
Análisis de riesgos por deslizamientos en la vía Chillanes–San Pablo de Atenas

Risk analysis of landslides along the Chillanes–San Pablo de Atenas Road

Jhoselyn Estefania Mantilla Quintana¹, David Alexander Monteros Pazmiño²

¹Estudiante Universidad Estatal de Bolívar

²Docente Universidad Estatal de Bolívar

Resumen

Este estudio analizó el riesgo por deslizamientos en la vía Chillanes-San Pablo de Atenas, en la provincia de Bolívar, Ecuador. El objetivo fue identificar los factores físicos y territoriales que dictan la inestabilidad de las laderas, buscando transformar este diagnóstico en una herramienta práctica para la gestión preventiva de la infraestructura vial. Para ello, se integraron Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), estructurando el trabajo en cinco etapas clave, desde la recopilación y limpieza de datos geoespaciales, hasta la validación estadística mediante la curva ROC. En el modelo se priorizaron tres variables determinantes: pendiente, litología y distancia a la red vial, procesadas bajo una resolución de 12,5 m y contrastadas contra un inventario real de eventos de remoción en masa. Los resultados evidenciaron que la pendiente se consolidó como el factor crítico con una ponderación de 0,724, dejando a la litología (0,193) y a la proximidad a la vía (0,083) en un segundo plano. El modelo identificó 49 tramos críticos con niveles de susceptibilidad alta y muy alta, concentrados en el sector Perezán, específicamente entre los kilómetros 13 y 14. Dado que el 17,8 % del área total presenta este nivel de amenaza y que la validación arrojó un valor AUC de 0,885, se considera que el modelo posee una capacidad predictiva muy favorable. En conclusión, esta metodología no solo ofrece un soporte técnico confiable para priorizar el mantenimiento y monitoreo en este corredor andino, sino que sienta las bases para ser replicada en otras zonas montañosas que compartan condiciones geomorfológicas similares.

Palabras clave: Movimientos en masa, AHP, susceptibilidad, validación ROC, gestión de riesgos

Recibido: 17 de marzo de 2026 – Revisión aceptada: 20 de mayo de 2026 – Fecha de publicación: 01 de septiembre 2026

Correspondiente al autor: jmantilla@mailes.ueb.edu.ec

Abstract

This study analyzed the risk of landslides along the Chillanes-San Pablo de Atenas road in Bolívar Province, Ecuador. The objective was to identify the physical and territorial factors that contribute to slope instability, with the aim of transforming this assessment into a practical tool for the preventive management of road infrastructure. To this end, Geographic Information Systems (GIS) were integrated with the Analytic Hierarchy Process (AHP), structuring the work into five key stages, from the collection and cleaning of geospatial data to statistical validation using the ROC curve. The model prioritized three key variables: slope, lithology, and distance from the road network, processed at a resolution of 12.5 m and validated against an actual inventory of mass movement events. The results showed that slope emerged as the critical factor with a weight of 0.724, leaving lithology (0.193) and proximity to the road (0.083) in the background. The model identified 49 critical sections with high and very high susceptibility levels, concentrated in the Perezán sector, specifically between kilometers 13 and 14. Given that 17.8% of the total area presents this level of threat and that the validation yielded an AUC value of 0.885, the model is considered to have a very favorable predictive capacity. In conclusion, this methodology not only offers reliable technical support for prioritizing maintenance and monitoring in this Andean corridor but also lays the groundwork for replication in other mountainous areas with similar geomorphological conditions.

Key words: Mass movements, AHP, susceptibility, ROC validation, risk management

Introducción

Los deslizamientos constituyen una de las amenazas geodinámicas de mayor incidencia en los territorios andinos, donde la combinación de pendientes fuertes, lluvias intensas, meteorización de materiales y alteraciones antrópicas sobre laderas y taludes incrementa de forma sostenida la inestabilidad del terreno. En el contexto ecuatoriano, la inestabilidad de la infraestructura vial de montaña representa un desafío crítico. Las carreteras a menudo deben sortear relieves abruptos y sistemas de drenaje complejos, donde la intervención

humana, mediante cortes de talud, se suma a una hidrología inestable, creando el escenario perfecto para procesos recurrentes de saturación hídrica. Esta dinámica no solo compromete la conectividad territorial, sino que incrementa los costos de mantenimiento y, lo más preocupante, eleva la exposición de las comunidades locales a interrupciones prolongadas del tránsito (Secretaría Nacional De Gestión de Riesgos, 2025).

La vigencia de esta problemática es innegable. Según cifras de la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (2025), entre el 1 de enero

y el 9 de abril de 2025, se contabilizaron 2.574 eventos adversos vinculados a las lluvias, de los cuales un 40,52 % correspondió directamente a deslizamientos. Al cerrar el balance anual, esta tendencia se mantuvo, con 4.443 eventos registrados y los deslizamientos consolidándose como la amenaza más recurrente (41,46 %). Más que incidentes aislados, estos números revelan una manifestación sistémica del riesgo que afecta a provincias, cantones y, sobre todo, a los corredores estratégicos de movilidad.

Bajo este escenario, la vía Chillanes-San Pablo de Atenas, en la provincia de Bolívar, se perfila como un caso de estudio relevante. Su localización en el medio interandino, caracterizado por una topografía accidentada y una alta sensibilidad geomorfológica, la convierte en un área natural de inestabilidad. Un ejemplo claro fue el deslizamiento reportado por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en el kilómetro 13: un evento de gran magnitud que movilizó cerca de 76.500 m³ de material a lo largo de 500 metros, provocando un cierre total de la vía debido a la saturación extrema del talud. Este suceso expone las condiciones estructurales de fragilidad del corredor y subraya la urgencia de transitar hacia un enfoque preventivo (Ministerio de Infraestructura y Transporte, 2026).

En el ámbito académico ecuatoriano, se ha presenciado un avance significativo en la aplicación de modelos de susceptibilidad a deslizamientos en carreteras, particularmente en el complejo contexto de las carreteras andino-amazónicas. Un ejemplo claro es el estudio en la vía Puyo-Tena, donde se identificó que el 21,25 % del corredor (17 km) presenta una alta probabilidad de inestabilidad, logrando

una precisión de validación ROC-AUC del 83,7%. Paralelamente, una investigación de 2026 sobre la vía Alóag-Santo Domingo destaca cómo la integración de la geomática, el análisis multicriterio y la lógica difusa ha permitido transitar hacia modelos dinámicos y actualizables. Estos antecedentes son fundamentales, pues marcan un cambio de paradigma, donde el análisis espacial deja de ser un simple ejercicio descriptivo, para convertirse en una herramienta estratégica, orientada a optimizar recursos y fortalecer la toma de decisiones institucionales (Cargua et al., 2024).

