



Aplicación de herramientas geomáticas para la identificación y evaluación de riesgo a la erosión hídrica en la cuenca del río Vincos, Ecuador

Application of geomatics tools for the identification and assessment of water erosion risk in the Vincos River basin, Ecuador

Carlos Alberto, Nieto Cañarte ; Norma María, Guerrero Chuez ; Mariela Alexi, Díaz Ponce ; Eloyssa Mariana, Parraga Borja

⁽¹⁾ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador.

Resumen

La gestión integral de los recursos hídricos (GIRH) en la Cuenca del Río Vincos, requiere evaluar con precisión la erosión hídrica, un desafío ambiental intensificado por la presión antropogénica y las condiciones geomorfológicas del territorio. El objetivo de esta investigación fue aplicar herramientas geomáticas, específicamente el Sistema de Información Geográfica (SIG), para implementar el modelo empírico de la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) y determinar la erosión potencial y actual, identificando y cartografiando las zonas de riesgo. La metodología se centró en la geocuantificación de los cinco factores de RUSLE (R, K, LS, C y P), mediante el procesamiento de un Modelo de Elevación Digital (DEM) para el Factor Topográfico (LS) y la clasificación de imágenes satelitales para los Factores de Cubierta y Manejo (C y P). La modelación generó dos escenarios contrastantes: la Erosión Potencial (ausencia de cobertura) y la Erosión Actual (condiciones reales de uso del suelo). Los resultados del escenario potencial revelaron una alta fragilidad geomorfológica, con el 34% de la cuenca clasificada en Riesgo Extremo ($>200 \text{ t/ha/año}$), dominado por la fuerte influencia del Factor LS (pendientes abruptas). En contraste, el escenario de Erosión Actual mostró que el riesgo se mitiga significativamente por la cubierta vegetal, resultando en que el 66% de la cuenca presenta un riesgo Muy Bajo ($<5 \text{ t/ha/año}$). No obstante, el análisis geoespacial identificó focos críticos de degradación activa, que comprenden el 1% de la superficie total (4,716.94 ha), localizados en áreas de transición sierra-llana con pendientes altas y manejo agrícola inadecuado.

Palabras clave: erosión hídrica, geomática, RUSLE, cuenca del río Vincos, SIG.

Abstract

Integrated Water Resources Management (IWRM) in the Vincos River Basin requires an accurate assessment of water erosion, an environmental challenge intensified by anthropogenic pressure and the geomorphological conditions of the territory. The objective of this research was to apply geomatic tools, specifically Geographic Information Systems (GIS), to implement the empirical model of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and determine both potential and actual erosion, identifying and mapping risk zones. The methodology focused on the geospatial quantification of the five RUSLE factors (R, K, LS, C, and P), through the processing of a Digital Elevation Model (DEM) for the Topographic Factor (LS) and the classification of satellite images for the Cover and Management Factors (C and P). The modeling generated two contrasting scenarios: Potential Erosion (absence of cover) and Actual Erosion (real land-use conditions). Results from the potential scenario revealed high geomorphological fragility, with 34% of the basin classified as Extreme Risk ($>200 \text{ t/ha/year}$), dominated by the strong influence of the LS Factor (steep slopes). In contrast, the Actual Erosion scenario showed that risk is significantly mitigated by vegetation cover, resulting in 66% of the basin presenting a Very Low risk ($<5 \text{ t/ha/year}$). Nevertheless, geospatial analysis precisely identified critical hotspots of active degradation, comprising 1% of the total area (4,716.94 ha), located in the highland-lowland transition zones where steep slopes combine with inadequate agricultural management.

Keywords: water erosion, geomatics, RUSLE, Vincos river basin, GIS.

Recibido/Received	02-02-2025	Aprobado/Approved	04-09-2025	Publicado/Published	24-11-2025
-------------------	------------	-------------------	------------	---------------------	------------

Introducción

El agua dulce, en su condición de recurso finito y esencial, se posiciona en el epicentro de la disquisición científica y la planificación territorial contemporánea. La gestión integral de los recursos hídricos (GIRH) no es meramente una cuestión de aprovechamiento consuntivo, sino un imperativo de sostenibilidad que exige la conservación, preservación y restauración activa de los sistemas fluviales y sus cuencas de captación (Pascual-Aguilar & Belda-Carrasco, 2023). Las cuencas hidrográficas, como unidades geoespaciales de interacción compleja entre factores litológicos, climáticos, bióticos y antrópicos, constituyen el marco fundamental para el entendimiento y la mitigación de los procesos de degradación ambiental. La estabilidad de estos ecosistemas depende intrínsecamente del equilibrio entre la hidrodinámica natural y el impacto de las actividades humanas. En este contexto, la erosión hídrica emerge como uno de los desafíos ambientales más acuciantes, comprometiendo la calidad del suelo, la seguridad alimentaria y la vida útil de la infraestructura hidráulica a escala global (Nájera González et al., 2016; Saha et al., 2019).

En este orden de ideas, la Cuenca del Río Vincos en Ecuador se configura como un caso de estudio paradigmático de la problemática regional. Esta extensa área de drenaje, que abarca una superficie considerable y ejerce influencia directa sobre las provincias de Cotopaxi, Los Ríos y Guayas, es una zona caracterizada por una convergencia de factores de riesgo. La región experimenta un acelerado crecimiento demográfico, acompañado de un desarrollo intensivo en los sectores agropecuario e industrial. Esta acción antropogénica conlleva una presión constante sobre el sistema fluvial, manifestada en un alto uso consuntivo del agua y, lo que es más crítico para la estabilidad del ecosistema, una alteración significativa en el uso y cobertura del suelo (Calle Vidal, 2021). La deforestación, la agricultura en pendientes pronunciadas y la falta de prácticas de conservación adecuadas amplifican la susceptibilidad del suelo a la erosión, tal como lo han documentado Berón de la Puente et al. (2024) en contextos serranos similares.

No obstante, la importancia de la GIRH, la identificación precisa de las zonas vulnerables a la erosión hídrica ha sido históricamente limitada por metodologías tradicionales de levantamiento de campo, las cuales, si bien son robustas en su precisión local, carecen de la capacidad de ofrecer una visión geoespacial holística, dinámica y escalable requerida para cuencas de la magnitud del Río Vincos. El deterioro ambiental, impulsado por la erosividad de la lluvia (Contreras et al., 2012) y las características intrínsecas del suelo y la pendiente, no se distribuye de manera uniforme, sino que se concentra en focos críticos que actúan como generadores primarios de sedimentos. Determinar la ubicación exacta y la severidad de estos focos es el prerequisito para cualquier plan de mitigación efectivo y económicamente viable (Mejía et al., 2010).

