



UEB
UNIVERSIDAD
ESTATAL DE BOLIVAR

MOVIMIENTOS EN MASA: FUNDAMENTOS, EVALUACIÓN DE LA AMENAZA Y APLICACIONES

ISBN: 978-9907-0-0557-8



2025

DANIEL SANTIAGO PAREDES GAIBOR
JOHANNA FERNANDA DUEÑAS DURÁN

MOVIMIENTOS EN MASA: FUNDAMENTOS, EVALUACIÓN DE LA AMENAZA Y APLICACIONES

AUTORES:

DANIEL SANTIAGO PAREDES GAIBOR

JOHANNA FERNANDA DUEÑAS DURÁN



Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Estatal de Bolívar
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupobl.com
<https://grupobl.com/libros-investig>
REPOSITORIO



Paredes, D., Dueñas, J. (2025) Movimientos en masa: fundamentos, evaluación de la amenaza y aplicaciones. Grupo Editorial BLR.

© Daniel Santiago Paredes Gaibor
Johanna Fernanda Dueñas Durán

ISBN: 978-9907-0-0557-8

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

FILIACIONES DE LOS AUTORES

Daniel Santiago Paredes Gaibor

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: daniel.paredes@ueb.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3591-7008>

Johanna Fernanda Dueñas Durán

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: johanna.duenas@ueb.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2442-314X>



PRÓLOGO

Los movimientos en masa constituyen uno de los fenómenos de origen natural más recurrentes y devastadores del territorio ecuatoriano y andino. En este contexto, su investigación no es simplemente una actividad académica, sino una necesidad apremiante para entender cómo las acciones humanas se entrelazan con la dinámica de la naturaleza y amenazan vidas, infraestructuras y economías locales. Esta obra surge en este contexto, como un esfuerzo colaborativo para sistematizar saberes, métodos y vivencias que se han utilizado en la gestión y análisis de esta amenaza.

El texto fusiona de manera rigurosa la fundamentación teórica con su aplicación práctica. En sus capítulos se analizan métodos tanto contemporáneos como clásicos, desde los heurísticos hasta los de probabilidad, así como conceptos fundamentales. Asimismo, se muestran estudios de caso en la provincia de Bolívar que evidencian cuán relevante es implementar el conocimiento científico en el territorio. Por lo tanto, este libro no solo describe las técnicas, sino que también muestra su relevancia en situaciones específicas donde la exposición y la vulnerabilidad son claras.

Una de sus mayores virtudes es la claridad con la que los autores relacionan los factores condicionantes y desencadenantes en torno a los movimientos en masa con herramientas de evaluación espacial, estadística y determinística, lo que ofrece una guía metodológica a estudiantes, investigadores, técnicos de gestión de riesgos y responsables de planificación territorial. Asimismo, la obra destaca por

integrar la perspectiva de la gobernanza, la educación comunitaria y la necesidad de políticas públicas sólidas que permitan reducir el riesgo a medio y largo plazo.

Este libro se convierte así en una referencia imprescindible para quienes buscan comprender y gestionar la amenaza de los movimientos en masa en Ecuador y la región andina. Más allá de los mapas y modelos, invita a reflexionar sobre la corresponsabilidad entre la ciencia, las instituciones y la sociedad.

ÍNDICE

PRÓLOGO	i
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I	16
1 FUNDAMENTOS DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA ..	16
1.1 La inevitable interacción entre geodinámica y sociedad.....	17
1.2 Definiciones y terminología fundamental.....	19
1.3 Clasificación y tipos de movimientos en masa.	24
1.3.1 Los tipos de movimiento se dividen en cinco categorías principales.....	25
1.3.2 Los tipos de material se dividen en tres categorías principales	25
1.3.3 Descripción de los tipos de movimientos en masa.....	26
1.4 Factores de la inestabilidad de laderas: El balance de fuerzas ...	31
1.4.1 Principios de la estabilidad de taludes	32
1.5 Factores condicionantes (susceptibilidad).....	33

1.5.1	Geología e ingeniería geotécnica.....	34
1.5.2	Geomorfología y topografía.....	36
1.6	Propiedades físicas y mecánicas del suelo.....	38
1.6.1	Relaciones gravimétricas y volumétricas	38
1.6.2	Granulometría y clasificación de suelos	39
1.7	Límites de Atterberg	40
1.7.1	Resistencia al corte	41
1.7.2	Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS)	41
1.8	Los mecanismos detonantes de la falla	42
1.8.1	El rol primordial del agua.....	43
1.9	La sismicidad como disparador de inestabilidad	47
1.9.1	Los sismos actúan como detonantes de dos maneras principales.....	48
1.9.2	Factores que intervienen en torno a esta amenaza.....	49
1.10	Deforestación y degradación de la cobertura vegetal	50
1.11	Alteraciones en la hidrología de la ladera	53
1.12	Métodos de análisis de la estabilidad de taludes	53
1.12.1	El factor de seguridad y el equilibrio límite.....	54

1.13	Métodos tradicionales de equilibrio límite.....	56
1.13.1	Método de Fellenius (1927)	56
1.13.2	Método de Bishop simplificado.....	56
1.14	Métodos avanzados y tecnologías de vanguardia	58
1.14.1	Análisis numérico	58
1.14.2	Modelos de susceptibilidad	59
1.14.3	Teledetección y geomática	59
1.15	Marco conceptual de la gestión de riesgos por movimientos en masa	60
1.16	Conceptos clave según la ley ecuatoriana.....	60
CAPÍTULO II.....		62
2 METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA		62
2.1	Enfoques.....	62
2.1.1	Heurístico.....	63
2.1.2	Estadístico.....	75
2.1.3	Determinístico	84
2.1.4	Probabilístico.....	90

