%20Mar%C3%ADa%20fue,la%20zona%20con%20planes%20de%20conservaci%C3%B3n%20(1)). [Accedido May 15, 2025].
- [19] Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica and Naciones Unidas Costa Rica, "Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Costa Rica," 17 OBJETIVOS para transformar nuestro mundo. [Online]. Disponible en: <https://ods.cr/> [Accedido Mar. 02, 2025].

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.