A pesar de estos avances, el caso de la vía Chillanes-San Pablo de Atenas presenta retos particulares. Se han detectado vacíos técnicos importantes, especialmente en lo que respecta a las propiedades resistente de los geomateriales y a la idoneidad de las medidas de estabilización propuestas para las laderas más críticas. De hecho, estudios recientes en esta misma ruta advierten que la carencia de información geotécnica detallada ha frenado la implementación de soluciones de sostenimiento a la altura de la magnitud del problema (Cuji, 2025). Esta brecha de conocimiento subraya la pertinencia científica de este estudio y enfatiza su utilidad práctica, constituyendo un paso necesario para mejorar la seguridad vial, la planificación territorial y la protección efectiva de la población usuaria.

En este marco, el objetivo general de la investigación es analizar el riesgo por deslizamientos en la vía Chillanes-San Pablo de Atenas. Mediante la identificación exhaustiva de los factores físicos y territoriales que condicionan la inestabilidad, se busca

generar un insumo técnico que sirva como eje articulador para la prevención, la gestión del riesgo y la toma de decisiones informadas en la infraestructura vial.

El aceite esencial de *Clinopodium tomentosum* ha demostrado una efectividad del 100 % contra larvas de *Premnotrypes vorax* en solo 24 horas (Tubon et al., 2020). El aceite esencial de las partes aéreas de *Minthostachys mollis* elimina al 100 % de la plaga *Hypothenemus hampei* en 18 horas, debido a sus propiedades neurotóxicas selectivas (De Albuquerque et al., 2024).

Metodología

El rigor metodológico de esta investigación se fundamenta en la integración estratégica de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP). Esta combinación no es casual; cuenta con un amplio respaldo en la literatura técnica como una metodología muy eficaz para evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa, ya que permite convertir variables complejas, de origen geomorfológico, geológico e hidrometeorológico, en productos cartográficos cuantitativos y precisos. Para garantizar la coherencia y reproducibilidad del estudio, se estructuró el proceso en cinco fases (ver Fig. 5), las cuales se sintetizan en el siguiente flujo de trabajo:

(i) compilación y homogeneización de datos geoespaciales; (ii) estandarización de criterios mediante una escala de valoración del 1 al 9; (iii) ejecución del análisis AHP para la determinación de pesos específicos; (iv) superposición ponderada de capas dentro del entorno SIG; y (v) validación del modelo

mediante el análisis de la curva *Receiver Operating Characteristic* (ROC) y el coeficiente *Area Under the Curve* (AUC). Este enfoque metodológico es una respuesta a las mejores prácticas actuales en la gestión de corredores viales andinos. Investigaciones recientes ratifican la validez de este enfoque, obteniendo niveles de precisión que superan los 0,85 en el índice AUC y ratios de consistencia satisfactorios, situados por debajo del umbral crítico de 0,1 (Saaty, 1977; Reichenbach et al., 2018; Cargua et al., 2024; Zhang et al., 2024).

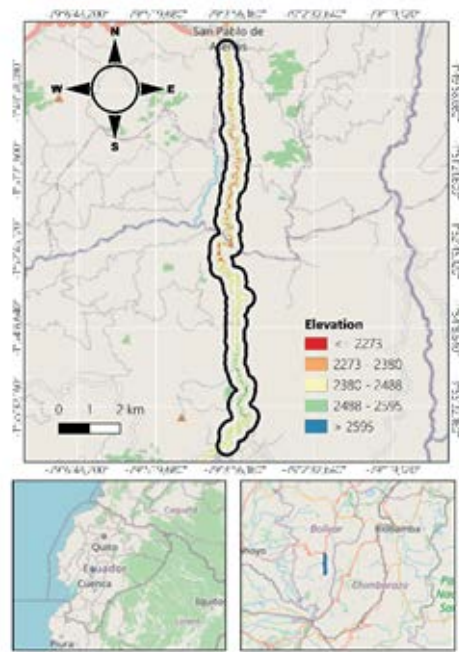
Área de Estudio

El área de estudio se centra en el corredor vial Chillanes-San Pablo de Atenas, una ruta estratégica situada en la provincia de Bolívar, dentro de la región interandina ecuatoriana (ver Fig. 1). A lo largo de sus 21 kilómetros de extensión, la vía se despliega sobre un relieve marcadamente hostil, definido por pendientes que superan los 35°, además de una red densa de quebradas profundas y valles estrechos. Este paisaje, con elevaciones que fluctúan entre los 520 y los 2.480 m.s.n.m., constituye un factor determinante en la inestabilidad recurrente de las vertientes.

Desde una perspectiva climática, el corredor está expuesto a fuertes precipitaciones, con registros anuales que oscilan entre los 1.800 y 2.200 mm. La distribución de estas lluvias no es uniforme; la alta concentración observada entre enero y abril acelera los procesos de saturación hídrica e infiltración, convirtiéndose en el principal motor de los eventos de remoción en masa. En síntesis, la interacción entre la geología local, marcada por depósitos volcánicos altamente

alterables, la topografía escarpada y un clima de alta pluviosidad, perfila este sector como una zona de elevada vulnerabilidad, cuya dinámica exige un estudio técnico detallado.

Figura 1. Tramo de la vía San Pablo de Atenas – Chillanes



Inventario de Deslizamientos de Tierra

La elaboración de un inventario detallado es un paso crítico en cualquier estudio de estabilidad, pues, como sugieren Liu et al. (2018), permite caracterizar con precisión la dinámica espacio-temporal de los movimientos en masa, definiendo aspectos clave como su ubicación, magnitud y tipología. La calidad de este registro es, en última instancia, el cimiento sobre el cual se construye todo el proceso de modelación de la susceptibilidad y la evaluación del riesgo.

Bajo esta premisa, en el corredor Chillanes-San Pablo de Atenas se desarrolló un reconocimiento geoespacial exhaustivo que abarcó los 21 km de la vía principal,

sumando 4 km adicionales en la ruta lateral hacia San Pablo. Cada punto de inestabilidad detectado fue georreferenciado con precisión técnica y clasificado cuidadosamente, tomando en cuenta tanto el contexto litológico del sector como la tipología específica de cada movimiento observado (Tabla 1).

