Investigaciones Geográficas
Instituto Interuniversitario de Geografía
Universidad de Alicante
ISSN: 0213-4691 | eISSN: 1989-9890
https://www.investigacionesgeograficas.com

Evaluación de la vulnerabilidad del suelo por erosión hídrica en la provincia de Manabí (Ecuador) mediante la aplicación de un modelo geoespacial

Assessment of soil vulnerability to water erosion in the province of Manabí (Ecuador) through the application of a geospatial model

AUTORÍA

Isabel Andrade-Carreño
Universidad San Gregorio de Portoviejo, Avenida Metropolitana y Olímpica, Portoviejo EC130101, Manabí, Ecuador.

Daniel Delgado
Departamento de Construcciones Civiles, Arquitectura y Geología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí, Avenida José María Urbina, Portoviejo EC130105, Manabí, Ecuador.

Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens, Université de Perpignan, Via Domitia, UMR 5110, 52 Avenue Paul Alduy, 66860, Perpignan CEDEX, France.

Mirian Guillén Vivas
Universidad San Gregorio de Portoviejo, Avenida Metropolitana y Olímpica, Portoviejo EC130101, Manabí, Ecuador.

DOI
https://doi.org/10.14198/INGEO.27414

CITACIÓN
Andrade-Carreño, I., Delgado, D., & Guillén Vivas, M. (2025). Evaluación de la vulnerabilidad del suelo por erosión hídrica en la provincia de Manabí (Ecuador) mediante la aplicación de un modelo geoespacial. *Investigaciones Geográficas*, (83), 109-128. https://doi.org/10.14198/INGEO.27414

CORRESPONDENCIA
Daniel Delgado (daniel.delgado@utm.edu.ec)

HISTORIA
Recibido: 9 abril 2024
Aceptado: 18 noviembre 2024
Publicado: 23 enero 2025

TÉRMINOS
© 2025 Isabel Andrade-Carreño, Daniel Delgado, Mirian Guillén Vivas
Este trabajo se publica bajo una licencia Creative Commons de Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Resumen

La pérdida del suelo por erosión hídrica es uno de los problemas ambientales más preocupantes en la actualidad. Para estimar las tasas erosivas se requiere de información de alta resolución. No obstante, en Manabí, la limitada disponibilidad de datos locales de precipitaciones y la falta de registros detallados de uso del suelo presentan importantes restricciones para una evaluación precisa de los procesos erosivos. El objetivo principal de la investigación es estimar tasas de erosión mediante el modelo RUSLE y su relación con la cobertura de superficie y la densidad poblacional en Manabí, para evaluar su vulnerabilidad. En la metodología se delimitó la zona de estudio y se obtuvieron los factores que conforman RUSLE desde bases de datos oficiales. La delimitación del área de estudio se realizó mediante la cartografía nacional y los factores que conforman RUSLE desde bases de datos oficiales: las precipitaciones se obtuvieron desde GPCC; NDVI desde MODIS; topografía desde SRTM; propiedades del suelo desde SoilGRIDS; el Factor P fue considerado como unidad debido a la carencia de información estadística. Se registraron tasas de erosión entre 0,06 y 190,49 t/ha, con distribuciones irregulares dentro de la provincia. El 68% de los cantones manabitas registraron un riesgo Medio-alto y Muy-alto, destacando la importancia de generar medidas de mitigación frente a la erosión del suelo. Los resultados de este estudio proporcionan una base sólida para que las autoridades gubernamentales implementen medidas efectivas de control de la erosión del suelo en Manabí. La metodología aplicada es adaptable a otras regiones con condiciones geográficas y climáticas similares, lo que permite su replicación en diferentes contextos. Esto resulta especialmente relevante en el marco del cambio climático, donde la flexibilidad para adaptar soluciones locales a distintos escenarios globales es crucial para una gestión sostenible del suelo y la mitigación de la erosión.

Palabras clave: erosión hídrica; RUSLE; vulnerabilidad; modelo geoespacial; Manabí; cambio climático.

Abstract

Soil loss due to water erosion is one of the most concerning environmental issues today. Estimating erosion rates requires high-resolution data. However, in Manabí, the limited availability of local precipitation data and the lack of detailed land use records pose significant constraints for an accurate assessment of erosion processes. The primary objective of

this research is to estimate erosion rates using the RUSLE model and to examine their relationship with land cover and population density in Manabí in order to assess its vulnerability. The methodology consisted in delineating the study area and obtaining the factors that comprise the RUSLE model from official databases. The delineation of the study area was carried out using national cartography and the factors that make up the RUSLE model from official databases: precipitation data were sourced from GPCC; NDVI from MODIS; topography from SRTM; soil properties from SoilGRIDS; and the P factor was treated as a unit due to the lack of statistical data. Erosion rates ranging from 0.06 to 190.49 t/ha were recorded, with irregular distributions across the province. Sixty-eight percent of Manabí's cantons recorded medium-high and very high risk, which highlights the importance of implementing mitigation measures to address soil erosion. The results of this study provide a solid foundation for government authorities to implement effective soil erosion control measures in Manabí. The methodology applied in this study is adaptable to other regions with similar geographical and climatic conditions, allowing for its replication in different contexts. This is particularly relevant in the context of climate change, where flexibility in adapting local solutions to various global scenarios is crucial for sustainable soil management and erosion mitigation.

Keywords: rainfall erosion; RUSLE; vulnerability; geospatial model; Manabí; climate change.

1. Introducción

La erosión del suelo es un fenómeno natural provocado por la confluencia de factores naturales y actividades humanas (Krishna Bahadur, 2009). El calentamiento global ha provocado que las lluvias extremas y las condiciones de clima severo sean cada vez más frecuentes (Zhang et al., 2024). Estos episodios de precipitaciones intensas ocasionan el agotamiento y deterioro de los nutrientes del suelo, así como la merma de la productividad del terreno (Karlen & Rice, 2015). Factores como el aumento demográfico, la rápida urbanización y cambios en el uso del suelo, impulsados por las actividades humanas, también han acelerado la degradación del suelo, resultando en una disminución de su calidad a nivel mundial (Kaiser et al., 2018). La erosión del suelo representa una seria amenaza para la seguridad social y económica en varios países del mundo (Delgado et al., 2022). Este fenómeno puede incrementar la carga sedimentaria en los ríos, lo que, bajo condiciones extremas como lluvias intensas o prolongadas, puede derivar en problemas ecológicos (Pacheco et al., 2019). Aunque la sedimentación es un proceso natural y beneficioso para los ecosistemas fluviales, el exceso de sedimentos producto de la erosión acelerada del suelo puede alterar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos, afectando la calidad del agua, la biodiversidad y aumentando el riesgo de inundaciones (Casanova-Ruiz et al., 2024), poniendo en peligro el desarrollo de la sociedad humana (Zhang et al., 2024). En los últimos años, la preocupación por estimar las tasas de erosión en Ecuador ha crecido significativamente, debido a la necesidad de desarrollar estrategias efectivas de mitigación que consideren los espacios con mayor crecimiento demográfico (Ochoa-Cueva et al., 2015; Pacheco et al., 2019; Delgado et al., 2022; Arias-Muñoz et al., 2023; Delgado et al., 2023; Casanova-Ruiz et al., 2024). Sin embargo, estos análisis se han enfocado principalmente en cuencas hidrográficas individuales o en factores aislados que influyen en la erosión, lo cual ha limitado el alcance de las intervenciones. El clima ecuatoriano, influenciado tanto por la línea equinoccial como por la Cordillera de los Andes, genera patrones climáticos distintos en sus tres regiones naturales: Costa, Sierra y Oriente (Pourrut, 1994; Casanova-Ruiz et al., 2024). En particular, la región Costa presenta dos estaciones climáticas bien diferenciadas: una estación seca, que se extiende de junio a noviembre, y una estación húmeda, de diciembre a mayo (Delgado et al., 2022), lo que añade complejidad a la evaluación de los procesos erosivos en esta zona.

Para determinar la vulnerabilidad del suelo tomando en cuenta la erosión hídrica, es necesario estimar las tasas de erosión (Farhan & Nawaiseh, 2015). A nivel mundial, se han registrado más de 400 modelos distintos para calcular la erosión del suelo (Borrelli et al., 2021), pero sus componentes no permiten que todas las opciones sean aplicables en las diversas regiones del planeta. Especialmente en Ecuador, el número de metodologías que se pueden aplicar se reducen drásticamente considerando las condiciones ambientales muy irregulares que afectan al comportamiento ambiental. Otra de las limitantes es la base de datos de precipitaciones del Ecuador, que está a cargo del Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI). Varias investigaciones (Erazo et al., 2018; Delgado et al., 2022) han afirmado que la distribución espacial no homogénea de estaciones de aforo del INAMHI, genera una estimación no representativa de las precipitaciones en el territorio ecuatoriano.

Entre los modelos disponibles, RUSLE ha sido una de las ecuaciones más utilizada a nivel de Sudamérica (Borrelli et al., 2021) y la más empleada en Ecuador (Arias-Muñoz, 2024; Casanova-Ruiz et al., 2024). Este modelo requiere de la determinación de cinco factores: Factor R, desencadenante de la erosión hídrica y conocido también como erosividad de la lluvia; Factor K, erodabilidad del suelo; Factor LS, que resulta de

la combinación de los parámetros de longitud y la gradiente de la pendiente; Factor C, uso y cobertura del suelo y; Factor P, prácticas de apoyo agrícola. RUSLE permite resolver los problemas de la falta de bases adecuadas de datos de precipitaciones locales al ser compatibles con metodologías innovadoras que consideren la utilización de información obtenida de sensores remotos como Global Precipitation Measurement (GPM) o de recopilación híbrida como Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) que emplea información tanto de pluviómetros propios como de instituciones públicas y privadas después de un riguroso proceso de validación y es presentada en formato ráster, para hacer frente a la escasa cobertura de medidores del Ecuador, mostrando excelentes resultados para el territorio ecuatoriano (Delgado et al., 2022).

Por este motivo, el objetivo principal de la presente investigación es evaluar la vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica mediante la aplicación del modelo geoespacial RUSLE y su relación con la cobertura vegetal, considerando la expansión demográfica en la provincia de Manabí. Una de las innovaciones destacadas del presente trabajo es la capacidad de evaluar la vulnerabilidad del suelo a un espacio físico que no se restringe a la escala espacial de una cuenca hidrográfica y considera todo el territorio de la provincia de Manabí, junto con la identificación de los sectores más vulnerables, tomando en cuenta las elevadas tasas de erosión y la concentración de un mayor número de habitantes por km^2.