2.2	Enfoques para el análisis de movimientos en masa: comparación y guía de uso	96
2.3	De susceptibilidad a amenaza	100
CAPÍTULO III		104
3 ESTUDIOS DE CASO EN LA PROVINCIA DE BOLÍVAR.....		104
3.1	Estudio de la amenaza de deslizamiento en la colina San Bartolo – Guaranda – Ecuador.	104
3.1.1	Problemática.....	104
3.1.2	Enfoque metodológico	106
3.1.3	Principales resultados.....	106
3.1.4	Validación y evaluación de desempeño.....	107
3.1.5	Limitaciones del estudio	108
3.2	Análisis de los movimientos en masa y su relación con elementos expuestos en el barrio América, cantón San Miguel de Bolívar.	108
3.2.1	Problemática.....	108
3.2.2	Enfoque metodológico	110
3.2.3	Principales resultados.....	110
3.2.4	Validación y evaluación de desempeño.....	110

3.2.5	Limitaciones del estudio	111
3.3	Análisis de la estabilidad de taludes ante la amenaza de deslizamientos del cerro Cuchicahua ubicado en el cantón Chillanes.....	112
3.3.1	Problemática.....	112
3.3.2	Enfoque metodológico	113
3.3.3	Principales resultados.....	114
3.3.4	Validación y evaluación de desempeño.....	116
3.3.5	Limitaciones del estudio	117
3.4	Análisis de susceptibilidad ante deslizamientos y sus afectaciones a elementos expuestos en la vía Guanujo – Echeandía sector “Piedra Blanca”.	117
3.4.1	Enfoque metodológico	118
3.4.2	Principales resultados.....	119
3.4.3	Validación y evaluación de desempeño.....	121
3.4.4	Limitaciones del estudio	122
CAPÍTULO IV.....		123
4 APLICACIONES PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO Y LINEAMIENTOS OPERATIVOS		123

4.1	Planificación territorial.....	123
4.2	Medidas de reducción del riesgo.....	128
4.2.1	Estrategias de intervención del riesgo.....	133
4.2.2	Análisis del riesgo.....	135
4.2.3	Análisis de la amenaza.....	136
4.2.4	Análisis de la vulnerabilidad.....	137
4.2.5	Cálculo del riesgo	138
4.2.6	Evaluación del riesgo	140
4.3	Monitoreo y alerta temprana	141
	BIBLIOGRAFÍAS.....	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los deslizamientos.....	29
Tabla 2. Rangos de Pendiente y Grado de inestabilidad.	37
Tabla 3. Factores condicionantes con sus respectivas ponderaciones relacionado al método de Evaluación semicuantitativa de la susceptibilidad a deslizamientos mediante AHP y combinación lineal ponderada.....	65
Tabla 4. Supuestos clave de SHALSTAB.	85
Tabla 5. Marco comparativo de metodologías heurísticas, estadísticas, determinísticas y probabilísticas.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Número de eventos por amenaza por provincia periodo 2010 – marzo 2024.	xv
Figura 2. Talud artificial (a) y Ladera natural (b).	20
Figura 3. Nomenclatura que hace referencia a las partes de un deslizamiento.	22
Figura 4. Dimensiones de los movimientos en masa.	24
Figura 5. Tipos de deslizamientos de tierra.	26
Figura 6. Mapa Geológico de la República del Ecuador escala 1:1.000.000.	35
Figura 7. Esquema de una muestra de suelo y sus fases.	39
Figura 8. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).	42
Figura 9. Flujo metodológico de la Evaluación semicuantitativa de la susceptibilidad a deslizamientos mediante AHP y combinación lineal ponderada.	68
Figura 10. Factores involucrados en la metodología de susceptibilidad / amenaza ante movimientos en masa.	69
Figura 11. Mapa de susceptibilidad / amenaza ante movimientos en masa.	75

Figura 12. Esquema de preparación y control de calidad de los datos.	78
Figura 13. Diagrama de la metodología basada en evidencia ponderada e índices.	79
Figura 14. Diagrama de flujo del Modelos Basados en Evidencia Ponderada e Índices.	80
Figura 15. Tendencias a nivel de cartografía de susceptibilidad.....	82
Figura 16. Esquema para la aplicación de metodologías de aprendizaje profundo.	83
Figura 17. Esquema de operativización del método SHALSTAB.	87
Figura 18. Esquema de operativización del método SINMAP.	88
Figura 19. Esquema de operativización del método TRIGRS.	90
Figura 20. Esquema de operativización del método peligro probabilístico a escala de cuenca.	93
Figura 21. Aplicación típica del enfoque bayesiano espacio-temporal con procesos puntuales (LGCP/INLA) sobre unidades de ladera.	95
Figura 22. Esquema de operativización del método procesos puntuales y modelos espacio-temporales bayesianos (LGCP/INLA).	96
Figura 23. Representación gráfica del paso de la susceptibilidad a amenaza.	102

Figura 24. Ubicación geográfica de la colina San Bartolo.	105
Figura 25. Análisis determinístico (b) vs heurístico (a).	107
Figura 26. Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	109
Figura 27. Ubicación geográfica de la zona de estudio, sector “cerro Cuchicahua”.....	113
Figura 28. Perfilamiento radial de estabilidad de ladera: Cerro Cuchicahua.	116
Figura 29. Ubicación geográfica de la zona de estudio, sector “Piedra Blanca”.	118
Figura 30. Susceptibilidad a deslizamientos, sector “Piedra Blanca”.	120
Figura 31. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos y su correlación con líneas de ruptura, sector “Piedra Blanca”.	121

INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa son una amenaza de origen natural, más concretamente de carácter geológico, que afecta en gran medida al territorio ecuatoriano. Este libro tiene como finalidad ser un recurso para que estudiantes, profesionales y personas propensas a esta amenaza adquieran un mayor nivel de conocimientos sobre los factores condicionantes y desencadenantes derivados de ella. Esta amenaza afecta directamente a la dinámica de las poblaciones, influyendo en los sectores económicos y sociales cuando se materializa. Por otro lado, se aborda desde la fase conceptual de la amenaza y su tipología para, posteriormente, abordar distintas metodologías existentes y analizar estudios de casos locales que permitan evidenciar la aplicabilidad de cada una de las metodologías, con el fin de afianzar la reducción de riesgos de desastres y los procesos de planificación territorial.

