

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación del riesgo de deslizamientos mediante análisis integral geoespacial en
Zhindilig, Azogues-Cañar.

INGE-3036

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Geología

Presentado por:

Eudes Ricardo Ramos Sánchez

Guayaquil-Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico con todo mi cariño y amor a mis padres y mi hermano, Eudes Rigoberto Ramos, Mirella Sánchez y Favio Ramos, por ser las contantes en mi vida y siempre contar con su ayuda en cada paso del camino, si he llegado tan lejos es por ustedes.

Del mismo modo, expreso mi gratitud a todos mis familiares por su constante apoyo, con una mención especial a mi querido tío Mauricio Sánchez. Dios te tenga en su gloria.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible este proyecto. A mis padres, por su amor, apoyo y fe incondicional en mí, y a mi hermano, por su confianza y por estar siempre a mi lado. A mis tutores del proyecto integrador, David Altamirano, M.Sc.; Ángel Valdiviezo, M.Sc.; y Peter Olaya, M.Sc., por su guía y valiosos aportes. Asimismo, agradezco a los profesores de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT) por el conocimiento y las herramientas brindadas durante mi formación académica. De manera especial, agradezco al Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), al GAD Municipal de Azogues, con mención honorífica al Ing. César Pinos, y al laboratorio de Geotecnia de la FICT por el apoyo recibido. Finalmente, agradezco a mis amigos Adrián, Nicole, Astrid, Andrei, Elvis, Ariana y Erick, por su compañerismo y apoyo constante.

Declaración Expresa

Yo Eudes Ricardo Ramos Sánchez acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 16 de octubre del 2025.



Eudes Ricardo Ramos Sánchez

Evaluadores

Joselyne Bárbara Solórzano Chauca

Profesor de Materia

David Ricardo Altamirano Morán

Tutor de proyecto

Resumen

La comunidad de Zhindilig, en el cantón Azogues, presenta una alta susceptibilidad a deslizamientos de tierra, según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) 2023-2027. Los deslizamientos afectan a infraestructuras viales, viviendas y zonas de actividad productiva. Este estudio tiene como objetivo evaluar el riesgo por deslizamientos mediante un análisis integral que permita la identificación de las zonas críticas, y propuestas de medidas de mitigación territorial.

Para el desarrollo del proyecto se aplicaron métodos geofísicos y geotécnicos en conjunto con análisis espaciales mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las técnicas empleadas constaron de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), ensayos de laboratorio de suelos y el modelo de talud infinito para la identificación las zonas críticas, así como sus niveles de estabilidad.

Los resultados mostraron sectores en dirección Norte-Este con alta susceptibilidad que coinciden con las zonas del mapa de amenaza donde se tiene Factor de Seguridad (FS) menores o igual a 1. Se concluye que la implementación de sistemas de drenaje, la estabilización de taludes y la planificación territorial adecuada son esenciales para la reducción del riesgo y fortalecer la resiliencia de Zhindilig.

Palabras Clave: Deslizamientos, SIG, TRE, estabilidad de taludes, riesgo geológico.

Abstract

The community of Zhindilig, located in the Azogues canton, presents a high susceptibility to landslides, as indicated in the 2024–2027 Landslide Development and Planning Plan. These mass movement processes have significant impacts on road infrastructure, housing, and productive areas. The present study aims to assess landslide risk through a comprehensive analysis that enables the identification of critical zones and supports the proposal of appropriate mitigation measures.

To achieve the objectives of the research, geophysical and geotechnical methods were applied in combination with spatial analysis using Geographic Information Systems (GIS). The methodologies employed included Electrical Resistivity Tomography (ERT), laboratory soil testing, and the infinite slope stability model, which together allowed for the identification of critical areas and the evaluation of their stability conditions.

The results showed sectors oriented in the northeast direction with high susceptibility, which coincide with areas on the hazard map where the Factor of Safety (FS) is less than or equal to 1. It is concluded that the implementation of drainage systems, slope stabilization, and proper land-use planning are essential to reduce risk and strengthen the resilience of Zhindilig.

Keywords: Landslides, GIS, ERT, slope stability, geological hazard.

Índice general

Resumen	1
<i>Abstract</i>	2
Índice general	3
Abreviaturas	6
Simbología	7
Índice de figuras	8
Índice de tablas.....	9
Capítulo 1	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	3
1.3 Justificación del problema	4
1.4 Zona de estudio.....	5
1.5 Objetivos.....	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	6
1.6 Antecedentes.....	7
1.7 Marco teórico.....	8
1.7.1 Deslizamientos o movimientos en masa	8
1.7.2 Inestabilidad de laderas	9
1.7.3 Factores desencadenantes de deslizamientos en regiones andinas.....	9
1.7.4 Talud infinito y Factor de Seguridad (FS)	10

1.7.5	Componentes del riesgo	11
1.7.6	Evaluación del riesgo de desastre por deslizamientos.....	11
1.7.7	Sistemas de Información Geográfica	12
1.7.8	Métodos Geofísicos y ensayo de resistividad eléctrica	13
1.7.9	Matriz de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas.....	13
Capítulo 2		15
2.1	Marco Geológico	16
2.1.1	Contexto Tectónico Regional.....	16
2.1.2	Contexto Geológico del Ecuador	17
2.1.3	Geología Regional Sur del Ecuador	18
2.1.4	Formaciones geológicas	19
Capítulo 3		25
3.1	Materiales	26
3.1.1	Materiales e Insumos de información	26
3.1.2	Equipos y Materiales de Campo.....	26
3.1.3	Software y Procesamiento de Datos.....	27
3.2	Metodología.....	27
3.2.1	Fase 1: Análisis de Contexto	31
3.2.2	Fase 2: Análisis de Amenaza (A).....	31
3.2.3	Fase 3: Análisis de Vulnerabilidad (V).....	41
3.2.4	Fase 4: Análisis de Exposición (E)	43
3.2.5	Fase 5: Análisis de Riesgo (R)	44

3.2.6	Fase 6: FODA y Medidas de mitigación.....	45
Capítulo 4	47
4.1	Resultados.....	48
4.1.1	Cálculo de la Amenaza (A)	48
4.1.2	Cálculo de Vulnerabilidad (V)	58
4.1.3	Cálculo de Exposición (E).....	62
4.1.4	Cálculo de Riesgo (R)	64
4.1.5	FODA y medidas de Mitigación	68
4.2	Discusión	72
Capítulo 5	75
5.1	Conclusiones.....	76
5.2	Recomendaciones	77
Referencias	78

Abreviaturas

CAME	Corregir, Afrontar, Mantener, Explotar
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
FODA	Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas
FS	Factor de Seguridad
GAD	Gobierno(s) Autónomo(s) Descentralizado(s)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
IIGE	Instituto de Investigación Geológico y Energético
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PDOT	Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial
QRA	Quantitative Risk Analysis
SAGA GIS	System for Automated Geoscientific Analyses Geographic Information System
SIG	Sistemas de Información Geográficos
SNGR	Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
TRE	Tomografía de Resistividad Eléctrica

Simbología

φ	Ángulo de fricción interna
c	Cohesión
E	Este
Fm.	Formación
g	Gramos
ha	Hectáreas
IP	Índice de plasticidad
km	Kilometros
KN	Kilo-Newton
KPa	Kilo-Pascal
LL	Límite líquido
LP	Limite plástico
m	Metros
MPa	Mega-Pascal
N	Norte
NE	Noreste
NO	Noroeste
O	Oeste
mV	Milivoltio
s	Segundo
S	Sur
SE	Sureste
SO	Suroeste

Índice de figuras

Figura 1 <i>Esquema gráfico de la problemática</i>	4
Figura 2 <i>Mapa de ubicación de la comunidad Zhindilig</i>	6
Figura 3 <i>Imagen representativa de un deslizamiento</i>	9
Figura 4 <i>Mapa de la geología del área de estudio</i>	19
Figura 5 <i>Diagrama de flujo de la metodología</i>	30
Figura 6 <i>Comunicación con los residentes de la comuna Zhindilig</i>	31
Figura 7 <i>Calicata realizada en la Zhindilig</i>	34
Figura 8 <i>Cuarteo de muestra en laboratorio</i>	34
Figura 9 <i>Ensayo de granulometría</i>	35
Figura 10 <i>Ensayo de límites de Atterberg</i>	35
Figura 11 <i>Ensayo de corte directo y la caja triaxial para la muestra</i>	37
Figura 12 <i>Ensayo de TRE gradiente en Zhindilig</i>	39
Figura 13 <i>Modelo Digital de Elevación (MDE) de Zhindilig</i>	48
Figura 14 <i>Mapa de pendientes (Slope) de Zhindilig</i>	48
Figura 15 <i>Función logarítmica de tendencia lineal de los ensayos de LL</i>	51
Figura 16 <i>Mapa de ubicación de las tomografías y la calicata</i>	53
Figura 17 <i>Ensayo de TRE, Línea 1</i>	54
Figura 18 <i>Ensayo de TRE, Línea 2</i>	55
Figura 19 <i>Ensayo de TRE, Línea 3</i>	57
Figura 20 <i>Mapa de amenaza con FS</i>	58
Figura 21 <i>Mapa de edificaciones clasificado por su estado de mantenimiento (εsmn)</i>	59
Figura 22 <i>Mapa de Vulnerabilidad de Edificaciones (Ved) con εsmn</i>	60
Figura 23 <i>Mapa de uso de suelo de Zhindilig</i>	61
Figura 24 <i>Mapa de Vulnerabilidad de Uso de Suelo (Vus) con εsmn</i>	62

Figura 25 Mapa de Exposición de Edificaciones (Eed) con ϵsmn	63
Figura 26 Mapa de Exposición de Uso de Suelo (Eus) con ϵsmn	64
Figura 27 Mapa de riesgos de Edificaciones (Red) con ϵsmn	65
Figura 28 Mapa de Riesgo de Uso de Suelo (Rus) con ϵsmn	66
Figura 29 Mapa de Riesgo Total (Rt) con ϵsmn	68

Índice de tablas

Tabla 1 Esquema de la matriz FODA	14
Tabla 2 Matriz de evaluación de alternativas a solución	29
Tabla 3 Parámetros de SagaGIS para generar el mapa de FS.....	32
Tabla 4 Información del dron.....	33
Tabla 5 Equipo usado en campo para los ensayos de TRE.....	38
Tabla 6 Tabla de clasificación del Factor de Seguridad	39
Tabla 7 Parámetros de FS y su medio de obtención	40
Tabla 8 Parámetros de resistencia y sus valores	41
Tabla 9 Valores de vulnerabilidad	43
Tabla 10 Porcentaje de fino post lavado de muestra	49
Tabla 11 Resultado de granulometría	50
Tabla 12 Límite de plasticidad-Datos	51

Capítulo 1

1.1 Introducción

Las zonas montañosas de los Andes ecuatorianos constituyen sistemas geo-socio-ecológicos complejos que desempeñan un papel fundamental en la regulación hídrica, la biodiversidad y el desarrollo de las comunidades humanas asentadas en sus laderas (Alonso-Pandavenes et al., 2024). Sin embargo, dichas zonas se encuentran sometidas a múltiples presiones: cambios climáticos que intensifican precipitaciones extremas, expansión urbana sin planificación adecuada, deforestación y modificaciones del uso del suelo. Estos factores aumentan la susceptibilidad a deslizamientos (Puente-Sotomayor et al., 2021).

El Ecuador, debido a su ubicación geodinámicamente activa y a sus características geológicas y topográficas, presenta una alta propensión a procesos de remoción en masa. Eventos recientes como los deslizamientos de La Josefina (1993), Alausí (2023) y La Gasca (2024) han causado pérdidas humanas y materiales significativas, evidenciando la vulnerabilidad de las poblaciones y la necesidad de fortalecer la planificación territorial y la gestión del riesgo (Alonso-Pandavenes et al., 2024).

Comprender la interacción entre amenazas naturales, vulnerabilidad y exposición resulta esencial para implementar estrategias de reducción del riesgo de desastre. Este enfoque se sustenta en la gestión integral del riesgo, que reconoce la necesidad de integrar componentes técnicos, sociales y ambientales en la toma de decisiones (Yamin et al., 2013). En este contexto, la aplicación de métodos geofísicos, geotécnicos y de análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituye una herramienta fundamental para identificar zonas críticas y sustentar medidas de mitigación (Alonso-Pandavenes et al., 2024).

Este trabajo se enfoca en la comunidad de Zhindilig, en el cantón Azogues, con el propósito de evaluar su riesgo frente a deslizamientos mediante un enfoque integral, identificando las áreas críticas para la propuesta de medidas de mitigación territorial.

1.2 Descripción del Problema

La comunidad de Zhindilig, perteneciente a la parroquia Guapán del cantón Azogues, presenta condiciones de inestabilidad que la hacen susceptible a procesos de remoción en masa. Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) del cantón Cañar 2023–2024, el cantón Azogues muestra complicaciones por fenómenos de este tipo, especialmente en sus parroquias orientales como Taday, Pindilig y Rivera, y en menor medida en Guapán y Javier Loyola, donde se han registrado eventos asociados a asentamientos y presencia de agua en los materiales del terreno (GAD Cañar, 2023).

Estudios locales muestran que taludes ubicados en vías comunes en la provincia, con pendientes pronunciadas, suelos poco cohesivos, drenaje deficiente y alta saturación de agua, presentan baja estabilidad (Ronquillo Mendoza & Valdiviezo Ajila, 2023). Estos factores coinciden con las condiciones descritas para Zhindilig en los registros del PDOT. En el proyecto de Ronquillo Mendoza (2023), por ejemplo, se realizó una caracterización geotécnica del tramo Matrama-Mazar, donde tres puntos críticos fueron identificados debido al riesgo de deslizamientos que afectan el tránsito, la infraestructura vial y la seguridad de comunidades rurales.

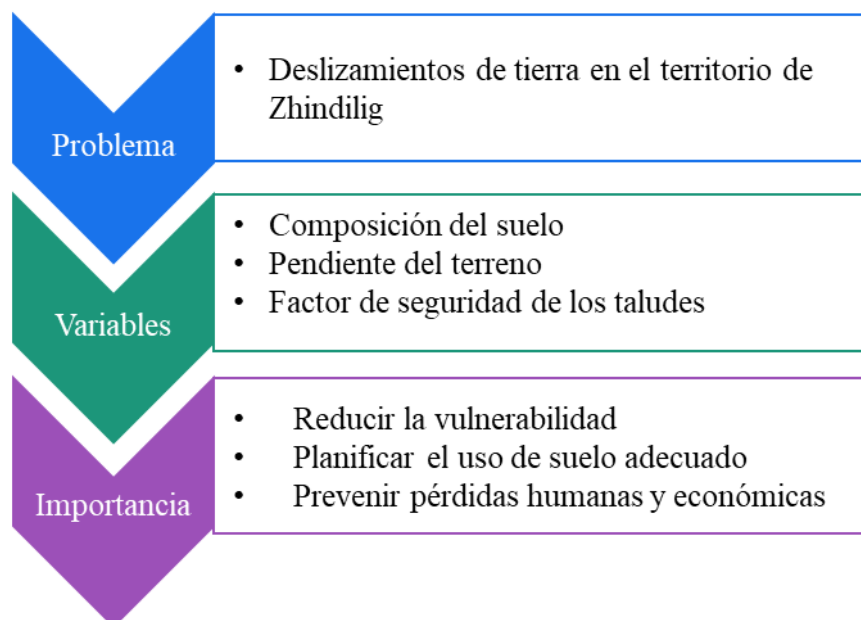
El problema se expresa en que dichos fenómenos son recurrentes y causan deterioro en vías de primer y segundo orden, daños en viviendas, interrupción de actividades productivas y pérdidas materiales, sin que hasta ahora exista un estudio geofísico-geotécnico integral que permita delimitar claramente las zonas críticas y proponer intervenciones técnicas.

Los deslizamientos son recurrentes y relevantes porque la población de la parroquia de Guapán es de aproximadamente 8921 habitantes según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), siendo Zhindilig de un aproximado de 700 habitantes, lo que implica que muchas personas podrían estar expuestas si se presentan deslizamientos en comunas rurales con pocas infraestructuras de mitigación. Se desconoce con exactitud la población de Zhindilig, lo que representa una restricción para dimensionar el impacto social de los deslizamientos.

1.3 Justificación del problema

La importancia de resolver este problema radica en la necesidad de reducir la vulnerabilidad, planificar adecuadamente el uso del suelo y prevenir pérdidas humanas y económicas (Figura 1). Adicionalmente, es necesaria una definición clara respecto de qué entidades locales sean responsables y de la disponibilidad de datos oficiales para intervenciones; posiblemente el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Azogues sea la entidad cliente clave, al ser la institución local encargada del ordenamiento territorial y de la gestión del riesgo.

Figura 1 Esquema gráfico de la problemática



La comunidad de Zhindilig enfrenta un riesgo elevado de deslizamientos de tierra que amenaza la seguridad de sus habitantes, su infraestructura y su calidad de vida. La provincia de Cañar registra un porcentaje importante de eventos adversos provocados por lluvias, siendo los deslizamientos los más frecuentes (más del 50 %) en periodos invernales recientes, lo que evidencia la alta exposición a fenómenos naturales que deterioran las vías, viviendas y servicios básicos en cantones como Azogues (SNGR, 2025).

Además, el cantón Azogues ha sido escenario de emergencias ocasionadas por lluvias intensas: se han registrado daños en viviendas, colapso de vías de segundo y tercer orden, destrucción de estructuras de infraestructura básica y aislamiento de comunidades durante temporadas lluviosas (SNGR, 2025). Estas afectaciones recurrentes generan pérdidas económicas, interrupción de la actividad productiva local (agrícola, doméstica) y un aumento de la vulnerabilidad social al quedar comunidades aisladas o sin acceso a servicios de emergencia.

Este estudio no solo aborda una problemática local, sino que se alinea directamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

- ODS 3 (Salud y Bienestar): mediante la gestión de riesgos y la alerta temprana se busca prevenir lesiones y muertes causadas por deslizamientos.
- ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles): al promover políticas locales que identifiquen zonas de alto riesgo y fomenten la resiliencia ante desastres naturales en Azogues.
- ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres): al conservar la cobertura vegetal y prevenir la degradación de suelos que agraven los movimientos de masa.

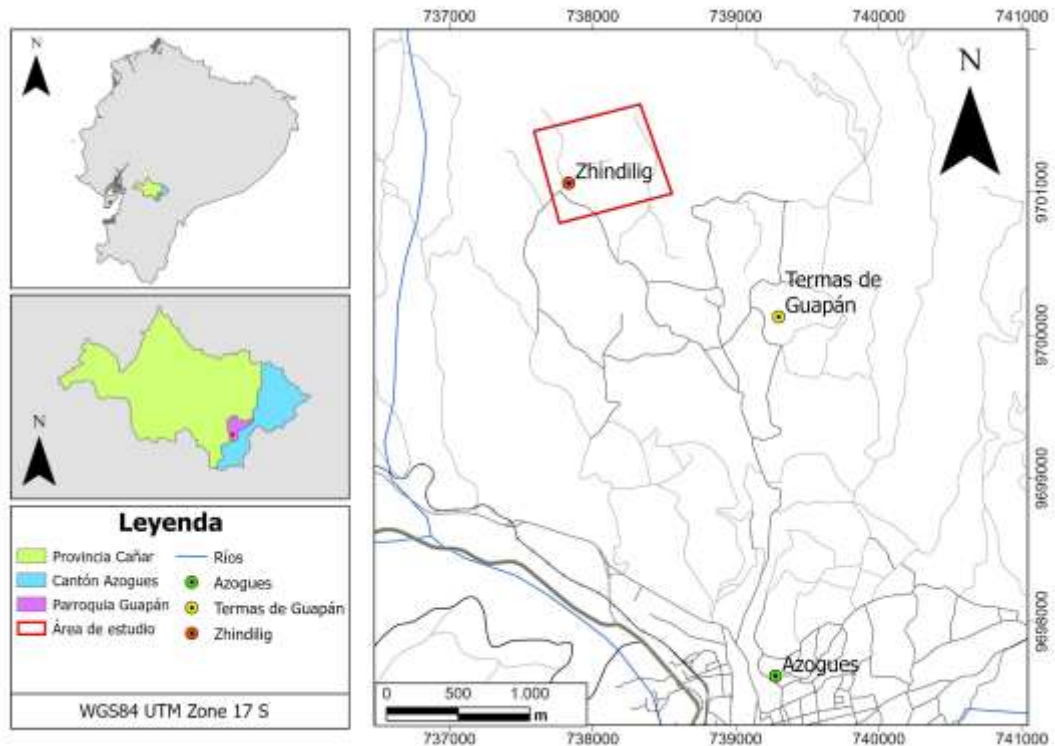
Resolver esta problemática es crucial para asegurar la continuidad de actividades económicas, proteger las infraestructuras, reducir pérdidas humanas y ambientales, y mejorar la capacidad del gobierno local y la comunidad para planificar territorios más seguros y resilientes. La evaluación de riesgo que se propone permitirá delimitar zonas críticas, proponer medidas de mitigación (estructurales y no estructurales) y entregará información técnica para integrar estas acciones al PDOT de Azogues.

1.4 Zona de estudio

La comunidad de Zhindilig se encuentra ubicada al sur del cantón Azogues, en la provincia del Cañar, Ecuador (Figura 2). Se localiza en una zona de relieve montañoso y pendientes pronunciadas, característica de la Sierra ecuatoriana. Su altitud promedio es de aproximadamente

2 700 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), y se accede desde la ciudad de Azogues mediante una vía secundaria que conecta con las áreas rurales del cantón.