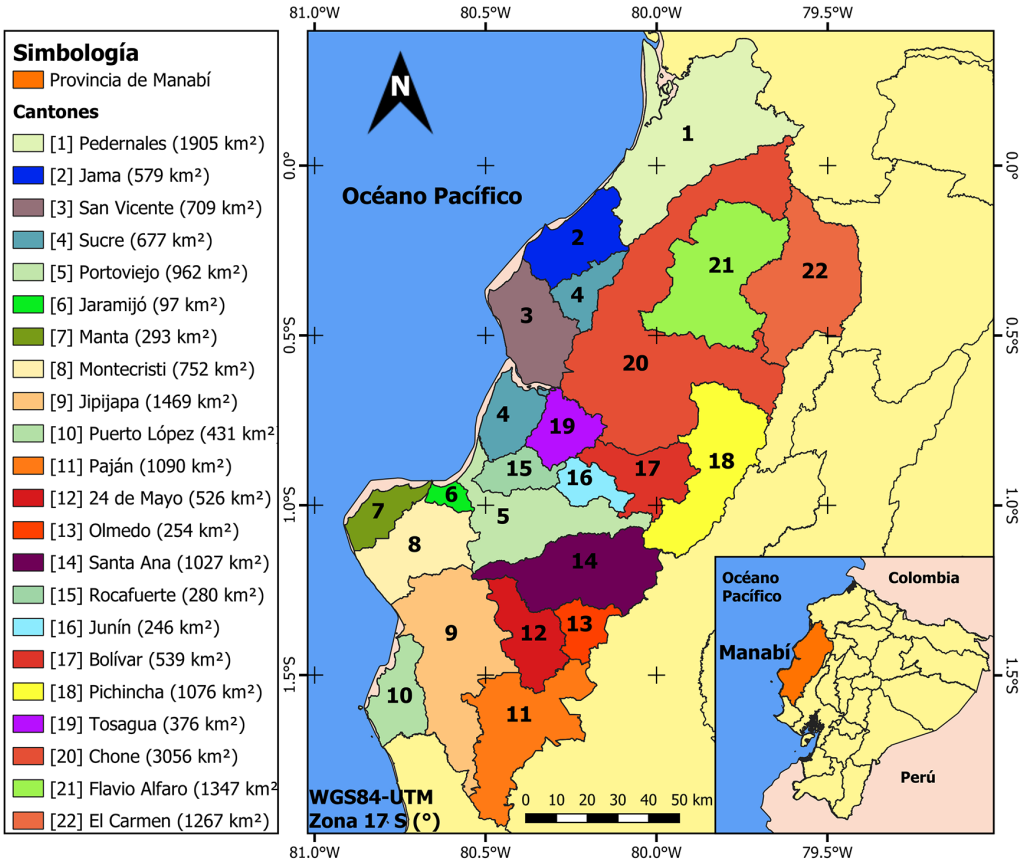
2. Metodología

2.1. Área de estudio

La presente investigación se desarrolló en la provincia de Manabí, una de las 24 provincias que conforma el territorio ecuatoriano. Se encuentra ubicada en la parte occidental de Ecuador, en la región costera, y todo su territorio pertenece a la cuenca del Pacífico (Delgado et al., 2022).

Para delimitar la zona de estudio, se empleó la cartografía nacional elaborada por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM-EC), la cual está disponible en acceso abierto con formato shapefiles. El archivo base de la provincia fue modificado y reproyectado al sistema de coordenadas WGS84 zona 17 Sur mediante la utilización de los Softwares QGIS (versión 3,34) y R (versión 3,6,0, con su complemento RStudio, Figura 1).

Figura 1. Área de estudio (provincia de Manabí-Ecuador). ID y área de cada cantón se incluyen en la simbología



Elaboración propia

La provincia de Manabí está clasificada en 22 cantones (Figura 1; el cantón Sucre, ID 4, está catalogado en dos cuerpos independientes), abarcando una extensión de 18.958 km^2 entre las coordenadas (WGS84 zona 17 S) 609.028 O – 10.039.658 S y 560.199 O – 9.787.108 S (Casanova-Ruiz et al., 2024).

El cantón Chone (ID 20 en Figura 1) es el territorio de mayor extensión de la provincia de Manabí, seguido de Pedernales y Jipijapa (ID 1 y 9 en Figura 1, respectivamente), mientras que los cantones más pequeños son Jaramijó y Junín (ID 6 y 16 en Figura 1, respectivamente).

2.2. Conformación de conjuntos de datos

2.2.1. Datos de precipitación

Para la obtención de precipitaciones entre 2001 y 2020 en la provincia de Manabí, se empleó la base de datos Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). GPCC proporciona un conjunto de datos de precipitaciones (a escala de píxel) de alta calidad mediante la utilización de medidores que abarcan toda la superficie del planeta para el seguimiento y la investigación del clima de la Tierra. Esta base de datos fue creada en 1989 como contribución alemana al Programa Mundial de Investigaciones del Clima (WCRP, siglas en inglés) y al Sistema Mundial de Observaciones del Clima (GCOS, siglas en inglés).

La información de precipitaciones está disponible gratuitamente en Deutscher Wetterdienst, Servicio Meteorológico Nacional de Alemania (DWD) a través de su página web oficial. Al proporcionar ráster a escala de píxel, es posible seleccionar diferentes resoluciones espaciales, que van desde los 0,25° hasta los 2,5°, con una cobertura temporal que se extiende desde 1981 hasta la actualidad.

Esta base de datos ha sido empleada previamente en la provincia de Manabí (Delgado et al., 2022) y en países cercanos como Colombia (Estupiñán et al., 2016). Para la presente investigación, se empleó la versión "Full Data Monthly V 2020" de GPCC en formato NetCDF. Se descargaron ráster a 0,25° de resolución espacial entre el 2001 y 2020. Estos datos fueron apilados en orden cronológico para generar un solo producto para los 20 años de estudio. Posteriormente, la información fue escalada a la resolución espacial de la investigación (100 m) y reproyectada al sistema de coordenadas local (WGS84 zona 17 Sur), mediante R y QGIS. A partir de esto, la precipitación media anual se calculó a escala de píxel para posteriormente ser empleada en la obtención del Factor R (Erosividad de la lluvia).

2.2.2. Propiedades del suelo

El modelo RUSLE requiere de la caracterización del suelo considerando 4 propiedades principales: 3 propiedades físicas (contenido de arena, arcilla, limo) y 1 propiedad química (carbono orgánico, SOC). La base de datos SoilGRIDS de ESRI contiene información obtenida por más de 230.000 observaciones de perfiles de suelo en todo el mundo, considerando factores climáticos, uso y cobertura terrestre, relieve y pendiente, entre otros.

Se obtuvieron las propiedades de la capa superficial del suelo del suelo desde la base de datos SoilGRIDS a una resolución espacial de 250 m para posteriormente procesarla mediante QGIS y R, adaptándola al sistema de coordenadas WGS84 zona 17 Sur y a una escala espacial de 100 m.

2.2.3. Modelo digital de elevación (MDE)

Existen varias bases de datos satelitales que proporcionan MDE para la provincia de Manabí, entre los que destacan HydroSHEDS V2, la Misión de topografía de radar del transbordador (SRTM, siglas en inglés) y ALOSPALSAR. Sin embargo, no todas las opciones caracterizan correctamente la topografía irregular de la zona de estudio, lo que es esencial para generar estimaciones adecuadas de la pérdida del suelo en el territorio manabita.

Delgado et al. (2024), demuestra que la base de datos SRTM es la que mejor caracteriza al territorio ecuatoriano, incluyendo a la provincia de Manabí. Por este motivo, se descargó el MDE de SRTM a una escala espacial de 90 m, que posteriormente fue reproyectado al sistema de coordenadas local (WGS84 zona 17 Sur) y escalado a 100 m.

2.2.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI es uno de los parámetros más empleados para determinar el Factor C a escala mundial, incluyendo a Ecuador (Ruiz Vélez & Pacheco Gil, 2020; Casanova-Ruiz et al., 2024). NDVI caracteriza la vitalidad de la

vegetación, permitiendo identificar la capacidad de protección que genera el uso y cobertura del suelo ante una eventual erosión hídrica.

Se descargaron los datos en formato TIFF desde la base de datos MODIS versión "Vegetation Indices 16-Day, Terra 061" utilizando el software R y la herramienta automática MODIStsp, que facilita el procesamiento automático de series temporales (Buseto & Ranghetti, 2017). Para esta investigación, se seleccionó una resolución espacial de 250 m y se estableció un período de descarga extendido desde el 1 de enero de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2020. Cada mes del período de estudio cuenta con dos imágenes satelitales de NDVI, excepto octubre en los años no bisiestos y noviembre en los años bisiestos, donde se dispone de una sola imagen. Esto generó un total de 23 imágenes anuales y 460 imágenes para todo el período de 20 años. Para homogenizar la información, se promediaron las dos imágenes correspondientes a cada mes, mientras que las imágenes únicas de octubre y noviembre se mantuvieron sin modificaciones debido a la falta del archivo ráster adicional. Este proceso resultó en la obtención de 12 capas de NDVI por año, una para cada mes. Posteriormente, se calculó un promedio mensual para generar una serie de 20 capas de NDVI representativas del promedio anual de cada año entre 2001 y 2020. Finalmente, a partir de estas 20 capas anuales, se realizó un promedio para generar un único ráster de NDVI, representando el valor medio del índice de vegetación para el periodo completo. Este ráster promedio fue el que se utilizó como insumo para el cálculo del Factor C en la modelación de la erosión.

La información descargada fue reproyectada al sistema de coordenadas WGS84 zona 17 Sur y a un tamaño de píxel de 100 m. Posteriormente, y considerando las indicaciones de los autores (Didan et al., 2015), se procedió a emplear un factor de conversión de 0,00001 al NDVI obtenido, para poder llevarlo al rango normal de magnitudes que oscila entre -1 y 1, siendo 1 una representación de máxima vitalidad de la vegetación, mientras que -1 refleja lo contrario.

2.2.4. Cobertura del suelo en función del tipo de vegetación

Para la presente investigación, se utilizó la información obtenida del producto MODIS MCD12Q1 para determinar la cobertura del suelo, específicamente bajo el esquema IGBP, clasificada mediante la aplicación del algoritmo de árbol de decisiones C4.5, el cual procesó un año completo de datos MODIS Nadir BRDF-Adjusted Reflectance (NBAR, Schaaf et al., 2002), con una frecuencia de 8 días. La información fue descargada directamente en el sistema de coordenadas locales EPSG:32717 WGS84-UTM zona 17S, en formato "tif", utilizando el lenguaje R y aplicando la herramienta automática "MODIStsp" (Buseto & Ranghetti, 2017). La resolución espacial inicial fue de 500 m, la cual se escaló posteriormente a 100 m (resolución utilizada en la presente investigación). El rango temporal de descarga abarcó desde 2001 hasta 2020, con una capa disponible por cada año, lo que generó un total de 20 capas. Sin embargo, se utilizó la capa del 2010 para generar el mapa de cobertura del suelo.