La falta de conocimiento por parte de las comunidades genera una construcción social del riesgo, ya que se minimiza el nivel de peligro potencial que puede derivarse de la amenaza. A esto se suma la inexistencia de políticas educativas o financieras que permitan reducir el nivel de riesgos. Teniendo en cuenta la necesidad de las poblaciones de expandirse a nivel territorial, es pertinente tener el nivel de conocimiento que evite asentamientos humanos en zonas inestables, ya que de esta forma se genera un efecto de bomba de tiempo en el que la amenaza puede llegar a manifestarse de forma súbita, generando grandes impactos no solo en las infraestructuras, sino también en el tejido social de una comunidad.

La gestión eficaz de la amenaza origen natural denominada como movimientos en masa, es necesario sumar esfuerzos entre la academia, las instituciones públicas y las organizaciones sociales, etc. Esto implica crear líneas de base de información basadas en inventarios históricos de eventos, que a su vez sean potenciadas por tecnologías emergentes para la captura, integración y análisis de grandes volúmenes de datos mediante sistemas de información geográfica, teledetección, DInSAR y modelización geotécnica, entre otras. Asimismo, es necesario integrar el conocimiento de la amenaza en tres ejes: (i) gobernanza institucional, (ii) corresponsabilidad comunitaria y (iii) transparencia y difusión del conocimiento. Estas condiciones permiten reducir el riesgo y traducir el conocimiento técnico en políticas públicas efectivas y sostenibles.

Es pertinente indicar que se ha venido realizando diversos diagnósticos territoriales por las entidades encargadas, en dónde debido a la ubicación del territorio ecuatoriano está expuesto a diversos tipos de amenazas como se observa en la Figura 1 que presenta una recopilación de los eventos suscitados a lo largo del periodo 2010 – marzo 2024. En el mencionado gráfico resalta que la amenaza de movimientos en masa es recurrente en el país y por ello toma especial relevancia su estudio.

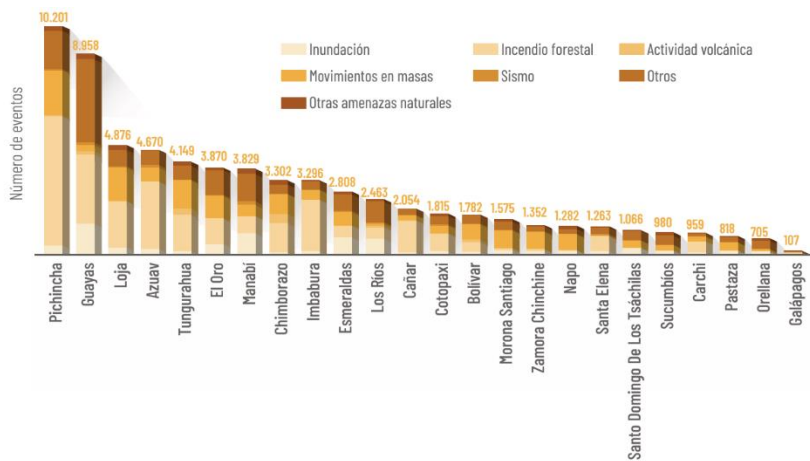


Figura 1. Número de eventos por amenaza por provincia periodo 2010 – marzo 2024.

Fuente: (Secretaría Nacional de Planificación, 2024).

CAPÍTULO I

1 FUNDAMENTOS DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA

Este capítulo se presenta como una guía esencial para estudiantes y profesionales de la ingeniería interesados en comprender a fondo los movimientos en masa. Con un enfoque particular en los ambientes tropicales y andinos, la obra busca explicar cómo la interacción entre procesos geológicos, hidrológicos y humanos puede desencadenar deslizamientos que ocasionan graves pérdidas humanas y materiales.

A lo largo de este capítulo, el texto avanza desde los fundamentos teóricos hasta la aplicación práctica en la gestión del riesgo. Introduciendo los conceptos básicos, define qué son los movimientos en masa y presenta casos históricos relevantes que evidencian su impacto. Se habla la clasificación de los distintos tipos de movimientos según la propuesta de Cruden y Varnes (1996), diferenciando entre caídas, deslizamientos, flujos y propagaciones laterales, así como los materiales involucrados; introduciendo los conceptos de equilibrio de fuerzas que determina la estabilidad de una ladera, destacando la importancia del Factor de Seguridad y la diferencia entre los factores condicionantes (como la geología y la pendiente) y los detonantes (como la lluvia o la sismicidad). Analiza la influencia humana, señalando cómo la deforestación, la urbanización desordenada y las obras sin control técnico aumentan el riesgo de deslizamiento y presenta los métodos de análisis empleados en la práctica geotécnica, desde los tradicionales como los métodos de equilibrio límite de Fellenius y Bishop hasta los

más modernos, como el uso del método de elementos finitos y la teledetección (InSAR) para monitorear deformaciones.