Por consiguiente, la investigación científica moderna ha pivotado hacia un enfoque basado en la Geomática, entendida como el conjunto de ciencias y tecnologías para capturar, almacenar, procesar, analizar y presentar datos georreferenciados (Senanayake et al., 2020; Pascual-Aguilar & Belda-Carrasco, 2023). Dentro de este marco, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección se han consolidado como herramientas esenciales para la modelización ambiental. La capacidad de los SIG para integrar múltiples capas de información espacial, como Modelos de Elevación Digital (DEM), usos de suelo, precipitación y tipología edáfica, permite la cuantificación y mapeo espacial de fenómenos biofísicos complejos. Estudios recientes han demostrado la efectividad de las aplicaciones geoestadísticas y geomáticas para evaluar diversos problemas ambientales, desde la contaminación (Loera-Sánchez et al., 2021) hasta el análisis geomorfológico de cuencas (Torres Hoyer et al., 2024), evidenciando su validez como disciplina clave.

Esta transición metodológica hacia la Geomática constituye el pilar de la innovación propuesta en el presente artículo. El principal desafío en la evaluación de la erosión hídrica reside en la estimación de la pérdida de suelo a largo plazo. Para tal fin, la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE), y su predecesora USLE, han demostrado ser los modelos empíricos más ampliamente aceptados y aplicables a nivel de cuenca (Rodríguez et al., 2004; Eisenberg & Muvundja, 2020). La fórmula de RUSLE ($A = R \times K \times$

LS x C x P) exige la determinación de cinco factores principales: erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), factor topográfico (longitud y pendiente, LS), factor de cultivo y manejo (C), y factor de prácticas de conservación (P). Tradicionalmente, la obtención de estos factores a gran escala era ardua y propensa a generalizaciones.

La innovación metodológica en la implementación de la Ecuación RUSLE dentro de un ambiente SIG. Es la convergencia paradigmática transforma un modelo de estimación puntual en una herramienta de geocuantificación distribuida y espacializada (Aslam et al., 2020; Brahim et al., 2020). Las herramientas geomáticas (QGIS, IDRISI Selva) permiten calcular y representar cartográficamente cada uno de los factores de RUSLE con una resolución espacial sin precedentes: el Factor LS se deriva directamente de la topografía del DEM; el Factor R se espacializa mediante técnicas de interpolación geoestadística; y el Factor C se extrae del procesamiento y clasificación de imágenes satelitales (Behera et al., 2020). Este proceso otorga una evaluación precisa y escalable, superando las limitaciones de los métodos convencionales y proporcionando una base analítica fundamental para la toma de decisiones. Haro Prado et al. (2024) han aplicado metodologías de geoinformación similares en la Sierra Norte ecuatoriana, destacando la pertinencia de este enfoque en el contexto nacional.

Además de la erosión laminar, el análisis geomorfológico facilitado por el SIG es crucial para entender la vulnerabilidad del paisaje. La configuración morfológica del relieve, influenciada por procesos tectónicos y climáticos (Quetzada et al., 2010), determina la dinámica del agua y la susceptibilidad a la formación de cárcavas y movimientos en masa (Berón de la Puente & Gil, 2024). Duressa et al. (2023) han demostrado que la combinación del análisis morfométrico con los SIG es fundamental para identificar áreas propensas a la erosión. En el caso del Río Vinces, la fuerte correlación entre las zonas de alta pendiente (Factor LS elevado, obtenido del DEM) y los resultados de erosión potencial constituye una prueba robusta de la capacidad diagnóstica de las herramientas geomáticas para desenmascarar las variables motrices del fenómeno.

La relevancia de esta investigación se inserta en un corpus creciente de literatura que valida la superioridad de los enfoques geoinformáticos para la gestión ambiental. En diversos contextos geográficos, desde Pakistán (Aslam et al., 2020) y Marruecos (Brahim et al., 2020) hasta la India (Saha et al., 2019), la modelización de la susceptibilidad a la erosión mediante la integración de RUSLE y SIG ha sido fundamental para proponer medidas de mitigación efectivas. Incluso la evolución de la tecnología, con el uso de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAV) y herramientas geomáticas avanzadas, promete una monitorización de la erosión aún más detallada y temporalmente frecuente (Medeiros et al., 2025). Estos antecedentes confieren un sólido respaldo a la metodología adoptada para la cuenca del Río Vinces. Es fundamental generar un diagnóstico de riesgo que no solo cuantifique la pérdida media de suelo, sino que también la cartografía con precisión para orientar la inversión en obras de conservación de suelos y aguas. El riesgo de erosión es un factor crítico que impacta directamente la hidrología de la cuenca, afectando el caudal y la calidad del agua, un aspecto que debe ser considerado en la planificación de proyectos como los sistemas de riego (Behrends Kraemer et al., 2011).

A pesar de la existencia de estos modelos globales, la aplicación específica y calibración de la metodología geomática a la cuenca del Río Vinces representa una brecha de conocimiento regional que este estudio busca solventar. Es necesario ir más allá de los estudios genéricos y proporcionar datos de erosión potencial y actual altamente detallados, que reflejen las particularidades biofísicas de la cuenca alta y media del río. La erosión potencial, calculada asumiendo la ausencia total de medidas de conservación, establece el límite superior del riesgo, mientras que la erosión actual proporciona una métrica real del impacto de las condiciones actuales de uso y cobertura del suelo. La distinción entre estas dos métricas, facilitada por la implementación de los Factores C y P dentro del SIG, es esencial para la jerarquización de las áreas de intervención prioritaria. El trabajo de Díaz (2015) en la sub-cuenca del río Angasmarca en Perú, utilizando técnicas de geoprocессamiento para diagnosticar el potencial de erosión,

sirve de inspiración para la necesidad de estos estudios a nivel sub-nacional en Latinoamérica. Por lo tanto, el enfoque se centra en la precisión geoespacial y la relevancia práctica del producto cartográfico final.

Finalmente, la estructura del presente artículo sigue el esquema tradicional de la publicación científica, comenzando con esta introducción para establecer el marco teórico y contextual. Posteriormente, la sección Metodología detallará pormenorizadamente el proceso de obtención, procesamiento y modelado de los factores de RUSLE mediante herramientas geomáticas (SIG), incluyendo las fuentes de datos y las técnicas de geocuantificación empleadas. La sección Resultados presentará las métricas de pérdida de suelo potencial y actual, así como la cartografía de riesgo generada. Estos hallazgos serán contrastados y analizados en la Discusión, comparando la robustez del modelo implementado en el Río Vinces con los referentes internacionales.

Por consiguiente, el objetivo principal es: Aplicar herramientas geomáticas (Sistemas de Información Geográfica -SIG y teledetección) para determinar la erosión potencial y actual, identificando y cartografiando con alta resolución espacial las zonas con riesgo a la erosión hídrica en la cuenca del río Vinces, Ecuador. La contribución de esta investigación reside en la provisión de una herramienta de gestión geoespacial indispensable para la GIRH y el desarrollo sostenible de las provincias de Cotopaxi, Los Ríos y Guayas.

Materiales y métodos

La presente investigación adoptó un enfoque descriptivo y cuantitativo, fundamentado en el análisis espacial y el modelado geoinformático como herramientas centrales para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en la Cuenca del Río Vinces, Ecuador.