La base de datos MODIS distribuye a la superficie terrestre en 17 distintos tipos de cobertura, tomando en cuenta su composición y características (Cover & Change, 1999; Sulla-Menashe & Friedl, 2018): 1) Bosques siempre verdes de hoja aguja: dominados por árboles de coníferas siempre verdes (dosel >2 m). Cobertura arbórea>60%; 2) Bosques siempreverdes latifoliados de hoja ancha: Dominados por árboles siempreverdes latifoliados y palmados (dosel>2m). Cobertura arbórea>60%; 3) Bosques caducifolios de hoja aguja: Dominados por árboles caducifolios de hoja aguja (alerce) (dosel>2 m). Cobertura arbórea>60%; 4) Bosques caducifolios latifoliados de hoja ancha: Dominados por árboles caducifolios latifoliados (dosel >2m). Cobertura arbórea>60%; 5) Bosques Mixtos: Dominados por tipos de árboles que no son caducifolios ni perennes (40-60% de cada uno) (dosel>2m). Cobertura arbórea>60%; 6) Arbustos matorrales cerrados: Dominados por plantas leñosas perennes (1-2 m de altura) >60% de cobertura; 7) Matorrales abiertos: Dominados por plantas leñosas perennes (1-2 m de altura), 10-60 % de cobertura; 8) Sabanas leñosas: Cobertura arbórea 30-60% (dosel>2m); 9) Sabanas: Cobertura arbórea 10-30% (dosel>2m); 10) Pastizales: Dominados por herbáceas anuales (<2m); 11) Humedales Permanentes: Tierras permanentemente inundadas con 30-60% de cobertura de agua y >10% de cobertura de vegetación; 12) Tierras de cultivo: al menos el 60% del área es tierra cultivada; 13) Terrenos Urbanos y edificados: Al menos 30% de superficie impermeable incluyendo materiales de construcción, asfalto y vehículos; 14) Mosaicos de tierras de cultivo/vegetación natural: Mosaicos de cultivos a pequeña escala 40-60% con vegetación natural arbórea, arbustiva o herbácea; 15) Hielo y Nieve Permanentes: Al menos el 60% del área está cubierta por nieve y hielo durante al menos 10 meses al año; 16) Árido: Al menos el 60% del área son áreas áridas sin vegetación (arena, roca, suelo) con menos del 10% de vegetación; 17) Cuerpos de Agua: Al menos el 60% del área está cubierta por cuerpos de agua permanentes.

En la provincia de Manabí se identificaron únicamente 15 tipos de coberturas (Figura 6), debido a que las clases “1) Bosques siempre verdes de hoja aguja” y “15) Hielo y Nieve Permanentes” no forman parte de la composición del suelo, producto de las condicionantes ambientales del medio físico analizado.

2.3. Modelo RUSLE

El modelo RUSLE es una metodología matemática empleada ampliamente a nivel mundial para estimar las tasas de erosión (Jahun et al., 2015; Ganasri & Ramesh, 2016; Sahu et al., 2017; Sujatha & Sridhar, 2018; Gianinetto et al., 2019; Kebede et al., 2021; Patriche, 2023). En Ecuador, es el modelo más utilizado gracias a su facilidad de adaptación con los factores condicionantes del medio (Casanova-Ruiz et al., 2024). Esta adaptabilidad es especialmente relevante, ya que las metodologías convencionales no siempre son compatibles con las características del país. Por ejemplo, el cálculo del Factor LS presenta desafíos significativos debido a las variaciones topográficas impuestas por la Cordillera de Los Andes (Delgado et al., 2024). Estas condiciones exigen enfoques metodológicos específicos que optimicen la evaluación de la erosión, lo que subraya la versatilidad del modelo RUSLE en contextos complejos (Casanova-Ruiz et al., 2024). A continuación, se presenta la ecuación clásica propuesta por Renard (1997) (Ecuación 1):

$$A = R * K * LS * C * P \qquad \text{[Ec. 1]}$$

Donde:

A: tasas de erosión en t/ha año;
R: erosividad de la lluvia en MJ mm/ha h año;
K: erodabilidad del suelo en t/MJ mm;
LS: combinación de factores de longitud y pendiente (adimensional);
C: uso y cobertura del suelo (adimensional) y;
P: prácticas de apoyo agrícola (adimensional).

En los siguientes apartados de la sección 2.3 se considerarán las metodologías empleadas el cálculo de cada factor de RUSLE, a excepción del Factor P. Este factor será considerado como 1 (unidad), debido a la carencia de estadísticas sobre prácticas de apoyo agrícola en Manabí (Pacheco et al., 2019; Delgado et al., 2022; Casanova-Ruiz et al., 2024).

2.3.1. Cálculo del Factor R (erosividad de la lluvia)

La estimación del Factor R se la realizó mediante la metodología de Delgado et al. (2022) que fue elaborada exclusivamente para determinar la erosividad de la lluvia en Ecuador, tomando en cuenta la ubicación espacial de la zona de estudio (vertiente Pacífico o Amazónica). Esta metodología ha sido validada en investigaciones previas mostrando excelentes resultados (Casanova-Ruiz et al., 2024). La ecuación que considera el territorio que aporta a la cuenca del Pacífico (localización de la provincia de Manabí) se detalla a continuación (Ecuación 2):

$$R = 187{,}94x^2 + 0{,}36x + 156{,}73 \qquad \text{[Ec. 2]}$$

Donde:

R: erosividad de la lluvia en MJ mm/ha h año;
x: precipitación media anual entre 2001 y 2020 (mm/año).

2.3.2. Cálculo del Factor K (erodabilidad del suelo)

Para el cálculo del Factor K se empleó la metodología de Williams (1995) y Neitsh et al. (2000) (Ecuación 3):

$$K_{USLE} = f_{sand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand} \qquad \text{[Ec. 3]}$$

Donde:

K_{USLE}: erodabilidad del suelo modelo USLE;
f_{sand}: factor de contenido de arena;
f_{cl-si}: factor de contenido de arcilla y limo;
f_{orgc}: factor de contenido de carbono orgánico;
f_{hisand}: factor de altos contenidos de arena.

Para poder adaptar la ecuación original del Factor K al modelo RUSLE, fue necesario aplicar un factor de conversión de 0,1317 (Ecuación 4) (Al Rammahi & Khassaf, 2018).

$$K_{RUSLE} = K * 0{,}1317 \qquad \text{[Ec. 4]}$$

Donde K_{RUSLE} corresponde a la erodabilidad del suelo en t/MJ mm compatible con el modelo RUSLE y K corresponde a la erodabilidad del suelo del modelo USLE.

Las ecuaciones para estimar los factores en base a las propiedades físicas y químicas del suelo se detallan a continuación (Williams, 1995; Neitsh et al., 2000) (Ecuaciones 5, 6, 7, 8):

$$f_{csand} = \left\{0{,}2 + 0{,}3\ x \exp\left[-0{,}256\ x\ m_s\ x\ \left(1 - \frac{m_{silt}}{100}\right)\right]\right\} \qquad \text{[Ec. 5]}$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}}\right)^{0{,}3} \qquad \text{[Ec. 6]}$$

$$f_{orgc} = \left\{1 - \frac{0{,}25\ x\ orgC}{orgC + \exp(3{,}75 - 2{,}95\ x\ orgC)}\right\} \qquad \text{[Ec. 7]}$$

$$f_{hisand} = \left\{1 - \frac{0{,}7\ x\ \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + \exp\left[-5{,}51 + 22{,}9\ x\ \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right]}\right\} \qquad \text{[Ec. 8]}$$

Donde:

m_s: porcentaje de arena;
m_{silt}: porcentaje de limo;
m_c: porcentaje de arcilla y;
orgC: porcentaje de SOC.

Para obtener estos porcentajes fue necesario clasificar cada píxel en función del contenido de arena, arcilla, limo y SOC. Delgado et al. (2023) indica que para realizar este procedimiento empleando información ráster satelital, es necesario convertir las unidades a g/kg (únicamente SOC se obtiene en hg/kg, por lo que fue necesario dividirlo para 10, SOC/10). Cabe destacar que, tomando en cuenta las características de la base de datos SoilGRIDS, se registraron varios píxeles aislados que carecían de información, los cuales fueron completados utilizando el comando "Fill nodata" de QGIS. Este método de interpolación se basa en la correlación espacial de los valores adyacentes, permitiendo inferir estimaciones coherentes para los píxeles sin datos, con valores asignados que varían según las características de los píxeles vecinos. Este enfoque evita sesgos y asegura la continuidad y precisión en la modelización de las propiedades del suelo, tal como se detalla en Delgado et al. (2023), donde se advierte que la imputación arbitraria podría comprometer los resultados finales del estudio.

2.3.3. Cálculo del Factor LS (longitud y pendiente)

De acuerdo a Delgado et al. (2024), ciertas metodologías convencionales no permiten representar correctamente la topografía del Ecuador (incluyendo al territorio manabita), generando una sobreestimación de los resultados adimensionales del Factor LS. Para hacer frente a este inconveniente, los autores proponen emplear la metodología automatizada del Sistema de Análisis Geocientíficos Automatizados (SAGA en sus siglas en inglés), mediante la ecuación de Desmet y Govers (1996) al archivo MDE obtenido de la base de datos SRTM. Este procedimiento fue empleado para la estimación del Factor LS en la presente investigación.

2.3.4. Cálculo del Factor C (uso y cobertura del suelo)

Para determinar el Factor C se consideró la metodología propuesta por Durigon et al. (2014) que emplea el NDVI y ha sido elaborada para territorios con condiciones ambientales similares a las registradas en Ecuador (Ecuación 9):

$$C = \frac{-NDVI + 1}{2} \qquad \text{[Ec. 9]}$$

Donde:

C: Factor C de uso y cobertura del suelo (adimensional);
NDVI: Índice de Vegetación Diferenciada Normalizada (adimensional).

2.4. Clasificación del territorio manabita en función a la vulnerabilidad del suelo por erosión hídrica

Posterior a la obtención de las tasas de erosión obtenidas mediante el modelo RUSLE, se procedió a realizar un mapa de riesgo erosivo del suelo considerando las localidades de la provincia de Manabí. Para esto, se propone tomar en consideración la siguiente clasificación en función a la pérdida del suelo (Tabla 1).