Figura 2 Mapa de ubicación de la comunidad Zhindilig



1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar el riesgo de deslizamiento en la comunidad de Zhindilig mediante un análisis integral geoespacial para la elaboración de un mapa que identifique las áreas susceptibles.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar las unidades litológicas, sus propiedades geotécnicas, estructuras geológicas y procesos geomorfológicos activos mediante ensayos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y calicatas en la zona de estudio, para la determinación de la amenaza por deslizamientos.

2. Integrar la información geológica, geotécnica, geofísica y socioeconómico mediante herramientas de Sistema de Información Geográfica para la elaboración de un mapa de riesgo por deslizamientos que identifique las zonas críticas dentro de la comunidad.
3. Formular estrategias de mitigación mediante la categorización de los resultados del mapa de riesgos por deslizamiento para la prevención de desastres con acciones prioritarias.

1.6 Antecedentes

En la provincia del Cañar se han identificado históricamente problemas asociados a movimientos en masa y erosión de suelo, especialmente durante las temporadas de lluvias intensas, desencadenado movimientos de masa y desprendimientos de material, afectando vías y asentamientos rurales; tales eventos han requerido la activación de comités de emergencia y provocaron daños a infraestructura y evacuaciones en diferentes años (El Telégrafo, 2011).

Según la actualización del PDOT de Guapán (2015), en el sector de Zhindilig se evidencian procesos de deslizamiento de menor magnitud en superficie, pero con incidencia directa sobre la población local. Estas inestabilidades se relacionan con la vulnerabilidad del suelo, la presencia de materiales erosionados y las pendientes pronunciadas. Además, se identifican zonas de reptación y acumulación de flujos de escombros a lo largo de quebradas cercanas, lo que incrementa el riesgo de afectación a viviendas, vías y áreas productivas, lo que constituye el antecedente oficial local más relevante para justificar la necesidad de un estudio geofísico-geotécnico integral.

El PDOT del cantón Azogues 2024–2027 incorpora un diagnóstico del territorio, atlas cartográfico y determinaciones sobre vulnerabilidad y uso del suelo; en estos instrumentos el municipio identifica áreas de susceptibilidad a riesgos naturales y establece lineamientos para la gestión del riesgo y el ordenamiento del suelo. Es en este marco técnico-legal donde se registra la categorización de sectores con distintos niveles de susceptibilidad dentro del cantón Azogues,

incluyendo la clasificación de la parroquia Guapán como área con alta susceptibilidad (nivel 3) frente a deslizamientos (GAD Cañar, 2023).

Además de los riesgos geodinámicos, el cantón Azogues ha experimentado problemas con los servicios básicos como cortes y racionamiento de agua hacia zonas altas, situación que aumenta la vulnerabilidad de las poblaciones asentadas en pendientes y sectores de difícil acceso, puesto que una infraestructura precaria limita la capacidad de respuesta y la resiliencia comunitaria frente a desastres (El Mercurio, 2024).

Durante los eventos de lluvias intensas del 13 de marzo de 2025 se registraron desprendimientos de material en la vía Cuenca–Azogues–Biblián que obligaron al cierre temporal de la carretera y movilización de maquinaria para limpieza, lo que reafirma que las condiciones de precipitación extrema siguen generando movimientos de masa en el área de influencia de Azogues (Teleamazonas, 2025).

Aunque la prensa no registra abundantemente informes periodísticos que describan daños concretos exclusivamente en Zhindilig (por ejemplo, viviendas cuarteadas con atribución directa a deslizamientos), la combinación de antecedentes regionales de deslizamientos, eventos recientes de desprendimiento de material, indicadores de vulnerabilidad en servicios básicos y la clasificación oficial del PDOT que sitúa a Zhindilig en un nivel elevado de susceptibilidad permiten sostener que la comunidad está potencialmente afectada por procesos de inestabilidad. Esto justifica la realización de un estudio integral (geofísico-geotécnico y de estabilidad de taludes) para delimitar zonas críticas y proponer medidas de mitigación.

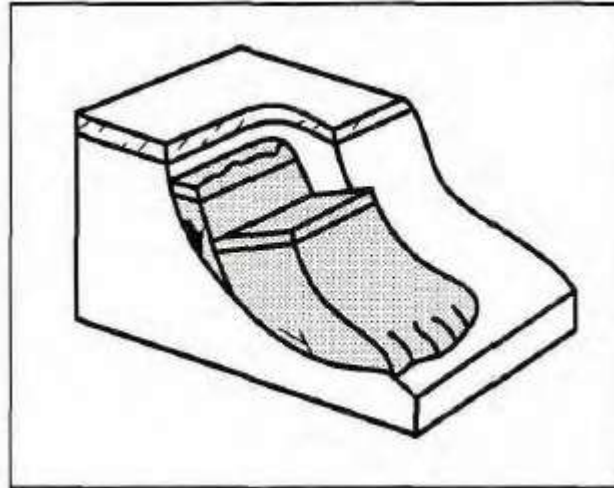
1.7 Marco teórico

1.7.1 Deslizamientos o movimientos en masa

Los deslizamientos o movimientos en masa, se definen como desplazamientos gravitacionales de materiales de una ladera, que pueden incluir roca, suelo o detritos, y que se producen cuando la fuerza motriz supera la resistencia del material (Figura 3) (Irasema Alcántara,

2000). En ambientes montañosos, estos procesos contribuyen de manera significativa al cambio de relieve y pueden ocurrir con distintos mecanismos (caída, deslizamiento rotacional, traslacional, flujo de detritos), según las condiciones de pendiente, litología y saturación de agua (Campforts et al., 2022).

Figura 3 *Imagen representativa de un deslizamiento*



Nota. Obtenido de Irasema Alcántara (2000).

1.7.2 Inestabilidad de laderas

La inestabilidad de laderas se produce cuando las condiciones físico-geológicas de una pendiente (como litología, pendiente, fractura miento, presión de poros, drenaje deficiente) favorecen que la masa de la ladera pierda su equilibrio (Irasema Alcántara, 2000). Irasema Alcántara (2000) sostiene que la saturación del suelo reduce la cohesión efectiva y aumenta la presión de poros, disminuyendo la capacidad de resistencia del material. Estudios recientes muestran también que el drenaje superficial y subterráneo insuficiente agrava la inestabilidad al incrementar el peso activo y reducir la fricción interna (Macías et al., 2024).

1.7.3 Factores desencadenantes de deslizamientos en regiones andinas

Los deslizamientos en regiones andinas se producen cuando las condiciones hidrometeorológicas generan un incremento en la saturación del suelo, reduciendo la resistencia efectiva de los materiales y elevando la presión de poros, lo cual disminuye la estabilidad del

terreno (Maragaño-Carmona et al., 2023). Las lluvias intensas y prolongadas constituyen el factor más frecuente, y la relación entre la intensidad y duración de las precipitaciones permite definir umbrales empíricos para identificar el inicio de los movimientos en masa (Soto et al., 2019). En años dominados por el fenómeno El Niño, estos umbrales son fácilmente superados, generando deslizamientos a gran escala debido al aumento de la humedad en las laderas (Maragaño-Carmona et al., 2023). La sismicidad también representa un factor importante, pues las vibraciones inducidas por los terremotos pueden reducir temporalmente la resistencia al corte de materiales débiles, provocando fallas en terrenos previamente saturados o inestables (Macías et al., 2024). La deforestación y los cambios en el uso del suelo agravan el problema al eliminar la cobertura vegetal que estabiliza las pendientes, aumentando el escurrimiento superficial y favoreciendo la erosión en la base de los taludes (Irasema Alcántara, 2000). Asimismo, las actividades antrópicas, como la apertura de carreteras, cortes de talud sin drenaje y sobrecarga de estructuras en la parte superior de las pendientes, alteran el equilibrio natural y pueden inducir fallas incluso bajo condiciones climáticas moderadas (Puente-Sotomayor et al., 2021). La composición litológica también desempeña un papel determinante, ya que los depósitos coluviales poco consolidados o las rocas sedimentarias alteradas permiten la propagación de movimientos superficiales y flujos de detritos (Macías et al., 2024). La comprensión integral de estos factores resulta esencial para establecer modelos predictivos y sistemas de alerta temprana basados en umbrales de precipitación o actividad sísmica, que contribuyan a reducir la vulnerabilidad en zonas montañosas (Maragaño-Carmona et al., 2023).

1.7.4 Talud infinito y Factor de Seguridad (FS)

El modelo teórico de “talud infinito” es un enfoque clásico para estimar la estabilidad de una ladera homogénea y extensa, bajo la premisa de que el desplazamiento ocurre a lo largo de un plano de deslizamiento paralelo a la superficie, lo cual permite calcular un Factor de Seguridad

(FS) como la razón entre la resistencia al deslizamiento y las fuerzas que tienden a deslizar (Younes Cárdenas & Erazo Mera, 2016).

Según la Normativa Ecuatoriana de la Construcción-Seguriada Estructural-Getécnia y Comentaciones (NEC-SE-GC) en condiciones estáticas, donde no se consideran efectos sísmicos, se establece como criterio general un factor de seguridad igual o mayor a 1,5, valor que proporciona un margen adecuado frente a posibles mecanismos de inestabilidad. En escenarios que incorporan condiciones pseudoestáticas, en los cuales se simula la acción sísmica mediante fuerzas equivalentes, el factor de seguridad admisible suele disminuir, situándose comúnmente en un rango entre 1,1 y 1,2. Para taludes temporales, cuya estabilidad se requiere únicamente durante un periodo limitado, se acepta un factor de seguridad mínimo de 1,3. Cuando el factor de seguridad es inferior a 1,0, el sistema se considera inestable.

1.7.5 Componentes del riesgo

El riesgo ante deslizamientos se entiende como la combinación de tres componentes: amenaza (la probabilidad e intensidad del evento), exposición (los elementos susceptibles a daño: viviendas, vías, infraestructura) y vulnerabilidad (la susceptibilidad de esos elementos a sufrir pérdidas) (Puente-Sotomayor et al., 2021). Mediante la identificación de estas tres dimensiones es posible generar mapas de riesgo, priorizar intervenciones y planificar estrategias de mitigación más efectivas, ya que el riesgo no proviene sólo del fenómeno natural, sino de la interacción entre el evento, los elementos expuestos y su condición de vulnerabilidad (Puente-Sotomayor et al., 2021).

1.7.6 Evaluación del riesgo de desastre por deslizamientos

La evaluación del riesgo por deslizamientos integra análisis cualitativos y cuantitativos: desde la cartografía de susceptibilidad y peligro, el cálculo de factores de seguridad, hasta la estimación de consecuencias potenciales y costos de reparación (Puente-Sotomayor et al., 2021). Constituye un componente esencial dentro de la gestión de desastres y la mitigación de sus

impactos, ya que proporciona información clave para la planificación territorial y la toma de decisiones informadas. En este sentido, una gestión del riesgo efectiva debe integrar tanto los factores naturales que originan el fenómeno como las acciones antrópicas que puedan intensificar la inestabilidad de las laderas (Marín et al., 2020).

1.7.7 Sistemas de Información Geográfica

Los SIG son herramientas computacionales que permiten la captura, almacenamiento, análisis y visualización de información espacial asociada a atributos temáticos, integrando en un mismo entorno datos provenientes de diversas fuentes como cartografía topográfica, sensores remotos y bases de datos geológicos (Rocha, 2019). Estas plataformas facilitan el análisis de fenómenos geográficos mediante la generación de capas temáticas que representan características del terreno y relaciones espaciales entre variables (Rocha, 2019). En la evaluación del riesgo por deslizamientos, los SIG son fundamentales para derivar parámetros geomorfológicos como pendiente, curvatura, orientación y relieve, obtenidos a partir de modelos digitales de elevación de alta resolución (Younes Cárdenas & Erazo Mera, 2016). Además, permiten integrar información complementaria sobre uso y cobertura del suelo, proximidad a ríos o carreteras, y registros pluviométricos, con el fin de identificar patrones espaciales de susceptibilidad (Puente-Sotomayor et al., 2021). A través de métodos estadísticos y multicriterio, como el Análisis Jerárquico de Procesos (AJP) o la regresión logística, los SIG posibilitan la generación de mapas de susceptibilidad que jerarquizan las áreas según su nivel de exposición a movimientos en masa (Younes Cárdenas & Erazo Mera, 2016). La utilidad de los SIG radica en su capacidad para integrar datos geotécnicos, hidrológicos y climáticos, transformándolos en información espacial útil para la planificación del territorio y la reducción del riesgo (Rocha, 2019). En consecuencia, el empleo de SIG se ha consolidado como una herramienta esencial para la gestión integral del riesgo, permitiendo establecer estrategias de mitigación basadas en evidencia espacial y científica (Puente-Sotomayor et al., 2021).

1.7.8 Métodos Geofísicos y ensayo de resistividad eléctrica

Los métodos geofísicos son técnicas no invasivas que permiten caracterizar el subsuelo, detectar discontinuidades, zonas de saturación o estructuras de falla sin necesidad de excavación extensa (Perrone et al., 2014). Entre ellos, la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) ha demostrado gran utilidad en la caracterización y monitoreo de zonas de deslizamiento al reflejar variaciones en la resistividad eléctrica del subsuelo vinculadas con humedad, fracturamiento, material alterado y presencia de agua (Perrone et al., 2014). Estudios recientes han subrayado que los perfiles TRE y los análisis de resistividad pueden revelar variaciones temporales y espaciales previas a un deslizamiento, lo que los hace aptos para sistemas de alerta temprana (Tsai et al., 2021).

1.7.9 Matriz de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas

El análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) es una técnica de diagnóstico estratégico que permite identificar y relacionar factores internos y externos relevantes para la planificación de proyectos y la toma de decisiones (Gürel & Merba, 2017). Esto facilita la síntesis de información compleja en cuatro cuadrantes, lo que ayuda a visualizar interacciones entre recursos internos y condiciones externas que afectan el desempeño de una organización o proyecto (Tabla 1) (Gürel & Merba, 2017). Históricamente, el FODA se ha aplicado en ámbitos empresariales, institucionales y de políticas públicas, y se ha adaptado también a la evaluación de proyectos y programas territoriales por su sencillez y aplicabilidad práctica (Gürel & Merba, 2017). Sin embargo, la literatura crítica señala limitaciones metodológicas del FODA, tales como la falta de priorización de factores, la posibilidad de listas extensas sin ponderación y la ambigüedad en la formulación de elementos, por lo que se recomienda complementar el FODA con métodos cuantitativos o técnicas de jerarquización (Gürel & Merba, 2017). Entonces, para aumentar su efectividad, se sugiere integrar procedimientos de validación como entrevistas a expertos, análisis documental o matrices ponderadas (por ejemplo,

incorporar criterios de peso o utilizar herramientas complementarias como la matriz Corregir, Afrontar, Mantener, Explotar (CAME) o análisis multicriterio) que permitan convertir el diagnóstico FODA en insumo operativo para la definición de estrategias (Gürel & Merba, 2017).

Tabla 1 *Esquema de la matriz FODA*

Componentes	Descripción
Fortalezas (F)	Características que otorgan ventajas frente a otras organizaciones dentro del sector o industria.
Oportunidades (O)	Elementos externos del entorno que generan beneficios o posibilidades favorables para la organización.
Debilidades (D)	Características que colocan a la organización en desventaja en relación con otras.
Amenazas (A)	Elementos externos del entorno que pueden generar dificultades, riesgos o problemas para la organización.

Nota. Modificado y obtenido de Gürel & Merba (2017)

Capítulo 2

2.1 Marco Geológico

2.1.1 Contexto Tectónico Regional

La configuración tectónica del Ecuador está dominada por el proceso de subducción activa de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, un mecanismo que ha estado operando desde el Mesozoico tardío y que continúa moldeando la morfología y dinámica interna de la cordillera de los Andes ecuatorianos (Araque-Pérez & Reyes-Lucero, 2025). Este proceso de convergencia, que ocurre con una dirección general este-noreste y velocidades aproximadas de 80 a 90 mm/año, constituye la principal fuerza impulsora de la deformación cortical, la sismicidad y el volcanismo en el margen continental (Jaillard et al., 2000).

La oblicuidad en la convergencia entre ambas placas genera un régimen tectónico complejo caracterizado por zonas de compresión, acortamiento y rotación de bloques corticales, acompañado de una marcada variabilidad en la geometría de la losa subducida (Jaillard et al., 2000). En el margen ecuatoriano, esta losa presenta cambios notables en su inclinación y profundidad, lo que define segmentos tectónicos con comportamientos diferenciados, tales como el segmento de subducción plana al norte (bajo la región de Esmeraldas y Quito) y el segmento de subducción más inclinada hacia el sur (en las provincias de Azuay y Loja) (Jaillard et al., 2000).

El resultado de esta dinámica es un paisaje estructuralmente diverso, en el que se combinan procesos de levantamiento cortical, deformación interna, formación de cuencas interandinas y retroarco, donde se acumulan sedimentos continentales y depósitos volcánico-clásticos de diversas edades (Horton, 2018). La interacción entre la tectónica compresiva y el intenso clima tropical andino, caracterizado por fuertes precipitaciones estacionales, amplifica los procesos de erosión y transporte de sedimentos, afectando directamente la estabilidad de las laderas y la evolución geomorfológica (Horton, 2018).

En conjunto, la subducción de la placa de Nazca constituye el motor geodinámico que condiciona la génesis de las estructuras regionales, la actividad sísmica frecuente y la constante

renovación del relieve andino a través del vulcanismo y la deformación activa (Araque-Pérez & Reyes-Lucero, 2025).

2.1.2 Contexto Geológico del Ecuador

El territorio ecuatoriano exhibe una compleja arquitectura geológica producto de una prolongada historia de convergencia, acreción y vulcanismo asociada al margen occidental sudamericano (Jaillard et al., 2000). Este escenario geodinámico ha dado lugar a una zonación litotectónica bien definida, donde se reconocen las principales provincias: la Cordillera Occidental, constituida por materiales volcánicos y ofiolitas acrecionadas; la Cordillera Real u Oriental, compuesta por rocas metamórficas y plutónicas paleozoicas; la Faja Interandina, un corredor tectónico-sedimentario donde se emplazan cuencas neógenas; y finalmente la Cuenca Amazónica, que representa el dominio de sedimentación continental más reciente (Horton, 2018).

El registro estratigráfico ecuatoriano evidencia la alternancia de unidades volcánicas cenozoicas (derivadas del arco magmático andino activo) con secuencias sedimentarias continentales y marino-costeras del Mesozoico y Cenozoico (Jaillard et al., 2000). Estas sucesiones litológicas controlan aspectos clave como la permeabilidad, la cohesión y el comportamiento mecánico de los materiales que conforman las laderas andinas, factores determinantes en los procesos de inestabilidad y erosión (Horton, 2018).

Durante el Neógeno y el Cuaternario, la persistente actividad tectónica, combinada con fluctuaciones climáticas globales, intensificó el aporte de sedimentos hacia las cuencas interandinas, originando potentes paquetes sedimentarios (como los de edad Mioceno–Plioceno) que hoy afloran en amplias zonas de la Sierra ecuatoriana (Jaillard et al., 2000). Estos depósitos (conformados por conglomerados, lutitas, areniscas y niveles volcánicos intercalados) definen la base litológica sobre la cual se desarrollan los suelos y estructuras geotécnicas actuales (Jaillard et al., 2000).

2.1.3 Geología Regional Sur del Ecuador

El sur del Ecuador, que abarca las provincias de Azuay, Cañar y Loja, constituye una región clave para entender la evolución tectono-sedimentaria del segmento meridional de la Cordillera de los Andes ecuatorianos (Pulupa et al., 2022). En esta zona, la historia geológica está dominada por la acumulación de depósitos volcánicos, volcanoclásticos y continentales neógeno-cuaternarios, formados en un ambiente interandino sujeto a pulsos alternados de deformación compresiva, levantamiento y actividad volcánica (Steinmann et al., 1999).

Durante el Mioceno superior al Plioceno, la región experimentó un volcanismo de tipo andesítico a dacítico, asociado al arco volcánico ecuatoriano, que dio origen a unidades tales como la Formación Tarqui y otras equivalentes locales (Steinmann et al., 1999). Estos eventos volcánicos estuvieron acompañados de la depositación de sedimentos continentales gruesos y finos que rellenaron las cuencas interandinas en desarrollo, formando los actuales depósitos coluviales, aluviales y de ladera que caracterizan el paisaje (Steinmann et al., 1999).

Los estudios geológicos realizados en el área de Azogues y sus alrededores (Cañar) han identificado una estratigrafía heterogénea, con paquetes alternantes de lutitas, limolitas, areniscas finas y niveles piroclásticos intercalados (Pulupa et al., 2022). Estas unidades conforman un conjunto litológico con contrastes de competencia mecánica (entre niveles resistentes y materiales friables) que controlan la susceptibilidad a movimientos en masa, especialmente en sectores donde la infiltración de agua o la alteración superficial reducen la cohesión de los materiales (Gonzaga Garzón, 2018).

