

RIESGO DE EROSIÓN DEL SUELO EN EL CANTÓN MOCACHE APLICANDO ANÁLISIS MULTICRITERIO Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

SOIL EROSION RISK IN THE MOCACHE CANTON APPLYING MULTICRITERIA ANALYSIS AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS.

José Luis Muñoz Marcillo¹, Luis Veas Triana²

RESUMEN

La erosión del suelo es uno de los principales y más extendidos tipos de degradación del suelo, determinada por factores ambientales y antropogénicos, que impactan significativamente en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo su degradación. En consecuencia, a través de esta investigación se buscó evaluar el riesgo de erosión del suelo en el cantón Mocache mediante la aplicación de técnica de análisis multicriterio y el uso de sistemas de información geográfica (SIG). El modelo CORINE incluyó varios criterios para la zonificación del riesgo de erosión potencial y actual, incluida la erosividad, definida por el Índice Modificado de Fournier (IMF) e Índice de Aridez de Bagnouls-Gaussen (IBG); la erodabilidad, integrada por la textura, pedregosidad y profundidad del suelo; la ocupación del suelo; la pendiente-orientación; y cobertura vegetal, mediante la estimación del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI). Se aplicó una consulta a expertos apoyada en Analytic Hierarchy Process (AHP) para definir el aporte de cada criterio al riesgo de erosión. Las capas resultantes fueron combinadas mediante una relación ponderada (álgebra cartográfica) dentro del entorno SIG. Se obtuvo que la pendiente-orientación y erosividad explican en gran parte el riesgo de erosión, con una ponderación del 42,46% y 27,48% en orden, según la evaluación a expertos y el AHP. La alta erosividad estuvo aportada por los factores climáticos predominantes: precipitaciones intensas y altas temperaturas. Además, se obtuvo que el riesgo de erosión potencial y actual representan el 13,1% (7.244 ha) y 10,7% (5.905 ha) de la extensión territorial. Se concluye que los factores físicos-naturales, meteorológicos y las actividades antropogénicas contribuyen al riesgo de erosión potencial y actual del suelo en el cantón Mocache.

Palabras clave: cobertura vegetal, erodabilidad, erosividad, pendiente, uso del suelo.

SUMMARY

Soil erosion is one of the main and most widespread types of soil degradation, determined by environmental and anthropogenic factors, which significantly impact the physical, chemical and biological properties of the soil, favoring its degradation. Consequently, through this research we sought to evaluate the risk of soil erosion in the canton of Mocache through the application of multicriteria analysis techniques and the use of geographic information systems (GIS). The CORINE model included several criteria for the zoning of potential and actual erosion risk, including erosivity, defined by the Modified Fournier Index (MFI) and the Bagnouls-Gaussen Aridity Index (BGI); erodibility, composed of soil texture, stoniness and depth; soil occupation; slope-orientation; and vegetation cover, through the estimation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). An expert consultation supported by Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to define the contribution of each criterion to erosion risk. The resulting layers were combined using a weighted relationship (map algebra) within the GIS environment. It was obtained that slope-orientation and erosivity explain a large part of the erosion risk, with a weighting of 42.46% and 27.48% in order, according to the expert evaluation and the AHP. The high erosivity was contributed by the predominant climatic factors: intense precipitation and high temperatures. In addition, it was found that the potential and current erosion risk represent 13.1% (7,244 ha) and 10.7% (5,905 ha) of the territorial extension. It is concluded that physical-natural, meteorological factors and anthropogenic activities contribute to the risk of potential and current soil erosion in Mocache canton.

Key words: vegetation cover, erodibility, erosivity, slope, land use.

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo UTEQ, Ph.D

² Universidad Técnica Estatal de Quevedo UTEQ, MSc

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es uno de los principales y más extendidos tipos de degradación del suelo, dado que conduce al deterioro del medio ambiente ecológico, al bajo nivel de producción agrícola y el aumento de sedimentos (Fu et al., 2021). Esta erosión se da por la incidencia de diversos factores ambientales y antropogénicos, que impactan significativamente en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo así su degradación. Se sabe que alrededor de 4.900 millones de hectáreas (33%) de suelo a nivel global han sido afectadas por procesos de degradación (Aguirre et al., 2017), principalmente por la combinación de la erosión hídrica y los cambios en los usos del suelo (López et al., 2019).

En Ecuador, las actividades antropogénicas vinculadas al cambio del uso del suelo han incrementado abruptamente los niveles de erosión del suelo durante los últimos años, que sumado a los factores climáticos cambiantes han agravado aún más la problemática (Párraga et al., 2023); ocasionando que el 50% de los suelos del país experimenten procesos erosivos (Jaya, 2023). Entre las principales causas de la erosión del suelo se encuentran: la urbanización, la agricultura y ganadería, y la pérdida de cobertura vegetal (Bravo et al., 2017), que sumado a factores como la pendiente del suelo, la intensidad de las precipitaciones y los tipos de suelo, pueden intensificar aún más este fenómeno (Arias et al., 2022).

La determinación de la erosión del suelo es una tarea multicriterio, que considera un conjunto de variables o factores medioambientales (Khanchoul et al., 2020). La utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de análisis multicriterio ha tenido grandes avances en la evaluación de la erosión del suelo, dado que combinan un conjunto de variables (López et al., 2019).

El Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) es un método ampliamente utilizado para calcular la ponderación de diferentes factores del fenómeno de la erosión del suelo mediante la asignación de pesos relativos a cada factor y su representación a través de cartografía temática (Khanchoul et al., 2020). Existen muchas investigaciones sobre el riesgo de erosión del suelo a diversas escalas espaciales y temporales que han utilizado SIG y AHP para evaluar la

susceptibilidad del suelo ante la erosión hídrica (Delgado et al., 2021).

Los estudios de erosión del suelo en Ecuador son muy escasos y se aplican únicamente a pequeñas regiones o a factores aislados del suelo, generando una enorme incomprensión de esta problemática ambiental (Párraga et al., 2023). Por otra parte, la ausencia de información sobre los procesos erosivos a nivel local impide evaluar objetivamente las tendencias en el riesgo de erosión actual y potencial, y limita las posibilidades de planificación y aplicación de técnicas de conservación del suelo que sean efectivas bajo estas condiciones (Bravo et al., 2017). La base metodológica para responder a esta problemática es el empleo de modelos de predicción a través del análisis de los datos apoyados en SIG (Párraga et al., 2023).

Este estudio aborda la determinación del riesgo de erosión del suelo empleando índices de erosividad, erodabilidad, pendiente y orientación, ocupación del suelo y cobertura vegetal, mediante el método de determinación de riesgos de erosión y calidad del suelo CORINE. Con base en el análisis multicriterio y la distribución espacial de los índices se construirán mapas temáticos usando SIG, mismos que podrán ser utilizados como referencia para el desarrollo de futuras investigaciones y en la toma de decisiones en torno a la conservación del recurso suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

LOCALIZACIÓN.

El sitio de estudio seleccionado corresponde a la circunscripción territorial del cantón Mocache, localizado en la zona céntrica de la provincia de Los Ríos, con coordenadas 1° 11' 02" Latitud Sur, y 79° 30' 20" Longitud Oeste.

ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE EROSIVIDAD, ERODABILIDAD, PENDIENTE Y ORIENTACIÓN, OCUPACIÓN DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL.