Tabla 1. Registro de movimientos en masa más significativos suscitados en el área de estudio.

Fig.	Longitud (°)	Latitud (°)	Sector	Formación geológica	Tipo de deslizamiento
2	-79.06730	-1,8750	km3 (tramo San Pablo–Chillanes)	Depósitos coluviales modificados	Deslizamiento circular
4	-79.06345	-1,8940	km 14 (Perezán)	Andesita fracturada	Deslizamiento mixto
3	-79.06380	-1,8935	km 13 (Perezán)	Andesita fracturada	Flujo de tierra masivo

Fuente: Preparado por los autores a partir de la revisión de boletines de informes de carretera, (MIT, 2025)

Para asegurar la fiabilidad del inventario, se realizó una triangulación de datos combinando el análisis de imágenes satelitales, la revisión de boletines oficiales del MIT y verificaciones in situ. En este proceso de depuración, se seleccionaron solo aquellos eventos con límites definidos, cuya precisión espacial fuera coherente con la resolución de 12,5 m del Modelo Digital de Elevación (DEM). Este conjunto de datos, rigurosamente validado, constituyó el insumo crítico para la calibración y posterior validación del modelo de susceptibilidad.

Factores Condicionantes (Capas Temáticas)

La investigación se nutre de datos oficiales de instituciones clave como el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), el Instituto de Investigación Geológica y Energética (IIGE), la SNGR y el MIT, sintetizados en la Tabla 2. Para el análisis, se definen como variables críticas la pendiente, la litología y la proximidad a la red vial; una selección que no es aleatoria, sino que responde tanto a la realidad observada en campo como a la disponibilidad y calidad de la cartografía temática oficial.

La literatura científica internacional es consistente al señalar que la distribución

de los movimientos en masa es el resultado de una compleja interacción entre factores morfoestructurales, dinámicas hidrológicas y la huella antrópica. En este contexto, la litología y la pendiente se consolidan como los condicionantes con mayor peso explicativo, mientras que variables como la cercanía a cauces hídricos y carreteras actúan como factores secundarios al comprometer la estabilidad local del talud. Una vez procesadas, estas variables se transformaron en capas temáticas rasterizadas para alimentar el modelo SIG-AHP.

Si bien el método AHP es una herramienta robusta y de amplia aceptación, conlleva limitaciones inherentes, como la subjetividad en el juicio experto y una alta sensibilidad ante variaciones en la ponderación de los pesos. Es precisamente esta restricción la que ha fomentado el auge de modelos híbridos, como el AHP-RF o el AHP-SVM, orientados a mitigar el sesgo predictivo (Reichenbach et al., 2018; Li et al., 2024); sin embargo, para el alcance de este estudio, el AHP se mantiene como un marco metodológico idóneo por su capacidad de estructurar criterios complejos bajo un esquema lógico y transparente.

Figura 2. Deslizamiento km 3



Figura 3. Deslizamiento de tierra km13



Figura 4. Deslizamiento km 14



Para la generación de las capas temáticas, se parte de la información geológica del IIGE y del DEM ALOS PALSAR, trabajando con una resolución espacial constante de 12,5 metros por píxel. A partir de estos insumos, se derivaron los pesos de las variables (pendiente, distancia a carreteras y litología) mediante un análisis cartográfico riguroso y verificaciones cruzadas en el entorno QGIS, reclasificando cada factor según sus niveles de influencia real en la inestabilidad.

La integración de estos datos se realizó bajo una metodología de dos etapas: primero se

aplicó el método AHP para la jerarquización de los factores y, posteriormente, se utilizó la Combinación Lineal Ponderada (WLC) para la síntesis de las capas rasterizadas. Este enfoque, que equilibra el rigor cuantitativo con la experiencia cualitativa, ha demostrado ser eficaz para la zonificación de susceptibilidad. De hecho, esta misma lógica, validada previamente en diversos entornos andinos, fue el eje conductor para elaborar la cartografía final de riesgos que define la vulnerabilidad del corredor Chillanes–San Pablo de Atenas (Li et al., 2023).

Tabla 2. Inventario de fuentes y recursos cartográficos empleados.

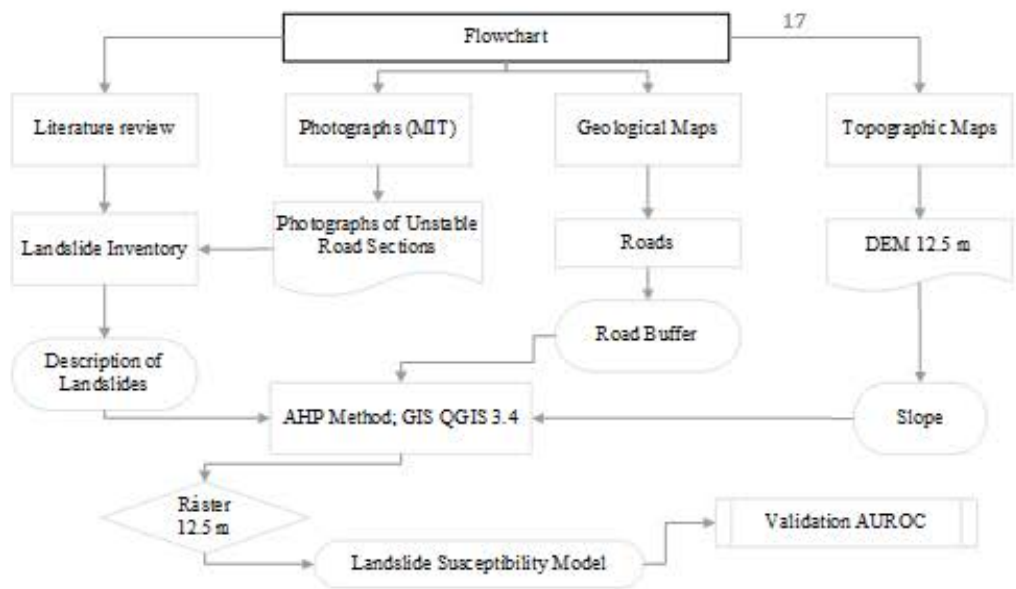
Datos	Descripción Técnica	Fuente / Repositorio
Registro fotográfico	Documentación visual de eventos históricos	https://www.mit.gob.ec/?s=San+Pablo+-+Chillanes
DEM (12,5 m)	DEM ALOS PALSAR	ASF, https://search.asf.alaska.edu/#/
Derivada de DEM	Capa derivada de DEM	DEM 12,5 m
Red vial	Información sobre la red local de carreteras	IGM, http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/
Litología	Composición mineralógica y unidades geológicas	MAGAP, http://geoportal.agricultura.gob.ec/

Fuente: Elaboración de los autores mediante la investigación literaria.