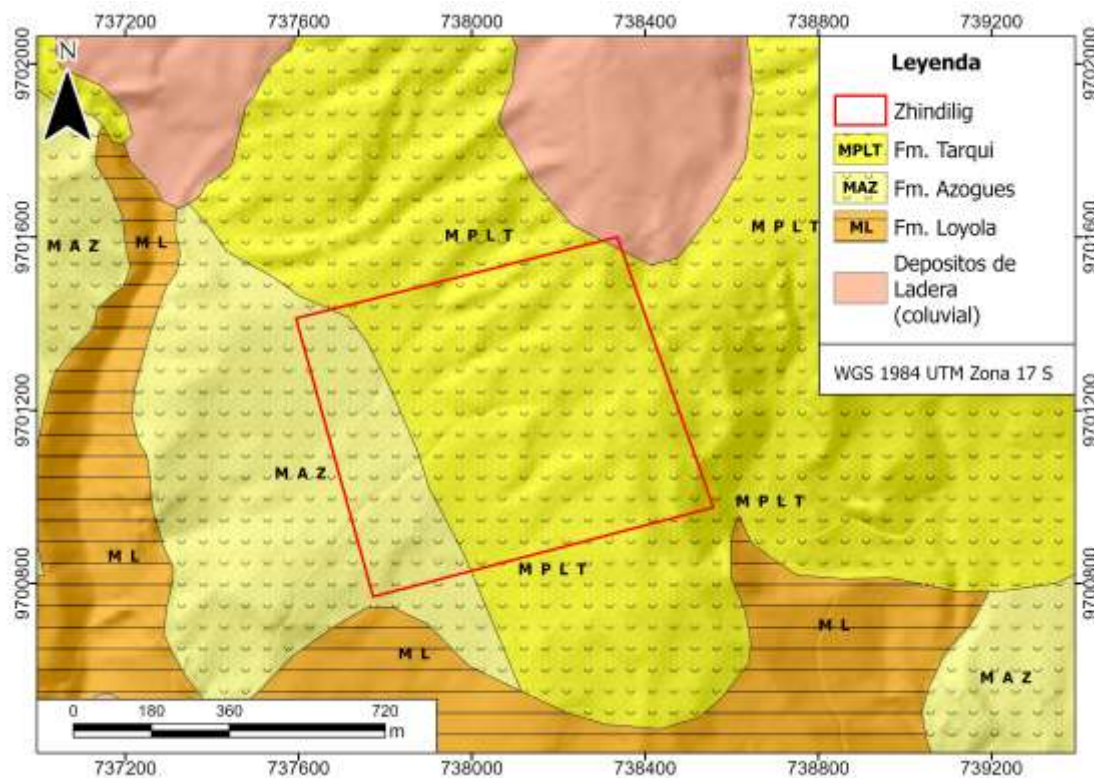
Además, el contexto estructural está marcado por fallas inversas y fracturas orientadas NE-SO, herencia de la deformación compresiva andina, que fragmentan el basamento y condicionan la geometría de las cuencas locales (Pulupa et al., 2022). La combinación de esta estructura tectónica, la litología volcanoclásticos y las altas tasas de precipitación propias del clima de la región sierra del Ecuador hacen que las laderas del sur ecuatoriano sean altamente inestables,

siendo comunes los deslizamientos y flujos de detritos durante la época lluviosa (Gonzaga Garzón, 2018).

2.1.4 Formaciones geológicas

El área correspondiente a la comuna Zhindilig se encuentra principalmente sobre la Formación Tarqui, la cual constituye la unidad geológica fundamental para el análisis de vulnerabilidad, peligro y amenaza en la zona. No obstante, el estudio geológico no puede limitarse a una sola unidad, ya que la comprensión integral del terreno requiere considerar la orientación estructural (rumbo y buzamiento) de las capas y su relación con las formaciones adyacentes. En este sentido, las formaciones Azogues, Loyola y los depósitos coluviales desempeñan un papel complementario y determinante en la configuración geológica y geotécnica del área de estudio, al influir directamente en la estabilidad de laderas y en la dinámica superficial del terreno (Figura 4).

Figura 4 Mapa de la geología del área de estudio



Nota. Obtenido y modificado de SIGTIERRAS (2019).

2.1.4.1 Formación Azogues

La Formación Azogues constituye una unidad sedimentaria clástica bien desarrollada en el centro de la cuenca interandina del sur del Ecuador, con amplios afloramientos en los alrededores de la ciudad de Azogues y a lo largo de ambos flancos del anticlinal de Biblián (Núñez Del Arco, 2003). Se extiende en dirección norte-sur, desde Cojitambo hasta el sector de El Valle, donde es cubierta por los depósitos cuaternarios de la Formación Turi. Sus rocas afloran también en el sector de Ucubamba y Challuabamba, cerca de Cuenca, donde se observa la denominada “Arenisca de Azogues”, que forma colinas escarpadas y resistentes a la erosión, características del relieve local (Núñez Del Arco, 2003).

Litológicamente, la formación está compuesta por areniscas tobáceas de color café, con granos medianos a gruesos, intercaladas con limolitas, arcillas y lutitas (Núñez Del Arco, 2003). En algunos sectores, especialmente cerca de Borrero, se observa un conglomerado basal con clastos redondeados de cuarzo, lutitas y rocas ígneas, que descansa sobre la Formación Yunguilla del Cretácico (Núñez Del Arco, 2003). Hacia el tope, la unidad presenta facies volcanoclásticas con fragmentos de pómez, limolitas y arcillas blanquecinas o amarillentas. Su espesor máximo estimado es de aproximadamente 280 metros, y los contactos con las formaciones Loyola y Guapán indican una transición sedimentaria continua dentro de la cuenca (Gonzaga Garzón, 2018).

La presencia de fósiles como *Corbicula sp.*, *Hemisinus sp.* y *Diplodon sp.* en su base indica un ambiente de depósito lacustre a fluvial y una edad del Mioceno medio, correlacionable con la Formación Loyola (Núñez Del Arco, 2003). La disposición estructural y las características litológicas reflejan una sedimentación influenciada por el volcanismo y la tectónica neógena. En términos geotécnicos, la alternancia de areniscas permeables y niveles arcillosos finos confiere a esta unidad una susceptibilidad moderada a la inestabilidad de laderas, especialmente bajo condiciones de saturación, lo que la convierte en una formación clave para el análisis geológico y de riesgos en la región de Azogues (Gonzaga Garzón, 2018; Núñez Del Arco, 2003).

2.1.4.2 Formación Tarqui

La Formación Tarqui corresponde a una unidad de naturaleza volcánica y volcanoclástica de composición andesítico-dacítica, ampliamente distribuida en el sur de la cuenca interandina del Ecuador, particularmente en las provincias de Azuay y Cañar (Núñez Del Arco, 2003). Su origen se asocia a una etapa de intensa actividad volcánica durante el Mioceno superior y Plioceno, relacionada con el arco magmático ecuatoriano y la dinámica de subducción de la placa de Nazca bajo el margen continental sudamericano (Núñez Del Arco, 2003). Esta unidad representa el principal aporte volcánico a la sedimentación continental de la cuenca durante el Neógeno tardío, marcando una transición entre las etapas de sedimentación clástica interandina y los episodios volcánicos del Cuaternario (Núñez Del Arco, 2003).

Litológicamente, la Formación Tarqui muestra una heterogeneidad notable, resultado de la alternancia de flujos lávicos, depósitos piroclásticos, tobas y brechas volcánicas, intercalados con niveles continentales detríticos (Pulupa et al., 2022). Los estudios litoestratigráficos en el corredor Cañar–Azogues–Cuenca han permitido diferenciar diversas facies volcánicas y volcanoclásticas, entre ellas los domos de lavas andesíticas y dacíticas, los flujos masivos de coladas densamente soldadas, los depósitos de caída y flujos piroclásticos retrabajados (Núñez Del Arco, 2003). Estas facies reflejan una evolución eruptiva compleja, donde episodios explosivos y efusivos se desarrollaron de manera consecutiva en el tiempo en un ambiente de cuenca semiendorreica sometida a deformación compresiva moderada (Pulupa et al., 2022).

La geoquímica de las rocas de Tarqui evidencia afinidades calcoalcalinas, propias de magmas generados en márgenes convergentes, con altos contenidos de sílice y variaciones en los elementos traza que permiten clasificarlas entre las andesitas y dacitas intermedias a silíceas (Pulupa et al., 2022). Esta composición sugiere que los magmas evolucionaron por procesos de cristalización fraccionada y asimilación cortical, propios del volcanismo neógeno del sur del Ecuador (Pulupa et al., 2022). Las dataciones radiométricas (trazas de fisión en circones, ZFT) obtenidas en diferentes niveles lávicos y tobas permiten asignar a esta formación una edad

comprendida entre el Mioceno tardío y el Plioceno temprano, coincidiendo con una fase de reactivación volcánica regional posterior a la depositación de las formaciones Azogues y Loyola (Pulupa et al., 2022).

Desde el punto de vista geomorfológico y geotécnico, la Formación Tarqui influye de manera determinante en la configuración del relieve del área de Azogues y Cuenca (Alonso-Pandavenes et al., 2024). Los niveles más competentes, representados por las coladas volcánicas masivas, conforman escarpes y terrazas estructurales que contrastan con los sectores dominados por niveles de tobas y cenizas, mucho más susceptibles a la meteorización y erosión diferencial (Núñez Del Arco, 2003). Esta disposición litológica genera escalonamientos en los perfiles de ladera y favorece la formación de planos de debilidad estructural, especialmente en zonas donde los materiales volcánicos finos se encuentran saturados o alterados hidrotermalmente (Núñez Del Arco, 2003).

2.1.4.3 Formación Loyola

La Formación Loyola corresponde a una unidad sedimentaria de origen fluvio-lacustre con influencia volcanoclástica, ampliamente reconocida en la cuenca interandina sur del Ecuador, particularmente en las provincias de Azuay y Cañar (Núñez Del Arco, 2003). De acuerdo con los léxicos estratigráficos y estudios regionales, esta formación constituye uno de los principales paquetes sedimentarios neógenos que, junto con las formaciones Azogues y Tarqui, integra la secuencia estratigráfica característica del sector centro-sur andino (Alulima et al., 2020).

Litológicamente, la Formación Loyola se compone predominantemente de lutitas y limolitas finas, de colores grisáceos a verdosos, con intercalaciones locales de areniscas finas, niveles arcillosos y horizontes tobáceos (Núñez Del Arco, 2003). Estas características sugieren un ambiente de depósito continental dominado por procesos fluviales y lacustres, donde los aportes volcánicos (cenizas y tobas retransportadas) estuvieron asociados a la actividad eruptiva neógena del arco andino (Núñez Del Arco, 2003). En algunos cortes de la cuenca de Cañar–Azogues, las facies más finas muestran estructuras laminadas y gradadas, indicativas de decantación en cuerpos

de agua someros, mientras que las capas arenosas reflejan fases de mayor energía de corriente y aportes de sedimentos terrígenos (Alulima et al., 2020).

Estratigráficamente, la Formación Loyola subyace a la Formación Azogues, con la cual presenta contactos interdigitados y transicionales, lo que evidencia una continuidad sedimentaria en la evolución de la cuenca interandina (Núñez Del Arco, 2003). Su espesor total es variable (en algunos sectores supera los 200 metros) y depende de la posición estructural y de la erosión posterior (Alulima et al., 2020). Paleontológicamente, se han registrado moluscos y restos vegetales que apoyan su origen continental y permiten correlacionarla temporalmente con el Mioceno medio a superior (Núñez Del Arco, 2003).

Desde un punto de vista geomorfológico y geotécnico, la Formación Loyola presenta especial interés debido a su baja competencia mecánica y a la alta plasticidad de sus materiales finos, factores que favorecen procesos de inestabilidad de laderas cuando se encuentran saturados por infiltración (Alulima et al., 2020). En el área de Azogues y sus alrededores, las lutitas y limolitas de Loyola forman taludes suaves pero propensos a deslizamientos y reptaciones, especialmente donde se combinan con coluviones recientes o depósitos volcánicos alterados (Alulima et al., 2020).

2.1.4.4 Depósitos de Laderas (Coluviales)

Los depósitos coluviales o coluvios corresponden a acumulaciones de materiales no consolidados de origen gravitacional, formadas a partir del traslado y retrabajo de fragmentos de roca y suelo desde las partes altas de las laderas hacia los sectores bajos o de pie de monte (Abascal & González Bonorino, 2015). Este tipo de sedimentación se caracteriza por su heterometría y baja organización interna, compuesta por una mezcla de bloques, cantos, arenas, limos y arcillas sin una clara estratificación (Abascal & González Bonorino, 2015). Los coluvios se originan por procesos combinados de caída, reptación, deslizamiento y flujo superficial, y constituyen uno de los principales productos del modelado gravitacional activo en los Andes durante el Pleistoceno–

Holoceno, donde la alta pendiente, la meteorización y la dinámica hídrica controlan su formación y evolución (Abascal & González Bonorino, 2015).

En el contexto andino del sur del Ecuador, particularmente en los alrededores de Azogues y Cuenca, los depósitos coluviales se desarrollan sobre las formaciones sedimentarias y volcánicas neógenas (Azogues, Loyola y Tarqui), acumulándose en los pies de ladera, terrazas bajas y zonas de quebradas (Avilés-Campoverde et al., 2021). Estos materiales presentan gran variabilidad textural y composicional, dependiendo del tipo de roca fuente y de la pendiente del terreno. Generalmente corresponden a materiales finos de plasticidad baja a media (ML–CL según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS), con intercalaciones de fragmentos líticos angulosos, lo que les confiere una estructura suelta y anisotrópica (Avilés-Campoverde et al., 2021). De acuerdo con observaciones geotécnicas locales, estos depósitos pueden alcanzar espesores variables (desde menos de un metro hasta más de diez metros y mostrar zonas de saturación temporal que reducen la resistencia al corte y aumentan la probabilidad de inestabilidad superficial o reactivación de deslizamientos antiguos (Avilés-Campoverde et al., 2021).

Los estudios sobre dinámica de laderas y riesgo de deslizamientos destacan que la morfología y distribución de los coluvios constituyen indicadores directos del grado de estabilidad del terreno (Parry, 2011). En ambientes húmedos tropicales como el de Azogues, la presencia de agua intersticial y la baja cohesión del material fino hacen que estos depósitos respondan rápidamente a las precipitaciones intensas, generando flujos de detritos, reptaciones y deslizamientos superficiales (Abascal & González Bonorino, 2015). Por ello, la caracterización geotécnica detallada —incluyendo ensayos granulométricos, determinación de límites de Atterberg, peso específico y resistencia al corte (triaxiales o de corte directo)— es fundamental para evaluar su comportamiento y definir criterios de estabilidad (Abascal & González Bonorino, 2015).

Capítulo 3

3.1 Materiales

El desarrollo del presente estudio requirió la utilización de información bibliográfica, equipos de campo, software especializado y herramientas de laboratorio, los cuales permitieron caracterizar la amenaza por deslizamientos y evaluar el riesgo en la comunidad de Zhindiling, cantón Azogues, provincia del Cañar.

3.1.1 *Materiales e Insumos de información*

Se emplearon datos geológicos, geotécnicos, geofísicos y socioeconómicos provenientes de diversas fuentes institucionales y de campo. Los principales insumos fueron:

Mapas base y cartografía temática: Cartografía geológica a escala 1:50 000 proporcionada por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), SIGTIERRAS y modelos digitales de elevación hechos mediante fotogrametría.

Datos socioeconómicos: Información censal del INEC (2022), con énfasis en densidad poblacional, tipología de vivienda y actividades económicas predominantes.

Datos de campo: obtenidos mediante campañas de levantamiento geológico, ensayos geotécnicos y mediciones geofísicas, permitiendo identificar condiciones de subsuelo.

3.1.2 *Equipos y Materiales de Campo*

Durante las campañas de campo se utilizaron los siguientes equipos y técnicas:

Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE): empleando un resistivímetro multicanal con configuración gradiente, equipo proporcionado por el Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), para determinar la distribución vertical y lateral de la resistividad del subsuelo y reconocer zonas de saturación y planos de deslizamiento potencial.

Calicatas geotécnicas: ejecutadas hasta profundidades entre 1.5 m y 3 m para la toma de muestras inalteradas y alteradas, utilizadas en los ensayos de laboratorio.

Ensayos geotécnicos: incluyeron granulometría, límites de Atterberg, corte directo y permeabilidad, realizados en el Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).

DJI Mavic 3M: empleado para obtener fotografías aéreas y generar modelos digitales de superficie y ortomosaicos actualizados de la zona de estudio, con el fin de identificar morfologías de ladera, escarpes y cicatrices de deslizamientos.

GPS Garmin Etrex: para el registro de coordenadas precisas de los puntos de muestreo, estaciones TRE y elementos expuestos.

3.1.3 Software y Procesamiento de Datos

El análisis y procesamiento de la información se realizaron mediante el uso de herramientas digitales especializadas:

ArcGIS Pro-3.4.3: para la elaboración de mapas temáticos, integración espacial y modelamiento del FS.

Res2Dinv y EarthImager 2D: para la inversión e interpretación de los perfiles de resistividad.

Excel: para la organización y cálculo de parámetros geotécnicos y estadísticos.

Google Earth Pro: para la verificación visual de rasgos morfológicos y validación de zonas afectadas.

3.2 Metodología

La metodología adoptada en este estudio corresponde al Análisis Cuantitativo de Riesgo o Quantitative Risk Analysis (QRA) de Caleca et al. (2022), seleccionado mediante una matriz comparativa de alternativas. Se evaluaron tres enfoques: (i) análisis integral geoespacial (QRA), (ii) estudios geotécnicos puntuales y (iii) monitoreo y alerta temprana, bajo los criterios de costo, tiempo de implementación, nivel técnico y aporte a la gestión del riesgo, en una escala de 1 a 5 (Tabla 2).

El criterio costo corresponde a la inversión económica estimada necesaria para la implementación integral de cada metodología, considerando actividades de campo, adquisición y procesamiento de datos, uso de software especializado y análisis técnico (1: 500–1.000 USD; 2: 1.000–2.000 USD; 3: 2.000–7.500 USD; 4: 7.500–12.500 USD; 5: > 12.500 USD). Los valores bajos representan metodologías de bajo requerimiento financiero, mientras que los valores altos corresponden a enfoques que demandan mayores recursos económicos debido a su nivel de detalle, extensión espacial o complejidad técnica.

El criterio tiempo evalúa la duración total requerida para la aplicación de cada metodología, abarcando las fases de planificación, levantamiento de información, procesamiento de datos y análisis de resultados (1: < 1 mes; 2: 1–2 meses; 3: 2–4 meses; 4: 4–6 meses; 5: > 6 meses). Los valores más bajos indican metodologías de rápida ejecución, generalmente basadas en información existente o procedimientos simplificados, mientras que los valores más altos reflejan procesos más prolongados asociados a trabajos de campo extensivos y análisis detallados.

El criterio nivel técnico requerido evalúa el grado de formación académica, experiencia profesional y complejidad metodológica necesaria para la correcta aplicación de cada alternativa analizada. Un valor 1 corresponde a metodologías que pueden ser ejecutadas con conocimientos técnicos básicos, procedimientos estandarizados y mínima interpretación especializada, sin requerir software avanzado ni formación específica en análisis de riesgos. El valor 2 se asigna a metodologías que demandan conocimientos técnicos generales y cierta experiencia en el área, con uso limitado de herramientas analíticas y apoyo de información secundaria. El valor 3 representa metodologías que requieren formación técnica intermedia, capacidad de análisis especializado y manejo de herramientas específicas, así como experiencia previa en estudios territoriales o geotécnicos. El valor 4 corresponde a enfoques que exigen un alto nivel de especialización, dominio de modelos analíticos o numéricos, interpretación experta de resultados y uso intensivo de software especializado. Finalmente, el valor 5 se asigna a metodologías de alta complejidad

técnica, que requieren equipos multidisciplinarios, expertos altamente capacitados y un sólido respaldo teórico y metodológico para su correcta implementación.

El criterio aporte a la gestión del riesgo mide la capacidad de cada metodología para generar información útil y aplicable en los procesos de prevención, planificación territorial y toma de decisiones. Un valor 1 indica que la metodología proporciona resultados de alcance limitado, con información parcial que no permite integrar de manera efectiva la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición, ni orientar acciones concretas de gestión del riesgo. El valor 2 corresponde a metodologías que aportan información relevante pero de aplicación restringida, útil principalmente para diagnósticos preliminares o análisis puntuales. El valor 3 se asigna a metodologías que generan insumos técnicos que permiten identificar áreas críticas y apoyar procesos básicos de planificación y mitigación. El valor 4 representa metodologías con alto nivel de aporte, capaces de integrar múltiples variables, priorizar zonas de intervención y respaldar decisiones técnicas en la gestión del riesgo. El valor 5 corresponde a metodologías que ofrecen un aporte integral y estratégico, permitiendo la evaluación sistemática del riesgo, el soporte a políticas públicas y la planificación territorial a corto, mediano y largo plazo.