En conjunto, el libro ofrece una visión completa y aplicada de los movimientos en masa, combinando teoría, ejemplos reales y herramientas técnicas que permiten comprender los riesgos asociados a la inestabilidad de laderas, especialmente en regiones montañosas como los Andes.

1.1 La inevitable interacción entre geodinámica y sociedad

Los movimientos en masa, comúnmente conocidos como deslizamientos o derrumbes, representan una manifestación crítica de la interacción continua entre las fuerzas geológicas internas y externas que modelan la superficie terrestre. Según Duque Escobar (2024), estos fenómenos naturales, que son una parte esencial de la geodinámica externa, se originan principalmente a partir de la energía solar y la gravedad. Las fuerzas internas, entre las que se incluyen el vulcanismo y la tectónica, son las que mayormente generan formaciones extensas como las cordilleras. No obstante, los procesos externos, que persiguen un equilibrio en el relieve mediante la erosión y la remoción en masa, contrarrestan estas fuerzas una vez que se han formado. La inestabilidad de una ladera se produce cuando las fuerzas que tienden a mover una masa de suelo o roca ladera abajo superan las fuerzas que la resisten, a menudo de forma abrupta y catastrófica (Duque Escobar, 2024).

La problemática de los movimientos en masa ha alcanzado una dimensión crítica a nivel mundial, siendo uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los seres humanos. Los daños se miden

en miles de muertes y pérdidas económicas que ascienden a decenas de billones de dólares cada año (Aristizábal et al., 2010b). En particular, las zonas montañosas andinas y tropicales se encuentran en una situación de especial vulnerabilidad debido a una confluencia de factores predisponentes. La topografía abrupta, una alta sismicidad, la intensa y profunda meteorización de los suelos y los regímenes de lluvias torrenciales son elementos clave que se combinan para crear un entorno de alto riesgo (Aristizábal et al., 2010; Duque Escobar, 2024). La importancia de estudiar estos fenómenos no puede subestimarse, ya que el 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con antelación y se toman medidas de prevención y control adecuadas (Aristizábal et al., 2010).

Para contextualizar la gravedad de este problema en la región, el Ecuador muestra varios movimientos en masa que han causado pérdidas humanas y económicas considerables. El 5 de marzo de 1987, dos terremotos cerca del volcán Reventador desencadenaron deslizamientos de rocas, avalanchas de escombros y flujos de lodo que destruyeron alrededor de 70 km del oleoducto transecuatoriano y la carretera entre Quito y los campos petroleros amazónicos; las masas de derrumbe alcanzaron 75 110 millones de m³ y casi todas las cerca de 1 000 víctimas fatales fueron consecuencia de los deslizamientos (National Research Council & Division on Engineering and Physical Sciences, 1991). El 2 de febrero de 2020 colapsó la cascada de San Rafael; la erosión regresiva asociada a un depósito de avalancha volcánica desvió el cauce del río Coca y provocó deslizamientos que cortaron oleoductos y afectaron tierras kichwa. El proceso erosivo se aproxima a la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair (1 500 MW), que aporta un cuarto de

la electricidad nacional; los posibles daños a esta obra y a los oleoductos constituyen una amenaza económica para el país (Graw et al., 2022). El 31 de enero de 2022, un aluvión de lodo descendió por la quebrada El Tejar hacia los barrios La Comuna y La Gasca de Quito; las lluvias torrenciales, la deforestación y el relleno de quebradas favorecieron el desastre. Según el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos, el aluvión dejó 28 personas muertas, 53 familias damnificadas, 107 afectadas, 41 viviendas dañadas y siete destruidas; el municipio calculó que serían necesarios unos 12 millones de dólares para obras de recuperación e instaló sistemas de alarma para prevenir futuros eventos (Borja, 2023). Finalmente, el 26 de marzo de 2023, un deslizamiento rotacional en Alausí (Chimborazo), causado por lluvias que sobrepasaron en un 600 % la media entre 2010 y 2022, se movió durante aproximadamente 50 segundos y cubrió una parte de la ciudad; resultó en decenas de personas fallecidas y desaparecidas y obligó a desviar carreteras, lo que puso de manifiesto la vulnerabilidad derivada de deforestar y construir en pendientes inestables (Macías et al., 2024). Estos sucesos evidencian el impacto que han tenido los movimientos en masa sobre las infraestructuras estratégicas y las comunidades de Ecuador, lo que pone de relieve la importancia de una administración territorial apropiada y medidas para mitigar daños con el objetivo de disminuir las pérdidas económicas y humanas.

1.2 Definiciones y terminología fundamental

Para abordar el estudio de los movimientos en masa de manera rigurosa, es esencial establecer una base terminológica precisa. La definición más simple y ampliamente aceptada es la propuesta por Cruden (1991), que

describe un movimiento en masa como el desplazamiento de una masa de roca, escombros o tierra a lo largo de una ladera (Aristizábal et al., 2010b; Corpoboyacá, 2020; Suárez, 1998) . Esta definición genérica abarca una gran variedad de movimientos, desde los lentos e imperceptibles hasta los rápidos y catastróficos que involucran grandes volúmenes de material (Aristizábal et al., 2010).

Es importante diferenciar entre una ladera y un talud. El término ladera se utiliza para describir una masa de tierra con pendiente que se formó de manera natural. En contraste, el término talud se aplica a una pendiente creada artificialmente, como las que resultan de cortes para la construcción de carreteras o terraplenes como se observa en la Figura 2.