Para asegurar la coherencia del modelo, todas las capas temáticas, originalmente en formato vectorial, fueron procesadas y convertidas a formato ráster, manteniendo una resolución espacial unificada de 12,5 metros por píxel. Esta decisión resultó indispensable para integrar los tres factores condicionantes en un modelo geoespacial único y sin ambigüedades. Optar por esta resolución permitió armonizar las variables con el DEM base, garantizando la integridad geométrica y evitando la pérdida de detalle durante el proceso de superposición.

A continuación, se detalla el procedimiento técnico aplicado al tratamiento de cada uno de estos factores.

Figura 5. Diagrama de flujo de estudio.



Pendiente

El cálculo de la pendiente se realizó a partir del DEM (12,5 m/píxel), usando la herramienta GDALDEM en el entorno QGIS 3.4. Este parámetro es un condicionante crítico en la ocurrencia de movimientos en masa, debido a que el incremento en el ángulo de inclinación del terreno reduce la resistencia al corte y la capacidad de cohesión de los materiales, favoreciendo la inestabilidad de las laderas. En el corredor Chillanes-San Pablo de Atenas, los gradientes oscilan significativamente entre 0° y 50,06°, un rango que evidencia un marcado contraste morfológico, desde áreas de relieve moderado hasta laderas escarpadas, donde la erosión lateral y los taludes de corte vial favorecen a la fragilidad del terreno.

Siguiendo criterios estadísticos y metodologías validadas por Aceves et al. (2016), Li et al. (2023) y Wang et al. (2023), esta variable se reclasificó en seis niveles de susceptibilidad que

permiten visualizar la distribución del riesgo a lo largo del trayecto: < 5° (muy bajo), 5–10° (bajo), 10–20° (moderado), 20–30° (alto), 30–40° (muy alto) y > 40° (crítico) (ver Fig. 6).

Litología

La naturaleza litológica constituye uno de los factores de mayor incidencia en la estabilidad de las laderas, puesto que la composición mineralógica, el grado de fracturación y la estructura del macizo rocoso determinan su comportamiento ante la meteorización y el esfuerzo cortante. En el área de estudio se identificaron tres unidades predominantes: depósitos aluviales, diorita fracturada o alterada, y diorita masiva de carácter intrusivo (ver Fig. 7). La distribución de estas unidades ratifica la correlación entre las características litológicas y la recurrencia de fenómenos de inestabilidad en corredores viales de montaña (Corominas et al., 2023; Wang et al., 2023).

Distancia a las carreteras

La infraestructura vial en regiones montañosas altera el equilibrio mecánico de las laderas debido a la modificación de la geometría del talud, la deforestación y el cambio en los patrones de drenaje superficial. En el corredor analizado, se observó una antropización significativa caracterizada por el movimiento de tierras y la apertura de vías secundarias, factores que incrementan la probabilidad de movimientos de masa. El análisis espacial

determinó que la mayoría de los procesos de remoción y afloramientos inestables se concentran dentro de un radio de 600 m respecto al eje vial. En consecuencia, la variable se categorizó en cinco intervalos de influencia: 0–145 m, 145–290 m, 290–435 m, 435–580 m y > 580 m (ver Fig. 8). Los niveles más elevados de susceptibilidad se localizan en los márgenes inmediatos a la vía, evidenciando el impacto de los cortes de ladera y la saturación por escorrentía vial (Igwe et al., 2020).

Figura 6. Mapa de la pendiente

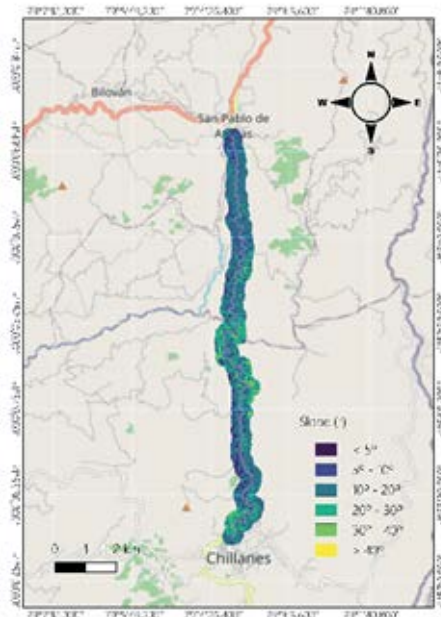


Figura 7. Mapa litológico

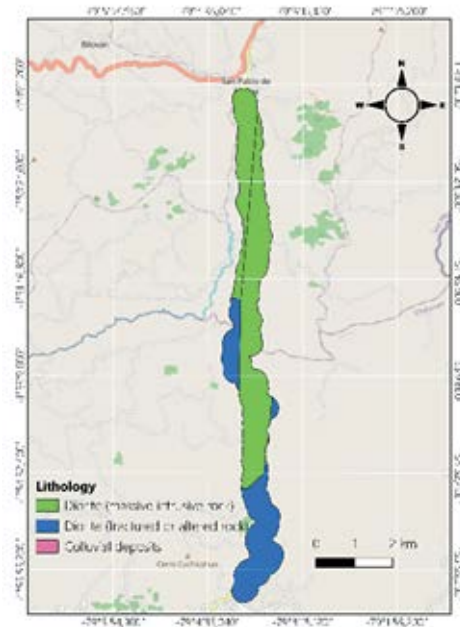
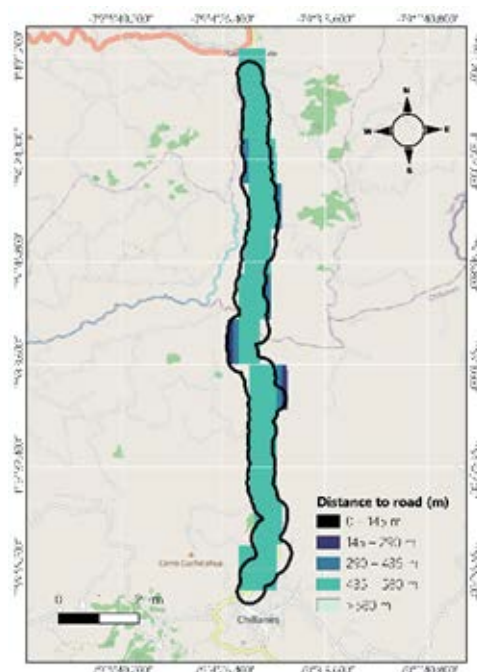