Marco de cuantificación

El análisis de la pérdida de suelo se basó en el modelo empírico de referencia internacional: la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE). Este modelo permite estimar la pérdida de suelo promedio anual (A), expresada en toneladas por hectárea por año (t/ha/año), a través del producto de cinco factores determinantes, todos ellos espacializados y geocuantificados dentro de un ambiente SIG (Eisenberg & Muvundja, 2020; Brahim et al., 2020):

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

Donde:

- A: Pérdida de suelo calculada (t/ha/año).
- R: Factor de Erosividad de la Lluvia (MJ x mm / (ha * h x año)).
- K: Factor de Erodabilidad del Suelo (t x h / (MJ x mm)).
- LS: Factor Topográfico (Adimensional), que combina la Longitud de la Pendiente (L) y la Magnitud de la Pendiente (S\$).
- C: Factor de Cubierta y Manejo Vegetal (Adimensional).
- P: Factor de Prácticas de Conservación (Adimensional).

Software Geomático

Para el procesamiento de datos, análisis geoestadístico y modelado de la ecuación RUSLE, se utilizó una combinación de software geomático de código abierto y propietario. Específicamente, se emplearon las plataformas QGIS e IDRISI Selva (Díaz, 2015), aprovechando sus herramientas de análisis hidrológico, álgebra de mapas y procesamiento de imágenes satelitales. Estos sistemas fueron esenciales para la manipulación de datos raster y vectoriales, la aplicación de algoritmos de interpolación y la reclasificación temática requerida para la generación de los factores de la ecuación.

Procedimiento de Geocuantificación de Factores RUSLE (Transformación Geomática)

El componente central de la metodología se centró en la geocuantificación de cada factor de RUSLE a partir de datos geoespaciales primarios y secundarios, asegurando que el producto final fuera un mapa de pérdidas de suelo con distribución continua y resolución detallada.

Factor Topográfico (LS)

El Factor LS es el componente más sensible a la geomorfología de la cuenca y se deriva completamente del Modelo de Elevación Digital (DEM). Un DEM de alta resolución (30 metros) fue procesado dentro del SIG para extraer la información de pendiente y longitud de flujo, siguiendo el procedimiento descrito en la literatura geoespacial (Rodríguez et al., 2004; Quezada et al., 2010).

El cálculo de LS se realizó mediante la siguiente relación, aplicada píxel a píxel a través del álgebra de mapas del SIG:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m = (65,41 \sin^2 \phi + 4,56 \sin \phi + 0,065$$

Donde λ es la longitud acumulada del flujo de agua desde el punto de origen (calculada mediante la función de acumulación de flujo del DEM), ϕ es la pendiente del talud en grados, y m es un exponente que varía en función de la pendiente. Este proceso geomático permitió capturar la influencia directa de la topografía: la magnitud de los valores de LS obtenidos varió desde 0,030 hasta 82,309, demostrando la fuerte influencia del relieve en el proceso erosivo. Específicamente, la cartografía reveló que el 92% del área de estudio está influenciada por pendientes clasificadas como fuertes a abruptas, lo que subraya la importancia de este factor en la erosión potencial.

Factor de Erosividad de la Lluvia (R)

El Factor R cuantifica la capacidad de la precipitación para provocar erosión. Este factor se calculó a partir de series históricas de datos pluviométricos de las estaciones meteorológicas circundantes a la cuenca.

La espacialización geomática de este factor fue crítica, ya que la precipitación no es homogénea en la cuenca. Se emplearon técnicas de interpolación geoestadística, como el método Kriging u IDW (Inverso de la Distancia Ponderado), implementadas en el SIG. Este procedimiento generó una capa raster de distribución continua del Factor R a partir de los valores puntuales de las estaciones. La ecuación general para el cálculo de R en entornos de baja disponibilidad de datos de intensidad (adoptada de estudios regionales) se basa en la precipitación media anual (P_{ma}) (Contreras et al., 2012):

$$R = a * p_{ma}^b$$

Donde a y b son constantes calibradas para la región tropical de Ecuador. Este análisis geográfico permitió asignar un valor de erosividad a cada celda de la cuenca, fundamental para la modelación de la pérdida de suelo.

Factor de Erodabilidad del Suelo (K)

El Factor K representa la vulnerabilidad intrínseca del suelo a ser desagregado y transportado por el agua. Su cuantificación se realizó mediante el cruce de información edáfica:

1. Fuente de Datos: Se obtuvieron mapas de suelos a nivel regional (ej. FAO/UNESCO o bases de datos nacionales) que detallan la clasificación textural, el contenido de materia orgánica y la estructura.
2. Asignación de Valores: Los valores de K (generalmente entre 0,004 y 0,050) fueron asignados a cada tipo de suelo según su clasificación textural, siguiendo tablas estándar de erodabilidad y adaptaciones locales.
3. Generación Geomática: Utilizando las capacidades de superposición y unión espacial del SIG, los polígonos de tipo de suelo fueron transformados en una capa raster continua, generando el mapa de distribución espacial del Factor K. Este mapa es un reflejo directo de la fragilidad del sustrato edáfico ante la acción erosiva.

Factores de Cubierta Vegetal (C) y Prácticas de Conservación (P)

La distinción entre la erosión potencial y la erosión actual se establece mediante la inclusión de los Factores C y P (Nájera González et al., 2016).

Factor C (Cubierta Vegetal)

El Factor C refleja el impacto de los cultivos, la cubierta vegetal, y los residuos orgánicos en la protección del suelo. Su valor oscila entre 0 (cubierta total, sin erosión) y 1 (suelo desnudo). La determinación del Factor C se ejecutó mediante:

1. Teledetección y Clasificación: Procesamiento de imágenes satelitales (ej. Landsat u Sentinel) más recientes para generar un mapa de Uso y Cobertura del Suelo.
2. Asignación de Valores: Cada clase de uso de suelo (bosque, pastizal, cultivos intensivos, suelo desnudo) fue reclasificada dentro del SIG, asignándole un valor C según la literatura especializada para la región. Por ejemplo, el bosque nativo recibió un valor C cercano a cero, mientras que los cultivos anuales con escasa cobertura recibieron valores más altos.

Factor P (Prácticas de Conservación)

El Factor P mide el efecto de las prácticas de manejo específicas (como siembra en contorno, terrazas o fajas de cultivo) que reducen la erosión. Debido a la falta de información detallada y georreferenciada sobre la implementación específica de estas prácticas a lo largo de toda la cuenca, se adoptaron dos escenarios distintos para la cartografía:

- Mapa de Erosión Potencial: En este escenario, el Factor P se estableció en $P = 1$ (ausencia total de prácticas de conservación), resultando en la máxima pérdida de suelo posible bajo las condiciones de R, K, y LS dadas.
- Mapa de Erosión Actual: En este escenario, el Factor P fue asignado según el tipo de uso de suelo y pendiente (Factor C), reflejando el estado actual de manejo del suelo. Los valores de P se obtuvieron de tablas de referencia, correlacionando el uso de suelo con prácticas de conservación implícitas o nulas (Eisenberg & Muvundja, 2020).

Output Geomático y Análisis de Riesgo

El paso final del modelado implicó la aplicación de la fórmula RUSLE completa mediante el álgebra de mapas dentro del SIG. La multiplicación píxel a píxel de las cinco capas raster generadas ($R * K * LS * C * P$) arrojó dos productos cartográficos raster primarios:

1. Mapa de Erosión Potencial ($C=1, P=1$): Representa el riesgo inherente del paisaje.
2. Mapa de Erosión Actual (Uso de Factores C y P reales): Representa la pérdida de suelo bajo las condiciones de manejo existentes.