Índice de erosividad. La erosividad se calculó integrando dos índices climáticos, el Índice Modificado de Fournier (IMF) y el Índice de Aridez de Bagnouls-Gaussen (IBG) en el modelo CORINE. Para ello se utilizaron datos climáticos de precipitación y temperatura de siete estaciones

meteorológicas para un periodo de 25 años (Tabla 1). El IMF se calculó mediante la ecuación 1 (El-Nady y Shoman, 2017):

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{(Precipitación\ mensual)^2}{Precipitación\ media\ anual} \quad (1)$$

Por su parte, el IBG se calculó mediante la ecuación 2 (Khallouf et al., 2021):

$$IBG = \sum_{i=1}^{12} (2t_i - P_i)K_i \quad (2)$$

donde t_i es la temperatura media; P_i es la precipitación total (anual); K_i es la fracción del mes durante el cual $2t_i - P_i > 0$.

Estación	Código	Altitud (msn m)	Coordenadas UTM	
			Sur	Oeste
Babahoyo	M0051	7	663141	9801317
Caluma	M0129	350	689893	9820860
La Maná	M0124	215	695231	9898663
Pichilingue	M0006	120	671167	9878372
Puebloviejo	M0172	19	662237	9832154
Ventanas INHAMI	M0465	52	670711	9840318
Vinces INHAMI	M0466	14	639054	9828729

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas. Fuente: INHAMI (2022).

Luego de calcular el IMF e IBG para cada estación meteorológica, los resultados fueron interpolados mediante el uso del método Spline y Kriging, en orden. Las capas raster resultantes fueron procesadas utilizando el siguiente procedimiento:



El IMF e IBG fueron reclasificados de acuerdo al siguiente detalle (Tabla 2):

Clase	Rango IMF	Descripción IMF	Rango IBG	Descripción IBG
1	< 60	Muy bajo	0	Húmedo
2	60-90	Bajo	> 0-50	Muy húmedo

3	> 90-120	Medio	> 50-130	Seco
4	> 120-160	Alto	> 130	Muy seco
5	> 160	Muy alto		

Tabla 2. Clasificación del IMF e IBG según Método CORINE. Fuente: Khallouf et al (2021).

Por último, el índice de erosividad se determinó combinando los dos índices climáticos: Erosividad = IMF * BGI (Gurebiyaw et al., 2018), utilizando el siguiente procedimiento:



Luego el índice de erosividad se clasificó como se indica a continuación (Tabla 3):

Clase	Descripción	Rango
1	Bajo	< 4
2	Moderado	4-8
3	Alto	> 8

Tabla 3. Clasificación del índice de erosividad. Fuente: Khallouf et al (2021).

Índice de erodabilidad. Las capas de textura, profundidad y pedregosidad del suelo fueron procesadas mediante la utilización del siguiente procedimiento, dentro del entorno SIG:



Las capas de textura, profundidad y pedregosidad del suelo fueron reclasificadas en distintas clases de acuerdo al índice de CORINE (Tabla 4).

Parámetro	Clase	Índice	Descripción
Textura del suelo	Arcillosas y francas	1	Ligeramente erosionable
	Limos / limo-arcillosas	2	Moderadamente erosionable
	Franco arenosas	3	Altamente erosionable
Profundidad del suelo (cm)	> 75	1	Ligeramente erosionable
	25-75	2	Moderadamente erosionable
	< 25	3	Altamente erosionable
Pedregosidad (%)	Moderadamente pedregoso > 10%	1	Totalmente protegido
	Ligeramente pedregoso 5-10%	2	No totalmente protegido
	Sin pedregosidad < 5%	3	No protegido

Tabla 4. Clasificación de la textura, profundidad y pedregosidad del suelo según Método CORINE. Fuente: Khallouf et al (2021).

La ecuación 3 se usó para calcular la erodabilidad, empleando la función Raster Calculator (El-Nady y Shoman, 2017):

$$ER = \text{clase de textura} * \text{clase de profundidad} * \text{clase de pedregosidad} \quad (3)$$

La erodabilidad del suelo se obtuvo como el producto de estos tres índices: textura, profundidad y pedregosidad (Tabla 5).

Clase	Descripción	Rango
1	Bajo	< 3
2	Moderado	3 - 6
3	Alto	> 6

Tabla 5. Clasificación del índice de erodabilidad. Fuente: Khallouf et al (2021).

Índice de pendiente-orientación. La capa de pendiente y orientación se obtuvo a partir de un modelo de elevación digital (DEM) en el entorno SIG utilizando las herramientas Slope y Aspect de 3D Analyst Tools respectivamente, y luego se clasificaron según el modelo CORINE (El-Nady y

Shoman, 2017). (Tabla 6, 7). La capa de pendiente del suelo fue procesada de acuerdo al siguiente esquema, dentro del entorno SIG:



Clase	Pendiente (%)	Clasificación	Susceptibilidad
1	< 5	Plana	Nula
2	5-12	Suave	Baja
3	12-25	Moderada	Media
4	25-40	Empinada	Alta
5	> 40	Muy empinada	Muy Alta

Tabla 6. Clasificación de la pendiente del suelo según Método CORINE. Fuente: Khallouf et al (2021)

La orientación de la pendiente del suelo fue generada a través del uso de curvas de nivel cada 50 metros utilizando el siguiente procedimiento:



Clase	Orientación (°)	Clasificación	Susceptibilidad
1	-1°	Plana	Nula
2	247,5-360°	Oeste, Noroeste, Norte	Baja
3	112,5-247,5°	Sureste, Sur, Suroeste	Media
4	0-112,5°	Norte, Noreste, Este	Alta

Tabla 7. Clasificación de la orientación de la pendiente del suelo según Método CORINE. Fuente: Khallouf et al (2021).

El índice de pendiente-orientación del suelo se determinó de acuerdo a las clases de pendiente y orientación determinadas (Tabla 8), utilizando el procedimiento descrito a continuación:



Clase	Descripción	Rango
1	Bajo	< 4
2	Moderado	4-8
3	Alto	> 8

Tabla 8. Clasificación del índice de pendiente del suelo. Fuente: Khallouf et al (2021).

Índice de ocupación del suelo. Este índice se generó a través de la capa de usos del suelo del cantón Mocache, generada por MAG-SIGTIERRAS (2018), y se procesó utilizando el siguiente procedimiento:



Este índice se clasificó de acuerdo al grado de susceptibilidad a la erosión en cuatro clases y usos distintos, según método CORINE (Khanchoul et al., 2020) (Tabla 9).

Clase	Ocupación (uso)	Susceptibilidad
0	Antrópico, Agua	Nula
1	Bosques conservados, Cultivos forestales comerciales	Baja
2	Pecuario, Cultivos agrícolas permanentes, Matorrales	Moderada
3	Agrícola, Agropecuario mixto, Tierras improductivas, Suelo desnudo	Alta

Tabla 9. Clases de ocupación del suelo según Método CORINE. Fuente: Khallouf et al (2021).

Índice de cobertura vegetal. Se utilizó la imagen Landsat 9 (OLI-2, TIRS-2) para el área de estudio del periodo junio 2023, generada por el servidor USGS Earth Explorer, a partir de la cual se determinó el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) (Gurebiyaw et al., 2018), utilizando el procedimiento descrito a continuación:



$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (4)$$

donde VIS y NIR representan las mediciones de reflectancia espectral adquiridas en las regiones visible (banda 4) e infrarroja (banda 5) cercana del espectro de ondas electromagnéticas, respectivamente.