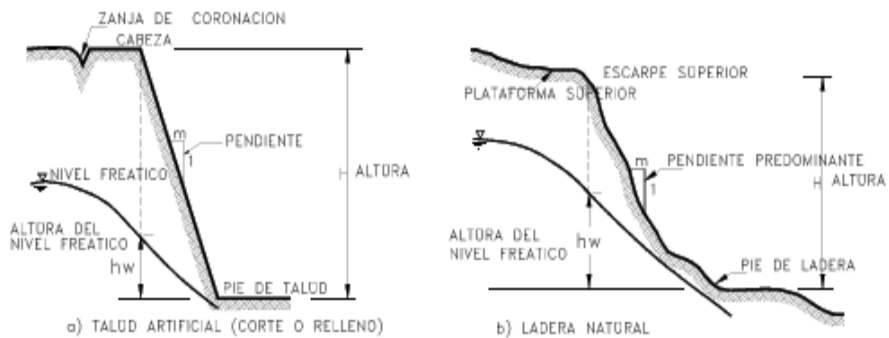


Figura 2. Talud artificial (a) y Ladera natural (b).

Fuente: (Suárez, 1998).

La caracterización de un movimiento en masa también requiere una nomenclatura específica para sus partes constitutivas. En ese sentido, un deslizamiento típico presenta los siguientes elementos:

- **Escarpe principal:** Una superficie muy inclinada y abrupta que se forma en la parte superior del área en movimiento. Es la marca visible del origen de la falla. Su continuación por debajo del material desplazado se conoce como la superficie de falla.
- **Corona:** El material de la ladera que permanece inalterado y se encuentra adyacente a la parte más alta del escarpe principal. Las grietas que aparecen en esta zona son a menudo un signo de inestabilidad incipiente.
- **Escarpe secundario:** Superficies inclinadas que se forman dentro de la masa en movimiento, producto de desplazamientos diferenciales. La presencia de múltiples escarpes secundarios indica la complejidad interna del movimiento.
- **Superficie de falla:** El área debajo del material desplazado que delimita el volumen que se ha movido. Es la zona donde ocurrió la ruptura.
- **Cuerpo principal:** La masa de material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla.
- **Pie de la superficie de falla:** La línea donde la parte inferior de la superficie de ruptura intercepta la superficie original del terreno.
- **Base y Punta:** La base es el área cubierta por el material perturbado por debajo del pie de la superficie de falla. La punta, o uña, es el punto más lejano de la cima en esta área.
- **Flanco:** Los perfiles laterales del movimiento.

En la Figura 3 se observa un diagrama de un deslizamiento, en dónde se presenta como está conformado: corona y escarpe, cuerpo principal

sobre superficie de falla, grietas transversales, pie y zona de acumulación.

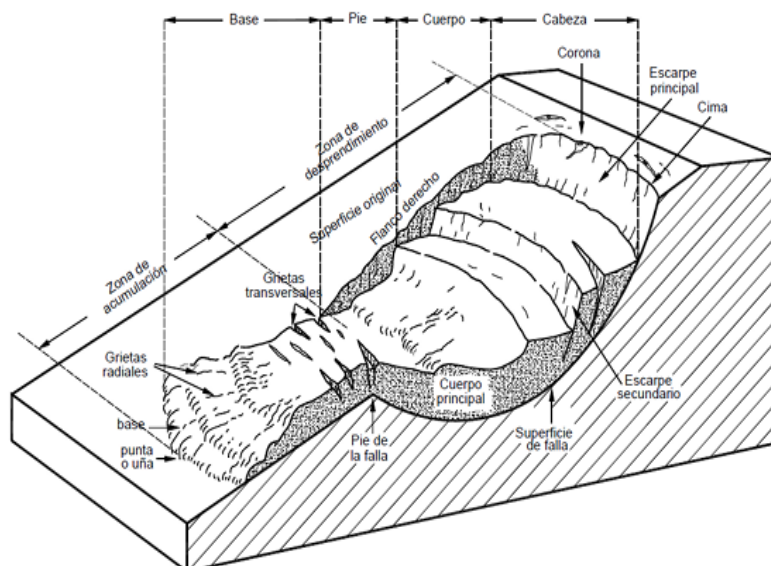


Figura 3. Nomenclatura que hace referencia a las partes de un deslizamiento.

Fuente: (Suárez, 1998).

La correcta identificación de estos elementos no es un simple ejercicio de etiquetado, sino que es fundamental para el diagnóstico en campo. Por ejemplo, la forma del escarpe principal puede dar pistas sobre el tipo de falla (circular vs. planar), y la relación entre la profundidad y la longitud del deslizamiento (D_r/L_r) ayuda a distinguir entre movimientos rotacionales y traslacionales. Esta precisión terminológica es la base para el análisis, la evaluación del riesgo y la posterior selección de medidas de mitigación efectivas (Aristizábal et al., 2010b).

También se puede definir las dimensiones de un movimiento para lo cual se usa la terminología por International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) (Suárez, 1998).

- Ancho de la masa desplazada W_d : ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud, L_d .
- Ancho de la superficie de falla W_r : ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud L_r .
- Longitud de la masa deslizada L_d ; distancia mínima entre la punta y la cabeza.
- Longitud de la superficie de falla L_r : distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.
- Profundidad de la masa desplazada D_d : máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d .
- Profundidad de la superficie de falla D_r : máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .
- Longitud total L : distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.
- Longitud de la línea central L_{cl} : distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

En la Figura 4 el deslizamiento muestra cabeza con corona y escarpe, cuerpo principal sobre superficie de falla, grietas transversales, pie zona de acumulación.