Tabla 2 *Matriz de evaluación de alternativas a solución*

Alternativas	Enfoque metodológico	Escala espacial	Costo (1-5)	Tiempo (1-5)	Nivel técnico (1-5)	Aporte a la gestión de riesgo (1-5)	Total
Análisis Cuantitativo de Riesgo (QRA)	Cuantitativo-espacial	Regional-Comunal	3	3	4	5	15
Estudios geotécnicos puntuales	Determinístico	Local	2	2	3	3	10
Monitoreo y alerta temprana	Operativo	Zonas	3	3	3	4	13

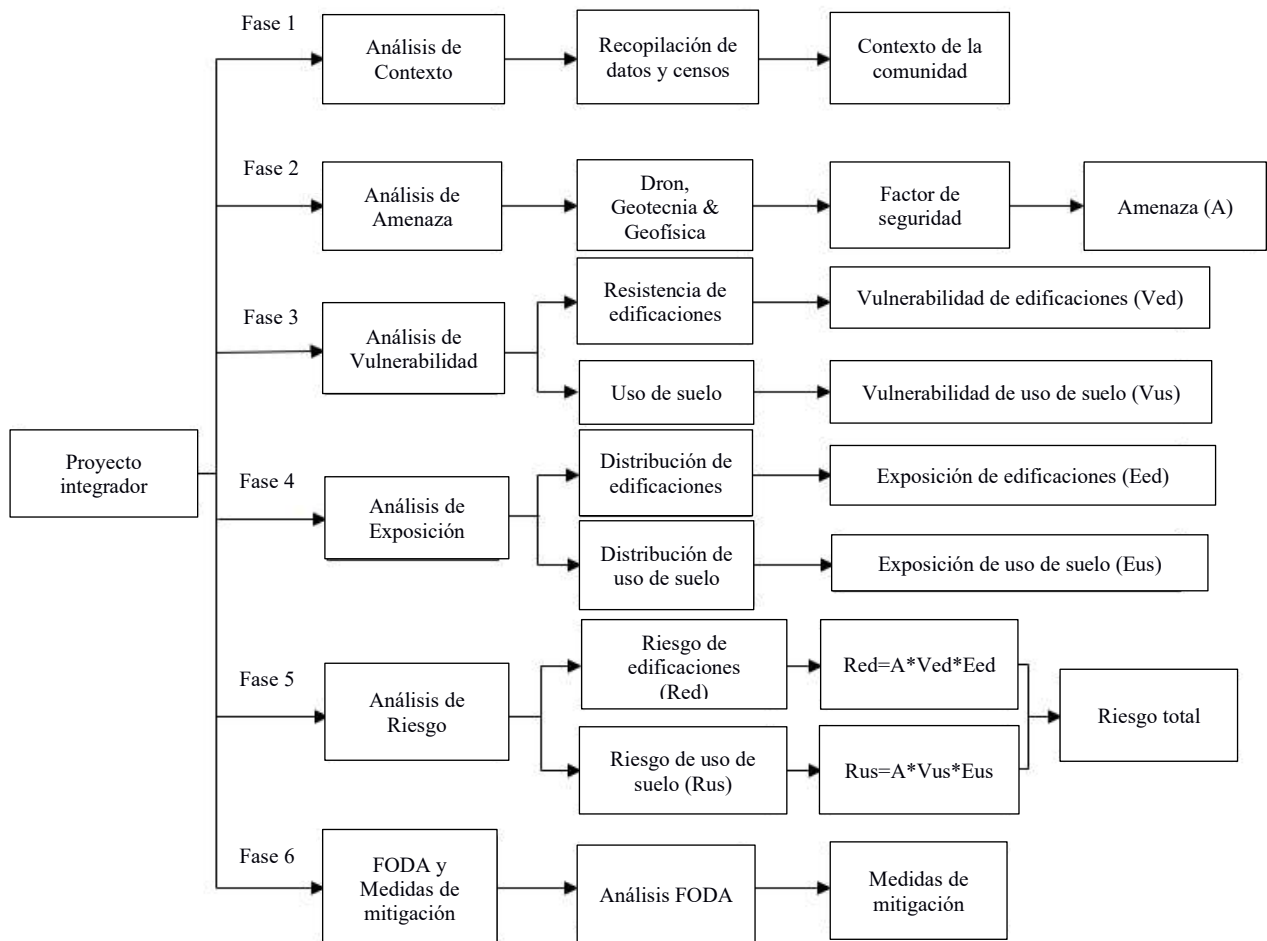
El enfoque QRA obtuvo la mayor puntuación total (15), destacando por su alto aporte a la gestión del riesgo (5) y su elevado nivel técnico (4), lo que refleja su capacidad para integrar de

forma cuantitativa la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición dentro de un marco espacialmente explícito. Aunque presenta valores intermedios en costo y tiempo (3), estos resultan aceptables frente a la cobertura regional–comunal y la calidad de la información generada.

A diferencia de los estudios geotécnicos puntuales, limitados a escalas locales, y de los sistemas de monitoreo, que tienen un enfoque operativo y reactivo, el QRA permite una evaluación preventiva, integral y espacial del riesgo, alineada con los objetivos de planificación territorial y gestión del riesgo del GAD de Azogues.

El proceso metodológico fue estructurado en seis fases secuenciales que abarcaron desde la recopilación y análisis del contexto físico hasta la formulación de medidas de mitigación mediante un análisis FODA (Figura 5).

Figura 5 Diagrama de flujo de la metodología



3.2.1 Fase 1: Análisis de Contexto

En esta fase se recopiló, procesó y analizó la información base relacionada con las condiciones físicas, sociales y ambientales de la comunidad. Se utilizó información geológica y geomorfológica, la identificación de estructuras tectónicas, pendientes y cobertura vegetal, todo esto obtenido de archivos shapfiles descargado de Sigtierras. Además, se incorporaron los datos censales y de infraestructura crítica obtenidos de INEC (2022).

El objetivo fue definir las características geodinámicas y socioeconómicas que condicionan la susceptibilidad del terreno a procesos de remoción en masa, estableciendo la línea base del estudio. Además, parte del análisis del contexto incluyó la socialización con los habitantes de la comuna de Zhindilig (Figura 6).

Figura 6 Comunicación con los residentes de la comuna Zhindilig



3.2.2 Fase 2: Análisis de Amenaza (A)

El análisis de la amenaza por deslizamientos en la comunidad de Zhindilig se desarrolló mediante un enfoque físico-mecánico basado en el cálculo del FS, el cual expresa la relación entre

las fuerzas resistentes del suelo y las fuerzas que inducen el deslizamiento. Para este propósito se utilizó el programa System for Automated Geoscientific Analyses Geographic Information System (SAGA GIS), que permite implementar un modelo de estabilidad de taludes distribuido espacialmente, generando un ráster continuo de amenaza, compatible con la metodología QRA de Caleca.

El modelo de SAGA GIS emplea seis parámetros fundamentales que representan las condiciones geométricas, geotécnicas e hidrológicas del terreno: pendiente, profundidad del suelo, cohesión, ángulo de fricción interna, densidad del suelo y grado de saturación (Tabla 3).

Tabla 3 *Parámetros de SagaGIS para generar el mapa de FS*

Parámetro	Tipo de dato	Formato (ráster)
Mapa de pendientes	Ráster de elevación	.tif (float, en radianes)
Profundidad de suelo	Constante o ráster	.tif (float, en m)
Cohesión	Constante o ráster	.tif (float, en MPa)
Ángulo de fricción interna	Constante o ráster	.tif (float, en grados)
Densidad	Constante o ráster	.tif (float, en kN/m ³)
Saturación	Constante o ráster	.tif (float, entre 0 y 1)

Estos parámetros fueron obtenidos e integrados a partir de tres fuentes principales de información:

3.2.2.1 Levantamiento Fotogramétrico

Para la caracterización topográfica de la zona de estudio se realizó un levantamiento fotogramétrico mediante un dron multispectral (Tabla 4), lo que permitió una cobertura continua y detallada del área. Se utilizó un DJI Mavic 3M con antena RTK, este se caracteriza por su alta estabilidad de vuelo, precisión de posicionamiento GNSS y cámara de 20 Megapíxeles, lo que garantiza la adquisición de imágenes de alta resolución espacial, adecuadas para estudios geomorfológicos y geotécnicos (DJI Agriculture, 2022).

El plan de vuelo se diseñó para asegurar una superposición longitudinal y transversal de al menos 70%, permitiendo la reconstrucción tridimensional del terreno mediante técnicas de

fotogrametría digital. Las fotografías obtenidas fueron procesadas en el *software* Agisoft Metashape (licencia educativa), siguiendo el flujo de trabajo estándar: alineación de fotografías, generación de nube de puntos densa, construcción del modelo de superficie y posterior interpolación para la obtención del MDE y la ortofoto georreferenciada de la zona de estudio.

El MDE generado representa la geometría real del terreno y constituye la base para el análisis de estabilidad de laderas. A partir de este modelo se calculó el mapa de pendientes (*slope*), que describe la inclinación de cada celda del terreno. Esta variable es fundamental en el análisis de deslizamientos, ya que controla directamente las fuerzas gravitacionales que inducen el movimiento de masas.

Tabla 4 Información del dron

Nombre Genérico	Características	Marca	Modelo	Serie
Dron Multiespectral	Incluye control remoto, 4 baterías cargadas, estuche de transporte	DJI	Mavic 3 Multiespectral	1581F5FKD23BH00DT331

3.2.2.2 Calicatas y ensayos geotécnicos

Con el fin de caracterizar las propiedades mecánicas y físicas del suelo en la zona de estudio, se ejecutó la calicata manual (C01) en sector representativo de la amenaza del área de estudio, excavada con herramientas manuales (pico y pala) hasta una profundidad máxima aproximada de 1,01 m (Figura 7), condicionada por limitaciones de tiempo y logística de la campaña de campo. Esta se realizó sin maquinaria, utilizando únicamente pico y pala, y fue ejecutada por una sola persona, lo que limitó la profundidad alcanzable en el tiempo disponible. Esta excavación permitió la observación directa de la estratigrafía, el espesor del suelo y la identificación de los materiales predominantes, así como la evaluación de las condiciones de humedad y estructura del suelo.

Figura 7 Calicata realizada en la Zhindilig



A partir de las calicatas se extrajeron muestras representativas para su análisis en laboratorio mediante el uso de la técnica de cuarteo (Figura 8). Los ensayos realizados incluyeron granulometría (ASTM D7928), límites de Atterberg (ASTM D4318) y ensayos de corte directo (ASTM D3080), los cuales permitieron determinar los parámetros geotécnicos fundamentales del suelo. La información granulométrica es fundamental para la clasificación del suelo, ya que define su comportamiento mecánico e hidráulico, su capacidad de drenaje y su susceptibilidad a la saturación (Figura 9).

Figura 8 Cuarteo de muestra en laboratorio



Figura 9 *Ensayo de granulometría*



Los límites de Atterberg (ASTM D4318) se utilizaron para clasificar el suelo y evaluar su comportamiento plástico, lo que es indicativo de su susceptibilidad a deformaciones y pérdida de resistencia en presencia de agua (Figura 10).

Figura 10 *Ensayo de límites de Atterberg*



Límites de Atterberg se dividen en dos, límite líquido (LL) y límite plástico (LP), ambos esenciales para determinar el tipo de suelo y clasificarlos según la clasificación de Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El LL se determinó mediante el método de la cuchara de Casagrande, que permite identificar el contenido de humedad al cual el suelo pasa del estado plástico al estado líquido. La muestra se mezcló con cantidades controladas de agua hasta obtener una pasta homogénea, la cual fue colocada en la copa del aparato y se le practicó una ranura normalizada.

La copa se sometió a golpes hasta que los bordes de la ranura se unieron en una longitud entre 1,3 y 1,7 cm, registrándose el número de golpes requerido. Este procedimiento se repitió para varios contenidos de humedad, cubriendo los rangos de 30–40, 25–30, 15–25 y 10–15 golpes. Para cada ensayo se determinó el contenido de humedad correspondiente.

Con estos datos se construyó la curva de flujo, ajustando una función logarítmica que tiene un tendencia de función lineal (3.1), donde Y es el contenido de humedad y X el número de golpes.

$$Y = A * \ln(X) + B \quad (3.1)$$

El límite plástico (LP) se determinó utilizando una porción de la muestra empleada previamente en el ensayo de límite líquido, específicamente correspondiente al rango de 30 a 40 golpes. De esta porción se tomó una masa aproximada de 16 g, la cual se dividió en dos submuestras y se colocó en recipientes separados.

Cada submuestra fue amasada y luego moldeada manualmente hasta formar cilindros de aproximadamente 1,3 mm de diámetro. Cuando los cilindros comenzaron a fisurarse y desmoronarse, se procedió a fragmentarlos en cuatro partes y colocarlos en los respectivos recipientes. Posteriormente, las muestras fueron pesadas, secadas en horno y nuevamente pesadas para determinar su contenido de humedad.

Finalmente, se usa el LL y LP para obtener el Índice de Plasticidad (IP) (3.2) según SUCS, el cual se calcula mediante:

$$IP = LL - LP \quad (3.2)$$

Por su parte, el ensayo de corte directo (ASTM D3080) se llevó a cabo con el objetivo de determinar la resistencia al corte del suelo bajo condiciones controladas de laboratorio. Para ello, la muestra de suelo fue previamente preparada y colocada en una caja de corte dividida horizontalmente en dos secciones. La muestra se compactó hasta alcanzar la densidad requerida y posteriormente se aplicó una carga normal constante, con el fin de simular las condiciones de confinamiento que el suelo experimenta en el terreno natural (Figura 11). Posterior se aplica

diferentes cargas normales a la muestra, registrando la fuerza necesaria para provocar la falla y a partir de estos ensayos se obtuvo la envolvente de falla del suelo, de la cual se derivaron los parámetros geotécnicos.

Figura 11 *Ensayo de corte directo y la caja triaxial para la muestra*



Durante el ensayo, se aplicó una carga horizontal progresiva sobre la parte superior de la muestra, incrementándose de manera continua hasta que se produjo la falla por corte. A lo largo del proceso se registraron la fuerza aplicada y el desplazamiento horizontal, permitiendo identificar el esfuerzo cortante máximo, a partir del cual se determinó la resistencia al corte del material.

El ensayo se repitió bajo dos niveles distintos de carga normal, lo que permitió construir la envolvente de falla y obtener los parámetros de resistencia al corte del suelo, específicamente la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ). Estos parámetros son fundamentales para el análisis de estabilidad de taludes, ya que representan la capacidad resistente del suelo frente a los esfuerzos que inducen el deslizamiento.

Finalmente, para calcular la densidad (3.3) y la saturación del suelo (% de humedad) (3.4) se usa las ecuaciones de Gonzales de Vallejo (2002), las cuales son:

$$\gamma = \frac{\text{Masa de suelo seco}}{\text{Volumen total (con poros)}} \quad (3.3)$$

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{Peso Suelo Húmedo} - \text{Peso Suelo Seco}}{\text{Peso Suelo Seco}} \times 100 \quad (3.4)$$

3.2.2.3 Ensayos de TRE

Con el objetivo de caracterizar las condiciones hidrogeológicas y estructurales del subsuelo, se realizaron ensayos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), siguiendo la normativa internacional ASTM D6431, los cuales permiten identificar la distribución de humedad, el nivel freático y el espesor de los materiales, factores directamente relacionados con la estabilidad de taludes.

Para la adquisición de datos se utilizó un Terrameter LS 2 (ABEM), complementado con carretes multielectrodo ABEM, un GPS Garmin para el posicionamiento espacial de los perfiles y radios walkie-talkie Baofeng para la coordinación del equipo en campo (Tabla 5). Este conjunto de equipos permitió ejecutar los levantamientos geofísicos con precisión espacial y control operativo.

Tabla 5 *Equipo usado en campo para los ensayos de TRE*

Cantidad	Equipo	Marca	Origen	Código
1	Terrameter LS 2	ABEM	CIPAT	228502
1	GPS	Garmin	CIPAT	188373
4	Carretes para tomografía eléctrica	ABEM	CIPAT	228502
2	Radio Walkie Talkie	Beofeng	CIPAT	212560

Las líneas de TRE fueron ubicadas en sectores previamente identificados como críticos, considerando pendientes elevadas, presencia de grietas, puntos de surgencia de agua, antecedentes de inestabilidad y cambios litológicos observados en campo. A lo largo de cada línea se dispusieron electrodos a intervalos regulares, conectados mediante un sistema multielectrodo al Terrameter LS2, el cual inyecta corriente eléctrica en el terreno y mide la diferencia de potencial resultante, permitiendo calcular la resistividad aparente del subsuelo (Figura 12).

Figura 12 *Ensayo de TRE gradiente en Zhindilig*



Para la adquisición de datos se empleó la configuración gradiente, debido a su alta cobertura lateral y eficiencia en la exploración de zonas extensas, lo que resulta adecuado para estudios de estabilidad de laderas. Esta configuración permite identificar contrastes laterales de resistividad asociados a cambios de material, zonas fracturadas y sectores saturados.

Los valores de resistividad obtenidos reflejan la variación en la composición y el contenido de agua del suelo, donde resistividades bajas suelen asociarse a materiales finos saturados o zonas con presencia de agua, mientras que resistividades altas indican materiales más competentes o secos. Los datos fueron procesados en el software Res2Dinv (versión 3.55.32) mediante un modelo de inversión refinado, luego de eliminar los puntos anómalos que generaban ruido, obteniéndose secciones bidimensionales del subsuelo.

3.2.2.4 *Factor de Seguridad (FS)*

La amenaza se evaluó mediante la determinación de la estabilidad del terreno con base en los parámetros geotécnicos y geofísicos obtenidos en campo. Se aplicó el modelo de talud infinito, que permitió calcular el FS. Los valores de FS se representaron espacialmente mediante un modelo ráster en el entorno SIG, clasificándose en tres categorías (Tabla 6).

Tabla 6 *Tabla de clasificación del Factor de Seguridad*

Nivel de Amenaza	FS
Muy alta	$FS < 1$
Alta	$1 \leq FS < 1,1$
Media	$1,1 \leq FS < 1,3$

Baja	$1,3 \leq FS < 1,5$
Muy Baja	$FS \geq 1,5$

Nota: Esta tabla fue obtenida de NEC-SE-GC, Miduvi (2014).

Para el cálculo del FS se emplearon seis parámetros fundamentales, los cuales fueron obtenidos a partir de ensayos de campo, laboratorio y análisis geoespacial. El mapa de pendientes, derivado del DEM generado a partir del vuelo de dron y procesado en Agisoft Metashape 1.8.4, define la geometría de las laderas y controla la componente gravitacional del movimiento. La profundidad del suelo fue estimada a partir de las TRE, las cuales permitieron identificar el espesor del material superficial y la posición del sustrato más competente.

Los parámetros de resistencia mecánica del suelo, la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ), fueron determinados mediante ensayos de corte directo, mientras que la densidad del suelo fue estimada a partir de su clasificación granulométrica y límites de Atterberg, complementados con los resultados del corte directo. Por su parte, el grado de saturación se calculó a partir del contenido de agua, obtenido mediante la comparación entre el peso de la muestra húmeda y seca.

Estos seis parámetros fueron integrados en SAGA GIS en forma de capas ráster o valores constantes (Tabla 7), permitiendo el cálculo distribuido del FS para cada celda del terreno. El resultado es un mapa continuo de estabilidad de taludes, donde las zonas con menor FS representan áreas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos.

Tabla 7 *Parámetros de FS y su medio de obtención*

Parámetro	Medio
Mapa de pendientes	Vuelo de dron, procesado en Agisoft Metashape
Profundidad del suelo	TRE
Cohesión	Ensayo corte directo
Ángulo de fricción interna	Ensayo corte directo

	Clasificación del suelo
Densidad	(granulometría y límites de Atterberg) con corte directo
Saturación del suelo	% agua= muestra húmeda y muestra seca

3.2.3 Fase 3: Análisis de Vulnerabilidad (V)

La vulnerabilidad se estimó considerando la resistencia estructural de las viviendas, los materiales de construcción y el acceso a servicios básicos. Se utilizó información censal del INEC (2022) y observaciones de campo, asignando valores de vulnerabilidad entre 0 (nula) y 1 (total).

Se evaluaron dos tipos de vulnerabilidad:

La **vulnerabilidad de las edificaciones (Ved)** que fue evaluada a partir de la resistencia de cada vivienda (3.5), la cual se calculó mediante la ecuación:

$$Rstr = (\varepsilon_{sty} \cdot \varepsilon_{smn} \cdot \varepsilon_{sht})^{-1/3} \quad (3.5)$$

donde ε_{sty} representa el tipo de estructura, ε_{smn} el estado de mantenimiento y ε_{sht} el número de pisos. Estos factores describen la capacidad estructural de una edificación para resistir los efectos de un deslizamiento y fueron asignados de acuerdo con la tipología constructiva observada en campo, la nube de puntos de Agisoft y la ortofoto.

El factor de tipo de estructura (ε_{sty}) considera el material y el sistema constructivo de la vivienda, asignándose valores bajos a estructuras livianas y valores más altos a edificaciones de hormigón armado, que presentan mayor resistencia. El estado de mantenimiento (ε_{smn}) refleja el grado de deterioro de la vivienda, desde muy mal estado hasta muy buen estado. Por su parte, el número de pisos (ε_{sht}) se utiliza como indicador de la masa y rigidez estructural (Tabla 8).

Tabla 8 *Parámetros de resistencia y sus valores*

Factor de resistencia	Tipología	Valor
Tipo de estructura	Residencial con estructura liviana	0.2
	Residencial con estructura de ladrillo	0.8

Tipo de estructura	Hormigón armado residencial	1.5
	Residencial en muy mal estado	0.1
Estado de mantenimiento	Residencial en estado medio	0.6
	Residencial en buen estado	1.2
	Residencial en muy buen estado	1.5
Número de pisos	Residencial de una sola planta	0.1
	Residencial de dos plantas	0.4
	Residencial de tres plantas	0.9
	Número de plantas mayor o igual a cuatro	1.5

NOTA: Obtenido de Caleca et al., (2022).

Una vez calculado el valor de resistencia Rstr para cada vivienda georreferenciada, estos datos puntuales fueron integrados en ArcGIS Pro 3.4.3 para generar el mapa de vulnerabilidad de edificaciones. Para ello se empleó el método de interpolación Kriging, el cual permite construir una superficie continua a partir de datos discretos considerando la dependencia espacial entre las observaciones. Este método estima valores en ubicaciones donde no existen mediciones directas, proporcionando un modelo espacialmente representativo de la distribución de la vulnerabilidad estructural en toda el área de estudio.

El resultado es un ráster continuo de vulnerabilidad, donde los valores más bajos de resistencia estructural representan edificaciones más vulnerables, y los valores más altos corresponden a estructuras con mayor capacidad de resistir los efectos de un deslizamiento.

La **vulnerabilidad del uso del suelo (Vus)**, se elaboró a partir de la clasificación del territorio según las coberturas y actividades presentes en la zona de estudio. Para este análisis se utilizó el archivo de cobertura y uso de suelo de Sigtierras, el cual proporcionó la base cartográfica para identificar los tipos de uso existentes dentro del área analizada. En la zona de estudio se identificaron únicamente tres clases de uso de suelo: tierra forestal, tierra agropecuaria y zonas antrópicas. A cada categoría de uso de suelo se le asignó un valor de vulnerabilidad de acuerdo con la tabla definida por Caleca et al., (2022). De este modo, las zonas antrópicas recibieron un

valor de 0.8, las tierras agropecuarias un valor de 0.6 y las tierras forestales un valor de 0.1. Estos valores fueron utilizados directamente en el proceso de reclasificación y generación del mapa de vulnerabilidad por uso de suelo dentro del análisis de riesgo (Tabla 9).