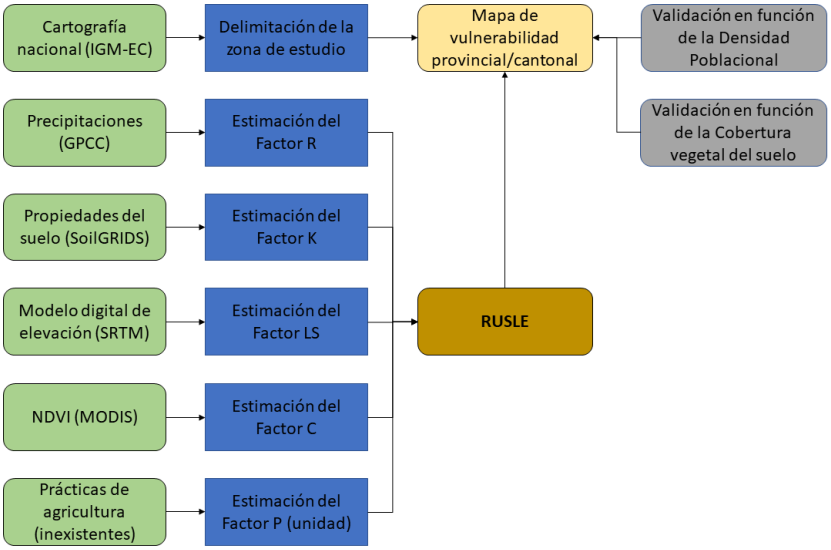
Tabla 1. Clasificación propuesta de riesgo erosivo en función de los rangos de pérdida del suelo

Rango de pérdida del suelo (t/ha)	Riesgo erosivo
0-2	Muy bajo
2-5	Bajo
5-10	Medio-bajo
10-15	Medio-alto
15-20	Alto
> 20	Muy alto

Elaboración propia

Para evaluar la exposición al riesgo de erosión en función de la densidad poblacional, se utilizó la base de datos ráster del "Socioeconomic Data and Applications Center" (SEDAC, https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-density-rev11), la cual proporciona información global sobre densidad poblacional a nivel de píxel para los años 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020, con una resolución espacial de 1°. Esta base de datos ha sido empleada en numerosas investigaciones mostrando excelentes resultados (Ji et al., 2018; Shen et al., 2020; Dubey et al., 2021). Se descargaron los datos correspondientes al año 2020 con el objetivo de contar con una estimación actualizada de la densidad poblacional (en hab/km^2), lo que permite identificar con mayor precisión la exposición de las comunidades locales al riesgo de erosión hídrica del suelo en el presente. Los datos descargados fueron procesados mediante R y QGIS para ajustarse a las condiciones particulares de la zona de estudio, obteniendo un mapa de densidad poblacional para todo el territorio manabita. El resumen metodológico se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Esquema del resumen metodológico empleado en la investigación



Elaboración propia

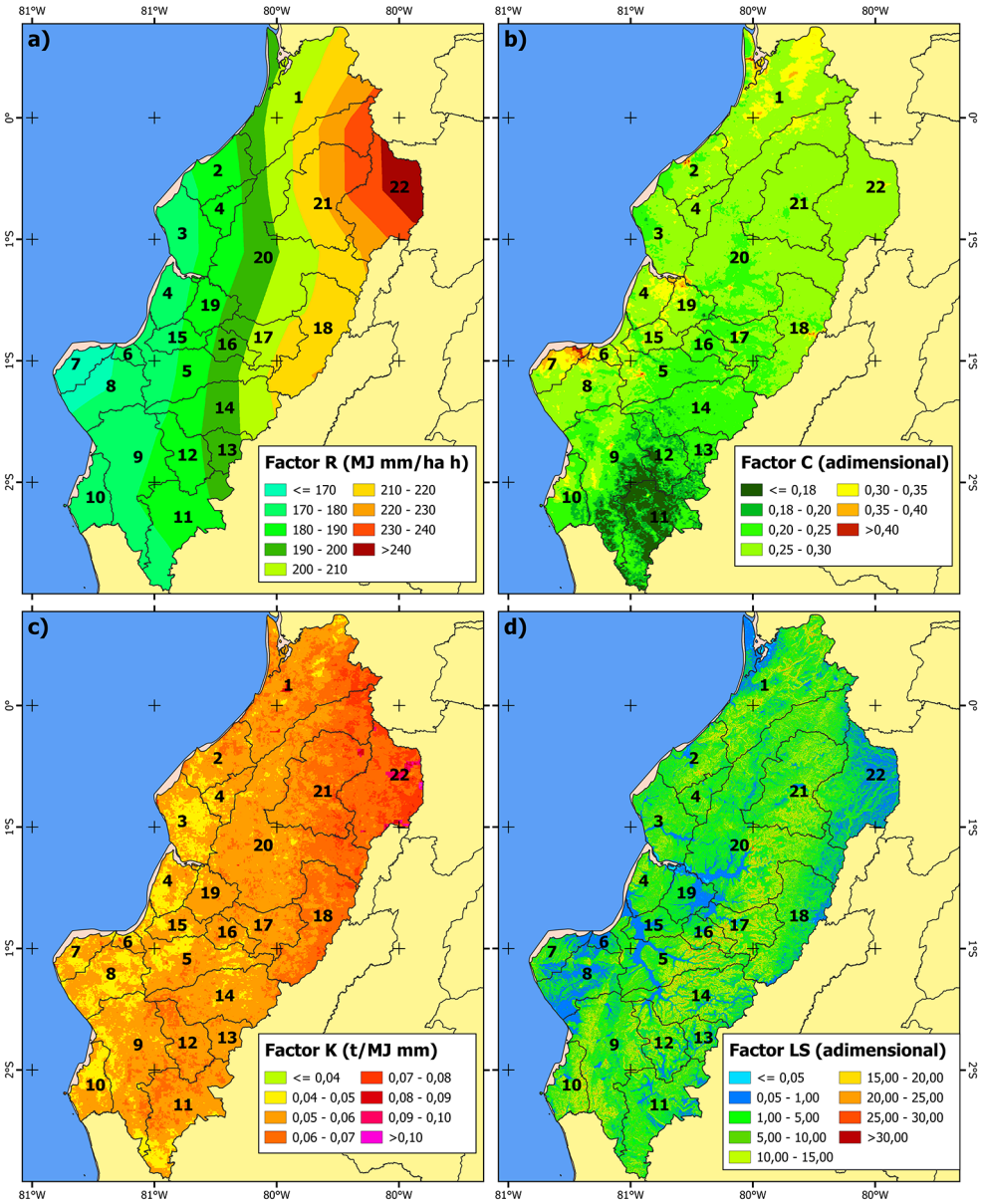
3. Resultados

3.1. Parámetros RUSLE

La estimación de los parámetros RUSLE permite representar cada una de las cinco variables específicas que influyen en el proceso de erosión hídrica. Los factores R y K se miden en unidades específicas, mientras que los demás (LS, C y P) son adimensionales. Analizarlos por separado, permite identificar la influencia de cada uno ante una eventual erosión hídrica del suelo.

Mediante el análisis de la Figura 3, se puede observar que la distribución espacial de los factores RUSLE en la provincia de Manabí es variada, pese a que corresponde a una pequeña área del Ecuador. La Figura 3a permite identificar la incidencia de las precipitaciones representada en la erosividad de la lluvia. A nivel de píxel se puede observar que la mayor erosividad de la lluvia se registra en el noreste de Manabí, en el cantón El Carmen (ID 22 en Figura 3a) con 248,65 MJ mm/ha h y la erosividad más baja se localizó en el Cantón Manta (ID 22 en Figura 3a) con 167,57 MJ mm/ha h. Esto indica que la erosividad de la lluvia se va debilitando mientras se va acercando al Océano Pacífico. A nivel cantonal, Chone registra el valor más alto de erosividad de lluvia, con 237,96 MJ mm/ha h, mientras que Manta registra la erosividad promedio más baja (al igual que a nivel de píxel), con 168,36 MJ mm/ha h (Tabla 2).

Figura 3. Distribución espacial de los factores RUSLE en la provincia de Manabí



Elaboración propia

La Figura 3b muestra la distribución espacial del Factor C, que corresponde al uso y cobertura del suelo. Los valores más bajos (más próximos a 0) reflejan mejores condiciones de protección frente a una eventual erosión hídrica, mientras que los valores más altos, representan sectores con mayor vulnerabilidad ante este evento natural. A nivel de píxel, el valor más bajo es de 0,13 y está ubicado al norte del Cantón Paján (ID 11 en Figura 3b), muy cercano al cantón 24 de Mayo (ID 12 en Figura 3b), mientras que el valor más alto fue de 0,43 y se localizó al norte del Cantón Manta (ID 7 en Figura 3b). El valor promedio a nivel de pixel fue de 0,28, lo que representa una protección aceptable ante un proceso de erosión hídrica del suelo, considerando sus condiciones de uso y cobertura. A nivel cantonal, Paján registra el mejor Factor C, con 0,18, mientras que el cantón con un Factor C más alto es Chone con 0,35 (Tabla 2).

Analizando la Figura 3c, que representa al Factor K (erodabilidad del suelo), se puede observar que su rango de variación es muy bajo (entre 0,04 y 0,103 t/Mj mm). Estos resultados muestran una composición bastante regular de las propiedades físicas y químicas del suelo, teniendo a la arena como compuesto principal (39,81%), seguido del limo (28,33%), arcilla (27,89%) y SOC (3,97%). Los valores por píxel más bajos se registraron en el Cantón Puerto López (ID 10 en Figura 3c), mientras que los valores más altos se localizaron en el Cantón El Carmen (ID 22 en Figura 3c). A nivel cantonal, el Factor K tuvo una oscilación menor (entre 0,05 y 0,07 t/Mj mm), registrando los valores más elevados en los cantones Chone y El Carmen (Tabla 2). Los valores más bajos del Factor K fueron resultado de un menor contenido de limo y mayor contenido de arcilla. Estos resultados confirman la información presentada por Delgado et al. (2023) a escala nacional (Ecuador).

La Figura 3d, que muestra el Factor LS (factor de longitud y pendiente) mostró también una distribución espacial muy variada. Esto se debe a que, pese a que la provincia de Manabí no está ubicada en la región Sierra del país (donde hay elevaciones superiores a los 5.000 m, Delgado et al., 2024), las elevaciones oscilaron entre 0 m y más de 800 m (debido a la existencia de pequeños sectores montañosos de la Costa, Delgado et al., 2022). A nivel de píxel, el valor más bajo fue de 0,03 y se ubicó en varios sectores del Cantón Pedernales (ID 1 en Figura 3d), mientras que el valor más alto fue de 31,92 y se registró en varios sectores de los cantones Pedernales, San Vicente y Chone (ID 1, 3 y 20 en Figura 3c, respectivamente). Su valor medio (a nivel de píxel) fue de 4,78. A nivel cantonal, el Factor LS tuvo una variación entre 0,21 (Jaramijó) y 7,61 (Puerto López) (Tabla 2).

Con respecto al Factor P y como se abordó en la sección 2.3, las prácticas de apoyo agrícola fueron consideradas como 1 para toda la provincia de Manabí, debido a la carencia de técnicas de conservación en la zona de estudio, y cuyo problema se extiende a nivel nacional (Delgado et al., 2022).

3.2. Distribución espacial de la erosión hídrica en Manabí

Mediante el análisis de la Figura 4, la distribución espacial de la erosión hídrica del suelo en la provincia de Manabí, Ecuador, muestra un panorama variado gracias a los diversos factores que componen el modelo RUSLE. Al ser una región costera, se experimenta una interacción entre la humedad atmosférica y los patrones de precipitación que contribuyen a la erosión (Pourrut, 1994).

Los resultados mostraron que las tasas de erosión en Manabí oscilaron 0,05 t/ha y 179,05 t/ha, con un valor promedio de 58,59 t/ha en un total de 1.481.640 pixeles que componen la provincia de Manabí. El píxel más alto se localizó al este del cantón Flavio Alfaro (ID 21 en Figura 4) mientras que el píxel más bajo se localizó al sur del cantón Jipijapa (ID 9 en Figura 4).