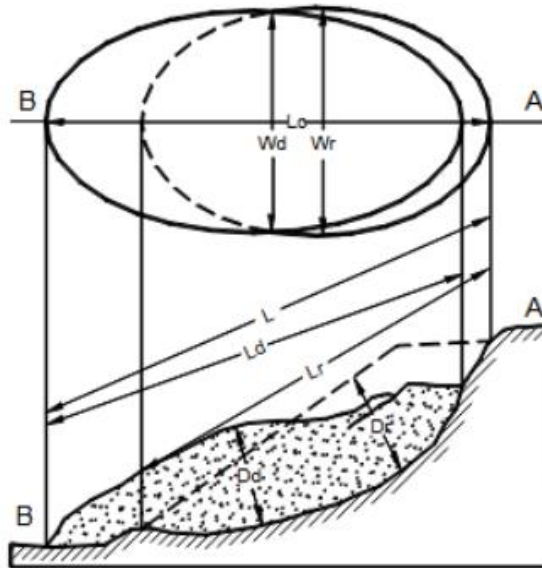


Figura 4. Dimensiones de los movimientos en masa.

Fuente: (Suárez, 1998).

1.3 Clasificación y tipos de movimientos en masa.

La clasificación de los movimientos en masa permite organizar la vasta diversidad de estos fenómenos en categorías manejables, lo cual es esencial para el estudio y la planificación. En ese sentido, la clasificación más reconocida y utilizada a nivel global fue propuesta por Varnes, (1978) y posteriormente actualizada por Cruden y Varnes en 1996. Esta taxonomía se basa en dos criterios principales: el tipo de movimiento y el tipo de material involucrado (Aristizábal et al., 2010a).

1.3.1 Los tipos de movimiento se dividen en cinco categorías principales

- **Caídas (Falls):** Movimiento de caída libre a través del aire.
- **Volcamientos (Topples):** Rotación de bloques rígidos hacia adelante.
- **Deslizamientos (Slides):** Movimiento de corte a lo largo de una o más superficies de falla discretas.
- **Flujos (Flows):** Movimiento de material deformado y viscoso sin una superficie de falla definida.
- **Propagación Lateral (Lateral Spreads):** Extensión lateral de una masa de suelo.

1.3.2 Los tipos de material se dividen en tres categorías principales

- **Roca:** Material duro e intacto que estaba en su lugar antes del movimiento.
- **Detritos o Residuos:** Suelo que contiene una proporción significativa de material grueso (más del 20% en peso de partículas mayores de 2 mm) (Aristizábal et al., 2010).
- **Tierra:** Material con más del 80% de partículas menores de 2 mm, incluyendo arenas, limos y arcillas (Aristizábal et al., 2010).

La combinación de estos criterios simples da lugar a una gran complejidad de movimientos en masa. Además de estos tipos básicos, se reconocen los movimientos complejos, que son una combinación de dos o más tipos de movimientos, como un deslizamiento que se transforma en un flujo (Aristizábal et al., 2010).

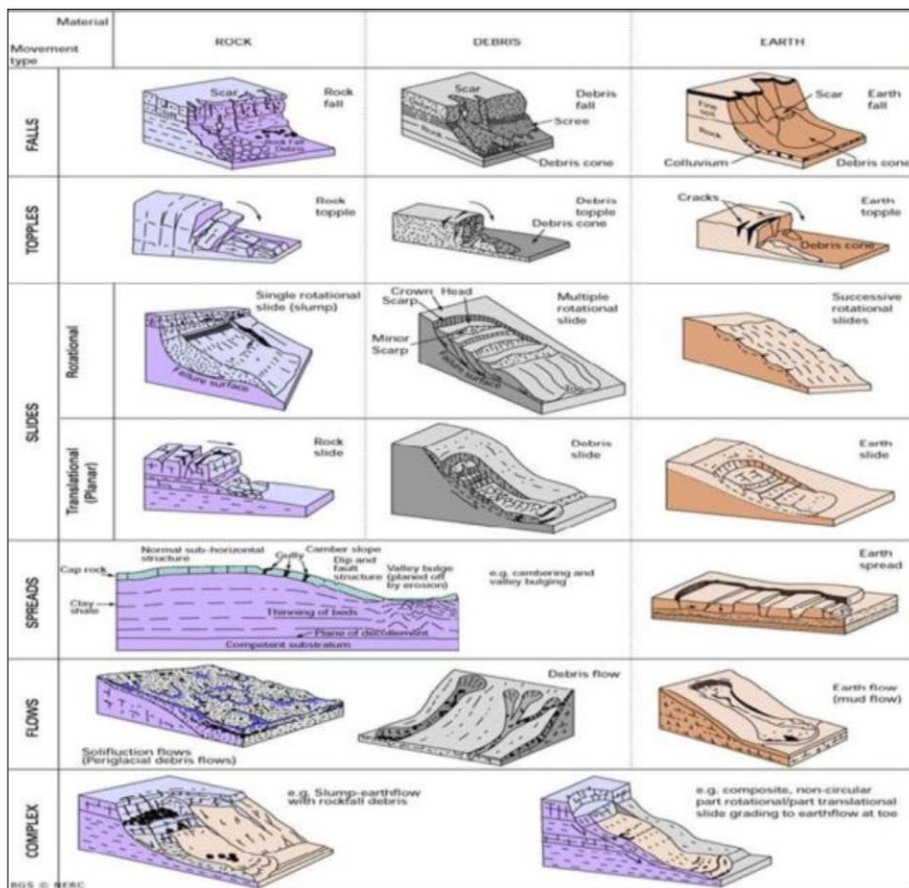


Figura 5. Tipos de deslizamientos de tierra.

Fuente: (Suárez, 1998).