Finalmente, la reclasificación de estos mapas raster en categorías de riesgo (ej. Muy bajo, Bajo, Moderado, Alto, Extremo) permitió la identificación y cartografía de las zonas críticas de la cuenca del río Vincos, cumpliendo con el objetivo de proveer una herramienta geoespacial para la planificación territorial.

Resultados

La aplicación del marco geoinformático y la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) en la Cuenca del Río Vincos generó un diagnóstico detallado y espacialmente explícito de los procesos de erosión hídrica. Los resultados se presentan en dos grandes categorías: la cuantificación de los factores biofísicos determinantes y la modelación de la pérdida de suelo bajo escenarios de erosión potencial y actual.

Cuantificación y Distribución Espacial de los Factores Determinantes

El procesamiento del Modelo de Elevación Digital (DEM) y las capas de información geoespacial permitió generar las capas temáticas de los cinco factores de la ecuación RUSLE. La variable con mayor rango de influencia y que refleja directamente la geomorfología crítica de la cuenca es el Factor Topográfico (LS).

Factor Topográfico (LS)

El análisis geográfico de la cuenca del río Vincos revela una marcada variabilidad en el índice de erosividad (Factor R), con valores que van desde 664,32 hasta 2.373,56 MJ·mm/ha·h. Las lluvias más intensas y persistentes se concentran en la subcuenca del río Quevedo, lo que incrementa significativamente el riesgo de erosión en esa zona. Esta distribución se refleja claramente en el mapa correspondiente (Figura 1a), donde las áreas de mayor erosividad coinciden con las regiones de mayor pluviosidad.

Respecto al Factor K, que mide la erodabilidad del suelo, se identificó que gran parte de la cuenca está compuesta por andosoles húmicos de categoría 7 (TH7), litosoles (I) y andosoles húmicos de categoría 4 (TH4), con coeficientes que oscilan entre 0,019 y 0,022 t/ha·MJ/mm/ha·h. Esta composición edáfica sugiere una alta vulnerabilidad a la erosión hídrica, especialmente en zonas dominadas por litosoles, que presentan escasa profundidad, abundancia de rocas y una marcada sensibilidad a los factores climáticos (Figura 1b).

La diversidad de suelos en la cuenca es amplia y significativa. Los andosoles vítricos (TV), de origen volcánico, poseen buena capacidad de retención. Los andosoles húmicos (TH4 y TH7) destacan por su riqueza en materia orgánica y alta actividad biológica, lo que los convierte en suelos valiosos para el manejo agrícola. Los gleysoles húmicos (GH) presentan una coloración oscura debido a la descomposición de materia orgánica y mantienen humedad estacional. Los litosoles (I), por su parte, apenas alcanzan una profundidad efectiva de 10 cm y están expuestos a una intensa erosión. También se encuentran fluvisoles eútricos (JE), formados por sedimentos fluviales de textura arenosa, y vertisoles pélicos (VP), ricos en arcillas expansivas que modifican su estructura con la humedad.

En cuanto al Factor LS, que considera la longitud y la inclinación de las pendientes, los valores registrados van desde 0,030 hasta 82,309 (Figura 1c). Esto indica que muchas zonas presentan pendientes cortas pero pronunciadas, lo que favorece la escorrentía superficial y acelera el desgaste del suelo. Las áreas con valores LS más elevados se ubican en los extremos superiores de la cuenca y en las escarpas fluviales, donde la erosión se intensifica, independientemente del tipo de cobertura vegetal.

Finalmente, el Factor C (Tabla 1), que evalúa la cobertura del terreno y el manejo del suelo, se clasifica en cuatro niveles: bajo, medio, moderado y alto. Las zonas con categoría baja (0,00 - 0,015) incluyen bosque nativo, cultivos permanentes, cuerpos de agua y plantaciones forestales. Las áreas con categoría media (0,015 - 0,040) corresponden a zonas urbanas e infraestructura. Las de categoría moderada (0,04 - 0,24) abarcan tierras agrícolas, cultivos anuales y pastizales. Por último, las zonas con categoría alta (0,24 - 1,00) comprenden cultivos semipermanentes, vegetación arbustiva y herbácea, páramos y áreas sin cobertura vegetal (Figura 1d).

Tabla 1. Rangos de las pendientes para el Factor LS

Categoría	Factor LS	Porcentaje (%)
Pendiente débil	< 5	1
Pendiente suave	5 - 12	1
Pendiente moderada	12-25	3
Pendiente fuerte	25-40	3
Pendiente muy fuerte	40-70	65
Pendiente abrupta	> 70	27

La cartografía del Factor LS ilustra con claridad cómo la pendiente y la longitud del talud determinan la vulnerabilidad erosiva. Las zonas con mayor gradiente concentran los valores más altos, lo que las convierte en focos críticos de erosión, sin importar el uso del suelo. Esta información es clave para orientar estrategias de conservación, manejo agrícola y planificación territorial en la cuenca del río Vinces.