Tabla 9 *Valores de vulnerabilidad*

Uso de suelo	Vulnerabilidad
Tierra sin cobertura vegetal	1
Zona antrópica	0.8
Tierra agropecuaria	0.6
Vegetación herbácea	0.4
Tierra forestal	0.1

Nota. Obtenido de Caleca et al. (2022).

El archivo de SIGTIERRAS fue reclasificado en ArcGIS Pro según estos valores de vulnerabilidad y posteriormente convertido a formato ráster, generándose así el mapa de vulnerabilidad por uso de suelo.

3.2.4 Fase 4: Análisis de Exposición (E)

En el marco del QRA, la exposición representa la cantidad de elementos susceptibles de ser afectados dentro de una unidad espacial definida, usualmente expresada como una densidad por celda o por área (Caleca et al., 2022). En este estudio, la exposición se evaluó mediante dos componentes:

La **exposición de edificaciones (Eed)**, que se estimó a partir del número de viviendas georreferenciadas, las cuales representan los elementos físicos directamente expuestos a la amenaza por deslizamientos. A partir de estos datos puntuales se generó un mapa continuo de exposición mediante técnicas de análisis espacial en ArcGIS Pro, utilizando herramientas de interpolación y análisis de vecindad (*neighborhood/zonal statistics*) para representar la concentración espacial de viviendas.

Este procedimiento permitió transformar la distribución discreta de edificaciones en una superficie ráster donde cada celda expresa la densidad relativa de viviendas, identificando zonas con alta, media y baja concentración. De esta manera, el mapa de exposición de edificaciones refleja la intensidad de ocupación humana en el territorio, en el cual la exposición se asocia al número de elementos presentes dentro de cada unidad espacial.

De forma complementaria, se elaboró un mapa de **exposición por uso de suelo (Eus)**, el cual se basó en la densidad de viviendas por unidad de área (hectáreas) dentro de cada tipo de uso de suelo identificado ((3.6). Para ello, se utilizó la información de cobertura y uso de suelo junto con el inventario de edificaciones, calculando la densidad como la define Caleca et al. (2022):

$$\text{Densidad de exposición} = \frac{\text{Número de viviendas}}{\text{Área del polígono (ha)}} \quad (3.6)$$

Este cálculo se realizó para cada una de las categorías de uso de suelo presentes en la zona de estudio, permitiendo cuantificar la intensidad de ocupación humana asociada a cada tipo de cobertura. Los valores obtenidos fueron posteriormente asignados espacialmente y convertidos a formato ráster, generándose el mapa de exposición por uso de suelo.

3.2.5 Fase 5: Análisis de Riesgo (R)

El riesgo se obtuvo combinando los resultados de amenaza (H), vulnerabilidad (V) y exposición (E) mediante la ecuación $\mathbf{R} = \mathbf{H} \times \mathbf{V} \times \mathbf{E}$, siguiendo el enfoque de Caleca et al. (2022). Este procedimiento permitió cuantificar y clasificar el riesgo relativo de cada celda del área de estudio.

Para la elaboración de los mapas de riesgo, se utilizó la amenaza calculada en la Fase 2 junto con los dos mapas de vulnerabilidad obtenidos en la Fase 3 y los dos mapas de exposición de la Fase 4. De esta forma, se generaron dos mapas de riesgo independientes:

El **mapa de riesgo de edificaciones (Red)**, construido mediante la integración del mapa de amenaza con los mapas de vulnerabilidad y exposición de edificaciones.

El **mapa de riesgo de uso del suelo (Rus)**, elaborado combinando la misma capa de amenaza con los mapas de vulnerabilidad y exposición correspondientes al uso del suelo.

Finalmente, ambos mapas de riesgos (el de edificaciones y el de uso del suelo) fueron superpuestos y sumados espacialmente en ArcGIS Pro, obteniéndose así el mapa de riesgo total (Rt) de la comunidad de Zhindiling, el cual representa de manera integral las zonas prioritarias de intervención donde coinciden altos niveles de amenaza, vulnerabilidad y exposición.

Para la clasificación de los valores obtenidos del índice de riesgo, estos fueron reclasificados en cinco categorías, siguiendo un esquema según Zhou et al. (2021). El rango continuo de valores es entre 0 y 1, los cuales se dividió en los intervalos 0–0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–0,8 y 0,8–1, que representan los niveles de amenaza muy baja, baja, media, alta y muy alta. Esta clasificación, originalmente empleada para la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos, se adopta en este estudio con el fin de garantizar coherencia metodológica y comparabilidad de los mapas de riesgo generados.

3.2.6 Fase 6: FODA y Medidas de mitigación.

Una vez obtenido el mapa de riesgo mediante el QRA, se desarrolló un análisis FODA con el fin de estructurar y priorizar las medidas de mitigación para la reducción del riesgo por deslizamientos en la comunidad de Zhindilig.

El análisis FODA se realizó con el apoyo de expertos en geología, geotecnia y gestión de riesgos, quienes aportaron criterios técnicos para la interpretación de los resultados del QRA y la formulación de propuestas de intervención. El Ing. David Altamirano, tutor del proyecto, aportó observaciones desde el enfoque de la teledetección y el marco legal ambiental; el Ing. Ángel Valdiviezo contribuyó desde la geotecnia y la gestión del riesgo; la Ing. Nicole Cueva y el Ing. Adrián Calle brindaron aportes metodológicos y de redacción relacionados con la aplicación del análisis FODA; y el Ing. César Pinos, vinculado al GAD Municipal de Azogues, aportó criterios desde la perspectiva institucional y territorial,

Las fortalezas y oportunidades identificadas reflejan las capacidades técnicas, institucionales y territoriales disponibles para la gestión del riesgo, mientras que las debilidades y amenazas representan los factores que incrementan la vulnerabilidad y la probabilidad de afectación por deslizamientos. A partir de esta evaluación se definieron medidas de mitigación estructurales y no estructurales, enfocadas principalmente en las zonas clasificadas como de riesgo alto y muy alto según el modelo QRA.

Las medidas propuestas incluyen acciones orientadas al mejoramiento del drenaje superficial y subterráneo, estabilización de taludes, control del uso de suelo, restricciones a nuevas edificaciones en zonas inestables y fortalecimiento de la planificación territorial, en concordancia con la Ley Orgánica para la Gestión Integral de Riesgos de Desastres (LOGRID) del Ecuador y las competencias del GAD de Azogues en materia de reducción del riesgo.

Capítulo 4

4.1 Resultados

4.1.1 Cálculo de la Amenaza (A)

4.1.1.1 MDE y Slope

A partir del MDE (Figura 13) se generó el mapa de pendientes en ArcGIS Pro utilizando la herramienta Slope. Los valores de pendiente obtenidos se agruparon en los rangos 0–10°, 10–16°, 16–26°, 26–46° y 45–83° (Figura 14).

Figura 13 Modelo Digital de Elevación (MDE) de Zhindilig

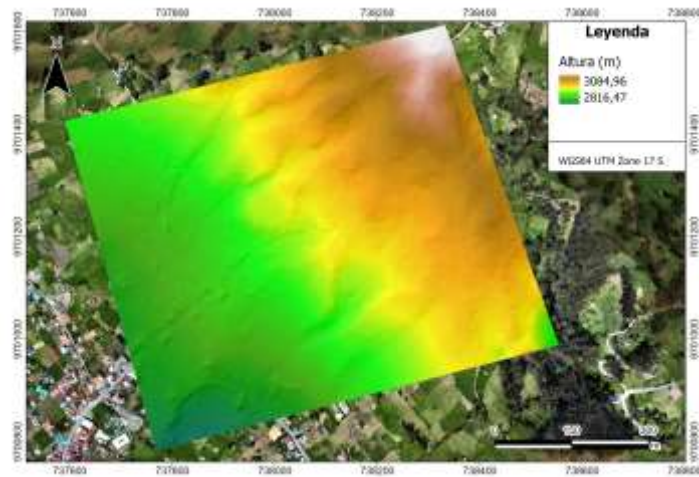
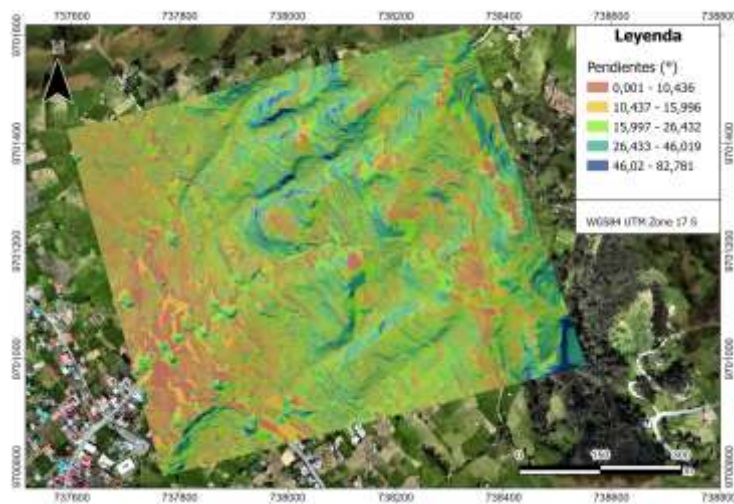


Figura 14 Mapa de pendientes (Slope) de Zhindilig



La distribución espacial de las pendientes muestra que, en las cercanías del poblado, el terreno presenta inclinaciones suaves (entre 0° y 15°), mientras que hacia los sectores de ladera se

incrementa progresivamente la pendiente (valores $> 26^\circ$). En particular, las áreas con mayor inclinación se concentran en las laderas orientadas hacia el suroeste (SW), donde el relieve es más abrupto y, por tanto, más relevante para el análisis de estabilidad y amenaza por deslizamientos.

4.1.1.2 Granulometría, Límites y Corte directo.

El cálculo de la amenaza requiere información proveniente de ensayos de laboratorio, entre los cuales la **granulometría** constituye uno de los análisis fundamentales. Para este ensayo, luego del proceso de cuarteo, se seleccionó una muestra representativa de 202,8 g, la cual fue sometida a un lavado a través del tamiz N.º 200 con el fin de separar la fracción de partículas finas (diámetro $< 0,074$ mm) del material más grueso (Tabla 10).

Tabla 10 Porcentaje de fino post lavado de muestra

Parámetros de control de ensayo	Valor
Masa inicial (g)	202.8
Mapa posterior al lavado (g)	52
Masa perdida (g)	150.80
Mapa perdida (g) + Fondo	152.10
% de masa $>$ tamiz nº200	75 %

Posteriormente, el material retenido fue sometido a un análisis granulométrico por tamizado en seco utilizando una máquina de agitación con temporizador, con un tiempo de operación de 5 minutos, de acuerdo con la normativa American Society for Testing and Materials (ASTM). Se emplearon los tamices N.º 4, 10, 40, 100 y 200, lo que permitió obtener la distribución del tamaño de partículas del suelo y definir su tendencia granulométrica.

Los resultados muestran una tendencia decreciente del tamaño de grano, observándose que el material que pasa por el tamiz N.º 200 corresponde únicamente a 1,3 g, lo que representa la

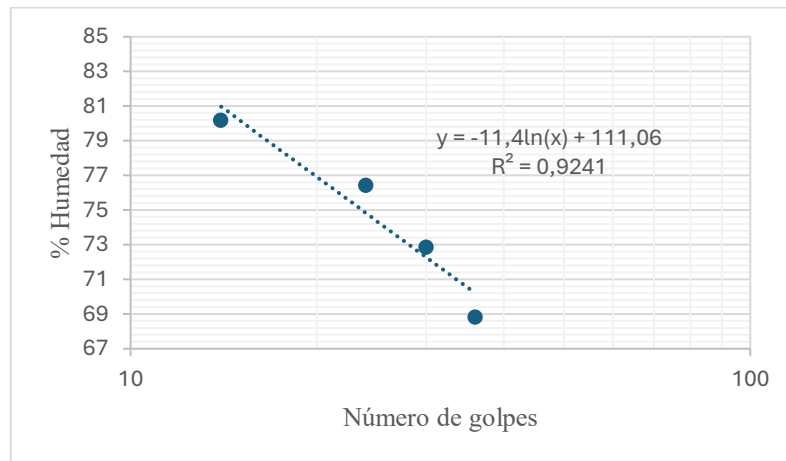
fracción de limos y arcillas (Tabla 11). A partir de la diferencia entre la masa inicial y la masa final retenida (52,1 g), y considerando la fracción fina obtenida, se determinó que aproximadamente el 75 % del suelo está compuesto por limos y arcillas, clasificándose, por tanto, como un suelo de predominio fino (Tabla 10).

Tabla 11 Resultado de granulometría

ASTM N°	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% retenido	% retenido acumulado	% pasa
4	4,75	0	0,00%	0,00%	100,00%
10	1,9	1,8	3,46%	3,46%	96,54%
40	0,84	13,7	26,35%	29,81%	70,19%
100	0,149	24	46,15%	75,96%	24,04%
200	0,074	11,2	21,54%	97,50%	2,50%
Fondo	Fondo	1,3	2,50%	100,00%	
Total		52	100,00%		

Este comportamiento granulométrico es relevante para el análisis de la amenaza, ya que los suelos finos presentan mayor susceptibilidad a la saturación, pérdida de resistencia al corte y, en consecuencia, a procesos de inestabilidad de laderas (Bustamante et al., 2025).

Por otro lado, tenemos los **límites de Atterberg**, LL y LP, donde los resultados se visualizan en la gráfica logarítmica cuyo comportamiento tiene un tendencia lineal decreciente. Se validó el ensayo con el coeficiente de determinación R^2 , obteniendo un $R^2=0,92$ siendo este un rango aceptable (0,91–0,95) (Figura 15). El límite líquido se obtuvo evaluando la ecuación para $N = 25$ golpes, resultando un valor de 74,36 % (Figura 15).

Figura 15 Función logarítmica de tendencia lineal de los ensayos de LL

El límite plástico (LP) se calculó, obteniéndose un valor de 49,57 %, el cual representa el contenido de humedad al que el suelo pasa del estado semisólido al estado plástico (Tabla 12).

Tabla 12 Límite de plasticidad-Datos

Resultado del ensayo de LP	Valor
ID del recipiente	71
Masa del recipiente	5,98
Masa suelo húmedo + recipiente	12,95
Masa suelo seco + recipiente	10,64
Masa de agua evaporada	2,31
Masa de suelo seco	4,66
Humedad	49,5708155
LP	49,57

Con los valores obtenidos de límite líquido (LL = 74,36 %) y límite plástico (LP = 49,57 %) se calculó el índice de plasticidad (IP) obteniéndose un valor de IP = 24,79 %. Este parámetro expresa el rango de humedad en el que el suelo se comporta de manera plástica.

Al combinar el IP, el LL y los resultados de la granulometría, el suelo fue clasificado según el SUCS como limo elástico arenoso, lo que indica un material fino con comportamiento plástico, presencia de fracción arenosa y alta sensibilidad a cambios en el contenido de humedad.

El análisis de resistencia al corte directo proporcionó un ángulo de fricción interna (ϕ) de $17,86^\circ$ y una cohesión (c) de 12,01 kPa, equivalente a 0,012 MPa, valor requerido por SAGA GIS para el cálculo del FS.

Adicionalmente, se determinó la densidad seca del suelo utilizando una muestra extraída de la caja triaxial, cuyo volumen es 72 cm^3 . La masa seca registrada fue de 74,64 g, obteniéndose una densidad de:

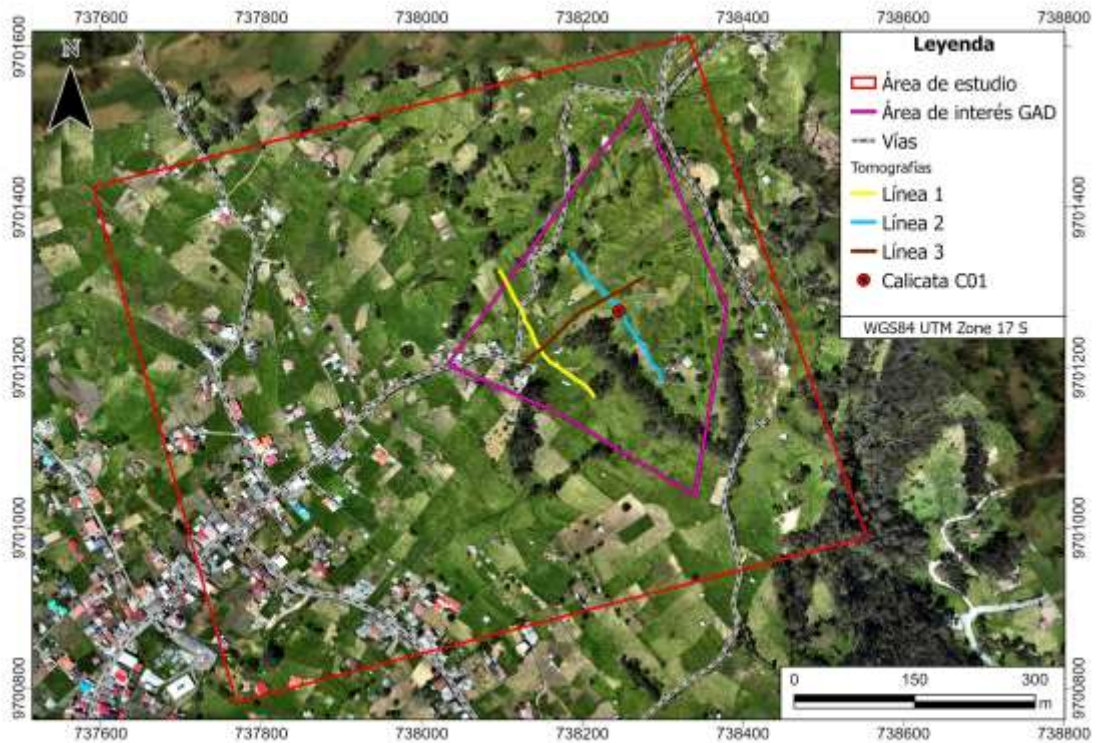
$$\gamma = 1,03 \text{ g/cm}^3$$

Este parámetro fue incorporado al análisis de estabilidad, ya que influye directamente en el peso propio del material y, por tanto, en las fuerzas que actúan sobre la ladera.

4.1.1.3 Tomografías de Resistividad Eléctrica

Las TRE realizadas en el proyecto correspondieron a tres líneas geofísicas, denominadas Línea 1, Línea 2 y Línea 3, las cuales se usaron para caracterizar la estructura del subsuelo en la zona inestable delimitada por el GAD municipal de Azogues (Figura 16). La Línea 1 se ubicó en la falda de la ladera, donde se concentra la mayor acumulación de material y humedad; la Línea 2 se trazó en la parte superior de la ladera, permitiendo evaluar las condiciones de recarga y origen del movimiento; mientras que la Línea 3 se dispuso de forma perpendicular a las dos anteriores, atravesando tanto la Línea 1 como la Línea 2, con el fin de obtener una visión transversal continua del subsuelo y correlacionar las variaciones de resistividad entre los distintos sectores de la pendiente.

Figura 16 Mapa de ubicación de las tomografías y la calicata

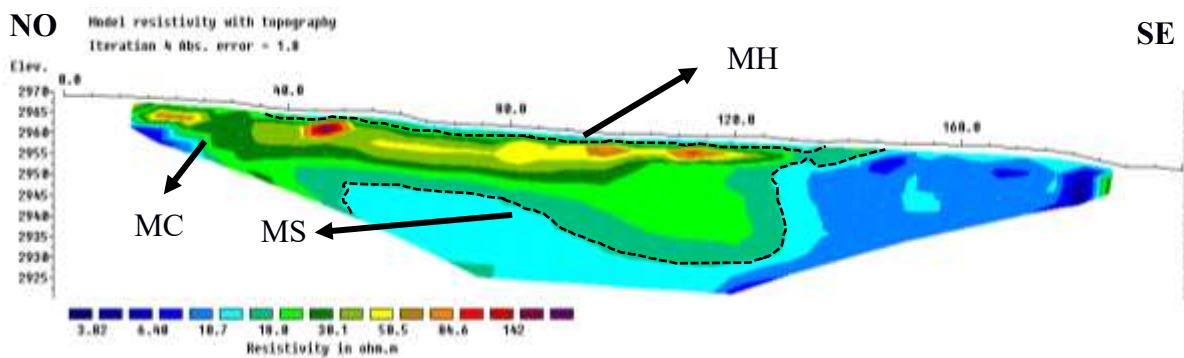


4.1.1.3.1 Línea 1

El perfil Línea 1, levantado en la dirección suroeste (SO) del polígono delimitado por el GAD municipal de Azogues, muestra en los primeros metros del subsuelo valores de resistividad entre 3,8–10,7 $\Omega \cdot m$, los cuales se asocian al suelo identificado en laboratorio como limo elástico arenoso (MH), caracterizado por alta plasticidad y elevada capacidad de retención de agua. MH que se extiende aproximadamente hasta los 2 m de profundidad, la saturación es favorecida tanto por la baja permeabilidad del material fino como por la infiltración asociada a la actividad agrícola. Entre aproximadamente 2 y 7 m de profundidad se observa un incremento local de resistividad que inicia en el lado noroeste para luego disminuir en la longitud de 120 metros en dirección sureste (SE), los valores alcanzan 84,6 $\Omega \cdot m$ e incluso un cuerpo aislado cercano a 146 $\Omega \cdot m$, interpretados como heterogeneidades internas del subsuelo, posiblemente asociadas a bloques de material más consolidado (MC), cuyo mayor grado de compactación reduce la conductividad eléctrica, aunque sin impedir completamente la infiltración de agua. Por debajo de este nivel, las

resistividades vuelven a disminuir y se mantienen entre 6 y 18 $\Omega \cdot m$ en gran parte del perfil, lo que sugiere la presencia de material volcánico alterado y re trabajado (denominaremos MA), probablemente relacionado con depósitos de tobas y aglomerados volcánicos pertenecientes a la Formación Tarqui, los cuales, debido a su naturaleza porosa y alterada, pueden alcanzar grados de saturación comparables a los del suelo superficial (Figura 17).