Figura 8. Mapa de distancias a las vías



Generación del Modelo de Susceptibilidad

Para la construcción de la matriz de comparación por pares, se realizó un muestreo intencional de expertos que incluyó a tres especialistas con amplia trayectoria en SIG), geotecnia y dinámica de laderas. Esta selección garantizó que la ponderación de las variables estuviese respaldada por un conocimiento técnico profundo del comportamiento geodinámico en el corredor vial. El procesamiento espacial se ejecutó en el software QGIS, mientras que los cálculos matriciales y la obtención de los pesos específicos para el método AHP se desarrollaron en el entorno estadístico RStudio. El flujo metodológico implementado comprendió las siguientes fases: a) estructuración jerárquica de los

factores condicionantes; b) construcción de la matriz de comparación pareada (ver Tabla 3) empleando la escala fundamental de Saaty (1977); c) síntesis de juicios y normalización de pesos; d) evaluación de la consistencia lógica para validar la coherencia de los juicios; e) integración de las capas mediante la técnica de Combinación Lineal Ponderada (WLC); y f) reclasificación del modelo final para su interpretación cartográfica.

Tabla 3. Escala fundamental de Saaty (1-9) para la ponderación de variables.

Valor	Definición	Explicación
1	Importancia igual	Ambos factores contribuyen de igual manera al fenómeno.
3	Importancia moderada	La influencia de un elemento sobrepasa levemente al otro.
5	Importancia fuerte	Un factor tiene un impacto significativamente mayor que el otro.
7	Importancia muy fuerte	El dominio de un elemento es evidente sobre el otro.
9	Importancia extrema	La diferencia de influencia es de orden superior.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Utilizados cuando se requieren matices entre los juicios anteriores.

Fuente: Elaboración de los autores a partir de Saaty (1977)

A partir de los valores de la matriz de juicio, se procedió a normalizar los vectores propios para obtener el peso relativo de cada factor. Para asegurar la validez del modelo, se calculó la Relación de Consistencia (CR) mediante la ecuación (1):

$$CR = \frac{RI}{CI} \quad (1)$$

Donde el índice aleatorio (RI) se obtiene de la Tabla 4 y el índice de consistencia (CI) se determina a través de la ecuación (2):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

En estas expresiones λ_{max} representa el autovalor máximo de la matriz y n el número de variables analizadas ($n = 3$). Siguiendo el criterio de Saaty & Vargas (2012), el modelo se considera válido si $CR \leq 10\%$. Finalmente, la integración de los factores se consolidó en el Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI), calculado mediante la ecuación (3):

$$LSI = \sum_{i=1}^n R_i W_i \quad (3)$$

Donde W_i es el peso relativo asignado a cada factor y R_i representa el valor de la subcategoría o clase rasterizada para dicho factor. El producto cartográfico resultante se reclasificó en cinco niveles de susceptibilidad (muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto) a través del método de cuantiles, optimizando la distribución estadística de los píxeles.

Panel de expertos

Para la determinación de pesos en la matriz AHP, se integró un panel de tres especialistas seleccionados mediante muestreo intencional, priorizando criterios de experiencia aplicada y trayectoria en la gestión de riesgos viales en zonas de montaña. La composición del panel integró competencias específicas: un experto en Sistemas de Información Geográfica, enfocado en el procesamiento espacial y análisis multicriterio; un especialista en geotecnia, orientado a la estabilidad de taludes y el comportamiento mecánico de geomateriales; y un profesional en geomorfología aplicada,

centrado en la dinámica de laderas y procesos de remoción en masa. Bajo este esquema, los especialistas emitieron juicios técnicos para realizar la comparación relativa entre la pendiente, la litología y la distancia a la red vial. Esta colaboración permitió contrastar criterios, reducir el sesgo subjetivo inherente a la jerarquización individual y fortalecer la consistencia conceptual de la ponderación final.

Validación y Precisión del Modelo de Mapeo

La validación del modelo de susceptibilidad se basó en la correlación estadística entre los niveles de riesgo predichos y el inventario de movimientos en masa documentados en el corredor vial. Este procedimiento es fundamental para verificar la fiabilidad y la capacidad predictiva de la herramienta. Con el objetivo de garantizar un equilibrio estadístico entre las zonas estables e inestables, se generaron puntos de control denominados no evento mediante un muestreo aleatorio estratificado, estableciendo un radio de exclusión de 100 metros respecto a los deslizamientos registrados.

La eficacia del modelo se evaluó mediante la curva ROC, estándar técnico en

estudios geomorfológicos para determinar la relación entre la tasa de verdaderos positivos (sensibilidad) y falsos positivos (1-especificidad). El indicador determinante fue el área bajo la curva (AUC); un valor cercano a 1,0 denota una capacidad discriminante excepcional, mientras que un resultado próximo a 0,5 sugiere una fiabilidad técnica limitada, equivalente a una probabilidad aleatoria (Sharir et al., 2022; Zhang et al., 2024; Tikuye et al., 2025).

El análisis estadístico reportó un valor de AUC = 0,885 (ver Fig. 10). De acuerdo con los criterios de clasificación de Çorbacioğlu y Aksel (2023), este resultado puede interpretarse como un desempeño muy bueno del modelo. No obstante, dado que la validación se realizó con un número reducido de eventos y mediante un procedimiento interno, este valor debe asumirse como favorable pero preliminar. En este sentido, la cartografía obtenida constituye una base técnica útil para orientar la gestión del riesgo vial, aunque su capacidad predictiva deberá fortalecerse en futuras aplicaciones mediante inventarios más amplios y procesos de validación externa.