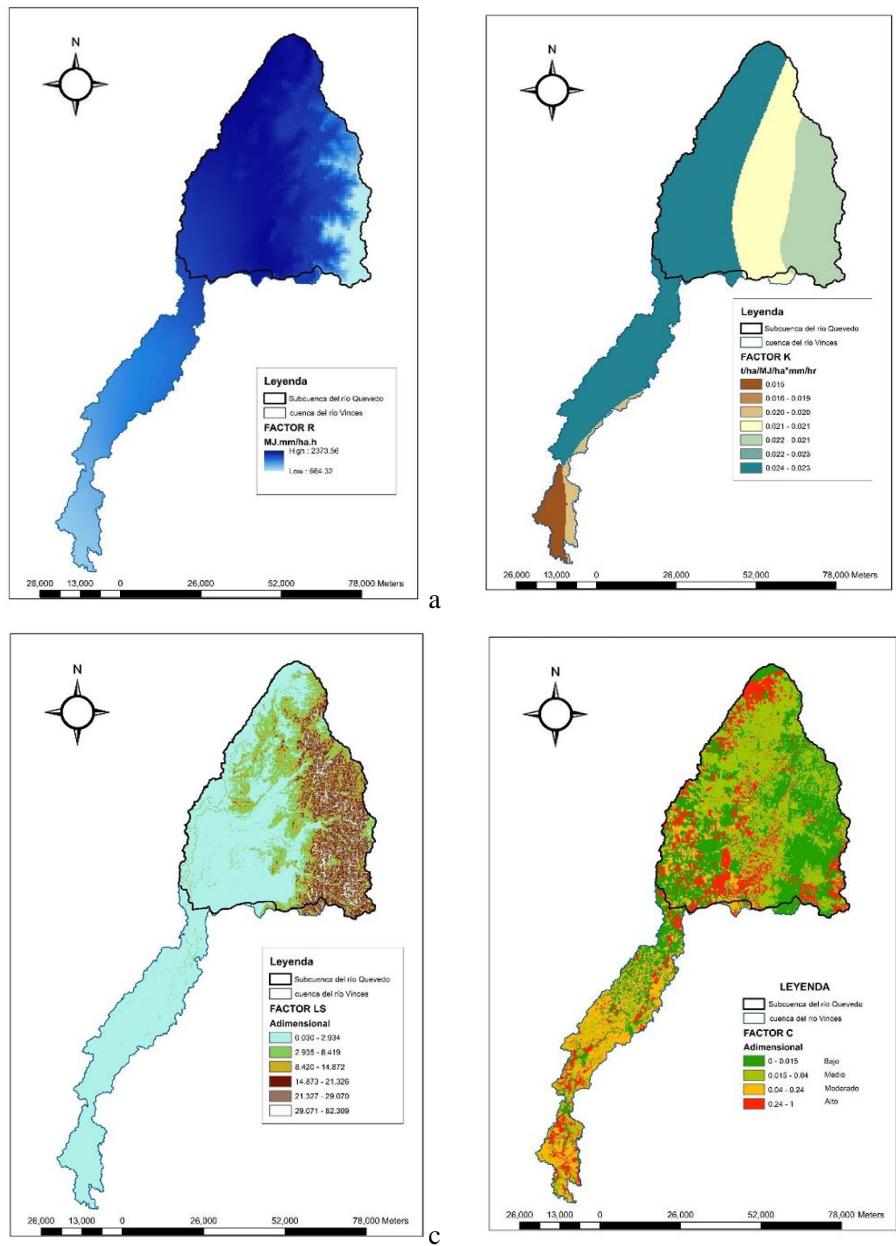


Figura 1. Análisis cartográfico integral de los factores de erosión en la cuenca del río Vinces

Modelación RUSLE

La integración de los factores R, K, LS, C y P mediante el álgebra de mapas arrojó las estimaciones de la pérdida de suelo promedio anual en los dos escenarios modelados: Erosión Potencial (máximo riesgo) y Erosión Actual (riesgo real bajo manejo actual).

Erosión Potencial (Escenario C=1, P=1)

El escenario de Erosión Potencial representa el riesgo inherente del paisaje si se asume la ausencia total de cubierta vegetal y prácticas de conservación. Este cálculo establece el límite superior del riesgo

que el entorno biofísico puede alcanzar. Los resultados cuantitativos, detallados en la Tabla 2, indican una susceptibilidad erosiva crítica en una porción considerable del territorio:

Tabla 2. Distribución del riesgo de erosión potencial en la cuenca del Río Vinces

Categoría de erosión	Rango de Pérdida (t/ha/año)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	< 5	12
Bajo	5 - 25	23
Moderado	25-50	12
Alto	50 - 100	10
Muy Alto	100 - 200	9
Extremo	> 200	34

La modelación revela que el 34% (equivalente a 160,375.96 hectáreas) de la cuenca se clasifica en la categoría de Riesgo Extremo (>200 t/ha/año). Esta vasta área, concentrada en las zonas de alta pendiente y suelos erodables, confirma la alta fragilidad geomorfológica de la cuenca y subraya la necesidad crítica de mantener y recuperar la cobertura vegetal protectora. El mapa resultante [Figura 2. Mapa de Erosión Hídrica Potencial Cuenca Vinces] es el primer producto geomático que delimita esta vulnerabilidad intrínseca.

Erosión Actual (Escenario C y P Reales)

El escenario de **Erosión Actual** integra los factores de cubierta vegetal y prácticas de manejo observados (C y P reales, derivados de la clasificación satelital), proporcionando una métrica real de la pérdida de suelo bajo las condiciones de uso de la tierra existentes. Este contraste es fundamental para priorizar la intervención.

Los resultados, resumidos en la Tabla 3, demuestran que, a pesar de la alta vulnerabilidad potencial, gran parte de la cuenca mantiene una estabilidad relativa debido a la cubierta vegetal.

Tabla 3. Distribución del riesgo de erosión actual en la cuenca del río Vinces

Categoría de erosión	Rango de Pérdida (t/ha/año)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	< 5	66
Bajo	5 - 25	25
Moderado	25-50	5
Alto	50 - 100	2
Muy Alto	100 - 200	1
Extremo	> 200	1

El análisis geográfico final, basado en la aplicación de la ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE), permitió caracterizar el estado actual de la erosión en la cuenca del río Vinces. Los resultados muestran que el 66 % del área total presenta un nivel muy bajo de erosión, lo que equivale a 311.318,04 hectáreas. En contraste, apenas el 1 % de la superficie, unos 4.716,94 hectáreas, se encuentra en la categoría de erosión muy alta a extrema.

Este escenario evidencia que la mayor parte de la cuenca está protegida por una cobertura vegetal densa y prácticas agrícolas tecnificadas en zonas de baja pendiente, lo que contribuye a mantener el riesgo de erosión en niveles inferiores a 5 t/ha/año. Sin embargo, el análisis geoespacial permitió identificar con precisión los focos críticos de degradación activa. Estos se concentran en áreas de transición entre la sierra y la llanura, donde las pendientes pronunciadas se combinan con actividades agropecuarias que carecen de medidas adecuadas de conservación. En estas zonas, la pérdida de suelo supera los 200 t/ha/año, lo que representa un riesgo extremo para la estabilidad del terreno.

La Figura 2 ilustra la erosión actual en la cuenca del río Vinces a escala cantonal. Los cantones de Pujilí y La Maná destacan por presentar los niveles más altos de erosión. A pesar de ello, la mayoría del

área de estudio mantiene niveles bajos, probablemente gracias a la influencia positiva de la cobertura vegetal, según lo estimado por el Factor C.