1.3.3 Descripción de los tipos de movimientos en masa

A continuación, Corpoboyacá (2020) describe en detalle los principales tipos de movimientos en masa, destacando sus características y mecanismos distintivos:

- **Caídas (Falls):** En este tipo de movimiento, una masa de roca, detritos o tierra se desprende de una ladera con una pendiente muy

fuerte y desciende principalmente a través del aire por caída libre, rebotando o rodando (Aristizábal et al., 2010a; Corpoboyacá, 2020). Cabe indicar que la velocidad es típicamente muy rápida a extremadamente rápida. Estos movimientos a menudo son precedidos por pequeños desplazamientos que provocan la separación progresiva de los bloques. En taludes con pendientes superiores a 75 grados, los movimientos tienden a comportarse como caídas de caída libre, mientras que en pendientes más suaves (menos de 45 grados), el material tiende a rodar (Aristizábal et al., 2010).

- **Volcamientos (Topples):** Este movimiento se caracteriza por la rotación hacia adelante de una o varias unidades de material, con el centro de giro ubicado por debajo del centro de gravedad de la unidad. Suelen ocurrir en formaciones rocosas o en suelos residuales, donde la orientación de las discontinuidades juega un papel crucial (Aristizábal et al., 2010a; Corpoboyacá, 2020). Las fuerzas que los provocan pueden ser generadas por el agua en las grietas, expansiones o movimientos sísmicos. Un volcamiento puede, a su vez, generar un desmoronamiento del talud o una falla en escalera si se presenta en varios niveles de discontinuidad (Aristizábal et al., 2010a).
- **Deslizamientos (Slides):** Este es un movimiento de corte a lo largo de una superficie de falla bien definida (Aristizábal et al., 2010a). Se subdividen en dos categorías principales:
 - **Deslizamiento Rotacional:** La superficie de falla es una curva cóncava hacia arriba, a menudo en forma de "cuchara". El movimiento es de rotación alrededor de un eje paralelo a la ladera

(Aristizábal et al., 2010a; Corpoboyacá, 2020). Estos deslizamientos son comunes en suelos homogéneos y cohesivos y tienden a la autoestabilización (Aristizábal et al., 2010a). La relación entre la profundidad de la falla (D_r) y la longitud de la ruptura (L_r) suele estar entre 0.15 y 0.33 (Aristizábal et al., 2010a).

- **Deslizamiento Traslacional:** La masa se desplaza hacia afuera o hacia abajo a lo largo de una superficie de falla más o menos plana o ligeramente ondulada, con muy poca o ninguna rotación (Aristizábal et al., 2010a; Corpoboyacá, 2020).

Estos movimientos son controlados típicamente por superficies de debilidad geológica, como fallas, juntas, o el contacto entre la roca y los suelos blandos. A diferencia de los rotacionales, un deslizamiento traslacional puede progresar indefinidamente ladera abajo. La relación D_r/L_r es generalmente inferior a 0.1 (Aristizábal et al., 2010).

- **Flujos (Flows):** En un flujo, el material se mueve como una unidad deformada y viscosa, sin una superficie de ruptura discreta, con movimientos relativos de partículas o bloques dentro de la masa (Aristizábal et al., 2010a; Corpoboyacá, 2020). La ocurrencia de flujos está directamente relacionada con la saturación de los materiales, y su velocidad puede ser lenta o extremadamente rápida (Aristizábal et al., 2010a).
- **Flujo de Detritos (Debris Flow):** Son flujos que contienen una cantidad significativa de material grueso (detritos). El movimiento es rápido, y pueden erosionar y transportar sedimentos,

incrementando su volumen a medida que avanzan (Aristizábal et al., 2010a; Duque Escobar, 2024).

- **Flujo de Lodo (Mud Flow):** En este tipo de flujo, los materiales son muy finos, la humedad es muy alta y el movimiento se comporta como un líquido viscoso, con un gran poder destructivo (Aristizábal et al., 2010).
- **Avalanchas:** Se trata de un tipo de flujo extremadamente rápido y de gran escala, que se puede describir como un “flujo turbulento de granos”(Aristizábal et al., 2010a). Se relacionan con lluvias excepcionales o eventos sísmicos en zonas de alta montaña.
- **Propagación Lateral (Lateral Spreads):** El modo de movimiento dominante es la extensión lateral, facilitada por la licuefacción o el flujo plástico de una capa de material subyacente (Aristizábal et al., 2010; Corpoboyacá, 2020). Es un movimiento complejo y lento que puede llevar al hundimiento, la rotación o la desintegración de las capas superiores (Aristizábal et al., 2010).

A continuación, se presenta la Tabla 1 en dónde se evidencia las categorías principales para facilitar su comprensión:

Tabla 1. Clasificación de los deslizamientos.

Clase	Descripción	Velocidad Típica	Material
Caído	Desprendimiento y caída libre de material de una ladera muy empinada	Muy rápida a extremadamente rápida	Roca, Detritos, Tierra

Volcamiento	Rotación hacia adelante de una unidad de material alrededor de un punto, sin un plano de falla definido	Extremadamente lento a extremadamente rápido	Roca, Detritos
Deslizamiento	Movimiento de masa sobre una superficie de falla definida	Lento a muy rápido	Roca, Detritos, Tierra
<i>Rotacional</i>	Superficie de falla curva; la masa rota hacia atrás	Moderado a rápido	Tierra, Suelos cohesivos
<i>Traslacional</i>	Superficie de falla más o menos plana; movimiento en bloque	Lento a rápido	Roca, Detritos, Tierra
Flujo	Movimiento de una masa deformada, viscosa o fluida, sin un plano de ruptura claro	Lento a muy rápido	Roca, Detritos, Tierra
<i>Flujo de Detritos</i>	Mezcla de material grueso y agua	Muy rápido	Detritos, Rocas
<i>Flujo de Lodo</i>	Material fino con alta humedad; se	Muy rápido	Tierra, Finos

	comporta como un líquido		
Propagación Lateral	Extensión lateral de una masa de suelo sobre una capa licuada o plástica	Extremadamente lento	Tierra (suelos sensitivos)