Tabla 4. Valores del índice de consistencia aleatoria según el número de variables

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fuente: Elaboración de los autores a partir de Saaty & Vargas (2012)

Limitación de la validación

Una limitación relevante del proceso de validación radica en el tamaño del inventario disponible, debido a que el análisis ROC se sustentó en tres eventos de deslizamiento y

46 puntos de control generados en zonas sin evidencia de remoción en masa. Aunque este procedimiento permitió estimar la capacidad discriminante del modelo, la validación aplicada fue de carácter interno, ya que el mismo

inventario se utilizó tanto en la calibración como en la comprobación del desempeño predictivo. Esta particularidad puede inducir un sobreajuste a los datos analizados, limitando la capacidad de generalización del modelo ante nuevos eventos, periodos distintos o sectores diferentes dentro del mismo corredor vial.

En consecuencia, el valor de AUC obtenido debe interpretarse como un indicador favorable, pero de alcance preliminar, respecto a la robustez metodológica general. Con el propósito de fortalecer la confiabilidad predictiva y la reproducibilidad del modelo en escenarios comparables, futuras investigaciones deberán orientarse hacia la incorporación de inventarios multitemporales de mayor escala, así como la integración de registros históricos adicionales y procesos de validación externa.

Resultados

Análisis del Proceso Jerárquico (AHP) y Ponderación de Variables

La aplicación del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), mediante la técnica de comparación por pares, permitió cuantificar la influencia relativa de cada variable en la susceptibilidad a movimientos en masa dentro del corredor vial Chillanes-San Pablo de Atenas (Tabla 5). Los resultados del análisis ratifican que la pendiente, la litología y la distancia a la red vial constituyen los factores condicionantes fundamentales, teniendo la pendiente el mayor peso dentro del modelo.

La consistencia de los juicios emitidos por el panel de expertos fue evaluada mediante el Índice de Consistencia (CR), el cual arrojó un valor de 0,096. Al situarse por debajo del umbral crítico de 0,10, establecido por Saaty (1977), este resultado confirma que la jerarquización y la asignación de pesos fueron tanto lógicas como estadísticamente consistentes. Una vez validada la jerarquía, se consolidó la matriz final de ponderaciones, la cual sirvió como insumo estratégico para la generación del modelo cartográfico de susceptibilidad (Tabla 6).

Tabla 5. Matriz de jerarquía y comparación de variables

Variables	Categorías	Valor	Categoría	Peso variable	CR Variable
Pendiente (°)	< 5°	1	0,04	0,724	0,026
	5–10°	2	0,08		
	10–20°	4	0,15		
	20–30°	5	0,19		
	30–40°	8	0,31		
	> 40°	6	0,23		
Litología	Diorita masiva	3	0,21	0,193	0,046
	Diorita fracturada	5	0,33		
	Depósitos coluviales	7	0,46		
Distancia a las carreteras (m)	0–145 m	7	0,41	0,083	0,013
	145–290 m	5	0,29		
	290–435 m	3	0,17		
	435–580 m	2	0,09		
	> 580 m	1	0,04		

Fuente: Elaboración de los autores, con base en los resultados de RStudio

Tabla 6. Matriz de comparación entre pares

	Pendiente	Litología	Distancia a vías	Ponderación final	CR Final
Pendiente	1,00	0,20	0,14	0,724	0,096
Litología	—	1,00	0,33	0,193	
Distancia a vías	—	—	1,00	0,083	

Fuente: Un valor CR = 0,096 demuestra la consistencia satisfactoria en las comparaciones, según Saaty (1977).

El modelo final categorizó la susceptibilidad del corredor vial en cinco niveles: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta (ver Fig. 9). Si bien gran parte de la vía exhibe una susceptibilidad de rango moderado, el análisis espacial identificó 49 tramos críticos con niveles de riesgo “Alto” y “Muy Alto”, distribuidos de manera discontinua a lo largo de la ruta (Tabla 7). Estas zonas de mayor vulnerabilidad se

localizan de forma predominante entre los kilómetros 13 y 14, específicamente en el sector de Perezán, así como en las áreas de influencia de los arroyos Bilován y Hualicunhuaycu. La coincidencia geográfica entre estos resultados y los registros históricos de remoción masiva del MIT (2025), subraya la fiabilidad de la herramienta para la gestión de emergencias viales.

Figura 9. Cartografía de susceptibilidad a movimientos en masa



Tabla 7. Inventario georreferenciado de segmentos viales con niveles críticos de susceptibilidad a movimientos en masa.

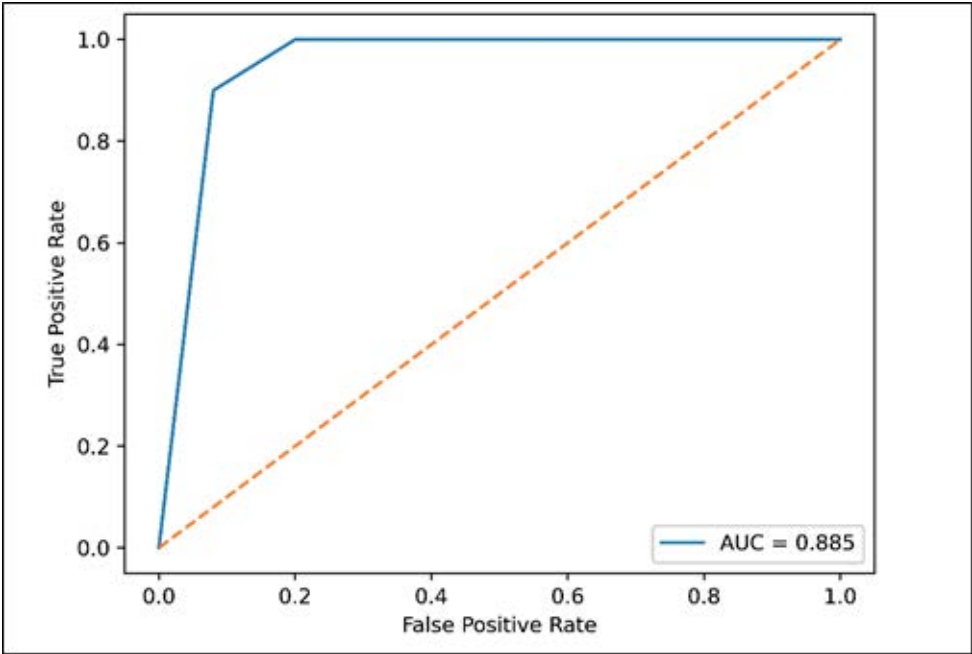
Región	Km_start	Long_start	Lat_start	Km_end	Long_end	Lat_end
1	0,103	-79,067695	-1,936739	0,103	-79,067262	-1,936039
2	0,103	-79,067052	-1,934151	0,332	-79,067092	-1,932691
3	0,332	-79,064608	-1,931473	0,361	-79,064532	-1,931263
4	0,361	-79,064296	-1,930458	0,392	-79,064079	-1,930283
5	0,392	-79,060328	-1,930317	0,469	-79,062385	-1,930456
6	0,479	-79,064273	-1,921404	0,493	-79,062404	-1,921194
7	0,493	-79,065188	-1,910396	0,507	-79,065075	-1,910335
8	0,507	-79,065184	-1,908411	0,597	-79,065061	-1,907629
9	0,597	-79,065503	-1,90437	0,608	-79,065529	-1,90425
10	0,608	-79,065656	-1,903551	0,696	-79,065631	-1,902769
11	0,696	-79,064742	-1,900936	0,705	-79,064742	-1,900858
12	0,705	-79,065578	-1,899263	0,959	-79,065537	-1,896999
13	0,959	-79,057593	-1,899263	1,083	-79,057593	-1,896547
14	1,083	-79,061587	-1,894595	1,203	-79,065325	-1,894638
15	1,203	-79,061587	-1,894406	1,252	-79,047771	-1,894323
16	1,252	-79,064672	-1,894823	1,445	-79,063304	-1,893687
17	1,445	-79,063648	-1,892739	1,519	-79,064147	-1,89239
18	1,519	-79,06483	-1,892146	1,731	-79,066217	-1,891129