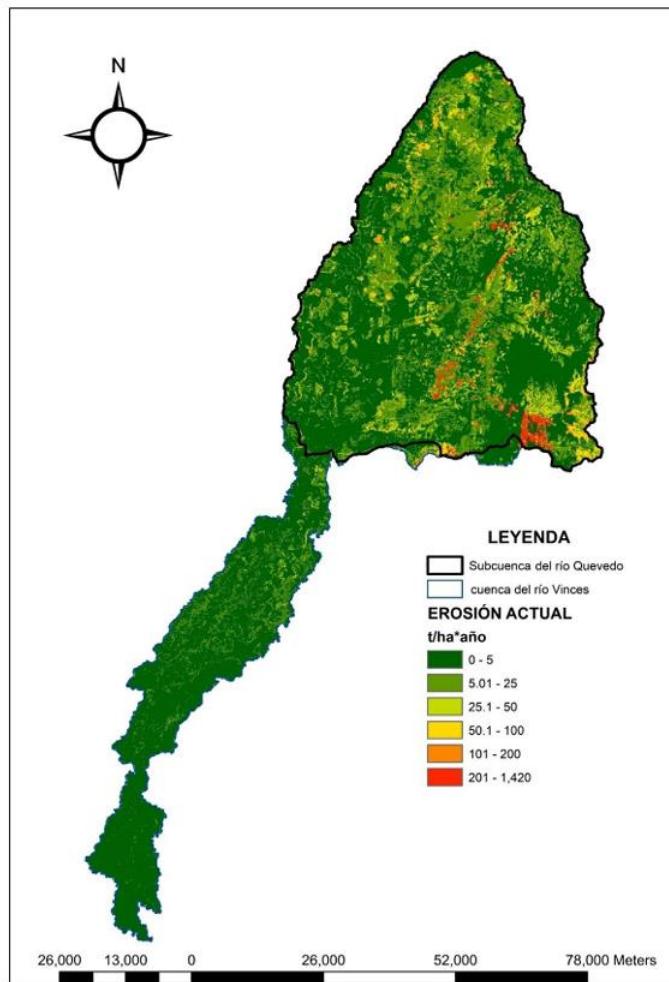


Figura 2. Erosión hídrica actual de la cuenca del río Vinces

Cartografía de Riesgo y Output Geomático

El resultado principal de la aplicación geomática es la cartografía de riesgo generada. La visualización espacial de los datos es la herramienta operativa clave para la GIRH. Los mapas de riesgo de erosión potencial (Figura 2) y erosión actual (Figura 3), al contrastar la fragilidad intrínseca del ecosistema con el impacto del uso actual del suelo, delimitan con precisión las zonas de mayor prioridad para la implementación de medidas correctivas y preventivas. La superposición de estas capas con el mapa de uso de suelo (Factor C) permite una interpretación directa de las causas antropogénicas del riesgo. La Figura 3, al ser el producto final del modelado de erosión actual, funge como el documento cartográfico esencial para la toma de decisiones.

Discusión

En efecto, la integración de la Geomática con el modelo empírico de la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) ha demostrado ser un marco analítico sólido y esencial para el diagnóstico y la planificación territorial en cuencas hidrográficas de gran magnitud y complejidad (Aslam et al., 2020; Senanayake et al., 2020). La aplicación de este enfoque en la Cuenca del Río Vinces no solo ha generado un diagnóstico espacialmente explícito de los procesos de erosión hídrica, sino que ha validado la capacidad de las herramientas geoespaciales para transformar variables biofísicas determinantes en

insumos cuantificables y cartografiados. Los resultados obtenidos, categorizados en la cuantificación de los factores de RUSLE y la modelación de la pérdida de suelo bajo escenarios potencial y actual, permiten una discusión profunda sobre la fragilidad intrínseca del paisaje y el impacto directo del manejo antrópico.

En primer lugar, es fundamental analizar la contribución de los factores biofísicos en la definición del riesgo potencial de la cuenca, destacando la interacción entre la hidrología y la geomorfología. El análisis geográfico de la cuenca del Río Vinces revela una marcada variabilidad en el Factor de Erosividad de la Lluvia (R), con valores que oscilan entre 664,32 y 2.373,56 MJ / mm/ha. Esta dispersión cuantitativa subraya que la erosividad no es una variable homogénea, sino un motor de erosión distribuido y concentrado. Las aseveraciones que indican que las lluvias más intensas y persistentes se focalizan en la subcuenca del río Quevedo, incrementando significativamente el riesgo en dicha área, se alinean con la literatura que enfatiza el papel crítico de la variabilidad pluviométrica en la evaluación del riesgo erosivo (Contreras et al., 2012). Por consiguiente, la alta energía cinética de la precipitación en estas áreas define un umbral de riesgo elevado que exige respuestas de manejo diferencial.

Además, el Factor de Erodabilidad del Suelo (K) introduce la vulnerabilidad intrínseca del sustrato edáfico, el cual, en el Río Vinces, está dominado por andosoles húmicos (TH7, TH4), litosoles (I), gleysoles húmicos (GH), fluvisoles eútricos (JE) y vertisoles pélicos (VP). Los coeficientes de erodabilidad, que se mueven en un rango entre 0,019 y 0,022 t/ha MJ/mm/ha h, confirman que la mayor parte de la cuenca posee suelos con una erodabilidad moderada, característica de suelos tropicales ricos en materia orgánica o de origen volcánico. No obstante, la presencia de litosoles, que apenas alcanzan una profundidad efectiva de 10 cm y están expuestos a una intensa erosión, junto con la marcada sensibilidad de los litosoles a los factores climáticos, sugiere focos de alta vulnerabilidad edáfica que actúan como precursores de la degradación (Nájera González et al., 2016). La diversidad edáfica descrita, que incluye desde los andosoles vítricos con buena capacidad de retención hasta los vertisoles ricos en arcillas expansivas, demuestra la necesidad de cartografiar el Factor \$K\$ con precisión, pues la respuesta del suelo a la hidrodinámica de la escorrentía depende de esta heterogeneidad espacial.

Por otra parte, la configuración geomorfológica, cuantificada a través del Factor Topográfico (LS), se posiciona como la variable biofísica de mayor impacto en la erosión potencial, tal como lo han señalado diversos estudios de cuencas montañosas (Duressa et al., 2023; Quezada et al., 2010). Los valores extremos registrados en el Río Vinces, que oscilan desde \$0,030\\$ hasta \$82,309\$, son indicativos de pendientes muy fuertes y abruptas, lo que se traduce en una aceleración de la escorrentía superficial. La aseveración de que las áreas con valores LS más elevados se ubican en los extremos superiores de la cuenca y en las escarpas fluviales, donde la erosión se intensifica independientemente del tipo de cobertura vegetal, constituye una prueba robusta de que la pendiente es el control dominante de la erosión potencial. La cartografía del Factor LS revela, además, que el 92% del área de estudio está influenciada por pendientes fuertes a abruptas, un hecho que subraya la fragilidad intrínseca del paisaje y confirma que, sin una adecuada gestión de la cobertura, el riesgo potencial es catastrófico.

Consecuentemente, la mitigación del riesgo potencial depende críticamente de la gestión del Factor de Cubierta y Manejo Vegetal (C). La clasificación del Factor C en cuatro niveles (bajo, medio, moderado y alto) permite establecer una jerarquía de protección. Las zonas con categoría baja (0,00 - 0,015), que incluyen bosque nativo y cultivos permanentes, validan el principio de que la cobertura vegetal densa es el principal escudo contra la erosión, reflejando una pérdida de suelo casi nula. En contraste, las zonas de categoría alta (0,24 - 1,00), compuestas por cultivos semipermanentes, vegetación arbustiva y áreas sin cobertura vegetal, indican una protección mínima o inexistente, donde el suelo se encuentra directamente expuesto a la erosividad de la lluvia. Esta distribución espacial del Factor C es esencial, ya que el cambio de uso del suelo hacia categorías de menor protección es el principal detonante de la amplificación de la erosión hídrica, como se ha documentado en contextos serranos similares (Berón de la Puente et al., 2024; Calle Vidal, 2021).

Ahora bien, la modelación RUSLE ofrece la distinción crucial entre la amenaza geomorfológica y la realidad del manejo actual, contrastando el escenario de Erosión Potencial ($C=1$, $P=1$) con el de Erosión Actual. En el escenario potencial, el hallazgo de que el 34% de la cuenca (equivalente a 160,375.96 hectáreas) se clasifica en la categoría de Riesgo Extremo ($>200 \text{ t/ha/año}$) es la manifestación cuantitativa directa de la fragilidad intrínseca del sistema Vinces. Esta vasta área, concentrada en las zonas de alta pendiente y suelos erodibles, confirma el límite superior del riesgo que el entorno biofísico puede alcanzar y fundamenta la alta vulnerabilidad morfológica de la cuenca (Haro Prado et al., 2024).