Los valores de NDVI oscilaron entre 1 y -1. Los resultados se reclasificaron en cuatro clases distintas de acuerdo al nivel de cobertura, según método CORINE (Tabla 10).

Clase	Cobertura vegetal	Rango NDVI
0	Sin vegetación	-0,052 - 0,15
1	Poca vegetación	0,15 - 0,30
2	Media vegetación	0,30 - 0,50
3	Alta vegetación	> 0,50

Tabla 10. Clases de cobertura vegetal según Método CORINE. Fuente: Khallouf et al (2021).

Predicción del riesgo de erosión actual y potencial del suelo mediante Proceso de Análisis Jerárquico (AHP).

Consulta a expertos. Se realizó una consulta a expertos en el ámbito de la evaluación del riesgo de erosión potencial del suelo empleando análisis multicriterio y SIG. Se seleccionó a un total de veinte expertos de seis áreas profesionales afines al objeto de investigación, con ocupaciones relativas al ámbito académico, investigativo, asesor, técnicos y especialistas. Para ello se aplicó un cuestionario de encuesta conformado por la comparación por pares de cada criterio respecto al nivel de importancia de un criterio sobre otro, asignando pesos a cada emparejamiento, y de esta forma determinar el grado de incidencia de cada criterio en el riesgo de erosión del suelo.

La fiabilidad del cuestionario se calculó a través del coeficiente alfa de Cronbach en el software IBM SPSS Statistics 25 (2017), por medio del cual se expresó la consistencia interna a partir de la correlación entre los ítems. El cálculo de este coeficiente se lo realizó empleando la siguiente ecuación (Rodríguez y Reguant, 2020):

$$\alpha = \frac{(1 - \sum S_i^2 / S_t^2)}{k - 1} \quad (5)$$

Así, k es el número de ítems del instrumento, S_i^2 la varianza de las puntuaciones en el ítem i, y S_t^2 la

varianza de las puntuaciones totales del cuestionario.

Para el Análisis de Componentes Principales por el método de la matriz de correlaciones se utilizó el software IBM SPSS Statistics 25 (2017), cuyo procedimiento se basó en la a) estandarización del conjunto de datos, b) cálculo de la matriz de covarianza y c) cálculo de los valores y los vectores propios de la matriz de correlación para identificar los componentes principales (Greenacre et al., 2022).

Analytic Hierarchy Process (AHP). El método AHP fue aplicado para el proceso de toma de decisiones respecto a los criterios que inciden en el riesgo de erosión del suelo, de acuerdo al siguiente procedimiento (Dos Santos et al., 2019) (Kulakowski, 2020):

- a) Estructura jerárquica del modelo. La estructura del AHP constó de dos niveles de jerarquía de decisión: el primer nivel correspondió al objetivo del análisis (riesgo de erosión potencial del suelo), el segundo nivel acapara a los criterios erosividad, erodabilidad, pendiente-orientación, y ocupación del suelo.
- b) Comparación de los criterios y cálculo de las ponderaciones. Se realizó la comparación por pares entre cada criterio. Los criterios individuales fueron evaluados en función de la escala AHP según el nivel de importancia de un criterio sobre otro (Tabla 11). Esta escala muestra la determinación de la evaluación de los criterios individuales con el índice de preferencia a partir del cual se seleccionaron los criterios para la construcción de la matriz, de acuerdo con la opinión dada por los expertos.

Escala	Nivel de importancia
1	Los criterios son igualmente importantes
3	Importancia media de un criterio sobre otro
5	Importancia fuerte o esencial
7	Importancia demostrada
9	Extremadamente importante
2,4,6,8	Valores intermedios

Tabla 11. Escala de comparación por pares de los criterios según escala AHP. Fuente: Saaty (1990).

Si a la actividad *i* se le asigna uno de los números 2,4,6,8 distintos de cero al compararla con la actividad *j*, entonces *j* tiene el valor recíproco al de la comparación con *i*.

Los resultados de la comparación para cada par de criterios se describieron como un valor entero de 1 (misma importancia) a 9 (importancia extremadamente diferente), donde un número más alto significó que el factor seleccionado fue más importante que el otro factor comparado (Tabla 12).

Criterio	Factor de ponderación (puntuación)									Criterio								
	Más importante			Igual de importante			Menos importante											
X1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	X1
X2	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	X2
X3	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	X3

Tabla 12. Elección de los valores en la escala de Saaty. Fuente: Saaty (1990).

$$A = \begin{matrix} X1 \\ X2 \\ X3 \\ \dots \\ Xn \end{matrix} \begin{pmatrix} X1 & X2 & X3 & \dots & Xn \\ 1 & 4 & 5 & \dots & 5 \\ 1/4 & 1 & 1/2 & \dots & 3 \\ 1/5 & 2 & 1 & \dots & 7 \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/5 & 1/3 & 1/7 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Una vez determinada las ponderaciones individuales, fue necesario crear una matriz, similar a la matriz (A), en donde se muestre el desglose de las ponderaciones individuales de cada criterio (Tabla 13).

	Erosividad	Erodabilidad	Pendiente y Orientación	Ocupación del suelo	Vector Propio
Erosividad	1				
Erodabilidad		1			
Pendiente y Orientación			1		
Ocupación del suelo				1	

Tabla 13. Ponderaciones individuales para cada criterio y vector propio. Fuente: Saaty (1990).

- a) Síntesis de prioridades (índice de consistencia). Antes de realizar el cálculo, fue necesario comprobar coherencia y de este modo evitar las

discrepancias en la comparación por pares de los criterios individuales. La coherencia podrá explicarse en la siguiente comparación: si el criterio X2 es tres veces más importante que el criterio X3 y X1 es tres veces más importante que X2, entonces X1 es seis veces más importante que X3. En este caso, la matriz es coherente.

Una vez elaborada la matriz, se calculó el Índice de Coherencia y el Ratio de Coherencia, según ecuación 13. El valor propio y/o Lamda (λ), se calculó primero para obtener el Índice de Consistencia y el Ratio de Consistencia. Posteriormente, se obtuvo el valor propio dividiendo el total ponderado de la matriz normalizada por el vector propio, y de esta manera evitar incoherencias ($\leq 10\%$ aceptable) respecto al juicio de los expertos.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

Donde, λ_{max} es igual a la media de todos los valores propios de la matriz, y n es el número de criterios de la matriz.

Luego, el Índice de Coherencia fue comparado con el de una matriz aleatoria, el Índice de Coherencia Aleatorio y el Coeficiente de Coherencia, se representan mediante la ecuación 8:

$$CR = \frac{IC}{IR} \quad (8)$$

Así, el Índice de Coherencia es una comparación entre el Índice de coherencia de la encuesta y el Índice de coherencia aleatorio, proporcionado por Satty (1980). El índice aleatorio usado para diferentes tamaños de matriz se describe como sigue (Tabla 14):

n	1	2	3	4	5	6	7	15
I R	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,59
n	8	9	10	11	12	13	14	15
I R	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Tabla 14. Valores de IR para diferentes tamaños de matriz .Fuente: Saaty (1990).

El proceso AHP fue realizado mediante el software SpiceLogic™ Inc., versión 4.2.7 (2024), refactorizado y optimizado para un mejor rendimiento.