Fuente: Elaboración de los autores, tomando en cuenta los resultados de QGIS

La validación del modelo de susceptibilidad se ejecutó en el entorno estadístico RStudio, empleando el paquete especializado ROCR. Este procedimiento permitió evaluar la robustez predictiva del mapa generado al contrastar los niveles de susceptibilidad calculados con los eventos reales documentados en el inventario de deslizamientos (Agboola et al., 2024). El desempeño del modelo se cuantificó a través de la relación entre la tasa de verdaderos positivos y falsos positivos.

El análisis estadístico arrojó un valor de AUC de 0.885 (ver Fig. 10). De acuerdo con los criterios de clasificación de Çorbacioğlu y Aksel (2023), un resultado de esta magnitud se sitúa en la categoría de rendimiento “Muy Bueno”. Esto demuestra que el modelo posee una alta capacidad discriminante, logrando diferenciar con precisión las zonas estables de aquellas con propensión al fallo. En consecuencia, la cartografía resultante constituye una base técnica fiable para la toma de decisiones en la gestión de riesgos del corredor vial.

Figura 10. Curva ROC de validación del modelo cartográfico.



Discusión

Al contrastar los resultados obtenidos con la literatura, se observa una coincidencia significativa respecto al papel determinante

de la pendiente en la estabilidad de taludes. Cargua et al. (2024), en su análisis de carreteras amazónicas ecuatorianas, identificaron que las condiciones del relieve influyen de manera decisiva en la delimitación de zonas

inestables mediante el uso de AHP y SIG. De forma análoga, Li et al. (2023) sostienen que la pendiente suele adquirir una ponderación alta en los modelos de susceptibilidad debido a que controla directamente la dinámica gravitacional del terreno. Por otro lado, estudios como el de Igwe et al. (2020) otorgan mayor relevancia a factores como la cercanía a la infraestructura vial y la alteración del drenaje, una divergencia que subraya cómo el comportamiento de cada corredor responde a sus condiciones físicas intrínsecas y no únicamente al método de evaluación aplicado.

Para la vía Chillanes–San Pablo de Atenas, el peso preponderante de la pendiente se justifica por la naturaleza abrupta del relieve, con gradientes que superan los 35° y alcanzan los 50,06°, sumado a la presencia de quebradas profundas y una saturación estacional crítica. En este contexto, la inclinación del terreno incrementa el esfuerzo cortante y reduce la resistencia natural de los materiales, desplazando la influencia de otras variables. En consecuencia, la gestión del riesgo en este sector debe priorizar los tramos de mayor escarpamiento, donde la probabilidad de inestabilidad es elevada y la intervención vial podría agravar las condiciones topográficas ya precarias.

Un aspecto distintivo de este corredor es la distribución no homogénea de la susceptibilidad, la cual se concentra en sectores específicos, notablemente entre los kilómetros 13 y 14. En dichos puntos convergen pendientes extremas, materiales altamente fracturados y antecedentes históricos de deslizamientos. A diferencia de escenarios donde la intervención antrópica o el uso del

suelo adquieren un protagonismo mayor, en el corredor Chillanes–San Pablo de Atenas la topografía se consolida como el elemento estructurante del riesgo.

Conclusiones

El modelo de susceptibilidad generado mediante la integración de AHP y SIG permitió identificar, con un alto nivel de detalle, las áreas críticas en el corredor vial Chillanes–San Pablo de Atenas. Los resultados confirman que el análisis multicriterio es una herramienta eficaz y eficiente para la evaluación de riesgos en terrenos montañosos, especialmente ante la escasez de datos geotécnicos detallados. Se determinó que la pendiente (0,724) y la litología (0,193) constituyen los factores condicionantes dominantes, mientras que la distancia a la red vial (0,083) ejerce una influencia secundaria.

La validación del modelo arrojó un valor AUC de 0,885, lo que denota un rendimiento predictivo calificado como muy bueno bajo las condiciones analizadas. La investigación revela que el 17,8 % del área de estudio presenta una susceptibilidad alta o muy alta, con una concentración crítica entre los kilómetros 13 y 14, el sector Perezán y las cuencas de los arroyos Bilován y Hualicunhuaycu. La correspondencia espacial entre estas áreas y los registros históricos de remoción en masa avala la utilidad del modelo como un instrumento de apoyo para la gestión preventiva, aunque sus resultados deben ser interpretados con la prudencia propia de un carácter preliminar.

Este mapa de susceptibilidad representa un insumo técnico esencial para instituciones

como la SNGR y el MIT, facilitando la priorización de intervenciones para la estabilización de taludes y el diseño de sistemas de alerta temprana. Asimismo, el enfoque metodológico empleado resulta adaptable para otros corredores andinos, fomentando una planificación territorial orientada a la reducción de la exposición a riesgos naturales.