Figura 17 Ensayo de TRE, Línea 1



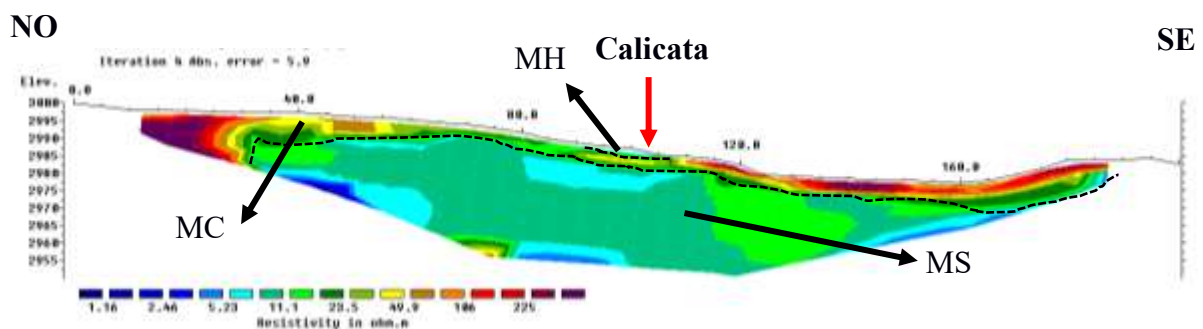
Nota: MH: Limo elástico arenoso, MC: Material compactado, MS: Material saturado

4.1.1.3.2 Línea 2

El perfil Línea 2 muestra en la zona superficial, entre 0 y aproximadamente 6,75 m de profundidad, valores de resistividad que oscilan entre 49,9 y 225 $\Omega \cdot m$, en contraste con los valores más bajos observados en Línea 1. Esta diferencia se interpreta como una variación en el grado de saturación del suelo superficial, asociada al distinto uso del terreno, ya que el área correspondiente a la Línea 2 está destinada principalmente a ganadería y pastoreo, con menor intensidad de riego agrícola. En este sector, si bien existen cunetas artificiales que canalizan el agua desde la parte alta de la ladera hacia zonas de menor pendiente, la infiltración directa es parcial y no genera una saturación permanente del suelo, lo que explica el incremento de resistividad respecto a zonas cultivadas. Estos valores elevados pueden corresponder al mismo tipo de suelo identificado en laboratorio (limo elástico arenoso, MH), pero en condiciones más secas o menos saturadas (posiblemente se trate de MC siendo el mismo material MH dado que la calicata fue hecha en el centro de la TRE, es decir 100 metros) donde se muestra resistividades de aproximadamente 5

$\Omega \cdot m$, así como a la presencia de heterogeneidades internas o concreciones de material más compacto que incrementan localmente la resistividad. A partir de aproximadamente 6,75 m de profundidad, se observa un descenso marcado de la resistividad, alcanzando valores del orden de 5,23 $\Omega \cdot m$ y, entre los 15 m y profundidades mayores, valores aún más bajos de 1,16 a 2,46 $\Omega \cdot m$, los cuales indican la presencia de material con alto contenido de agua y condiciones de saturación significativa (MA). Estas zonas conductivas (valores más bajos de resistividad: 1,16 a 2,46 $\Omega \cdot m$) aparecen de manera parcial y no continua, lo que sugiere una distribución heterogénea de la humedad en el subsuelo (Figura 18). Hacia mayores profundidades, 32 m, se identifican estructuras con geometría aproximadamente circular, donde las resistividades aumentan progresivamente yendo desde valores cercanos a 11,1 $\Omega \cdot m$ hasta valores superiores a 100 $\Omega \cdot m$ (hacia el núcleo), interpretadas como sectores más compactos o menos saturados dentro del mismo conjunto de materiales volcánicos alterados, cuya respuesta eléctrica refleja variaciones en compactación y contenido de agua más que cambios litológicos abruptos (Figura 18).

Figura 18 Ensayo de TRE, Línea 2



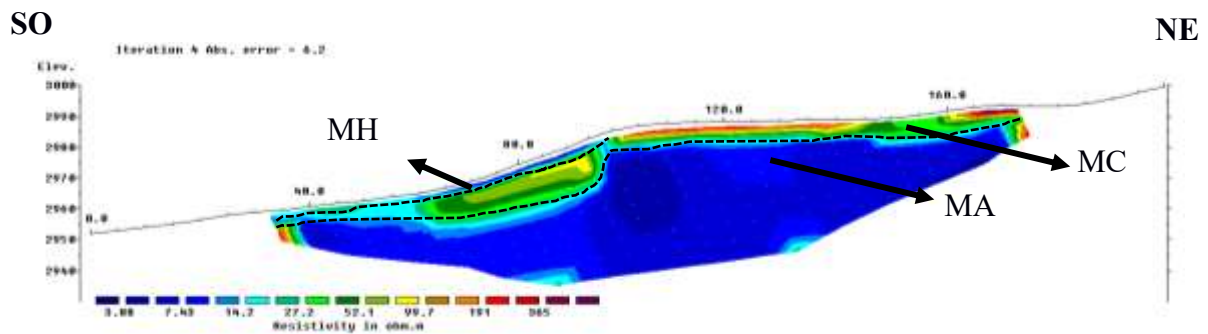
Nota: MH: Limo elástico arenoso, MC: Material compactado, MS: Material saturado

4.1.1.3.3 Línea 3

El perfil Línea 3, realizado de forma perpendicular a los perfiles 1 y 2, permitió integrar las variaciones de resistividad observadas entre la zona alta y la zona baja o de pendientes de menor grado en la ladera (Zona de riesgo del GAD), mostrando una clara coherencia con las interpretaciones individuales de ambos perfiles. En este sentido, la Línea 3 refleja de manera

continúa el cambio en el uso del suelo asociado a la variación de pendiente, donde la parte superior de la ladera corresponde a una zona destinada a ganadería y pastoreo, mientras que la parte inferior se encuentra asociada a áreas de cultivo y riego. En la zona que se ubica en el extremo de la dirección suroeste del perfil se identifican resistividades bajas en la capa superficial, donde la profundidad es menor a 6,75 m, los valores oscilan entre 3,88 y 14,2 $\Omega \cdot m$, las cuales se interpretan con el suelo previamente caracterizado en laboratorio como limo elástico arenoso (MH) en condiciones de saturación, favorecidas por las prácticas de riego. En este mismo sector se reconoce una zona con resistividades intermedias, entre 27,2 y 52,1 $\Omega \cdot m$, así como zonas con concreciones (MC) con valores cercanos a 99,7 $\Omega \cdot m$, posiblemente asociada a depósitos volcánicos de la Formación Tarqui o el mismo MH pero menos saturado o más compactado, lo que genera un contraste eléctrico respecto al material circundante, con resistividades más bajas (entre 3 y 14 $\Omega \cdot m$) (Figura). Por el contrario, en la parte superior del perfil, correspondiente a la zona ganadera, la capa superficial hasta aproximadamente 6,75 m muestra resistividades más altas, que varían entre 27,2 y 191 $\Omega \cdot m$, e incluso una anomalía puntual con valores cercanos a 365 $\Omega \cdot m$ hacia el extremo noreste (NE) del perfil, lo cual se interpreta como el mismo tipo de suelo MH, pero en condiciones menos saturadas, junto con la presencia local de material más compacto. No obstante, a partir de profundidades cercanas a 6,75 m, las resistividades disminuyen nuevamente en este sector, alcanzando valores entre 3,88 y 14,2 $\Omega \cdot m$, lo que indica un incremento en el contenido de humedad en profundidad asociado al material saturado (MS). En conjunto, considerando las interpretaciones integradas de los tres perfiles, se infiere que el suelo limo elástico arenoso, en condiciones saturadas y parcialmente saturadas, se desarrolla desde la superficie hasta aproximadamente 7 m de profundidad, mientras que por debajo de este nivel predominan materiales volcánicos alterados y erosionados, posiblemente asociados a la Formación Tarqui, dentro de los cuales se identifican de manera local concentraciones de material más compacto y menos saturado que generan resistividades medias a relativamente altas (Figura 19).

Figura 19 Ensayo de TRE, Línea 3



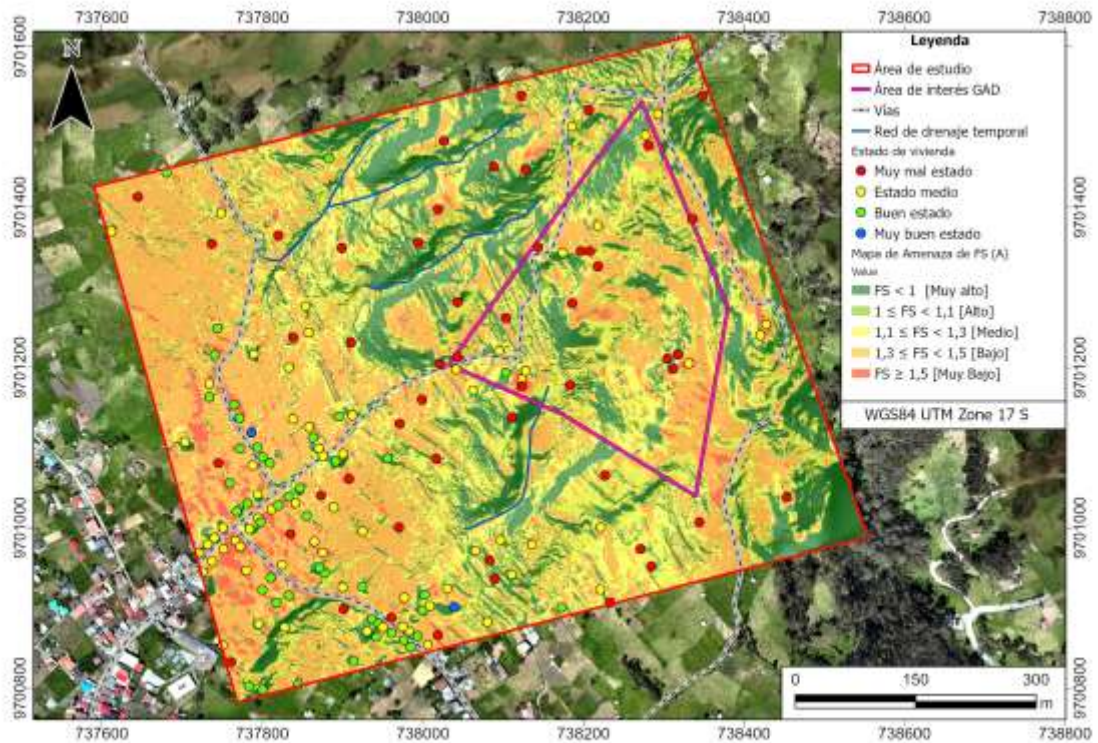
Nota: MH: Limo elástico arenoso, MC: Material compactado, MS: Material saturado

4.1.1.4 Mapa de Amenaza con FS

Este parámetro fue incorporado al análisis de estabilidad, ya que influye directamente en el peso propio del material y, por tanto, en las fuerzas que actúan sobre la ladera.

El mapa de Amenaza, generado a partir del FS en SAGA GIS, se elaboró utilizando los mapas de pendiente (Slope), cohesión, ángulo de fricción, porcentaje de humedad, profundidad del suelo y densidad, obteniendo Slope a partir del DEM para comprender mejor la relación entre la pendiente y el comportamiento del FS. Los resultados muestran que las zonas con pendientes más pronunciadas presentan una mayor amenaza, ya que los valores de FS en estas áreas tienden a ser menores a 1, indicando alta intensidad de riesgo. Por otro lado, las áreas con FS iguales a 1 representan una amenaza media, mientras que aquellas con FS mayores a 1 se consideran de baja amenaza, reflejando que la vulnerabilidad en estas zonas es menor debido a que los factores que determinan la resistencia del terreno o de las edificaciones son más favorables (Figura 20). Esto nos da un indicio que la zona se encuentra en un 15% con zonas de FS menores a 1, un 10% con zonas igual a 1.

Figura 20 Mapa de amenaza con FS

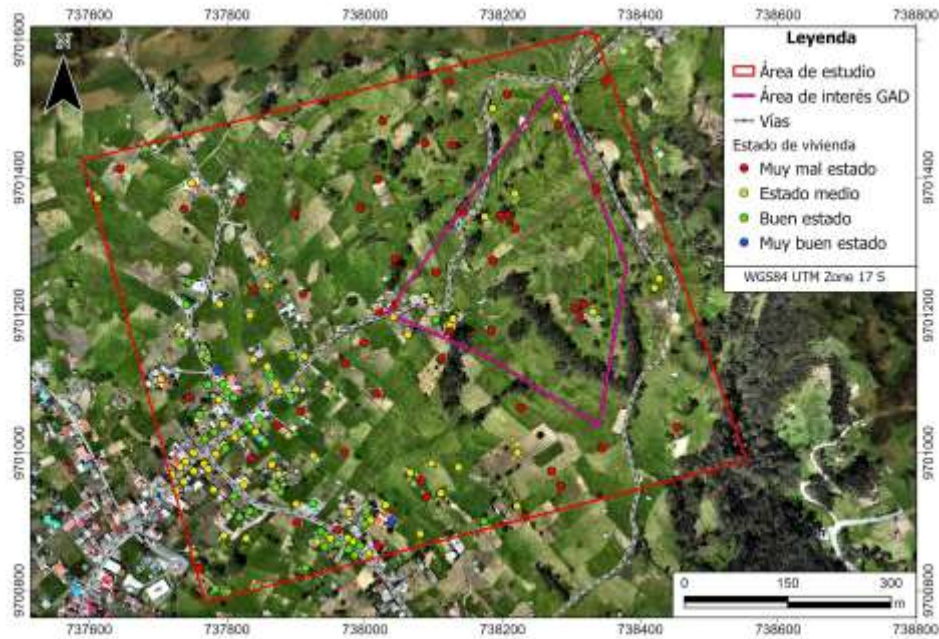


4.1.2 Cálculo de Vulnerabilidad (V)

4.1.2.1 Mapa de Vulnerabilidad de Edificaciones (Ved)

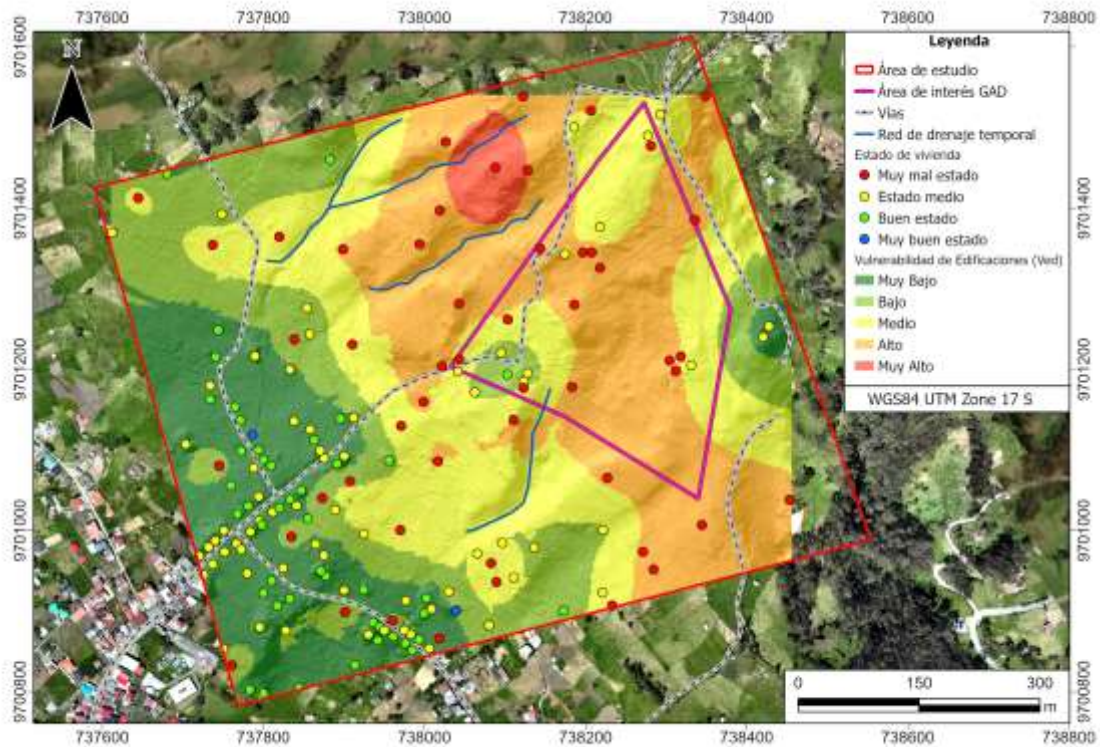
El análisis del estado de mantenimiento (ϵ_{smn}) se realizó sobre un total de 158 edificaciones, distribuidas de la siguiente manera: 48 unidades (30.4%) presentan un estado 'muy malo', 65 unidades (41.1%) se categorizan en estado 'medio', 44 unidades (27.9%) se encuentran en 'buen estado' y 2 unidades (1.3%) en 'muy buen estado' (Figura 21).

Figura 21 Mapa de edificaciones clasificado por su estado de mantenimiento (esmn)



Tras integrar estos datos con los valores de resistencia estructural (R_{str}) mediante una interpolación geoestadística de Kriging, se generó el mapa de vulnerabilidad de edificaciones. Los resultados revelan una correlación espacial directa entre la morfometría del terreno y el deterioro físico: las estructuras ubicadas en las zonas de mayor pendiente son, simultáneamente, aquellas que presentan un estado de conservación entre 'medio' y 'muy malo', registrando así los índices de vulnerabilidad más críticos ante procesos de inestabilidad de laderas (Figura 22).

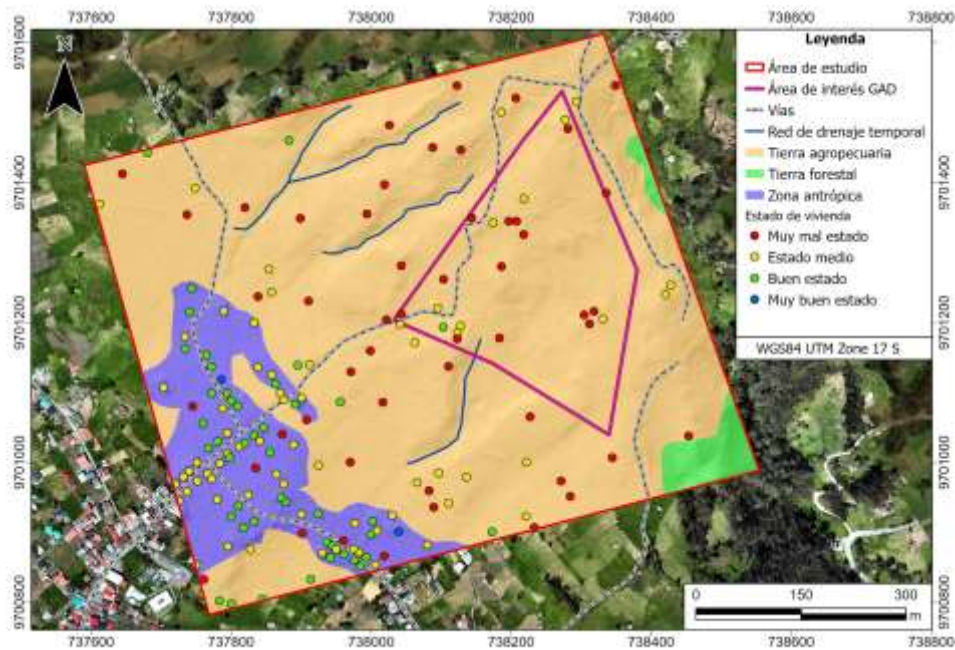
Figura 22 Mapa de Vulnerabilidad de Edificaciones (Ved) con esmn



4.1.2.2 Mapa de Vulnerabilidad de Uso de Suelo (Vus)

El área de estudio se categorizó en tres unidades principales de uso de suelo y cobertura vegetal: Tierras Agropecuarias, Zonas Antrópicas y Tierras Forestales. La distribución espacial muestra que las Tierras Agropecuarias predominan, seguidas por las Zonas Antrópicas y finalmente las Tierras Forestales (Figura 23).