Riesgo potencial de erosión del suelo (RPES). Para la obtención del mapa del riesgo de erosión potencial del suelo se utilizó el vector de prioridad de los criterios como peso factorial y, se asignó cada peso a la capa raster de cada índice, utilizando la herramienta Weighted Sum de Spatial Analyst Tools dentro del entorno SIG, de acuerdo con la siguiente ecuación (Gurebiyaw et al., 2018):



$$IR_j = \sum_{i=1}^n w_j v_{ij} \quad (9)$$

Siendo, IR_j es el riesgo de erosión potencial para el área j, w_j es la importancia normalizada del peso dado al criterio j, v_{ij} es el valor de prioridad del área i con respecto al criterio j, n es el número total de los criterios.

Se clasifico en una escala de erosión, que va de 1 (riesgo bajo), 2 (riesgo moderado) y 3 (riesgo alto). Este índice sólo influye por propiedades del suelo y el clima y no tiene en cuenta el posible papel protector de la vegetación, por lo que representa el “peor escenario posible” y puede interpretarse como el riesgo de erosión posible en ausencia de medidas de protección.

Riesgo actual de erosión del suelo. El riesgo actual de erosión del suelo se obtuvo modificando el riesgo de erosión potencial del suelo antes obtenido en función del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) (El-Nady y Shoman, 2017) (Tabla 15). Para la obtención de la capa del riesgo actual, se procedió de la siguiente manera:



	No	Bajo	Moderado	Alto
	0	1	2	3
Índice de riesgo potencial de erosión del suelo	1	0	1	2
Índice de cobertura del suelo	2	0	1	3

Tabla 15. Clases de riesgo potencial de erosión e índice de cobertura por modelo CORINE. Fuente: Khalouf et al (2021).

Propuesta de estrategias de restauración y conservación del suelo en áreas con alto riesgo de erosión. Se definieron estrategias para la restauración de zonas afectadas (suelo desnudo) y de conservación de áreas poco intervenidas (áreas con NDVI alto). Estas estrategias estarán alineadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, y de manera específica con la meta 15.3 “Para 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo”.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EROSIVIDAD.

Índice Modificado de Fournier (IMF). El IMF mostró valores entre 120-320 catalogado como alto y muy alto, con presencia de constantes e intensas precipitaciones (Fig. 1).

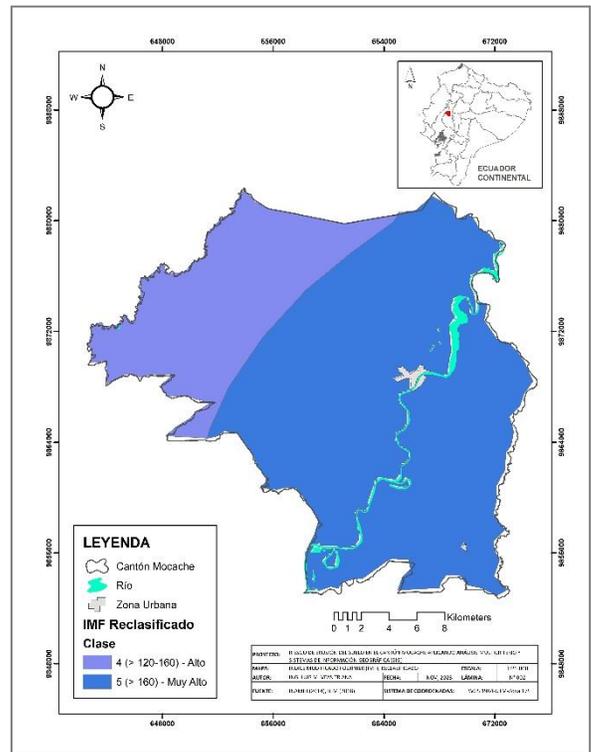


Figura 1. Índice Modificado de Fournier (IMF). Fuente: Elaboración propia

Niveles altos de IMF frecuentemente se asocian a zonas del territorio con mayor escorrentía y mayor riesgo de erosión del suelo (Poggetti et al., 2019); que desencadenan en efectos perjudiciales para la capa superficial del suelo en regiones con pendientes pronunciadas, una cobertura del suelo menos eficaz y sistemas de drenaje ineficientes (Ahmed et al., 2024). El desarrollo de actividades agrícolas en el cantón Mocache se encuentra fuertemente vinculada a la importante cantidad de lluvia recibida durante el año; sin embargo, acrecientan el riesgo de erosión debido a la falta de protección del suelo, como consecuencia del uso de cultivos transitorios y prácticas agrícolas agresivas.

Índice de Aridez de Bagnouls-Gaussien (IBG). El IBG reportó valores con rango de 17,0-75,50 que corresponden a las categorías de muy húmedo y seco. A pesar de esto, el 60,50% del territorio se ubicó en la categoría de muy húmedo, indicativo de que el promedio de las temperaturas de los meses con lluvia no supera el umbral de las precipitaciones, conllevando así a la presencia de humedad en el suelo (Fig. 2).

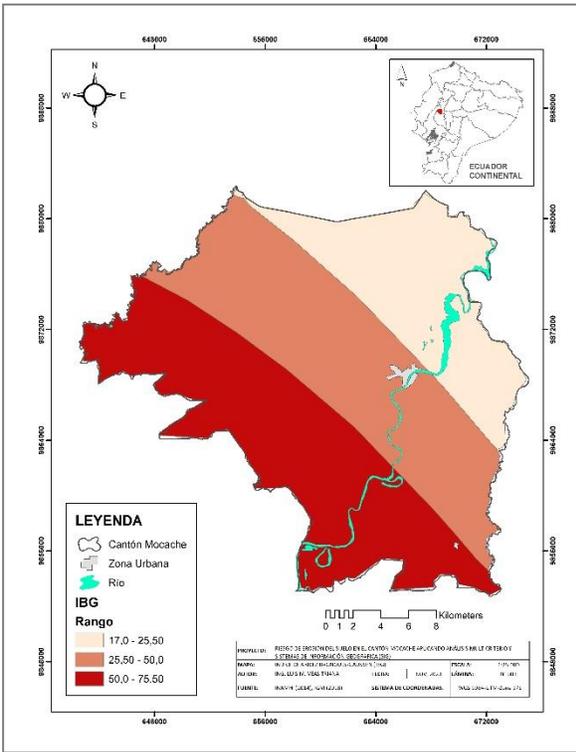


Figura 2. Índice de Aridez de Bagnouls-Gaussien (IBG). Fuente: Elaboración propia

Las zonas con mayor IBG regularmente se vinculan a áreas con condiciones húmedas, presencia importante de recursos hídricos (Ganchozo et al., 2020), abundante vegetación (Hrissanthou y Kaffas, 2019), y baja susceptibilidad a la erosión y desertificación (Ahmed et al., 2024). En la zona de estudio estos niveles de humedad a menudo se ven alterados por el cambio brusco de la ocupación del suelo.

La erosividad del suelo estuvo determinada por el aporte otorgado por el IMF e IBG, dando como resultado un nivel alto (> 8) para el 85,3% del territorio, como consecuencia de la fuerte incidencia de la precipitación y la temperatura en la fragilidad del suelo (Fig. 3).