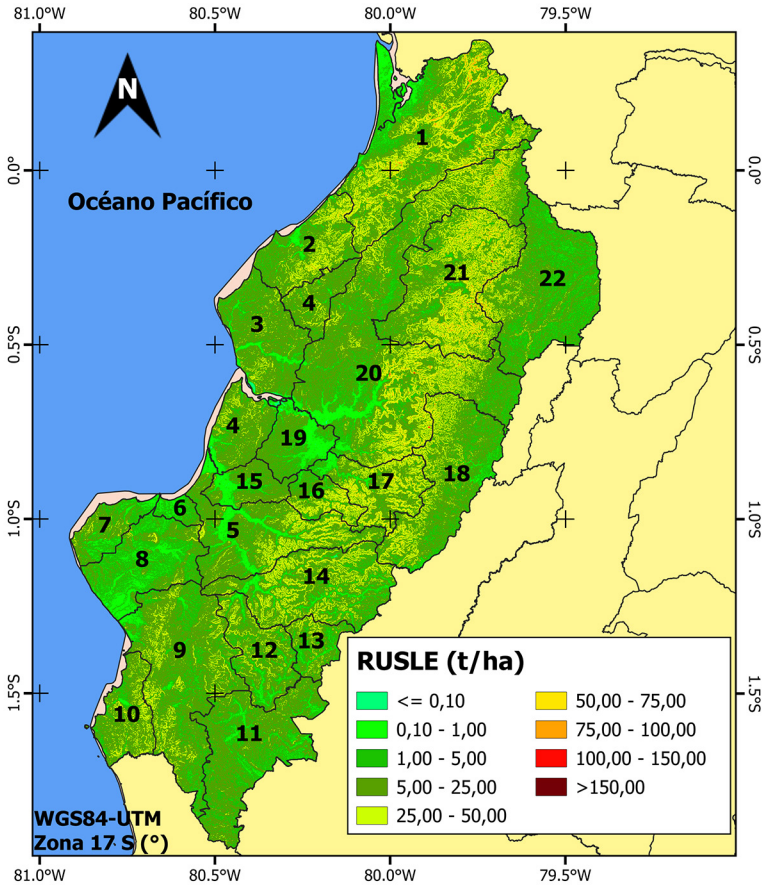
A nivel de cantón, las pérdidas de suelo más elevadas se registraron en Flavio Alfaro, con 23,63 t/ha, mientras que las más bajas se registraron en Jaramijó con tan solo 3,23 t/ha.

En general, las zonas con topografías más accidentadas, como las estribaciones de las pequeñas regiones montañosas de Manabí, reflejaron una mayor susceptibilidad a la erosión del suelo. La distribución de la vegetación junto al uso del suelo, desempeñaron un papel importante, donde las actividades humanas pueden estar asociadas al aumento de las magnitudes erosivas.

La distribución espacial de la erosión hídrica en Manabí refleja una interacción interesante de los factores climáticos y topográficos, destacando la importantica de contar con estrategias de gestión que permitan mitigar los efectos adversos que genera este fenómeno natural en la provincia de Manabí.

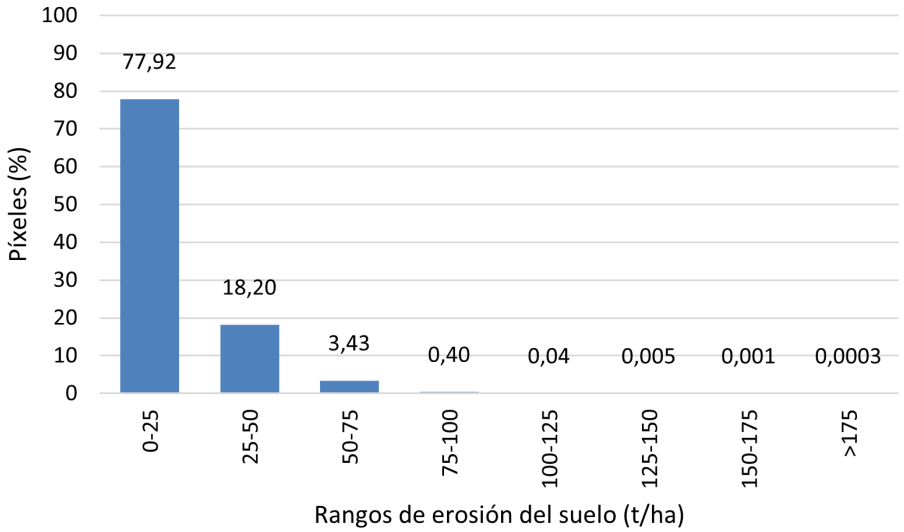
La Figura 5 muestra la distribución de las tasas de erosión considerando un rango de valores en t/ha. Se puede observar que la mayor cantidad de píxeles (79,27%) registraron tasas de erosión relativamente bajas (>25 t/ha), mientras que el segundo rango que mostró mayor frecuencia fue de 25-50 t/ha, con 16,85%. Las 6 clases restantes representan únicamente el 3,88%, pero corresponden a clases de erosión más perjudiciales.

Figura 4. Distribución espacial de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE en la provincia de Manabí



Elaboración propia

Figura 5. Frecuencia de pixeles por rango de tasas de erosión en la provincia de Manabí

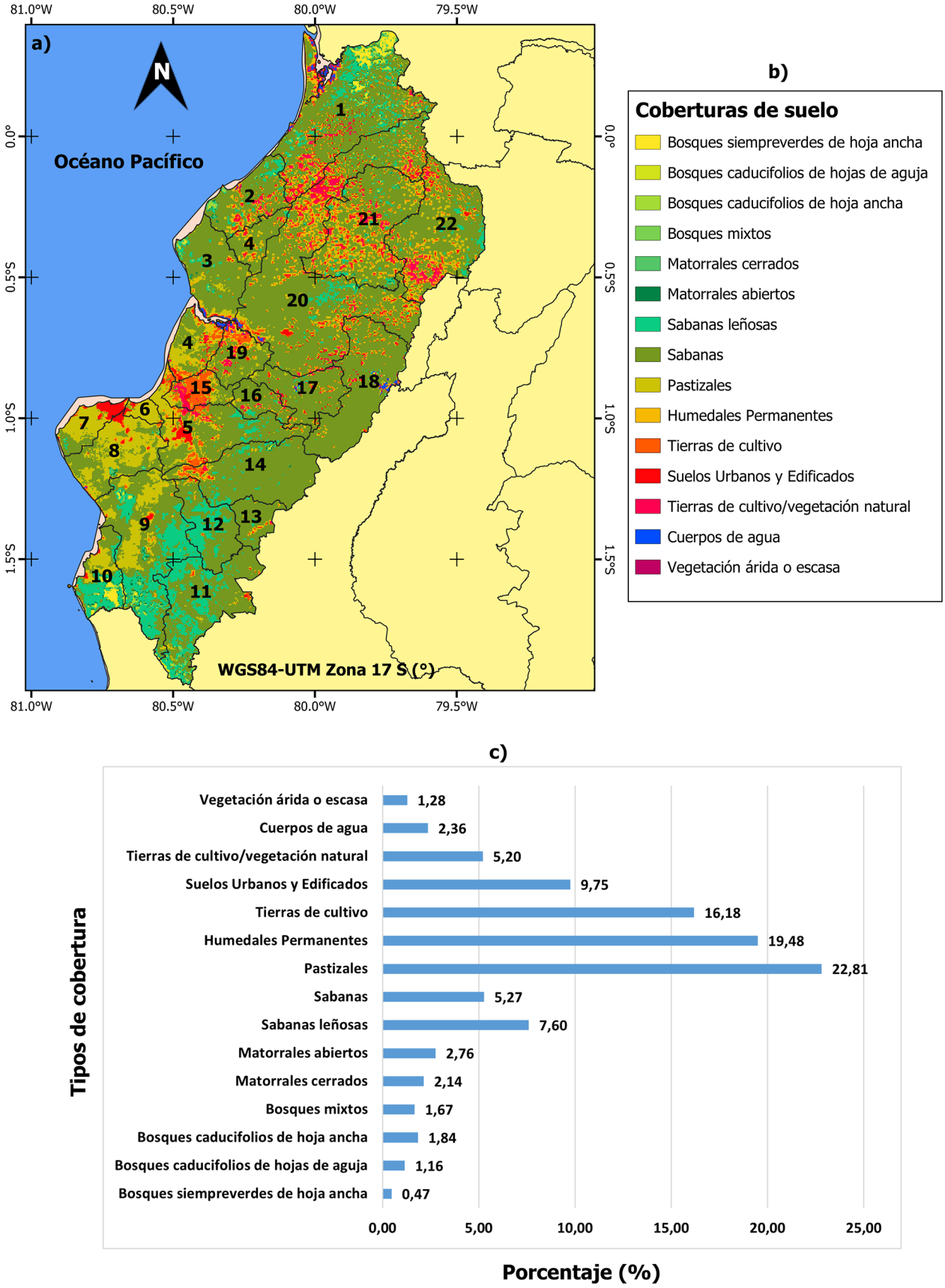


Elaboración propia

3.3. Cobertura del suelo en la provincia de Manabí

Los resultados obtenidos del análisis satelital mostraron que la cobertura del suelo en la provincia de Manabí está dominada por pastizales (22,81%) y humedales permanentes (19,48%), como se observa en la Figura 6. La topografía diversa y las condiciones climáticas regionales favorecen el desarrollo de estos tipos de cobertura. El tipo de cobertura con menor representación fue “bosques siempre verdes de hoja ancha” con el 0,47%.