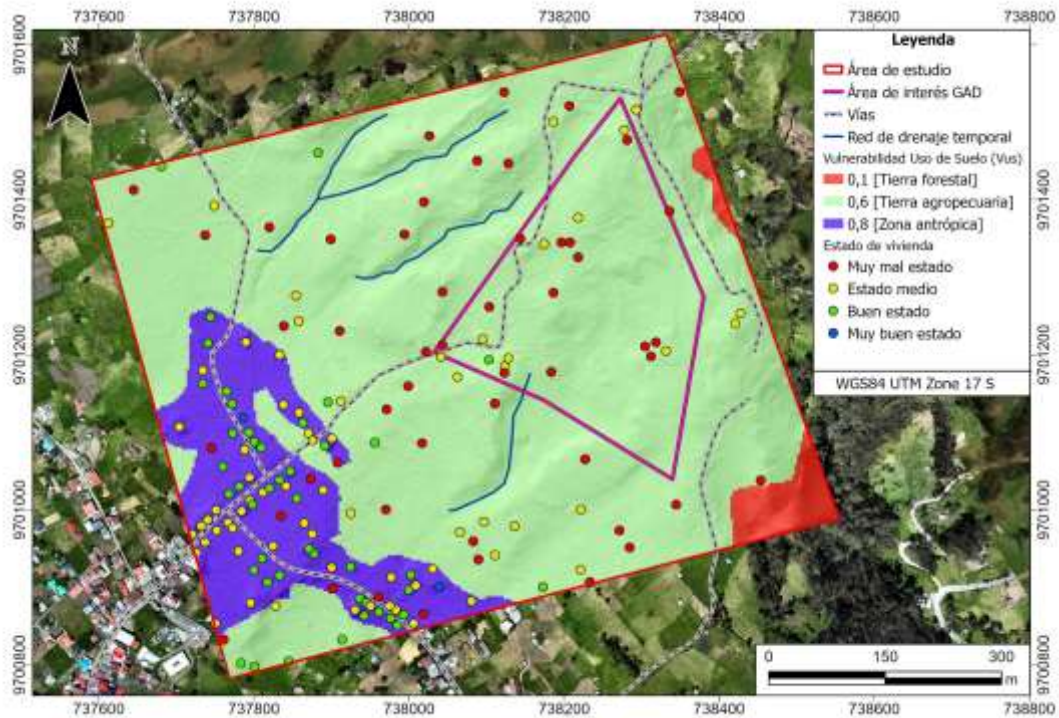
Figura 23 Mapa de uso de suelo de Zhindilig



Nota. Obtenido de SIGTIERRAS (2019).

La asignación de pesos de vulnerabilidad se realizó en función de la exposición de elementos vulnerables; de este modo, las Zonas Antrópicas recibieron el valor más alto (0.8) debido a la densidad de asentamientos humanos, seguidas por las Tierras Agropecuarias (0.6), donde se identificó presencia dispersa de infraestructura y viviendas. Por el contrario, las Tierras Forestales presentan la menor vulnerabilidad (0.1), dada la ausencia de edificaciones y su rol como cobertura protectora del suelo. Esta ponderación permite identificar que el riesgo se concentra en las áreas intervenidas donde la dinámica antrópica incrementa la susceptibilidad del sistema ante eventos de remoción en masa (Figura 24).

Figura 24 Mapa de Vulnerabilidad de Uso de Suelo (Vus) con esmn



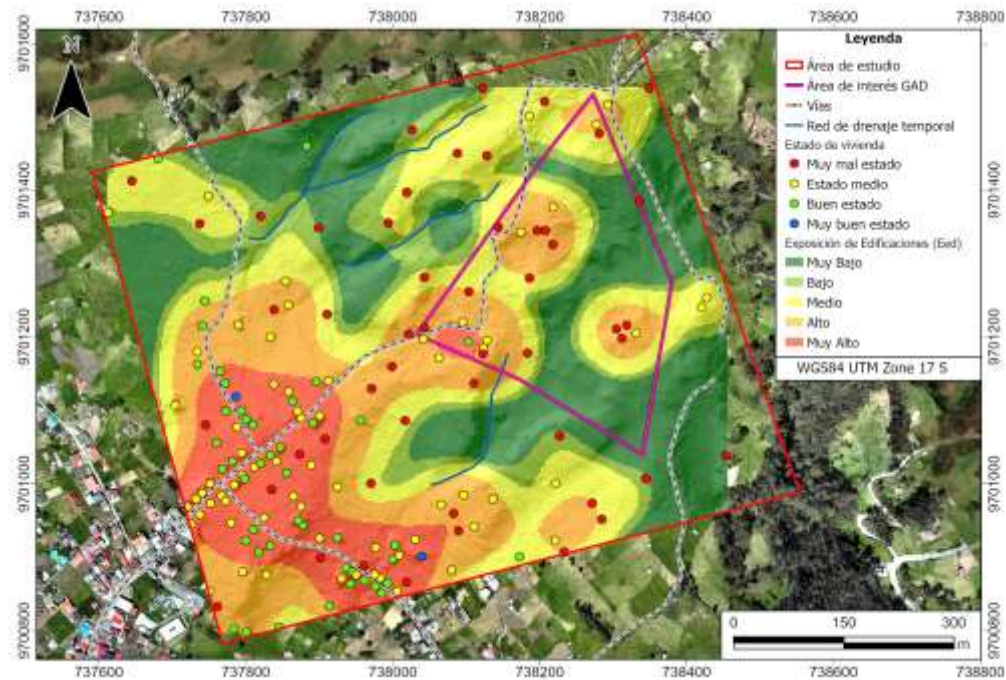
4.1.3 Cálculo de Exposición (E)

4.1.3.1 Mapa de Exposición de Edificaciones (Eed)

La evaluación del componente de exposición se aplicó al conjunto de 158 viviendas identificadas en el sector de Zhindilig. Los resultados indican que 84 edificaciones (53.2%) se sitúan en un nivel de exposición 'alto', mientras que las 74 unidades restantes (46.8%) se distribuyen en niveles moderados y bajos.

El patrón de exposición responde directamente a la configuración espacial de los asentamientos: las edificaciones con menor dispersión, que forman núcleos consolidados, se clasificaron en el rango de exposición muy alta debido a la mayor concentración de elementos vulnerables por unidad de área. Por el contrario, las viviendas localizadas de forma aislada en las periferias o integradas a las zonas de uso agropecuario presentan una exposición reducida. Esta diferenciación es fundamental para el análisis de riesgo, ya que un evento de remoción en masa en las zonas de alta densidad tendría un impacto socioeconómico significativamente mayor (Figura 25).

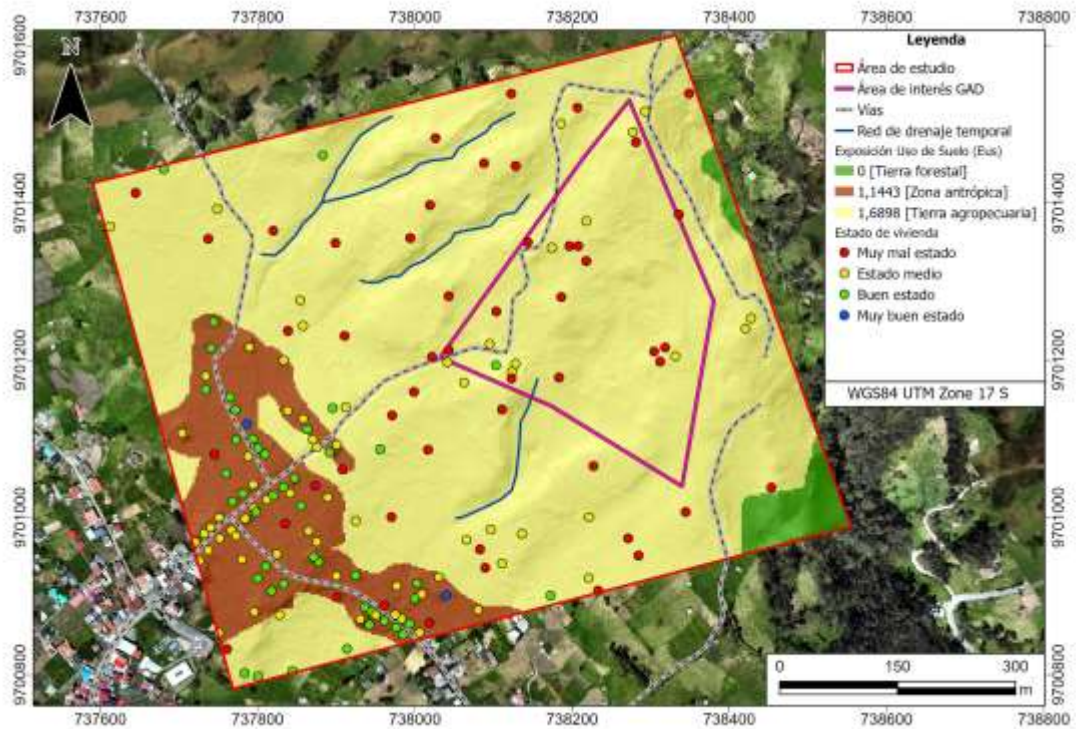
Figura 25 Mapa de Exposición de Edificaciones (Eed) con ϵ_{smn}



4.1.3.2 Mapa de Exposición de Uso de Suelo (Eus)

El área de estudio se encuentra dividida en tres zonas de uso de suelo. En las zonas antrópicas se registran un total de 84 viviendas, mientras que en las tierras agropecuarias se encuentran 74 edificaciones y en las zonas forestales no se registra ninguna construcción. La exposición por uso de suelo se calculó considerando la densidad de viviendas sobre el área correspondiente. Como resultado, las zonas antrópicas presentan una densidad de 1,1443 edificaciones por hectárea, las tierras agropecuarias 1,6898 edificaciones por hectárea, y las zonas forestales mantienen una densidad de 0, debido a la ausencia de edificaciones (Figura 26).

Figura 26 Mapa de Exposición de Uso de Suelo (Eus) con ϵsmn



4.1.4 Cálculo de Riesgo (R)

4.1.4.1 Mapa de Riesgo de edificaciones (Red)

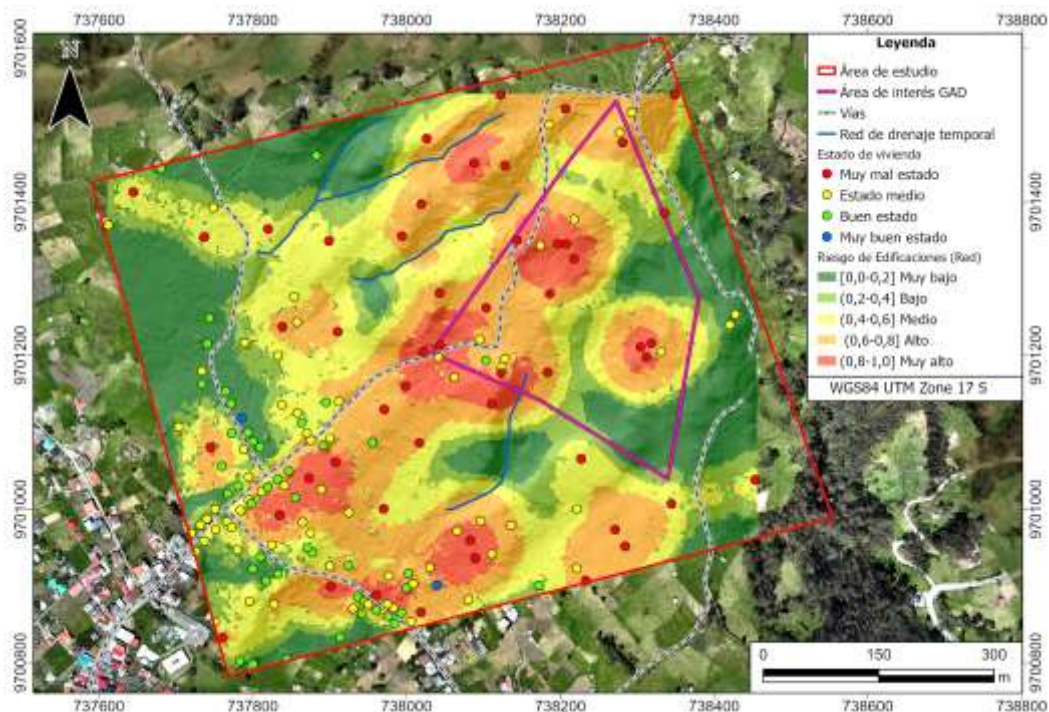
La integración de los factores de Amenaza, Vulnerabilidad física y Exposición mediante álgebra de mapas permitió obtener la zonificación del Riesgo Específico para las edificaciones del sector Zhindilig. El mapa resultante clasifica el área de estudio en cinco niveles de riesgo (de Muy Bajo a Muy Alto), evidenciando una distribución espacial heterogénea condicionada principalmente por la ubicación de los elementos expuestos (Figura 27).

Las áreas críticas, representadas en las tonalidades naranja y rojo, no se presentan de forma continua, sino que conforman un radio. Estos sectores de riesgo muy alto coinciden espacialmente con las zonas de mayor densidad habitacional (alta exposición) emplazadas sobre laderas inestables. En estos núcleos converge la máxima probabilidad de ocurrencia del fenómeno (amenaza) con una alta vulnerabilidad estructural (ϵsmn y $Rstr$ deficientes), lo que eleva el índice de riesgo compuesto. Se observa que la infraestructura ubicada en los centros poblados

consolidados es la que presenta los valores más críticos, validando la correlación directa entre la densidad de ocupación en zonas de pendiente y la magnitud del riesgo (Figura 27).

Las áreas de riesgo medio (color amarillo) actúan como zonas de transición o amortiguamiento alrededor de los núcleos principales. Por otro lado, las categorías de riesgo bajo y muy bajo (verde claro y oscuro) predominan en la periferia del área de estudio y en los espacios intermedios entre asentamientos. A pesar de que la amenaza geológica puede estar presente en estos sectores, la variable de Riesgo Específico disminuye drásticamente debido a la ausencia o baja densidad de edificaciones (Exposición nula o baja). Esto confirma que, en las zonas correspondientes a uso de suelo forestal o agropecuario disperso, el riesgo para la infraestructura es mínimo debido a la falta de elementos vulnerables (Figura 27).

Figura 27 Mapa de riesgos de Edificaciones (Red) con ϵsmn



4.1.4.2 Mapa de Riesgo de Uso de Suelo (Rus)

El mapa de Riesgo de Uso de Suelo (Rus) resulta de la integración espacial de la Amenaza por movimientos en masa con la vulnerabilidad y exposición intrínseca a las actividades productivas y coberturas vegetales del sector (Vus y Eus). A diferencia del riesgo en edificaciones,

que presenta una distribución sin forma, este modelo exhibe una distribución zonal continua, abarcando la totalidad de la superficie analizada (Figura 28).

Figura 28 Mapa de Riesgo de Uso de Suelo (Rus) con ϵsmn



El análisis visual evidencia una predominancia significativa de las categorías de riesgo alto (naranja) y muy alto (rojo), las cuales cubren la mayor parte de la zona central del área de estudio. Esta configuración responde a la extensa distribución de las tierras agropecuarias y zonas antrópicas. Dado que estas categorías poseen coeficientes de vulnerabilidad elevados (0.6 y 0.8 respectivamente) y se encuentran superpuestas a un terreno con alta susceptibilidad a deslizamientos (amenaza alta). La textura rugosa y dispersa de las zonas rojas sugiere que la inestabilidad del terreno amenaza no solo a la infraestructura, sino a la capacidad agrológica y económica del suelo.

En contraste, las áreas de riesgo muy bajo y bajo (0,0-0,2 y 0,02-0,4) se restringen a los extremos del polígono (esquinas sureste y noroeste, principalmente). Estas zonas se correlacionan directamente con las tierras forestales. A pesar de que la amenaza geomorfológica pueda persistir en estos sectores, el factor de vulnerabilidad asignado a la cobertura boscosa (0.1) actúa como un

atenuante drástico en la ecuación del riesgo. Esto valida la hipótesis de que la cobertura vegetal no solo reduce la erosión física, sino que disminuye el "valor expuesto", resultando en un riesgo calculado mínimo en comparación con las áreas intervenidas por el hombre.

4.1.4.3 Mapa de Riesgo Total (Rt)

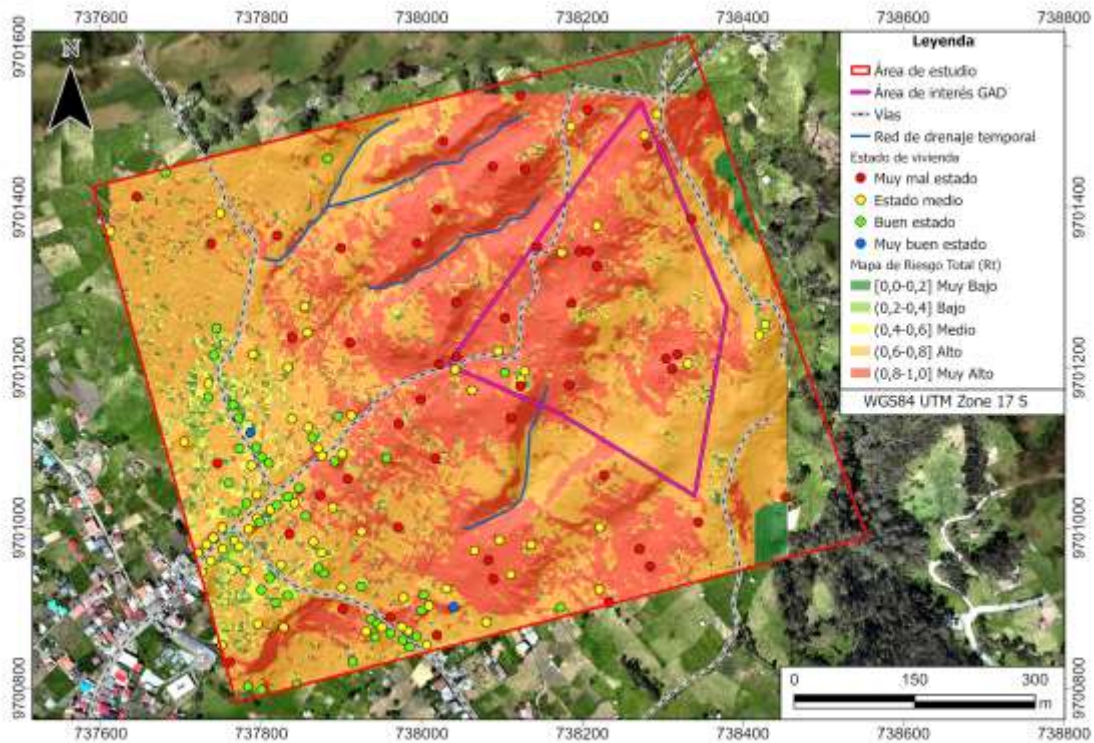
El Mapa de Riesgo Total (Rt) se obtuvo mediante la superposición aditiva de los modelos de riesgo en edificaciones y riesgo de uso de suelo. Esta integración permite visualizar la afectación sistémica del área de estudio, consolidando tanto las pérdidas potenciales en infraestructura habitacional como la degradación de la matriz productiva y el soporte biofísico del territorio.

A diferencia de los modelos individuales, el Rt presenta una pequeña disminución en las categorías alto (0,6-0,8) y muy alto (0,8-1,0), siendo más una delimitación del área que posiblemente sea del deslizamiento. Esto indica que, en el sector de Zhindilig, la peligrosidad geológica no solo amenaza puntos específicos de vivienda, sino que compromete la estabilidad integral del paisaje intervenido. Por ende, se observa una zona de máximo riesgo de carácter extensivo que atraviesa el centro del polígono de estudio. En este sector, el riesgo total se ve agravado por la coincidencia de tres factores críticos:

1. La presencia de escarpes y agrietamientos superficiales (amenaza).
2. La alta densidad de edificaciones con mantenimiento deficiente (riesgo habitacional).
3. La predominancia de suelos agropecuarios y zonas antrópicas que carecen de cobertura forestal protectora (riesgo de uso de suelo).

Las categorías de riesgo bajo y muy bajo quedan relegadas casi exclusivamente a las zonas periféricas del este y sur, coincidiendo con las áreas donde la topografía o la cobertura vegetal densa logran amortiguar la vulnerabilidad del sistema. Sin embargo, la conectividad de las zonas rojas sugiere que incluso estas áreas bajas podrían quedar aisladas ante un evento de deslizamiento de gran magnitud que bloquee las vías de acceso (Figura 29).

Figura 29 Mapa de Riesgo Total (Rt) con ϵ_{smn}



4.1.5 FODA y medidas de Mitigación

4.1.5.1 Análisis FODA

A continuación se presenta el análisis FODA del proyecto:

Fortalezas (F):

Metodología Superior (QRA): Se seleccionó un QRA que superó a otras alternativas en la matriz de decisión debido a su alto aporte a la gestión del riesgo y su nivel técnico. Esto representa una ventaja significativa frente a estudios puramente cualitativos.

Integración Tecnológica y Multidisciplinaria: El estudio combina diversas disciplinas, incluyendo geofísica (TRE), geotecnia (ensayos de laboratorio) y análisis espacial (SIG y drones). La utilización de TRE para evaluar el interior de la ladera constituye un diferenciador técnico relevante.

Validación de Campo Rigurosa: La evaluación de amenaza se fundamenta en datos de campo intrínsecos del suelo, incluyendo calicatas, granulometría, límites de Atterberg y ensayos

de corte directo. La clasificación de suelos como limo elástico arenoso (MH) con información propia proporciona solidez y credibilidad al modelo de talud infinito.

Enfoque Sistémico del Riesgo: El riesgo se calculó desagregando Amenaza, Vulnerabilidad (física y por uso de suelo) y Exposición, lo que permite proponer medidas de mitigación más específicas efectivas a cada componente a largo plazo y medidas urgentes en zonas de mayor riesgo.

Oportunidades (O):

Incidencia Política Directa (PDOT): El proyecto llena un vacío de información técnica crítica, ofreciendo la posibilidad de integrar los mapas de riesgo y zonificación directamente en el PDOT de Azogues, que identifica la zona como de alta susceptibilidad pero carece de estudios detallados.

Alineación con Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): El proyecto contribuye directamente a los ODS 3, 11 y 15, relacionados con salud y bienestar, ciudades sostenibles y vida de ecosistemas, aumentando la relevancia del proyecto.

Replicabilidad: La metodología QRA aplicada y validada puede ser escalada o replicada en otras comunidades con problemáticas similares, caracterizadas por suelos volcánicos, pendientes pronunciadas o lluvias intensas.

Debilidades (D):

Incertidumbre en Datos Demográficos: Existe una limitación significativa en la información disponible sobre la población específica de Zhindilig, lo que obligó a utilizar estimaciones o datos censales generales que podrían no reflejar con precisión la realidad local.