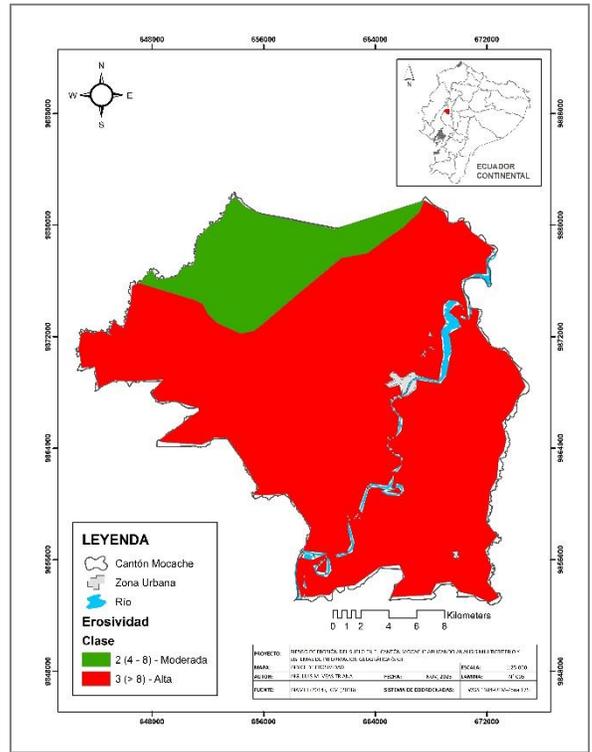


Figura 3. Índice de erosividad climática. Fuente: Elaboración propia.

La erosividad vinculada a los procesos erosivos del suelo, están fuertemente determinados por la estacionalidad de las temperaturas y precipitaciones en regiones tropicales (Ochoa et al., 2016), especialmente en América Latina (Marcillo et al., 2014) (Pacheco et al., 2019), África (El-Nady y Shoman, 2017) y Asia (Namdar et al., 2020b). A menudo los resultados de erosividad varían espacialmente, pero coinciden en gran medida con la distribución de climas del territorio, dando como resultado niveles muy variables de erosividad, con predominancia del nivel moderado y alto (Ganchozo et al., 2020). El uso de estos índices para la estimación de la erosividad se ve ampliamente respaldado por la correspondencia que éstos presentan, a la hora de evaluar el riesgo de erosión del suelo a partir de la incidencia del clima (Taripanah et al., 2022).

ERODABILIDAD.

En cuanto a la erodabilidad, se observan niveles muy variados en todo el territorio, con predominancia de las categorías baja y moderada, que en conjunto ocupan el 91,40% de la

circunscripción territorial, y apenas el 8,60% corresponde a una alta erodabilidad (Fig. 4).

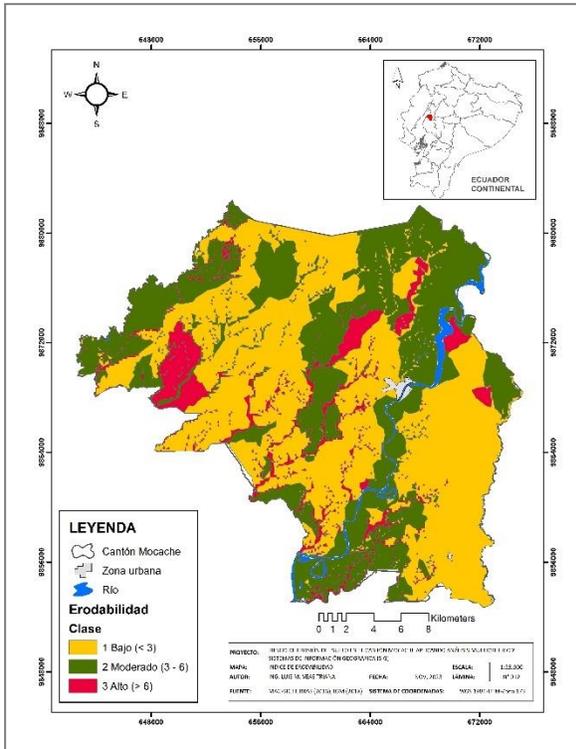


Figura 4. Índice de erodabilidad. Fuente: Elaboración propia.

En el área de estudio la erodabilidad está caracterizada principalmente por la coexistencia de texturas francas, suelos poco profundos y sin pedregosidad, que presentan una mayor susceptibilidad a ser erosionados; a diferencia de las zonas con alto contenido de arcilla lo que sugiere una alta resistencia a la erosión hídrica del suelo debido a la estabilidad de los agregados del suelo (Khallouf et al., 2021).

La erodabilidad del suelo depende principalmente de la estabilidad estructural del suelo (y por lo tanto de su resistencia al desprendimiento de partículas por salpicadura o escorrentía) y su capacidad para absorber la lluvia (Zaitunah et al., 2021). Los suelos con textura media a fina tienen bajas tasas de infiltración, se transfieren menos cuando se exponen a altas velocidades de escorrentía (Namdar et al., 2020b). Además, en suelos poco profundos, la tasa de erosión aumenta debido a la menor posibilidad de retención de agua y al mayor flujo superficial (Aslan et al., 2019). El aporte de la erodabilidad a la determinación del riesgo de

erosión del suelo es vital en zonas con escasa protección vegetal (Marcillo et al., 2014) y suelos con débil estructura (El-Nady y Shoman, 2017), así, el desprendimiento del suelo por efecto de la lluvia y/o flujo superficial tiene una alta incidencia en suelos con mediana o alta erodabilidad (Arias et al., 2022).

PENDIENTE-ORIENTACIÓN.

La susceptibilidad a la erosión del suelo definidas por la pendiente del suelo y el aspecto de la pendiente (orientación), indican que apenas el 5,98% del territorio se encuentra expuesta a posibles eventos erosivos como consecuencia de la incidencia de estos factores (Fig. 5). El 9,49% del territorio del cantón posee pendientes empinadas y muy empinadas (25-40%, > 40%). Respecto a la orientación de la pendiente, se observa que apenas el 7,40% del territorio atañe a una susceptibilidad alta, caracterizadas por orientaciones Norte, Noreste y Este.

En la región de estudio, la topografía juega un papel importante en la erosión del suelo, especialmente por la pobre vegetación existente (Marcillo et al., 2014) (Pacheco et al., 2019), que potencia el efecto erosivo del clima, especialmente de la precipitación (Khallouf et al., 2021). Esto apoya el hecho de que, las laderas de aspecto ecuatorial presentan suelos con contenidos de agua menor que una ladera de exposición polar (Gurebiyaw et al., 2018). Por lo tanto, tiene menos cobertura vegetal y más bajo contenido de materia orgánica (Halefom et al., 2019). El gradiente y el aspecto de la pendiente pueden modificar la temperatura del suelo, la humedad del suelo y las comunidades de vegetación a menor escala, y crear microclimas que difieren significativamente de las condiciones climáticas zonales (Jakšić et al., 2021).

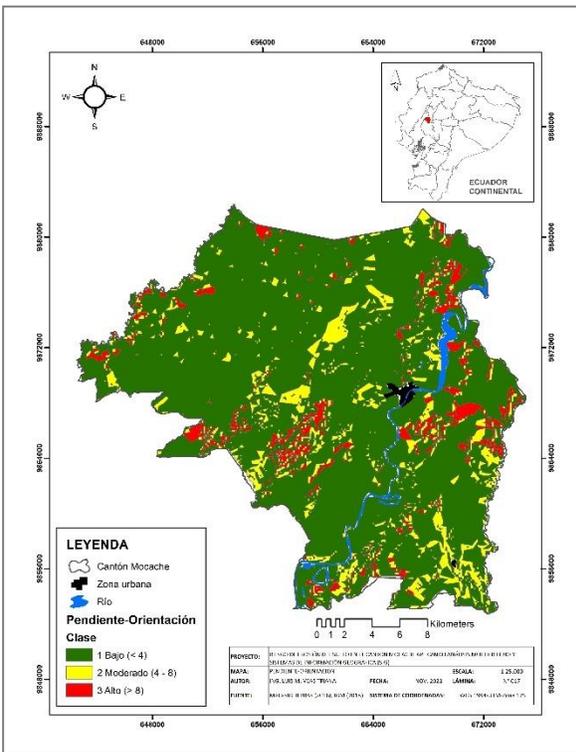


Figura 5. Índice de pendiente-orientación. Fuente: Elaboración propia.

mayor parte de los casos llevan a cabo la queda del desmonte o desechos del cultivo.