Figura 6. Distribución de la cobertura del suelo según MODIS (a, b) y su clasificación porcentual en cantones de la provincia de Manabí (c)



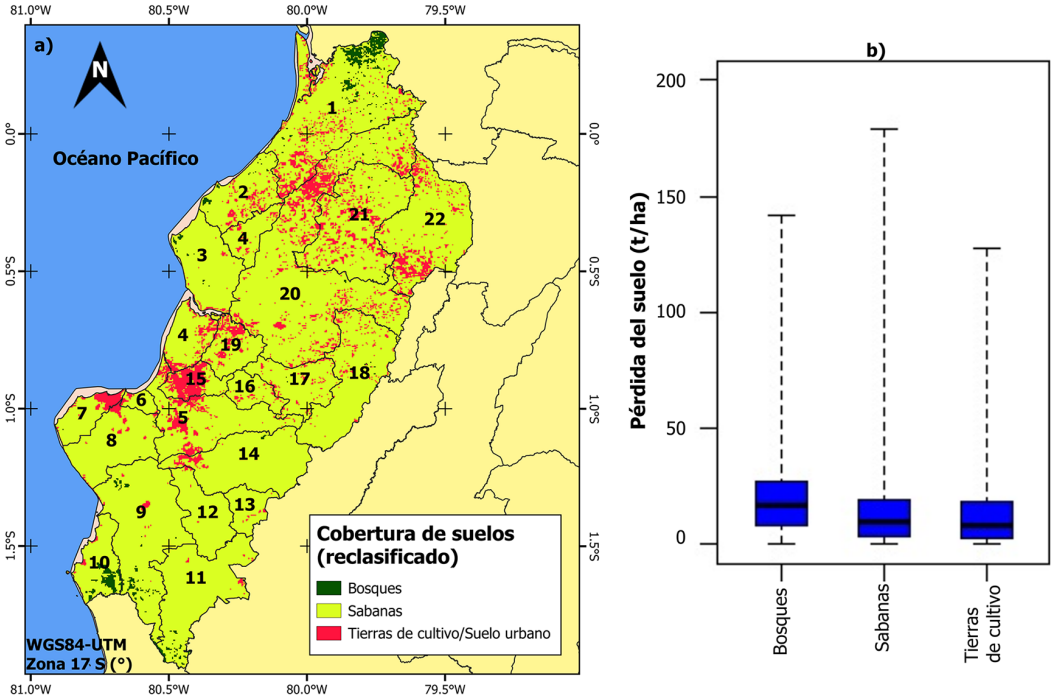
Elaboración propia

Para poder comprender la influencia que tienen los tipos de cobertura en las tasas de erosión, Casanova et al. (2024) recomienda reclasificar los tipos de cobertura de MODIS en 3 grandes grupos:

1) **Bosques:** comprenden los tipos Bosques siempreverdes de hoja ancha, Bosques caducifolios de hojas de aguja, Bosques caducifolios de hoja ancha, Bosques mixtos.
2) **Sabanas:** está conformado por Matorrales cerrados, Matorrales abiertos, Sabanas leñosas, Sabanas, Pastizales, Humedales Permanentes, Vegetación árida o escasa.
3) **Tierras de cultivo:** compuesto por Tierras de cultivo, Suelos Urbanos y Edificados, Mosaico de tierras de cultivo/vegetación natural.

Tras la reclasificación de los tipos de cobertura (Figura 7a), se determinó que las sabanas representaron el 89,11% del área, seguidas de tierras de cultivo (9,31%) y bosques (1,58%). Los bosques (Figura 7b), pese a ser considerados de alta protección contra la erosión, registraron una mediana de pérdida de suelo cercana a 20 t/ha, debido a las precipitaciones elevadas y la naturaleza limo-arenosa del suelo en esas áreas. Por otro lado, las sabanas, que cubren la mayor parte de la provincia, mostraron una mayor variabilidad en los valores de pérdida de suelo, con varios datos atípicos.

Figura 7. Cobertura del suelo reclasificada en los cantones de la provincia de Manabí (a) y diagrama de bigotes que representa las magnitudes de la pérdida del suelo en cada tipo de cobertura (b)



Elaboración propia

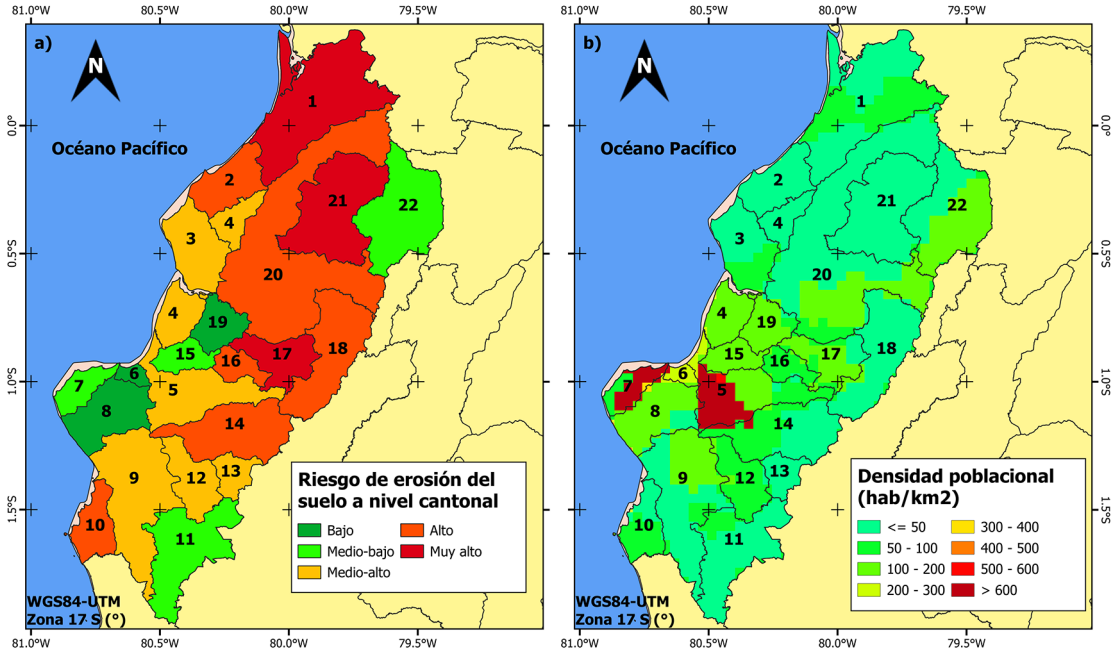
3.4. Riesgo erosivo a nivel cantonal y en función de la densidad poblacional

El análisis del riesgo de erosión del suelo a nivel cantonal en la provincia de Manabí se basa en una combinación de factores biofísicos y demográficos, que juegan un papel clave en la interpretación de los niveles de vulnerabilidad. La Figura 8a muestra cómo el 50% de la provincia presenta un riesgo de erosión entre medio-alto y alto, lo que plantea un escenario preocupante desde el punto de vista ambiental y de gestión del territorio. En particular, los cantones de Bolívar y Flavio Alfaro sobresalen con un riesgo muy alto de erosión, ocupando el 9,09% del total de la provincia. A pesar de esto, la densidad poblacional (Figura 8b) revela una dinámica diferente en cuanto a la exposición de la población a los efectos negativos de la erosión.

Al analizar la relación entre el riesgo erosivo y la densidad poblacional, se observa que, en territorios con baja densidad de población, como es el caso de Flavio Alfaro (con menos de 25 hab/km²), la amenaza de la erosión del suelo para las personas y las infraestructuras es significativamente menor, a pesar de su alto riesgo de erosión según el modelo RUSLE. Esto sugiere que, en cantones con características similares, las políticas de mitigación podrían centrarse más en la preservación de los recursos naturales y en la protección de los suelos, en lugar de implementar medidas costosas de protección para la población. En contraste, en cantones con mayor densidad poblacional, como Portoviejo, la capital provincial, que tiene una densidad

de 326 hab/km², la combinación de una exposición medio-alta al riesgo erosivo y una alta concentración de habitantes en áreas urbanas plantea un riesgo significativamente mayor en términos de daños potenciales a las personas, infraestructuras y actividades económicas.

Figura 8. Mapas de riesgo de erosión de suelo a nivel cantonal (a) y densidad poblacional (b) de la provincia de Manabí



Elaboración propia

Tabla 2. Valores promedio de las tasas de erosión, factores RUSLE e identificación de riesgo erosivo en los cantones de la provincia de Manabí

ID	Factor R (MJ mm/ha h)	Factor C	Factor K (t/MJ mm)	Factor LS	RUSLE (t/ha)	Densidad Poblacional (hab/km²)
1	208,73	0,29	0,06	5,06	18,47	36
2	185,41	0,27	0,05	5,74	16,29	47
3	178,51	0,26	0,05	4,38	10,25	36
4	180,36	0,28	0,05	4,67	12,00	101
5	184,52	0,25	0,05	5,72	13,66	326
6	171,83	0,30	0,05	1,21	3,23	282
7	168,36	0,32	0,05	2,81	7,50	887
8	171,06	0,27	0,05	2,02	4,66	141
9	177,33	0,22	0,05	5,85	11,90	63
10	174,38	0,23	0,05	7,61	15,24	54
11	183,64	0,18	0,06	4,07	7,50	40
12	185,94	0,20	0,06	5,75	12,10	70
13	195,19	0,21	0,06	4,93	11,23	46
14	196,06	0,22	0,06	6,44	15,58	78
15	179,40	0,28	0,05	2,98	7,95	148
16	194,65	0,25	0,05	7,02	18,19	91
17	205,78	0,25	0,06	7,34	21,29	90
18	214,31	0,26	0,06	4,28	14,38	39
19	186,39	0,28	0,05	1,65	4,70	125
20	237,93	0,27	0,07	4,73	15,63	49
21	218,40	0,28	0,06	6,15	23,63	23
22	236,11	0,28	0,07	1,78	7,98	81

Elaboración propia

4. Discusión

4.1. La cobertura del suelo y su influencia en las tasas de erosión

Los resultados de este estudio ponen de manifiesto que la cobertura del suelo en la provincia de Manabí, aunque relevante, no es el principal determinante en las tasas de erosión hídrica. Este hallazgo es coherente con investigaciones previas que señalan que, en regiones tropicales y subtropicales, los factores topográficos y climáticos tienden a tener un mayor peso en la determinación de la vulnerabilidad del suelo frente a la erosión (Lal, 2001; Lal, 2005; Poesen et al., 2003). En particular, el factor R, que mide la erosividad de la lluvia, y el factor LS, que refleja la interacción entre la longitud y la pendiente del terreno, se destacan como los controladores predominantes del proceso erosivo en Manabí.

En cuanto a los bosques, si bien son tradicionalmente considerados como una barrera efectiva contra la erosión debido a su capacidad para interceptar lluvia, reducir la velocidad de escorrentía y mejorar la infiltración de agua en el suelo (Delgado et al., 2021), en este estudio se observa que las mayores tasas de pérdida de suelo se registran en áreas boscosas. Esto, a primera vista, parece contradictorio, pero puede explicarse por la combinación de dos factores clave: la textura del suelo y la intensidad de las lluvias. Los suelos en las zonas boscosas de Manabí presentan una mayor proporción de limo, lo que los hace más susceptibles a la erosión bajo condiciones de precipitación intensa, incluso cuando están cubiertos por vegetación densa. Estudios anteriores (García-Ruiz et al., 2013) han mostrado que, en zonas con alta precipitación, los suelos con alto contenido de limo tienden a perder estabilidad estructural rápidamente durante eventos de lluvia, independientemente del tipo de cobertura.

Por otro lado, las sabanas, que dominan el paisaje de la provincia con un 89,11% de cobertura según los datos satelitales MODIS, muestran una alta variabilidad en las tasas de erosión. Esta variabilidad se debe, en gran medida, a la heterogeneidad en las características topográficas y climáticas de la región, así como a la influencia de las actividades humanas, particularmente la ganadería extensiva y la deforestación para la expansión de áreas de pastizales (Delgado et al., 2023). Estos factores modifican significativamente la capacidad del suelo para resistir los procesos erosivos, creando áreas con tasas de erosión tanto moderadas como extremas dentro de un mismo tipo de cobertura.