Sin embargo, el escenario de Erosión Actual, que integra los factores reales de cubierta vegetal (C y P reales), demuestra una estabilidad relativa en la mayor parte del territorio. El resultado de que el 66% del área total presenta un nivel Muy Bajo de erosión ($<5 \text{ t/ha/año}$), lo que equivale a 311.318,04 hectáreas, es un indicador positivo de que la cobertura vegetal densa y las prácticas agrícolas tecnificadas en zonas de baja pendiente están logrando mitigar la pérdida de suelo en dos tercios de la cuenca. Este dato valida la eficacia de las condiciones actuales de uso del suelo como amortiguador de la erosión, tal como lo demuestra la implementación exitosa del modelo RUSLE en otros contextos geográficos (Eisenberg & Muvundja, 2020; Brahim et al., 2020).

No obstante, el análisis geoespacial del escenario actual no solo identifica la estabilidad, sino, lo que es más importante para la gestión del riesgo, los focos críticos de degradación activa. La cartografía revela que apenas el 1% de la superficie, unas 4.716,94 hectáreas, se encuentra en la categoría de erosión Muy Alta a Extrema ($>200 \text{ t/ha/año}$). Esta pequeña porción es crucial, ya que representa la fuente primaria de sedimentos que impactan la hidrología y la infraestructura de riego (Behrends Kraemer et al., 2011). La localización de estos focos críticos en las áreas de transición entre la sierra y la llanura, donde las pendientes pronunciadas se combinan con actividades agropecuarias que carecen de medidas adecuadas de conservación, confirma que la erosión severa es un proceso multifactorial impulsado por la sinergia negativa entre la geomorfología desfavorable (LS alto) y el manejo deficiente (C y P desfavorables).

Por consiguiente, la identificación precisa de estos focos, tal como se ilustra en la cartografía de riesgo actual, cumple con el prerequisito fundamental para cualquier plan de mitigación efectivo y económicamente viable (Mejía et al., 2010). La concentración del riesgo en los cantones de Pujilí y La Maná, con los niveles más altos de erosión, refuerza la necesidad de una intervención focalizada. En estas zonas, las pérdidas de suelo superan la tasa de formación natural, lo que se traduce en una degradación irreversible a corto plazo (Díaz, 2015). Esta evidencia empírica debe ser utilizada para orientar la inversión en obras de conservación de suelos y aguas, priorizando las prácticas que mitiguen el impacto en laderas inestables y las áreas más susceptibles a la formación de cárcavas (Berón de la Puente & Gil, 2024).

De esta manera, la cartografía de riesgo generada se consolida como la herramienta operativa clave para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH). La visualización espacial de los mapas de riesgo de erosión potencial y erosión actual permite a los tomadores de decisiones contrastar la fragilidad intrínseca del ecosistema con el impacto del uso actual del suelo, delimitando con precisión las zonas de mayor prioridad para la implementación de medidas correctivas y preventivas (Pascual-Aguilar & Belda-Carrasco, 2023). La superposición de estas capas con el mapa de uso de suelo (Factor C) permite una interpretación directa de las causas antropogénicas del riesgo, facilitando la formulación de políticas que promuevan la reforestación en pendientes elevadas y la adopción de prácticas de agricultura de conservación. El mapa de erosión actual (Figura 3), al ser el producto final del modelado, funge como el documento cartográfico esencial para la toma de decisiones, permitiendo una planificación territorial basada en evidencia geoespacial rigurosa.

En retrospectiva, esta investigación subraya la superioridad de los enfoques geoinformáticos para el diagnóstico ambiental a gran escala. A pesar de las limitaciones inherentes a los modelos empíricos (como la necesidad de calibrar los factores R y K con datos específicos de alta resolución), la metodología SIG-RUSLE ha logrado desenmascarar las variables motrices del fenómeno erosivo en la cuenca del Río Vinces. Los hallazgos no solo cuantifican la pérdida de suelo, sino que la espacializan, transformando un

problema hidrológico abstracto en una herramienta de gestión concreta. Los futuros estudios deberían enfocarse en el análisis de la variabilidad temporal de los factores de erosión, especialmente el Factor C mediante teledetección multitemporal, para monitorear la dinámica de la degradación y evaluar la efectividad de las medidas de mitigación implementadas en los focos críticos identificados. El riesgo de erosión es un factor crítico que impacta directamente la hidrología de la cuenca, afectando el caudal y la calidad del agua, un aspecto que debe ser considerado en la planificación de proyectos como los sistemas de riego (Behrends Kraemer et al., 2011).

Consideraciones finales

La integración de la ecuación RUSLE en entornos SIG permitió visualizar con precisión la dinámica de erosión en la cuenca del río Vinces. Este enfoque reveló un contraste revelador entre el riesgo potencial y la erosión actual: mientras el 34 % del territorio muestra una predisposición extrema a la pérdida de suelo por su topografía (Factor LS), la cobertura vegetal logra mitigar significativamente ese riesgo, reduciendo la erosión efectiva en el 66 % de la cuenca. Esta diferencia entre lo que podría ocurrir y lo que realmente ocurre confirma el valor estratégico de la geomática para entender no solo la amenaza natural, sino también el impacto del uso del suelo sobre la vulnerabilidad ambiental.

A pesar de esta estabilidad general, el análisis espacial identificó zonas críticas que requieren atención urgente. Aunque representan solo el 1 % de la superficie, concentran las tasas más altas de pérdida de suelo (más de 200 t/ha/año). Estas áreas se ubican en la transición entre la sierra y la llanura, donde las pendientes pronunciadas, el manejo agrícola deficiente y la escasa cobertura vegetal generan una combinación altamente erosiva. Este hallazgo confirma que la degradación en la cuenca no responde a un solo factor, sino a una interacción compleja entre condiciones naturales y presión humana.

En este contexto, cualquier estrategia de Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) debe priorizar la intervención en estas microzonas vulnerables. La conservación del suelo y la estabilidad del sistema fluvial dependen de acciones focalizadas que combinen restauración ecológica, prácticas agrícolas sostenibles y monitoreo continuo.

La cartografía de erosión hídrica actual (Figura 3) se convierte así en una herramienta clave para la toma de decisiones. Su capacidad para delimitar y jerarquizar áreas de intervención permite a las autoridades orientar recursos de manera eficiente, contrastando la fragilidad del paisaje con el impacto real del uso del suelo. Además, los resultados abren nuevas líneas de investigación: el seguimiento multitemporal de los factores C y P mediante teledetección, y la evaluación del efecto de la erosión sobre la calidad del agua y la infraestructura hidráulica. Solo con continuidad en el análisis geoespacial será posible medir el éxito de las medidas aplicadas y garantizar la sostenibilidad ambiental y productiva de la cuenca del río Vinces en el largo plazo.