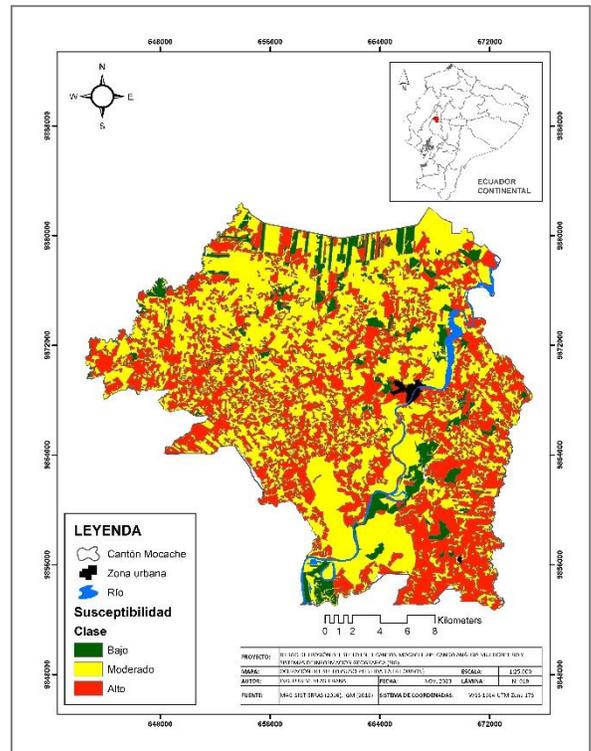


Figura 6. Índice de susceptibilidad a la erosión según ocupación del suelo. Fuente: Elaboración propia.

OCUPACIÓN DEL SUELO Y NDVI.

La ocupación del suelo para el cantón Mocache muestra que el 40,35% del territorio se encuentra destinado a cultivos agrícolas de tipo transitorio: maíz, arroz, maracuyá, soja, piña, tabaco y plátano; además de la preexistencia de zonas con suelo descubierto o tierras improductivas (Fig. 6). El uso del suelo en estas zonas las define como altamente erosionables (altamente susceptible), debido a las prácticas intensivas de laboreo, la escasa cobertura vegetal y la transitoriedad de los cultivos. Esto denota que las áreas donde las actividades agrícolas tradicionales han estado altamente susceptibles a la erosión del suelo (Khallouf et al., 2021), debido a que por lo general son áreas desprovistas de vegetación (Marcillo et al., 2014), y se encuentran sujetas a diversas alteraciones del agroecosistema (Pacheco et al., 2019). Lo expuesto se corroboró a partir de la determinación del NDVI, que dio como resultado que el 97,92% del territorio del cantón se identifica como desprovisto o sin vegetación (Fig. 7), lo cual evidentemente se relaciona con las extensas zonas agrícolas que predominan el territorio, y que en la

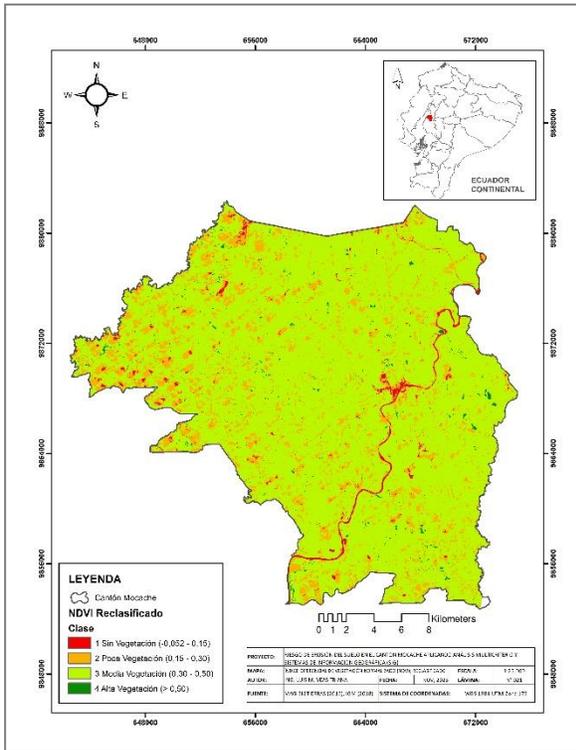


Figure 7. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Fuente: Elaboración propia.

ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP).

La matriz de comparación por pares muestra cada uno de los valores promedios de importancia asignados por los expertos dados a cada criterio evaluados. Estos valores fueron asignados de acuerdo a la escala AHP, propuesta por Saaty (Tabla 16).

	Erosividad	Erodabilidad	Pendiente y Orientación	Ocupación del suelo
Erosividad	1	5	0,5	1
Erodabilidad	0,2	1	0,25	0,5
Pendiente y Orientación	2	4	1	2
Ocupación del suelo	1	2	0,5	1

Tabla 16. Matriz de comparación por pares. Fuente: SpiceLogic™ Inc., 4.2.7 (2024).

El análisis AHP respecto a la opinión de los expertos reveló que la pendiente- orientación es el criterio más importante con un valor de vector propio de 0.490, seguido por la erosividad con un vector propio de 0.310, mientras que el criterio ocupación del suelo obtuvo una puntuación de 0.051. Por último, se obtuvo que la erodabilidad fue el criterio menos valorado, con valor de vector propio de 0.051, siendo así el criterio menos importante para efectos del análisis (Tabla 17).

	Erosividad	Erodabilidad	Pendiente y Orientación	Ocupación del suelo	Vector propio
Erosividad	1	5	0,5	1	0,310
Erodabilidad	0,2	1	0,25	0,5	0,146
Pendiente y Orientación	2	4	1	2	0,490
Ocupación del suelo	1	2	0,5	1	0,051

Tabla 17. Matriz normalizada. Fuente: SpiceLogic™ Inc., 4.2.7 (2024).

El análisis multicriterio a través del uso de la técnica AHP reveló el importante aporte de la pendiente y orientación (42,46%) en la determinación del riesgo de erosión del suelo en el cantón Mocache. Asimismo, se observa una mediana importancia de los criterios de erosividad y ocupación del suelo, con puntuaciones de 27,48% y 21,23%. Por otra parte, la erodabilidad reportó el menor nivel de importancia del análisis, con el 8,83% (Fig. 8). La combinación de la topografía del terreno y el uso del suelo determinan en mayor grado la incidencia de las precipitaciones sobre la capacidad para erosionar el suelo (Halefom et al., 2019) (Namdar et al., 2020a). Por otra parte, el coeficiente de coherencia de la matriz de comparación fue del 3,9% (< 10%), por lo cual se asume que los resultados de la valoración AHP es adecuado (Tabla 18).

Tabla 18. Matriz de ponderación final

Criterio	Vector Propio	Peso final	Ranking
Erosividad	0,310	27,48	2
Erodabilidad	0,146	8,83	4
Pendiente y Orientación	0,490	42,46	1
Ocupación del suelo	0,051	21,23	3

CR = 3,9% < 10%

Tabla 19. Matriz de ponderación final. Fuente: SpiceLogic™ Inc., 4.2.7 (2024).