Un aspecto crucial a resaltar es la relación entre las tasas de erosión y el factor LS. En áreas donde las pendientes son más pronunciadas, las sabanas presentan tasas de erosión considerablemente más altas, especialmente cuando están expuestas a lluvias intensas y prolongadas, lo que amplifica el efecto de la escorrentía superficial (Delgado et al., 2024). Los estudios realizados en cuencas tropicales han demostrado que las pendientes inclinadas y la longitud de las mismas son factores que incrementan exponencialmente la capacidad erosiva del agua (Moore & Burch, 1986; Desmet & Govers, 1996), lo que explica la presencia de valores atípicos (outliers) observados en los diagramas de bigotes de la cobertura de suelos en esta investigación.

Además, la reclasificación de los tipos de cobertura en tres grandes grupos (bosques, sabanas y tierras de cultivo) ha permitido comprender de manera más integral el comportamiento de los diferentes paisajes frente a la erosión. Aunque los bosques son tradicionalmente asociados con una alta protección contra la erosión, los resultados de este estudio muestran que las condiciones particulares del suelo y las precipitaciones en Manabí pueden superar esta capacidad de protección. Este hallazgo resalta la importancia de no depender únicamente de la cobertura vegetal para el control de la erosión, sino de considerar también las características físicas del suelo y los patrones climáticos específicos de la región.

En contraste, las tierras de cultivo, que representan el 9,31% del área de estudio, presentan tasas de erosión relativamente menores, pero esto puede estar relacionado con prácticas de manejo más intensivas que incluyen la implementación de técnicas de conservación del suelo, como el uso de coberturas vegetales temporales o rotación de cultivos, lo que puede mitigar la erosión en ciertas zonas. No obstante, estas prácticas no están generalizadas ni registradas en toda la región, lo que sugiere la necesidad de fomentar su adopción en áreas agrícolas más amplias para reducir la vulnerabilidad del suelo.

Estos resultados tienen importantes implicaciones para el manejo del suelo y la planificación territorial en la provincia de Manabí. Dado que los factores topográficos y climáticos juegan un papel más determinante que la cobertura del suelo en las tasas de erosión, las políticas de manejo deben centrarse en una gestión integrada del paisaje, que incluya la conservación de las zonas de mayor pendiente, la regulación de la deforestación en áreas vulnerables, y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles. Además, es esencial considerar que la erosión hídrica en Manabí no es solo un fenómeno natural, sino que está fuertemente influenciada por la acción humana, lo que requiere de un enfoque de gestión adaptativa que integre tanto la restauración de ecosistemas como el control de la actividad humana en áreas críticas.

4.2. Implicaciones para la Gestión del Territorio

La clasificación de los riesgos erosivos a nivel cantonal y su interacción con la densidad poblacional ofrece una visión más precisa sobre dónde concentrar los esfuerzos de mitigación y adaptación. En zonas con alta densidad poblacional y riesgo medio-alto, como Portoviejo, es imperativo desarrollar planes de ordenamiento territorial que combinen prácticas de conservación del suelo, la implementación de barreras físicas contra la erosión y políticas urbanas de protección ante eventos extremos. Además, en cantones como Bolívar y Flavio Alfaro, donde el riesgo erosivo es muy alto pero la densidad poblacional es baja, la gestión debe orientarse a la conservación del suelo y la restauración de áreas degradadas, priorizando la recuperación de servicios ecosistémicos.

La Tabla 2 también resalta otras áreas con condiciones similares. Por ejemplo, en Jipijapa, con una densidad de 148 hab/km² y una tasa de erosión de 7,95 t/ha, las medidas deben enfocarse en evitar la expansión urbana en áreas vulnerables y en promover prácticas agrícolas sostenibles que reduzcan el impacto de la erosión en las laderas. De manera similar, Chone, con una densidad de 101 hab/km² y una tasa de erosión de 12,00 t/ha, requiere estrategias tanto para la mitigación de la erosión como para la protección de la infraestructura crítica y los medios de vida de sus habitantes.

4.3. Aspectos limitantes de la investigación

La presente investigación empleó una escala de píxel de 100 m con el fin de generar un modelo compatible con diversas escalas espaciales, especialmente aquellas más gruesas. Dado que el modelo RUSLE utiliza datos de entrada variados, tales como precipitaciones, propiedades del suelo, modelos de elevación y pendientes, e índices de vegetación, y que estos datos se obtienen de diferentes fuentes ráster satelitales, se hace necesario homologar estas diversas resoluciones espaciales a la escala de trabajo de 100 m mediante el uso de software R y QGIS.

Para mejorar la validez de los resultados, se consideró esencial utilizar fuentes de información con una resolución espacial más adecuada, cercana a los 100 m. En la sección 2.2.2, se utilizaron datos con una escala original de 250 m para determinar las propiedades del suelo; en la sección 2.2.3, se estimó el factor de longitud y pendiente con datos de una escala original de 90 m; y en la sección 2.2.4, se calcularon los índices de vegetación a partir de datos con una escala original de 250 m. Sin embargo, no todos los parámetros de entrada disponen de resoluciones espaciales más finas. Particularmente, la base de datos de precipitaciones tiene escalas espaciales mucho mayores que la escala de trabajo, lo que puede introducir incertidumbres al escalar estos datos a 100 m y podría generalizar los resultados, produciendo un efecto visual de píxeles más grandes (sección 2.2.1).

Para representar la cobertura del suelo basada en la vegetación utilizando datos MODIS, se seleccionó la imagen del año 2010 para el análisis, a pesar de que el estudio abarca el período 2001-2020 en su análisis de la erosión del suelo. Esta elección se justifica debido a que los mapas de cobertura están clasificados en 17 tipos distintos, cada uno de ellos identificado mediante un valor numérico específico. Si se realizara un promedio de las coberturas de suelo a lo largo de los 20 años, no se obtendría una caracterización precisa de los tipos de cobertura, ya que los valores resultantes serían números decimales, los cuales no corresponden a ningún tipo de cobertura en particular. En cambio, dichos valores decimales carecerían de significado en el contexto de la clasificación, comprometiendo así la integridad del análisis. Por esta razón, se optó por utilizar un solo año representativo, evitando así distorsiones en la clasificación de los tipos de cobertura del suelo.

En cuanto al acoplamiento entre los archivos ráster de los factores de RUSLE y los vectores de la zona de estudio (divisiones provinciales y cantonales), la irregularidad de los límites políticos, que no están en forma de píxel, genera un fenómeno de dentado en las líneas divisorias, lo que da una apariencia de secciones escalonadas en lugar de una transición suave. Este fenómeno puede generar problemas en el análisis espacial, especialmente debido a la falta de precisión en los límites de los polígonos. No obstante, la elección de una escala espacial de 100 m reduce notablemente el posible sesgo en la interpretación de resultados.

La estimación del Factor P, que corresponde a las medidas de apoyo agrícola, puede estimarse mediante un análisis in situ en todo el territorio manabita, para permitir establecer ciertos programas de mitigación, incluso los que son propios de procesos de cultivos ancestrales, y que mejoren considerablemente las estimaciones de la pérdida del suelo. Sin embargo, este tipo de análisis demanda de gran cantidad de tiempo y recursos económicos, por lo qué, cuantificarlo con el valor de “1” ha sido ampliamente validado en investigaciones basadas en el modelo RUSLE (Pacheco et al., 2019; Delgado et al., 2022; Casanova-Ruiz et al., 2024).

El modelo RUSLE como tal, presenta limitaciones que "simplifican" la compleja realidad de un proceso erosivo mediante un conjunto de ecuaciones y parámetros, lo que provocaría que ciertas condiciones específicas de la superficie del suelo o de la cobertura vegetal no puedan ser representadas con precisión (Delgado et al., 2024) Además, existen otros factores internos que deben tomarse en cuenta y que afectan considerablemente a los efectos generados por la pérdida del suelo, como el factor antropogénico, que se analiza superficialmente en el Factor C y P (que incluso para Ecuador no está debidamente cuantificado al carecer de datos estadísticos de los procesos de cultivo). Sin embargo, es una herramienta muy útil que permite identificar las zonas más propensas a problemas erosivos, y cuyas limitaciones pueden reducirse mediante una correcta y cuidadosa interpretación de resultados.

Estas incertidumbres y limitaciones abordadas en la presente sección, no se perciben como particularmente significativas para la implementación de esta metodología a nivel provincial o nacional en Ecuador. A pesar de ello, se sugiera la introducción de mejoras en el futuro, como la adopción de conjuntos de datos con resoluciones espaciales originales más detalladas, que sean inferiores a los 100 m, con el fin de evitar posibles sesgos derivados de una distribución más generalizada, especialmente para el factor más dinámico espacio-temporalmente, R. Se recomienda que, por parte de las autoridades, se fomente la declaración de cultivos y los procesos empleados durante todo el ciclo de producción, mediante reducción de impuestos o entrega de fertilizantes gratuitos, para que se genere una cultura de registro estadístico y se pueda calcular, en un futuro próximo, el Factor P de manera y correcta y precisa. En cuanto a la cobertura del suelo, y tomando en consideración la gran cantidad de áreas de pastoreo en la provincia de Manabí, se debe regular estas zonas y evitar la propagación descontrolada de este tipo de cobertura, fomentando la reforestación mediante el Gobierno Provincial de Manabí.

5. Conclusiones

La investigación evaluó la erosión del suelo en la provincia de Manabí mediante el modelo RUSLE, marcando la primera aplicación integral de este modelo en todo el territorio manabita. Se identificaron patrones espaciales de erosividad de la lluvia influenciados por la distribución irregular de las precipitaciones, con una clara tendencia a la disminución de la erosividad hacia el Océano Pacífico. El uso de datos de GPCC, MODIS y SoilGRIDS representó una innovación metodológica significativa, permitiendo una estimación más precisa de los factores de erosión en una región con escasa cobertura de estaciones de aforo locales. El Factor C, derivado del NDVI de MODIS, mostró variaciones significativas, con las áreas del norte de la provincia presentando una cobertura vegetal menos favorable. En contraste, el sur, próximo a la provincia de Guayas, exhibió un mejor uso del suelo, evidenciando prácticas de manejo más sostenibles. Sin embargo, el análisis detallado reveló que el Factor C no es el principal determinante de las tasas de erosión en la región. El Factor K presentó una distribución homogénea debido a la composición uniforme del suelo en Manabí, destacándose la arena como el componente predominante. Por otro lado, el Factor LS tuvo un impacto superior en las tasas de erosión, especialmente en áreas con elevaciones mayores. Las tasas de erosión oscilan entre 0,05 t/ha y 179,05 t/ha, con el 59,09% del territorio manabita clasificado con un riesgo erosivo de medio a muy alto. Estos hallazgos subrayan la necesidad urgente de implementar medidas de mitigación adaptadas a las características específicas de cada zona. Flavio Alfaro, aunque con un alto riesgo erosivo, presenta una densidad poblacional baja, sugiriendo que el impacto social podría ser menor en comparación con otras áreas. Este estudio no solo proporciona una base científica sólida para la gestión del suelo en Manabí, sino que también resalta la importancia de un enfoque integrado que considere tanto factores naturales como socioeconómicos. La metodología utilizada puede aplicarse en otras regiones con características geográficas y climáticas similares, lo que la convierte en una herramienta versátil para la evaluación de la erosividad de la lluvia y el manejo de suelos en diversas áreas afectadas por la erosión. Las autoridades locales, tanto en Manabí como en otras zonas con problemáticas similares, pueden utilizar estos resultados para desarrollar estrategias de mitigación efectivas y sostenibles, adaptadas a las condiciones específicas de cada región, y para planificar el uso del suelo de manera más eficiente frente a los desafíos del cambio climático.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Centre de Formation & de Recherche sur les Environnements Méditerranéens (CEFREM-Francia) por proporcionar los instrumentos informáticos necesarios para el desarrollo de la presente investigación. Asimismo, agradecen a los revisores anónimos por sus valiosas sugerencias y comentarios, que contribuyeron significativamente a mejorar la calidad del manuscrito.