Dependencia de Factores Externos para la Mitigación: Aunque el diagnóstico técnico es sólido, la implementación de soluciones depende de factores externos, como la capacidad real de carga de las estructuras, que debió ser estimada visualmente mediante tipología y estado de

conservación para calcular la vulnerabilidad. Además, la limitada disponibilidad del factor económico destinado para la implementación de las medidas dispuestas.

Heterogeneidad del Suelo: Los resultados de TRE evidencian alta variabilidad en saturación y resistividad (zonas saturadas vs. bloques compactos). Representar esta complejidad mediante un FS único por celda implica una simplificación de la realidad geológica.

Amenazas (A):

Cambio Climático y Umbrales de Lluvia: Fenómenos como El Niño y el cambio climático están intensificando las precipitaciones y eventos extremos, generando el riesgo de que los umbrales de lluvia considerados sean superados con mayor frecuencia, acelerando procesos de inestabilidad más allá de lo modelado.

Ambigüedad Institucional: Existe una falta de claridad sobre la entidad local responsable de la intervención (Municipio o Junta Parroquial), lo que puede dificultar la ejecución efectiva de las medidas de mitigación.

Presión Antrópica Constante: La expansión urbana sin planificación y el cambio de uso de suelo, como la deforestación, incrementan el riesgo de manera continua. Sin medidas de control sobre estas actividades en las zonas críticas identificadas, las intervenciones de mitigación estructural podrían resultar insuficientes.

4.1.5.2 Medidas de Mitigación

Las medidas de mitigación se formularon a partir de los resultados obtenidos mediante el QRA y del diagnóstico estratégico FODA, garantizando su alineación con los objetivos del Plan Nacional de Gestión de Riesgos 2019-2030 de la Secretaría de Gestión de Riesgos (2019). Estas acciones se clasifican en **estructurales**, orientadas a la corrección física de los factores de riesgo, y **no estructurales**, enfocadas en la gestión, planificación y preparación comunitaria, priorizando las zonas identificadas con Riesgo Alto y Muy Alto en la comunidad de Zhindilig.

En concordancia con el Plan Nacional, se promueve la utilización de los mapas de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo como insumos técnicos fundamentales para mejorar el

conocimiento del riesgo, fortalecer la gobernanza mediante la incorporación de la zonificación de riesgo en los instrumentos de planificación territorial, y reducir el riesgo existente a través de obras de mitigación dirigidas a proteger la infraestructura y los medios de vida.

Entre las **medidas estructurales**, destacan la implementación de sistemas de drenaje y subdrenaje en los taludes inestables, justificada por la clasificación del suelo como limo elástico (MH) y la presencia de zonas de baja resistividad asociadas a saturación. Estas intervenciones incluyen zanjas de coronación y drenes tipo espina de pez, cuyo objetivo es disminuir el nivel freático y la presión de poros, incrementando así el FS. Adicionalmente, la reconformación y estabilización de taludes mediante muros de gaviones o de contención de hormigón armado aporta resistencia pasiva y reduce el riesgo de deslizamiento en zonas de pendiente crítica y baja cohesión del suelo volcánico alterado. La bioingeniería y reforestación con especies nativas permite mejorar la cohesión aparente del suelo y regular la infiltración hídrica, contribuyendo a la estabilidad de los taludes en zonas de riesgo medio.

En el ámbito de las **medidas no estructurales**, se propone la zonificación y regulación del uso de suelo, integrando el mapa de Riesgo Total al PDOT de Azogues para establecer áreas de protección por riesgo, prohibiendo nuevas construcciones en zonas de Riesgo Muy Alto y limitando la densidad ocupacional en áreas de Riesgo Alto. Asimismo, se enfatiza el control de descargas de agua, regulando los sistemas de riego y la disposición de aguas residuales domésticas, para evitar la infiltración directa en laderas inestables y reducir la saturación crítica identificada en las TRE.

Finalmente, en términos de preparación y respuesta, se recomienda la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) comunitario, basado en umbrales críticos de precipitación que permitan activar protocolos de evacuación preventiva ante lluvias intensas, así como la socialización y fortalecimiento de capacidades de la comunidad. La realización de talleres e implementación de señalética permite que los habitantes reconozcan las zonas de riesgo en las que

se encuentran sus viviendas y conozcan las rutas de evacuación seguras y zonas de seguridad, reduciendo la vulnerabilidad social mediante la educación y la participación comunitaria.

4.2 Discusión

La evaluación del riesgo de deslizamientos en la comunidad de Zhindilig mediante el QRA ha permitido integrar variables geológicas, geotécnicas y sociales que, analizadas en conjunto, revelan una dinámica de inestabilidad compleja. A diferencia de estudios previos que abordan la amenaza únicamente desde la pendiente o la precipitación, esta investigación valida que la inestabilidad en Zhindilig es producto de la interacción crítica entre suelos de baja competencia mecánica (MH) y una saturación hídrica inducida tanto por factores naturales como antrópicos.

Influencia de las Propiedades Geotécnicas e Hidrogeológicas en la Amenaza

Los ensayos de laboratorio fueron concluyentes al clasificar el suelo predominante como limo elástico arenoso (MH), un material caracterizado por su alta plasticidad ($IP = 24,79\%$). Este hallazgo es significativo porque los suelos MH son conocidos por su drástica pérdida de resistencia al corte cuando aumentan su contenido de humedad. Los resultados del ensayo de corte directo arrojaron un ángulo de fricción interna (ϕ) de $17,86^\circ$ y una cohesión (c) de $12,01$ kPa. Al contrastar estos valores con el mapa de pendientes, donde se identificaron inclinaciones superiores a 26° e incluso rangos de 45° – 83° en las laderas suroeste, se hace evidente que el terreno se encuentra en una condición de equilibrio límite. Geológicamente, esto confirma que la resistencia intrínseca del material es insuficiente para mantener la estabilidad en las pendientes pronunciadas sin el aporte de la succión del suelo, la cual desaparece con la saturación.

La TRE jugó un papel crucial al definir esta condición de saturación. Los perfiles, especialmente la Línea 1 y la Línea 3, mostraron zonas superficiales (0–2 m y hasta 1.2 m) con resistividades muy bajas (3.8 – $10.7 \Omega \cdot m$), interpretadas como el suelo MH saturado. Lo relevante de esta discusión es la correlación espacial: las zonas de baja resistividad (alta humedad) coinciden con las áreas de cultivo y riego identificadas en el uso de suelo. Esto sugiere que la amenaza no es

un fenómeno natural al azar, sino que está siendo exacerbada por la infiltración agrícola y la falta de drenaje, factores que mantienen al suelo en un estado plástico a líquido (recordando que LL es alto, 74.36%, lo que implica gran capacidad de retención de agua antes de fluir).

Dinámica del FS y Zonificación de la Amenaza

El modelo de talud infinito aplicado en SAGA GIS integró estas variables para determinar el FS. La discusión de estos resultados muestra que las zonas con $FS < 1$ (amenaza alta) no se distribuyen aleatoriamente, sino que siguen un patrón controlado por la morfología de las laderas orientadas al suroeste y la profundidad del suelo saturado detectado por la geofísica.

Es importante destacar la heterogeneidad identificada en las TRE, donde se observaron cuerpos resistivos (bloques) dentro de la matriz conductora. Esto implica que el deslizamiento podría no comportarse como una masa homogénea, sino presentar superficies de falla irregulares o flujos de detritos donde el material fino saturado "lubrica" el movimiento de los bloques más competentes de la formación Tarqui o depósitos coluviales subyacentes.

Vulnerabilidad y Exposición: El Componente Social del Riesgo

Desde una perspectiva multidisciplinaria que integra la ingeniería con la gestión territorial, los resultados de vulnerabilidad son alarmantes. El hecho de que el 40% de las edificaciones (60 viviendas) evaluadas se encuentren en "muy mal estado" incrementa exponencialmente el riesgo físico. La correlación espacial identificada es directa: las viviendas con mayores deficiencias constructivas se concentran desde el sector central del área de estudio hacia el noreste (NE), donde se desarrollan las pendientes más pronunciadas, superiores a 26° , configurando un escenario de doble exposición, asociado tanto a la fragilidad estructural como a las condiciones geomorfológicas desfavorables.

El mapa de Riesgo Total (R_t) sintetiza este hallazgo: el riesgo en Zhindilig es cercano en torno a los asentamientos humanos. Mientras que el riesgo de uso de suelo (agrícola) es extensivo y zonal, el riesgo habitacional se concentra en focos críticos donde la vida humana está

comprometida. Esto discute la efectividad de las políticas de ordenamiento territorial previas, evidenciando que la expansión de la zona antrópica (densidad de 1,14 viviendas/ha) ha avanzado sobre áreas que geológicamente no son aptas para el asentamiento sin medidas de mitigación robustas.

Limitaciones y Alcance

Si bien el modelo QRA ha demostrado ser robusto, se debe considerar que el cálculo del FS asume un nivel freático estático basado en la campaña de campo. En escenarios de Fenómeno de El Niño o lluvias extremas, la saturación podría extenderse a zonas que hoy aparecen como estables ($FS > 1$). Además, al utilizar datos censales agregados para la vulnerabilidad social, se protege la identidad de los habitantes, pero se recomienda que las intervenciones específicas del GAD realicen evaluaciones predio a predio en las zonas rojas del mapa de Riesgo Total.

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

Tras aplicar las fases metodológicas del QRA y la caracterización geofísica-geotécnica en la comunidad de Zhindilig, se han validado las hipótesis de inestabilidad y se obtienen las siguientes conclusiones primordiales:

Respecto a la caracterización litológica y geofísica: Se determinó que la amenaza por deslizamientos está condicionada por la presencia de un suelo limo elástico arenoso (MH) de alta plasticidad ($IP > 24\%$), cuyo FS desciende a niveles críticos ($FS < 1$) en las laderas con pendientes superiores a 26° . Las TRE revelaron que este material presenta zonas de saturación continua hasta los 7 metros de profundidad, asociadas a la infiltración por riego y falta de drenaje, lo que reduce drásticamente su resistencia al corte y actúa como detonante principal de la inestabilidad.

Sobre la integración geoespacial y el mapa de riesgos: La integración de las variables mediante SIG permitió generar el Mapa de Riesgo Total (Rt), identificando que el riesgo no es homogéneo, sino que se encuentra "nucleado" en las zonas de mayor densidad poblacional. Se concluye que las áreas críticas de Riesgo Muy Alto coinciden con los asentamientos humanos en zonas antrópicas (vulnerabilidad de 0.8) y tierras agropecuarias, donde la exposición de viviendas con mantenimiento deficiente (30.4% en muy mal estado) magnifica el impacto potencial de la amenaza geológica.

En relación con las estrategias de mitigación: A partir de la zonificación de riesgo, se formularon estrategias de mitigación priorizando la intervención correctiva mediante sistemas de drenaje profundo para abatir el nivel freático detectado en los perfiles de las TRE, y medidas prospectivas de ordenamiento territorial. Se estableció que la reducción efectiva del riesgo requiere restringir la construcción en las zonas rojas identificadas y mejorar las prácticas de riego agrícola que actualmente saturan el talud, alineándose con las competencias de gestión de riesgos del GAD local.

5.2 Recomendaciones

Tras culminar la evaluación integral del riesgo y presentar la propuesta de mitigación, se derivan las siguientes recomendaciones primordiales para dar continuidad y aplicabilidad al estudio:

Actualización de la data demográfica a escala de detalle: Se recomienda realizar un censo poblacional focalizado exclusivamente en la comunidad de Zhindilig, dado que la falta de datos demográficos exactos (limitación del presente estudio) obligó a usar estimaciones generales. Contar con esta información permitirá calibrar con mayor precisión la variable de "Exposición" para futuros análisis de vulnerabilidad social y evacuación.

Implementación de estudios hidrogeológicos complementarios: Si bien la TRE identificó zonas de saturación, se recomienda realizar estudios hidrogeológicos específicos (piezómetros) para monitorear la fluctuación estacional del nivel freático. Esto permitirá refinar el cálculo del FS bajo escenarios de precipitaciones extremas, como las asociadas al Fenómeno de El Niño, que podrían superar los umbrales considerados en este modelo.

Integración vinculante al PDOT Cantonal: Se insta al GAD de Azogues a incorporar el Mapa de Riesgo Total generado en esta tesis como un insumo técnico vinculante en la próxima actualización del PDOT. Esto es fundamental para dotar de marco legal a las restricciones de uso de suelo sugeridas y evitar la expansión de la frontera agrícola o urbana hacia las zonas de ladera inestable identificadas.

Referencias

- Abascal, L. del V., & González Bonorino, G. (2015). Sedimentación coluvial e inestabilidad de laderas en los Andes de Tierra del Fuego. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 72. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222015000400003
- Alonso-Pandavenes, O., Torrijo Echarri, F. J., & Garzón-Roca, J. (2024). Sustainable Management of Landslides in Ecuador: Leveraging Geophysical Surveys for Effective Risk Reduction. *Sustainability (Switzerland)*, 16(24). <https://doi.org/10.3390/su162410797>
- Alulima, B., Leon, J., Tobar, J., & Coronel, O. (2020). Léxico Estratigráfico de Las Cuencas Sedimentarias Miocénicas Del Sur Del Ecuador. *Instituto De Investigacion Geologico Y Energetico*, 1–58.
- Araque-Pérez, C. J., & Reyes-Lucero, J. (2025). Gravimetric modeling of the Nazca plate subduction geometry West of Ecuador. *Journal of Geodynamics*, 163, 102073. <https://doi.org/10.1016/J.JOG.2025.102073>
- Avilés-Campoverde, D., Chunga, K., Ortiz-Hernández, E., Vivas-Espinoza, E., Toulkeridis, T., Morales-Delgado, A., & Delgado-Toala, D. (2021). Seismically induced soil liquefaction and geological conditions in the city of Jama due to the M7.8 pedernales earthquake in 2016, NW Ecuador. *Geosciences (Switzerland)*, 11(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010020>
- Bustamante, J., Gallardo-Sepúlveda, R., Atencio, E., & Parra, P. F. (2025). Sensitivity Analysis of the Influence of Heavy-Intensity Rain Duration on the Stability of Granular Soil Slopes Under Unsaturated Conditions. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/app15116074>
- Caleca, F., Tofani, V., Segoni, S., Raspini, F., Rosi, A., Natali, M., Catani, F., & Casagli, N.

- (2022). A methodological approach of QRA for slow-moving landslides at a regional scale. *Landslides*, 19(7), 1539–1561. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01875-x>
- Campforts, B., Shobe, C. M., Overeem, I., & Tucker, G. E. (2022). The Art of Landslides: How Stochastic Mass Wasting Shapes Topography and Influences Landscape Dynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127(8), 1–22. <https://doi.org/10.1029/2022JF006745>
- DJI Agriculture. (2022, November 23). *DJI Agriculture Launches the Mavic 3 Multispectral to Spark the Development of Global Precision Agriculture - DJI*. <https://www.dji.com/newsroom/news/dji-launches-the-mavic-3-multispectral>
- El Mercurio. (2024, November 25). *Azogues está en crisis por los cortes de agua potable*. <https://elmercurio.com.ec/principal/2024/11/25/azogues-crisis-cortes-agua-potable/>
- El Telégrafo. (2011, November 27). *Azogues activó COE cantonal por deslizamientos*. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/informacion-general/205/azogues-activo-coe-cantonal-por-deslizamientos>
- Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia del Cañar. (2023). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Cañar 2023–2027*. <https://www.gobiernodelcanar.gob.ec/wp-content/uploads/2025/02/PDOT-2023-2027.pdf>
- Gonzaga Garzón, M. A. (2018). *Evolución tectono-sedimentaria de la cuenca miocénica de Cuenca* [Quito, 2018.]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19158>
- Gonzales de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica - Luis Gonzales de Vallejo*. Pearson Educación. https://www.academia.edu/105826786/Ingenieria_Geologica_Luis_Gonzales_de_Vallejo
- Guapán, G. A. D. P. R. de. (2015). *Actualización Del Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Parroquial Rural De Guapán Del Cantón Azogues*. <http://app.sni.gob.ec/sni->

link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/0360017630001_DIAGNOSTICO PDYOT GUAPAN_15-05-2015_13-56-38.pdf

Gürel, E., & Merba, T. (2017). SWOT ANALYSIS: A THEORETICAL REVIEW. *Journal of International Social Research*, 10(51), 994–1006. <https://doi.org/10.17719/JISR.2017.1832>

Horton, B. K. (2018). Sedimentary record of Andean mountain building. *Earth-Science Reviews*, 178, 279–309. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2017.11.025>

INEC. (2022). *Censo Ecuador 2022*. <https://cubos.inec.gob.ec/AppCensoEcuador/>

Irasema Alcántara, A. (2000). *Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología*.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112000000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Jaillard, E., Hérail, G., Monfret, T., Díaz-Martínez, E., Bbay, P., Lavenu, A., & Dumont, J.-F.

(2000). *Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northernmost Chile* (C. D. A. Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A. (ed.)).

https://www.researchgate.net/publication/284458693_Tectonic_evolution_of_the_Andes_of_Ecuador_Peru_Bolivia_and_northernmost_Chile

Macías, L., Quiñonez-Macías, M., Toulkeridis, T., & Pastor, J. L. (2024). Characterization and geophysical evaluation of the recent 2023 Alausí landslide in the northern Andes of Ecuador. *Landslides*, 21(3), 529–540. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02185-6>

Maragaño-Carmona, G., Fustos Toribio, I. J., Descote, P. Y., Robledo, L. F., Villalobos, D., & Gatica, G. (2023). Rainfall-Induced Landslide Assessment under Different Precipitation

Thresholds Using Remote Sensing Data: A Central Andes Case. *Water (Switzerland)*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/w15142514>

Marín, R. J., Marín-Londoño, J., & Mattos, Á. J. (2020). Análisis y evaluación del riesgo de

deslizamientos superficiales en un terreno montañoso tropical: implementación de modelos físicos simples. *Scientia et Technica*, 25(1), 164–171.
<https://doi.org/10.22517/23447214.22171>

Miduvi. (2014). Geotécnia y cimentaciones. Código NEC-SE-GC. In *Miduvi*.

Núñez Del Arco, E. (2003). *Geología del Ecuador*. Ricardo Gallegos Orta.

Parry, S. (2011). The Application of Geomorphological Mapping in the Assessment of Landslide Hazard in Hong Kong. *Developments in Earth Surface Processes*, 15, 413–441.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53446-0.00015-X>

Perrone, A., Lapenna, V., & Piscitelli, S. (2014). Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. *Earth-Science Reviews*, 135, 65–82.
<https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2014.04.002>

Puente-Sotomayor, F., Egas, A., & Teller, J. (2021). Land policies for landslide risk reduction in Andean cities. *Habitat International*, 107(November 2020), 102298.
<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102298>

Pulupa, R., Calderón, E., Romero, C., Gonzalo, J., Carranco, F., Belen, A., Pazmiño, P., & Maya, D. (2022). *Discriminación litoestratigráfica, petrográfica y geoquímica de la Formación Tarqui en el corte Cañar-Azogues*.
https://www.researchgate.net/publication/365174362_Discriminacion_litoestratigrafica_petrografica_y_geoquimica_de_la_Formacion_Tarqui_en_el_corte_Canar_-Azogues

Rocha, J. (2019). Geographic Information Systems and Science. In *Intech*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.75243>

Secretaría de Gestión de Riesgos. (2019). Plan Específico de Gestión de Riesgo. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. (2025a). *SitRep No. 07 – Lluvias, del 01/01/2025 a la*

fecha - Cañar (Issue 07).

Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. (2025b). *SitRep No. 20 – Lluvias, del 01/01/2025 a la fecha - Cañar* (Issue 20).

Sigtierras. (2019). *Cartografía de Geopedología escala 1:25.000 | Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica*.
<http://www.sigtierras.gob.ec/geopedologia/>

Soto, J., Palenzuela, J. A., Galve, J. P., Luque, J. A., Azañón, J. M., Tamay, J., & Irigaray, C. (2019). Estimation of empirical rainfall thresholds for landslide triggering using partial duration series and their relation with climatic cycles. An application in southern Ecuador. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(3), 1971–1987.
<https://doi.org/10.1007/S10064-017-1216-Z>

Steinmann, M., Hungerbühler, D., Seward, D., & Winkler, W. (1999). Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach. *Tectonophysics*, 307(3–4), 255–276. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00100-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00100-6)

Teleamazonas. (2025, March 13). *Material desprendido en la vía Cuenca - Azogues provoca cierre la tarde de este jueves 13 de marzo del 2025*. <https://www.teleamazonas.com/inundaciones-caida-material-via-cuenca-azogues-cerrada/>

Tsai, W. N., Chen, C. C., Chiang, C. W., Chen, P. Y., Kuo, C. Y., Wang, K. L., Lin, M. L., & Chen, R. F. (2021). Electrical Resistivity Tomography (ERT) Monitoring for Landslides: Case Study in the Lantai Area, Yilan Taiping Mountain, Northeast Taiwan. *Frontiers in Earth Science*, 9, 737271. <https://doi.org/10.3389/FEART.2021.737271/BIBTEX>

Yamin, L., Ghesquiere, F., Darío, O., Mario, C., & Ordaz, G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre. El caso de Bogotá, Colombia*.

Younes Cárdenas, N., & Erazo Mera, E. (2016). Landslide susceptibility analysis using remote sensing and GIS in the western Ecuadorian Andes. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 81(3), 1829–1859. <https://doi.org/10.1007/S11069-016-2157-8>

Zhou, X., Wu, W., Qin, Y., & Fu, X. (2021). Geoinformation-based landslide susceptibility mapping in subtropical area. *Scientific Reports* 2021 11:1, 11(1), 24325-. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03743-5>