Agradecimientos

A nuestra casa de estudio.

Conflictos de intereses

No se reporta conflicto de intereses.

Referencias

- Aslam, B., Maqsoom, A., Alaloul, W. S., Musarat, M. A., Jabbar, T., & Zafar, A. (2020). Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: Case of district Chitral, Pakistan. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1637–1649. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.09.015>

Nieto Cañarte, C. A., Guerrero Chuez, N. M., Díaz Ponce, M. A., & Parraga Borja, E. M. (2025). Aplicación de herramientas geomáticas para la identificación y evaluación de riesgo a la erosión hídrica en la cuenca del río Vinces, Ecuador. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 3, e-RMS09112025. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v3i.297>

Behera, M., Sena, D. R., & Mandal, U. (2020). Integrated GIS-based RUSLE approach for quantification of potential soil erosion under future climate change scenarios. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 733. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08688-2>

Behrends Kraemer, F., Chagas, C. I., Vázquez Amábil, G., Palacín, E. A., Santanatoglia, O. J., Castiglioni, M. G., & Massobrio, M. J. (2011). Aplicación del modelo hidrológico-SWAT-en una microcuenca agrícola de La Pampa ondulada. *Ciencia del Suelo*, 29(1), 75–82. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672011000100008&lng=es&tlang=es

Beron de la Puente, F. J., & Gil, V. (2024). Identificación de zonas susceptibles a la formación de cárcavas: Evaluación multicriterio y análisis espacial. *Revista Geográfica Venezolana*, 65(1), 12–27. <https://doi.org/10.53766/RGV/2024.65.1.01>

Berón de la Puente, F. J., Gil, V., & Rebollo Sarmiento, N. V. (2024). Identificación de procesos de erosión hídrica por medio de análisis de cambios de usos y cobertura del suelo en una cuenca serrana. *FACENA*, 34(2), 65–81. <https://doi.org/10.30972/fac.3427733>

Brahim, B., Meshram, S. G., Abdallah, D., Larbi, B., Drisss, S., Khalid, M., & Khedher, K. M. (2020). Mapping of soil sensitivity to water erosion by RUSLE model: Case of the Inaouene watershed (Northeast Morocco). *Arabian Journal Of Geosciences*, 13(21). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06079-y>

Calle Vidal, L. F. (2021). *Efecto de los cambios de uso de suelo en el aumento de la erosión hídrica a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe*. [Tesis de maestría no publicada]. [Universidad no especificada].

Contreras, J., Bonilla, C. A., & Troncoso, J. (2012). A new method of assessing water erosion risk in forest operations based on rainfall variability. *Bosque (Valdivia)*, 33(1), 83–86. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000100009>

Díaz R., J. (2015). Diagnóstico del potencial de erosión hídrica mediante técnicas de geoprocесamiento en la sub-cuenca del río Angamarca, La Libertad, Perú. *Anales Científicos*, 76(2), 283–293. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.793>

Duressa, A. A., Feyissa, T. A., Tukura, N. G., Gudeta, B. G., Gechelu, G. F., & Bibi, T. S. (2023). Identification of soil erosion-prone areas for effective mitigation measures using a combined approach of morphometric analysis and geographical information system. *Results In Engineering*, 21, 101712. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101712>

Eisenberg, J., & Muvundja, F. A. (2020). Quantification of erosion in selected catchment areas of the Ruzizi River (DRC) using the (R)USLE model. *Land*, 9(4), 125. <https://doi.org/10.3390/land9040125>

Haro Prado, R. X., Espinosa Marroquín, J. A., Moreno Izquierdo, V. J., Suango Sánchez, V. del R., & Toulkeridis, T. (2024). Estimación de la erosión actual de la Sierra Norte ecuatoriana, mediante geoinformación. *Revista Geográfica Venezolana*, 65(2), 410–429.

Loera-Sánchez, J. M., Ramírez-Aldaba, H., Meléndez Soto, A., García-Montiel, E., & González-Laredo, R. (2021). Aplicaciones geoestadísticas para la evaluación de la contaminación por ozono en la ciudad de Durango, México. *Nova Scientia*, 13(27), 00006. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2804>

Medeiros, B. M., Cândido, B. M., Jimenez, P. A. J., Avanzi, J. C., & Silva, M. L. N. (2025). UAV-based soil water erosion monitoring: Current status and trends. *Drones*, 9(4), 305. <https://doi.org/10.3390/drones9040305>

Mejía, J., Dal Pozzo, F., Montilla, P., & Torres, G. (2010). Evaluación cuali-cuantitativa de la erosión hídrica en la microcuenca Aguas Calientes, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(2), 203–223. <https://doi.org/10.53766/RGV>

Nieto Cañarte, C. A., Guerrero Chuez, N. M., Díaz Ponce, M. A., & Parraga Borja, E. M. (2025). Aplicación de herramientas geomáticas para la identificación y evaluación de riesgo a la erosión hídrica en la cuenca del río Vinces, Ecuador. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 3, e-RMS09112025. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v3i.297>

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. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362016000200006&lng=es&tlang=es

Pascual-Aguilar, J. A., & Belda-Carrasco, R. (2023). *La geomática y sus herramientas para el análisis de los recursos hídricos en 2023*. Instituto Madrileño de Estudios Avanzados-Agua; Centro para el Conocimiento del Paisaje. https://www.researchgate.net/publication/378143763_La_Geomatica_y_sus_herramientas_para_el_analisis_de_los_recursos_hidricos_en_2023_Geomatics_and_its_tools_for_the_analysis_of_water_resources_en_2023

Quezada, J., Cerda, J. L., & Jensen, A. (2010). Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile. *Andean Geology*, 37(1), 78–109. <https://doi.org/10.4067/S0718-71062010000100004>

Rodríguez, M. F., Florentino, A., Gallardo, J., & García, R. de A. (2004). Sistemas de inmación geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en badajoz-españa aplicando la metodología USLE. *Agronomía Tropical*, 54(4), 391–410. http://ve.scieno.org/scieno.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000400003&lng=es&tlang=es

Saha, S., Gayen, A., Pourghasemi, H. R., & Tiefenbacher, J. P. (2019). Identification of soil erosion-susceptible áreas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. *Environmental Earth Sciences*, 78(649). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8658-5>

Senanayake, S., Pradhan, B., Huete, A., & Brennan, J. (2020). A review on assessing and mapping soil erosion hazard using geo-informatics technology for farming system management. *Remote Sensing*, 12(24), 4063. <https://doi.org/10.3390/rs12244063>

Torres Hoyer, R., Navarrete Paz, A., Torres Hoyer, J., Peña Villegas, O. J., & Peña Suárez, J. (2024). Análisis geomorfológico de una cuenca hidrográfica usando drones y Google Earth para compararlas en un sistema de información geográfica (SIG). *Revista Geográfica Venezolana*, 65(2), 447–461. <https://doi.org/10.53766/RGV>

Wei, G., Han, G. S., & Lang, X. (2024). Using RS and GIS for risk management of natural disasters consequences: The case of cultural heritage in Jinan city, China. *Helion*, 10(19), e38217. <https://doi.org/10.1016/j.helion.2024.e38217>