Finalmente, aunque la subjetividad inherente al juicio experto en el AHP, se reconoce como una limitación. Por ende, las futuras líneas de investigación deberán enfocarse en la integración de metodologías híbridas basadas en machine learning (AHP-RF o AHP-SVM). Esta evolución, complementada con análisis de vulnerabilidad, permitirá robustecer la capacidad predictiva y minimizar el sesgo derivado de la ponderación experta, avanzando hacia una gestión de riesgos de infraestructura vial más precisa y resiliente.

Referencias Bibliográficas

- Aceves, J. F. Q., Legorreta, G. P., Lugo, J. H., Umaña, J. R., & Legorreta, H. A. C. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, 2016(91), 43–55. <https://doi.org/10.14350/rig.46503>
- Agboola, G., Beni, L. H., Elbayoumi, T., & Thompson, G. (2024). Optimización del mapeo de susceptibilidad a deslizamientos utilizando aprendizaje automático y técnicas geoespaciales. *Informática Ecológica*, 81, 102583. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102583>
- Cargua, C. J., Espin, R., Valencia, B. G., Simbaña, M., Araujo, S., Ocampos, A., & Cornejo, C. (2024). Análisis de susceptibilidad a deslizamientos empleando el proceso de jerarquía analítica en una carretera Amazónica del Ecuador. *La Granja*, 39(1), 117–138. <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.07>
- Cuji, G. C. (2025). *Modelo geotécnico para la estabilización de las zonas susceptibles a movimientos en masa en la vía Chillanes – San Pablo, cantón Chillanes, provincia de Bolívar*. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/www.dspace.uce.edu.ec>
- Çorbacioğlu, Ş. K., & Aksel, G. (2023). Análisis de curvas características de funcionamiento del receptor en estudios de precisión diagnóstica: Guía para interpretar el área bajo el valor de la curva. *Revista Turca de Medicina de Urgencias*, 23(4), 195–198. https://doi.org/10.4103/tjem.tjem_182_23
- Corominas, J., Guzzetti, F., Lan, H., Macciotta, R., Marunteranu, C., McDougall, S., & Strom, A. (2023). Revisitando los términos del riesgo de deslizamiento: Comisión IAEG Grupo de trabajo C-37 sobre nomenclatura del riesgo de deslizamientos. *Boletín de Geología de la Ingeniería y el Medio*

- Ambiente*, 82(12), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03474-z>
- Igwe, O., John, U. I., Solomon, O., & Obinna, O. (2020). Modelización de susceptibilidad a la erosión de barrancos basada en SIG, adaptación del método estadístico bivalente y enfoque AHP en la ciudad de Gombe y sus alrededores en el noreste de Nigeria. *Desastres geoambientales*, 7(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00166-8>
- Li, C. Dong, Feng, P. Fei, Jiang, X.-H., Zhang, S., Meng, J., & Li, B.-C. (2024). Identificación extensa de los límites de deslizamientos mediante imágenes de teledetección y métodos de aprendizaje profundo. *Geología de China*, 7(2), 277–290. <https://doi.org/10.31035/cg2023148>
- Li, H., Mao, Z., Sun, J., Zhong, J., & Shi, S. (2023). Mapeo de susceptibilidad por deslizamientos usando combinaciones lineales ponderadas: un caso de la ciudad de Gucheng en Ningxia, China. *Ingeniería Geotécnica y Geológica*, 41(2), 1247–1273. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02333-0>
- Liu, C., Luo, W., Chung, H. W., Yin, H. Y., & Yan, K. W. (2018). Influencias del inventario sombra en un modelo de susceptibilidad a deslizamientos. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2018, Vol. 7, Página 374, 7(9), 374. <https://doi.org/10.3390/IJGI7090374>
- Ministerio de Infraestructura y Transporte. (2026). *Talud de gran magnitud mantiene cerrada la vía San Pablo – Chillanes – Ministerio de Infraestructura y Transporte*. <https://www.mit.gob.ec/talud-de-gran-magnitud-mantiene-cerrada-la-via-san-pablo-chillanes/>
- MIT. (2025). Vía San Pablo de Atenas - Chillanes. Noticias Bolívar. <https://www.mit.gob.ec/?s=San+Pablo+-+Chillanes>
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). Revisión de modelos estadísticamente basados en la susceptibilidad a deslizamientos. *Revistas de Ciencias de la Tierra*, 180, 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- Saaty, T. L. (1977). Un método de escalado para prioridades en estructuras jerárquicas. *Revista de Psicología Matemática*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). Modelos, métodos, conceptos y Aplicaciones del proceso jerárquico analítico (Vol. 175). *Springer EE. UU.* <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>
- Secretaría Nacional De Gestión de Riesgos. (2025). *Puntos importantes*. chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/<https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2026/01/SitRep-No-146-Lluvias-01012025-al-31122025-CIERRE.pdf>

- Sharir, K., Lai, G. T., Simon, N., Ern, L. K., Talip, M. A., & Roslee, R. (2022). Evaluación del análisis de susceptibilidad a inundaciones mediante el proceso jerárquico analítico (AHP) en el área de Kota Belud, Sabah, Malasia. *Serie de Conferencias del IOP: Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente*, 1103(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1103/1/012005>
- SNGR. (2025). Afectaciones por lluvia en el Ecuador. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/informes-de-situacion-actual-por-eventos-adversos-ecuador/>
- Tikuye, B. G., Ray, R. L., Abeysingha, N. S., & Gurau, S. (2025). Integrando análisis de decisiones multicriterio y datos geoespaciales para el mapeo de susceptibilidad a inundaciones en Texas, EE. UU. *Progreso en la ciencia de desastres*, 28, 100462. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2025.100462>
- Wang, X., Wang, Y., Lin, Q., & Yang, X. (2023). Evaluación del riesgo global de accidentes por deslizamientos bajo cambio climático moderado basándose en múltiples proyecciones de GCM. *Revista Internacional de Ciencia del Riesgo de Desastres*, 14(5), 751–767. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00514-w>
- Zhang, X., Xie, H., Xu, Z., Li, Z., & Chen, B. (2024). Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos: un enfoque basado en el método AHP mejorado con modelado optimizado de bosques aleatorios. *Riesgos naturales*, 120(9), 8153–8207. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06306-1>