Referencias

Al Rammahi, A.H.J., & Khassaf S.I. (2018). Estimation of soil erodibility factor in RUSLE equation for Euphrates River watershed using GIS. *GEOMATE Journal*, *14*(46), 164–169. https://doi.org/10.21660/2018.46.87788

Arias-Muñoz, D. P. (2024). *Efectos de las técnicas de conservación de suelo en la erosión hídrica bajo escenarios de cambio de uso suelo: Caso cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador* [Doctoral thesis, Universidad de Universidad de Zaragoza]. ZAGUAN Repositorio Institucional de Documentos. https://zaguan.unizar.es/record/135476

Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2023). Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. Caso de estudio: cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, (79), 207-230. https://doi.org/10.14198/INGEO.22390

Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J.A.A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N.,, Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A.M., Gessesse, ,G.D., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., ... & Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the total environment*, 780, 146494. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494

Buseto, L., & Ranghetti, L. (2017). MODIStsp: A Tool for Automatic Preprocessing of MODIS Time Series. *Comput. Geosci, 97*, 40-48. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.020

Casanova-Ruiz, G., Delgado, D., & Panchana, R. (2024). Estimación de volúmenes de sedimentos por erosión hídrica empleando el modelo RUSLE en cuencas de la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista de Teledetección*, (63), 1-21. https://doi.org/10.4995/raet.2024.20147

Cover, M.L., & Change, L.C. (1999). *MODIS land cover product algorithm theoretical basis document (ATBD)* version 5.0. MODIS documentation, 42-47

Delgado, D., Sadaoui, M., Pacheco, H., Méndez, W., & Ludwig, W. (2021, May). Interrelations between soil erosion conditioning factors in basins of Ecuador: contributions to the spatial model construction. In *International Conference on Water Energy Food and Sustainability* (pp. 892-903). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3_94

Delgado, D., Sadaoui, M., Ludwig, W., & Mendez, W. (2023). Depth of the pedological profile as a conditioning factor of soil erodibility (RUSLE K-Factor) in Ecuadorian basins. *Environmental Earth Sciences, 82*(12), 286. https://doi.org/10.1007/s12665-023-10944-w

Delgado, D., Sadaoui, M., Ludwig, W., & Méndez, W. (2022). Spatio-temporal assessment of rainfall erosivity in Ecuador based on RUSLE using satellite-based high frequency GPM-IMERG precipitation data. CATENA, 219, 106597. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106597

Delgado, D., Sadaoui, M., Ludwig, W., & Méndez, W. (2024). DEM spatial resolution sensitivity in the calculation of the RUSLE LS-Factor and its implications in the estimation of soil erosion rates in Ecuadorian basins. *Environmental Earth Sciences, 83*(1), 36. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11318-y

Desmet, P., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51, 427–433.

Deutscher Wetterdienst, Servicio Meteorológico Nacional de Alemania (DWD). *Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)*. http://gpcc.dwd.de

dan, K., Munoz, A.B., Solano, R., & Huete, A. (2015). MODIS Vegetation Index User's Guide. *University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab,* 35, 2-33.

Dubey, A. K., Lal, P., Kumar, P., Kumar, A., & Dvornikov, A. Y. (2021). Present and future projections of heatwave hazard-risk over India: A regional earth system model assessment. *Environmental research,* 201, 111573. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111573

Durigon, V. L., Carvalho, D. F., Antunes, M. A. H., Oliveira, P. T. S., & Fernandes, M. M. (2014). NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing, 35*(2), 441-453. https://doi.org/10.1080/01431161.2013.871081

Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, CA (ESRI). Soil property maps for the world produced using machine learning at 250 m resolution (SoilGrids). https://soilgrids.org/

Erazo, B., Bourrel, L., Frappart, F., Chimborazo, O., Labat, D., Dominguez-Granda, L., Matamoros, D., & Mejia, R. (2018). Validation of satellite estimates (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) for rainfall variability over the Pacific slope and Coast of Ecuador. *Water, 10*(2), 213. https://doi.org/10.3390/w10020213

Estupiñán, A., Carvajal, L. F., & Ochoa, A. (2016). Validación de las bases de datos de precipitación del Centro de Climatología de Precipitación Global (GPCC) y de la misión satelital TRMM para Colombia. In *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.

Farhan, Y. & Nawaiseh, S. (2015). Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques. *Environ Earth Sci., 74*, 4649–4669. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4430-7

Ganasri, B.P., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers, 7*(6), 953-961. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007

García-Ruiz, J. M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., & Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology,* 198, 20-36. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023

Gianinetto, M., Aiello, M., Polinelli, F., Frassy, F., Rulli, M. C., Ravazzani, G., Bocchiola, D., Chiarelli, D.D., Soncini, A. & Vezzoli, R. (2019). D-RUSLE: a dynamic model to estimate potential soil erosion with satellite time series in the Italian Alps. *European Journal of Remote Sensing, 52*(sup4), 34-53. https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1669491

Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM-EC). *Cartografía nacional del Ecuador*. https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/

Jahun, B. G., Ibrahim, R., Dlamini, N. S., & Musa, S. M. (2015). Review of soil erosion assessment using RUSLE model and GIS. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare, 5*(9), 36-47. https://core.ac.uk/download/pdf/234660977.pdf

Ji, X., Yao, Y., & Long, X. (2018). What causes PM2. 5 pollution? Cross-economy empirical analysis from socioeconomic perspective. *Energy Policy*, 119, 458-472. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.040

Jimenez, E., Murillo, A., & Delgado, D. (2024). Análisis comparativo de bases de datos de precipitaciones para la provincia de Manabí. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS, 6*(1), 273-287. https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v6i1.957

Karlen, D. L., & Rice, C. W. (2015). Soil degradation: Will humankind ever learn?. *Sustainability, 7*(9), 12490-12501. https://doi.org/10.3390/su70912490

Kaiser, A., Erhardt, A., & Eltner, A. (2018). Addressing uncertainties in interpreting soil surface changes by multitemporal high-resolution topography data across scales. *Land degradation & development, 29*(8), 2264-2277. https://doi.org/10.1002/ldr.2967

Kebede, Y. S., Endalamaw, N. T., Sinshaw, B. G., & Atinkut, H. B. (2021). Modeling soil erosion using RUSLE and GIS at watershed level in the upper beles, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 2, 100009. https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100009

Krishna Bahadur, K. C. (2009). Mapping soil erosion susceptibility using remote sensing and GIS: a case of the Upper Nam Wa Watershed, Nan Province, Thailand. *Environmental geology,* 57, 695-705. https://doi.org/10.1007/s00254-008-1348-3

Lal, R. A. T. T. A. N. (2001). Soil degradation by erosion. *Land degradation & development, 12*(6), 519-539.

Lal, R. (2005). Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Research, 81*(2), 137-142. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.002

Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal, 50*(5), 1294-1298. https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2000). Erosion Soil and Water Assessment Tool Theoretical. *Documentation Texas Agricultural Eksperiment Station*, 625.

Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J. A., & Boll, J. (2015). Spatial Estimation of Soil Erosion Risk by Land-cover Change in the Andes OF Southern Ecuador. *L. Degrad. Dev. 26,* 565–573. https://doi.org/10.1002/ldr.2219

Pacheco, H.A., Méndez, W., & Moro, A. (2019). Soil erosion risk zoning in the Ecuadorian coastal region using geo-technological tools. *Earth Sciences Research Journal, 23*(4), 293–302. https://doi.org/10.15446/esrj.v23n4.71706

Patriche, C. V. (2023). Applying RUSLE for soil erosion estimation in Romania under current and future climate scenarios. *Geoderma Regional,* 34, e00687. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00687

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *CATENA, 50*(2-4), 91-133. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1

Pourrut, P. (1994). *L'eau en Equateur: principaux acquis en hydroclimatologie*. ORSTOM éditions.

Renard, K.G. (1997). *Predicting Soil Erosion byWater: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Agricultural Handbook 703)*. US Department of Agriculture, Washington, DC.

Ruiz Vélez, Á. C. & Pacheco Gil, H. A. (2020). Estimación del Factor C de la RUSLE en la microcuenca del rio Lodana, Ecuador, usando imágenes del satélite Sentinel 2. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, 43*(2), 69-75. https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/33620

Sahu, A., Baghel, T., Sinha, M. K., Ahmad, I., & Verma, M. K. (2017). Soil erosion modeling using Rusle and GIS on Dudhawa catchment. *International Journal of Applied Environmental Sciences, 12*(6), 1147-1158.

Schaaf, C. B., Gao, F., Strahler, A. H., Lucht, W., Li, X., Tsang, T., Strugnell, N. C., Zhang, X., Jin, Y., Muller, J.-P., Lewis, P., Barnsley, M., Hobson, P., Disney, M., Roberts, G., Dunderdale, M., Doll, C., d'Entremont, R., Hu, B., Liang, S., Privette, J.L. & Roy, D. (2002). First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment, 83*(1-2), 135–148. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00091-3

Shen, H., Jiang, Y., Li, T., Cheng, Q., Zeng, C., & Zhang, L. (2020). Deep learning-based air temperature mapping by fusing remote sensing, station, simulation and socioeconomic data. *Remote Sensing of Environment,* 240, 111692. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111692

Sujatha, E. R., & Sridhar, V. (2018). Spatial Prediction of Erosion Risk of a Small Mountainous Watershed Using RUSLE: A Case-Study of the Palar Sub-Watershed in Kodaikanal, South India. *Water, 10*(11), 1608. https://doi.org/10.3390/w10111608

Sulla-Menashe, D., & Friedl, M. A. (2018). *User guide to collection 6 MODIS land cover (MCD12Q1 and MCD12C1) product.* USGS: Reston, VA, USA, 1, 18.

Williams, J.R. (1995). The EPIC Model. Chapter 25. In *Computer Models of Watershed Hydrology* (pp. 909–1000). Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO.

Zhang, Y., Zhang, P., Liu, Z., Xing, G., Chen, Z., Chang, Y., & Wang, Q. (2024). Dynamic analysis of soil erosion in the affected area of the lower Yellow River based on RUSLE model. Heliyon, 10(1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23819