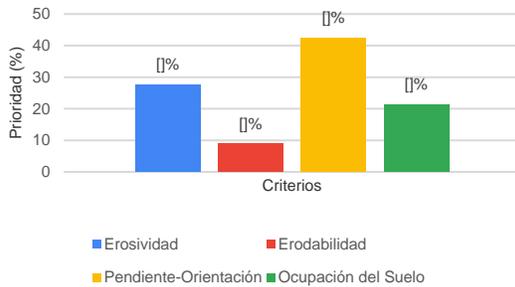


Figura 8. Niveles de prioridad de los criterios evaluados. Fuente: Elaboración propia.

RIESGO DE EROSIÓN POTENCIAL Y ACTUAL.

El Riesgo de Erosión Potencial del Suelo (REPS) del cantón Mocache muestra que el 47,40% (26.252 ha) del territorio posee un riesgo de erosión bajo; seguido del 39,5% (21.905 ha) con un riesgo moderado. Mientras que el 13,1% (7.244 ha) del cantón se identificó con un riesgo de erosión alto (Fig. 9).

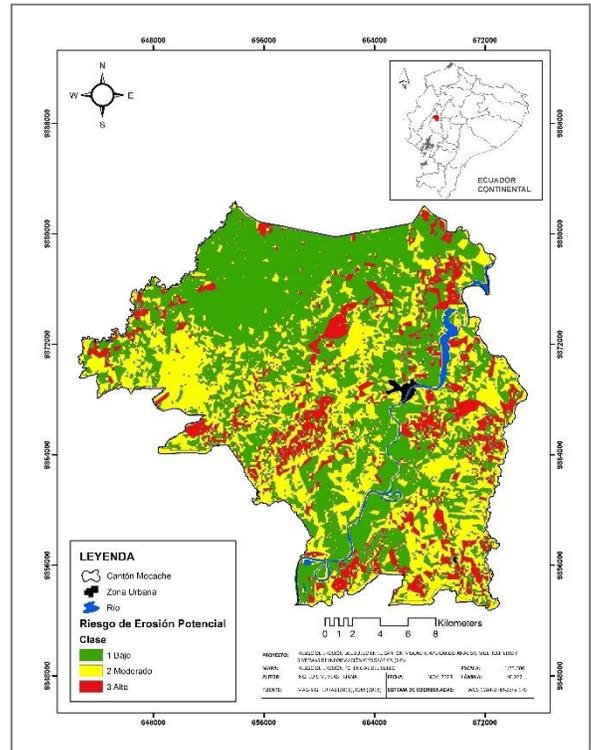


Figura 9. Riesgo de Erosión Potencial del Suelo. Fuente: Elaboración propia.

En contraste, se identifican niveles de erosión potencial muy altos (75,45%) a partir de factores erosividad, erodabilidad y pendiente del suelo (Gurebiyaw et al., 2018). El riesgo alto de erosión potencial se relaciona con zonas agrícolas y suelo poco protegido, y condiciones ambientales físicas, independientemente del uso actual del suelo (El-Nady y Shoman, 2017). A diferencia de las áreas con bosques y cultivos agroforestales que se proyectan con niveles más bajos de erosión, a pesar de la coexistencia de condiciones climáticas extremas (fuertes precipitaciones) (Namdar et al., 2020a).

El Riesgo Actual de Erosión del Suelo (RAES) del cantón Mocache revela que, el 50,4% (27.943 ha) del territorio posee un riesgo actual de erosión bajo, seguido del 38,9% (21.553 ha) catalogado con riesgo de erosión moderado, mientras que el 10,7% (5.905 ha) del cantón mostró un riesgo alto (Fig. 10).

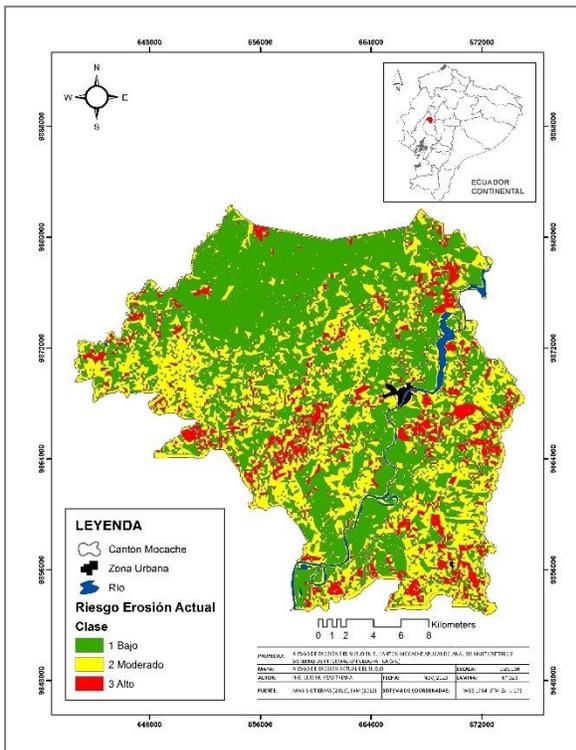


Figura 10. Riesgo de Erosión Actual del Suelo. Fuente: Elaboración propia.

A menudo, las zonas con alto riesgo de erosión potencial se caracterizan por el agroecosistema mixto que indica la combinación de diferentes usos del suelo como actividades agrícolas y forestales (Poggetti et al., 2019). Por lo tanto, se obtuvo una alta tasa de erosión en las áreas cultivadas (57%), mientras que las áreas forestales tienen una buena protección del suelo (43%) (Khallouf et al., 2021). Dado que, la diferencia fundamental entre los modelos REPS y RAES es que el modelo RAES evalúa el impacto de la cobertura vegetal en la erosión del suelo. Por tanto, el riesgo de erosión es siempre mayor en los mapas REPS (Khallouf et al., 2021). Esto guarda relación con lo identificado en este estudio, en donde el nivel más extremo de REPS es 2,4% mayor al RAES. De ahí, que la diferencia entre las áreas de riesgo potencial y actual (real) de erosión del suelo refleja la influencia protectora proporcionada por la actual cobertura del suelo (Gurebiyaw et al., 2018).

CONCLUSIONES

El territorio del cantón Mocache presenta condiciones físico-naturales y climatológicas que

favorecen el riesgo de erosión del suelo en un escenario potencial y actual, caracterizadas por precipitaciones intensas, altas temperaturas, niveles de pendiente superiores a 25% y escasa vegetación, cuyos efectos en la degradación del suelo se ven intensificados por las actividades antropogénicas insostenibles, sobre todo en las áreas rurales, en donde la propensión del riesgo es aún mayor.

El análisis multicriterio revela que la pendiente-orientación fue el criterio que mayor aporta al riesgo de erosión del suelo, con un valor de importancia del 42,62%, guardando así relación con referencias científicas en torno a la erosión del suelo y la realidad del territorio del cantón Mocache. Además, se obtuvo que el riesgo de erosión potencial y actual representan el 13,1% (7.244 ha) y 10,7% (5.905 ha) de la extensión territorial.

Las estrategias de conservación y preservación del suelo han sido planteadas bajo un enfoque de eficiencia y sostenibilidad de la gestión de las tierras agrícolas y forestales del territorio, basadas en la disminución de la incidencia de la pendiente y precipitación durante el establecimiento de los cultivos, la reutilización de residuos vegetales como capa protectora del suelo y el incremento de la cobertura vegetal a través de la asociación de cultivos. Por otra parte, han sido pensadas de acuerdo a la capacidad técnica, económica-financiera y a la realidad territorial de las unidades de producción campesinas, de modo que aparte de preservar y/o conservar el suelo, se constituyan en fuentes de subsistencia para la ruralidad.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, C. A. et al. Improving identification of areas for ecological restoration for conservation by integrating USLE and MCDA in a GIS-environment: A pilot study in a priority region Northern Mexico. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, vol. 6, no. 9, pp. 262. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi6090262>.

Ahmed, A. H. et al. Geospatial Assessment of Aridity and Erosivity Indices in Northwest Somalia Using the Corine Model. *Europe PubMed Central*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3960966/v1>.

- Arias, P., Saz, M. A., Escolano, S. 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*, 2022, vol. 79, pp. 207-230.
- Aslan, Z. et al. Effects of climate change on soil erosion risk assessed by clustering and artificial neural network. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, vol. 176, pp. 937-949. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2010-y>.
- Bravo, C. et al. Indicadores morfológicos y estructurales de calidad y potencial de erosión del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la Amazonía ecuatoriana. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 247.
- Delgado, I. R., Iglesias, H. I. P. y Batista, R. M. G. (2021). Degradación del suelo en sistemas agrícolas de la granja Santa Inés, provincia de El Oro, Ecuador. *Universidad y Sociedad*, 13(S2), 557-564.
- Dos Santos, P. H., Neves, S. M., Sant'Anna, D. O., De Oliveira, C. H. y Carvalho, H. D. (2019). The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications. *Journal of Cleaner Production*, 212, 119-138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.270>.
- El-Nady, M. A. y Shoman, M. M. (2017). Assessment of soil erosion risk in the basin of wadi maged in northern west coast of Egypt using corine model and gis techniques. *Egypt. J. Soil Sci.*, 57(1), 31-45. DOI: <https://doi.org/10.21608/EJSS.2017.3587>.
- Fu, A., Cai, Y., Sun, T. y Li, F. (2021). Estimating the impact of land cover change on soil erosion using remote sensing and GIS Data by USLE model and scenario design. *Scientific Programming*, 2021, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6633428>.
- Ganchozo, A. R. C., Ormaza, A. M. G., Suarez, R. A. M. y Bowen, L. M. R. (2020). Estimación de la erosividad en la provincia de Manabí con el método CORINE. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 7(1). DOI: <https://doi.org/10.46377/dilemas.v35i1.2260>.
- Greenacre, M., Groenen, P. J. F., Hastie, T., D'Enza, A. I., Markos, A. y Tuzhilina, E. (2022). Principal component analysis. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1), 100. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00184-w>.
- Gurebiyaw, K., Addis, H. K. y Teklay, A. (2018). Assessment of spatial soil erosion susceptibility based on the CORINE model in the Gumara-Maksegnit watershed, Ethiopia. *Journal of Natural Resources and Development*, 8, 38-45.
- Halefom, A., Teshome, A. y Sisay, E. (2019). GIS-based MCDA model to assess erosion sensitivity in Gumara watershed, Blue Nile, Basin Ethiopia. *Sciences*, 12(2), 61-70.
- Hrissanthou, V. y Kaffas, K. (2019). Soil Erosion: Rainfall Erosivity and Risk Assessment. *IntechOpen*. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.85937>.
- Jakšić, S., Ninkov, J., Milić, S., Vasin, J., Živanov, M., Jakšić, D. y Komlen, V. (2021). Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. *Sustainability*, 13(15), 8332. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13158332>.
- Jaya, J. (2023). Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 15(1), 26-39.
- Khallouf, A., Talukdar, S., Harsányi, E., Abdo, H. G. y Mohammed, S. (2021). Risk assessment of soil erosion by using CORINE model in the western part of Syrian Arab Republic. *Agriculture & Food Security*, 10, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40066-021-00295-9>.
- Khanchoul, K., Balla, F. y Othmani, O. (2020). Assessment of soil erosion by rusle model using gis: A case study of chemorah basin, Algeria. *Malaysian Journal of Geosciences (MJG)*, 4(2), 70-78. DOI: <https://doi.org/10.26480/mjg.02.2020.70.78>.
- Kulakowski, K. (2020). Understanding the analytic hierarchy process. *CRC Press*.
- López, E. M., Torres, E., López, L., Flores, Á. D., Peña, R. D. y López, J. F. (2019). Estimation of soil erosion using USLE and GIS in the locality of Tzicatlacoyan, Puebla, México. *Soil and Water Research*, 15(1), 9-17. DOI: <https://doi.org/10.17221/165/2018-SWR>.
- Marcillo, J. L. M., Morante, J. y Miranda, P. (2014). Erosión potencial por reconversión productiva en

subcuenca Llay-Llay, Chile: Aplicación de unidades de respuesta a la erosión. *Revista Ciencia y Tecnología*, 7(2), 35-47.

Namdar, F., Mahmoudi, S., Ouri, A. E., & Pazira, E. (2020a). Investigación del efecto de los cambios en el uso de la tierra en la erosión del suelo utilizando técnicas basadas en RS-GIS y AHP-Fuzzy (Estudio de caso: Qaresu Watersu, Ardabil, Irán). *Nexo Revista Científica*, 33(2), 525-538. <https://doi.org/10.5377/nexo.v33i02.10789>

Namdar, F., Mahmoudi, S., Ouri, A. E., & Pazira, E. (2020b). Investigating the effect of land use changes on soil erosion using RS-GIS and AHP-fuzzy based techniques (Case study: Qaresu watershed, Ardabil, Iran). *Nexo*, 33(02), 525-538. <https://doi.org/10.5377/nexo.v33i02.10789>

Ochoa, P. A. at al, Fries, A., Mejía, D., Burneo, J. I., Ruiz-Sinoga, J. D., & Cerdà, A. (2016). Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena*, 140, 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.011>

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>

Párraga, A. J., Tejena, Á. A., & Gutiérrez, D. A. (2023). Análisis de la distribución espacial de la erodabilidad del suelo en la cuenca del Río Esmeraldas-Ecuador. *Polo Del Conocimiento*, 8(2), 82-95. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i2>

Poggetti, E., Cencetti, C., De Rosa, P., Fredduzzi, A., & Rivelli, F. R. (2019). Sediment Supply and Hydrogeological Hazard in the Quebrada De Humahuaca (Province of Jujuy, Northwestern Argentina)-Rio Huasamayo and Tilcara Area. *Geosciences*, 9(11), 483. <https://doi.org/10.3390/geosciences9110483>

Rodríguez, J., & Reguant, M. (2020). Calcular la fiabilidad de un cuestionario o escala mediante el SPSS: el coeficiente alfa de Cronbach. *REIRE Revista d'Innovació i Recerca En Educació*, 13(2), 1-13. <https://doi.org/10.1344/reire2020.13.230048>

Taripanah, F., Ranjbar, A., Vali, A., & Mokarram, M. (2022). Soil Erosion Risk Assessment Using CORINE Model in Kharestan Watershed, Fars Province. *Desert Ecosystem Engineering*, 9(29),

59-74. <https://doi.org/10.22052/DEEJ.2020.9.29.41>

Zaitunah, A., Samsuri, & Sahara, F. (2021). Mapping and assessment of vegetation cover change and species variation in Medan, North Sumatra. *Heliyon*, 7(7), e07637. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07637>