1.4 Factores de la inestabilidad de laderas: El balance de fuerzas

Una vez comprendidos y clasificados los distintos tipos de movimientos en masa, llega el momento de dar un paso más allá: pasar de la simple descripción a un análisis técnico que explique por qué y cómo se producen. En el fondo, un deslizamiento no es más que un problema de equilibrio de fuerzas que ocurre cuando estas empujan la masa del terreno hacia abajo superando la capacidad del suelo o la roca para resistirlas. Por eso, entender la estabilidad de una ladera requiere conocer a fondo un concepto clave en geotecnia: el Factor de Seguridad (FS), una medida que indica cuán cerca está una ladera de perder su estabilidad.

Aquí se estudia el equilibrio de fuerzas que mantiene o rompe la estabilidad de un talud, introduciendo conceptos como cohesión y ángulo de fricción mediante la ecuación de resistencia al corte de Mohr-Coulomb, que explica la resistencia del suelo.

1.4.1 Principios de la estabilidad de taludes

La ocurrencia de un movimiento en masa es el resultado de un desequilibrio de fuerzas. El principio fundamental que rige la estabilidad de un talud es la comparación entre el esfuerzo cortante que tiende a causar el movimiento y la resistencia al corte del material que se opone a él (Aristizábal et al., 2010). El esfuerzo cortante es la fuerza motriz, principalmente generada por la gravedad, aunque puede ser aumentada por otros factores como los sismos o las sobrecargas. La resistencia al corte es la capacidad intrínseca del material para resistir este esfuerzo y se compone de dos componentes principales: la cohesión (c'), que es la fuerza que mantiene unidas las partículas del suelo, y la fricción interna (ϕ'), que resulta de la fricción entre los granos (Aristizábal et al., 2010; Duque Escobar, 2024).

La relación entre estas fuerzas se expresa a través del Factor de Seguridad (FS), un concepto central en la ingeniería geotécnica. El FS se define como el cociente entre la resistencia al corte disponible del suelo y el esfuerzo cortante requerido para mantener el equilibrio a lo largo de una superficie de falla potencial (Aristizábal et al., 2010). La ecuación de Coulomb, que describe la resistencia al corte, es fundamental para este cálculo:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

(Aristizábal et al., 2010; Duque Escobar, 2024).

Donde τ_f es la resistencia al corte, c' es la cohesión efectiva, σ' es el esfuerzo efectivo normal y ϕ' es el ángulo de fricción interna efectiva

(Aristizábal et al., 2010a). Un FS mayor que 1.0 indica estabilidad, mientras que un FS igual o menor a 1.0 indica un estado de falla incipiente (Aristizábal et al., 2010). En la práctica, un valor de 1.40 se considera un FS aceptable para el diseño de taludes estables (Aristizábal et al., 2010).

Una distinción conceptual crucial para entender la inestabilidad de las laderas es la diferencia entre factores condicionantes y factores detonantes (Ávila & Cubillos, 2015; Duque Escobar, 2024). Los factores condicionantes son las variables cuasi-estáticas o intrínsecas que determinan la susceptibilidad de la ladera a la falla. Estos factores, como la geología y la topografía, no cambian rápidamente en el tiempo y definen la distribución espacial de los movimientos en masa. Por otro lado, los factores detonantes son los estímulos dinámicos y externos que, al superar las condiciones de estabilidad, provocan la falla de una ladera susceptible en un momento dado, como las lluvias intensas o los sismos (Ávila & Cubillos, 2015). Esta comprensión dual es fundamental para un análisis de riesgo a nivel completo.

1.5 Factores condicionantes (susceptibilidad)

En esta sección también abordará los factores condicionantes que son las características propias del terreno que lo hacen más o menos susceptible a fallar, como el tipo de roca o suelo (litología), la presencia de fracturas o fallas geológicas, y la forma del relieve, en especial la pendiente. También se profundiza en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales como la granulometría o los Límites de Atterberg, que ayudan a comprender cuánta resistencia puede ofrecer un suelo.

En conjunto, esta sección busca que el lector entienda que detrás de cada deslizamiento hay una interacción compleja entre las fuerzas naturales y las características del terreno, requiriendo su análisis una mirada tanto física como geológica.

1.5.1 Geología e ingeniería geotécnica

El tipo de material que compone una ladera es el factor de inestabilidad más primordial y directo. La litología y composición del suelo determinan la resistencia, la permeabilidad y el comportamiento general del macizo. En las regiones andinas, es común encontrar suelos residuales que se han formado por la meteorización in situ de la roca madre. Estos suelos se diferencian de los transportados en que conservan una "fábrica heredada" o "estructuras relictas" de la roca original, lo que puede resultar en discontinuidades con orientaciones aleatorias e impredecibles, a diferencia de los planos de estratificación horizontales de los suelos sedimentarios (Aristizábal et al., 2010a). Por ejemplo, en el área de la vía Guanujo-Echeandía en Ecuador, la geología está dominada por depósitos coluvio-aluviales y la Formación Macuchi, que incluye tobas (Castro & Guerrero, 2025).

La estructura geológica es otro condicionante crítico. La presencia y orientación de discontinuidades como fallas, diaclasas o planos de estratificación son determinantes para el mecanismo de falla (Duque Escobar, 2024). Un talud es intrínsecamente más inestable si los planos de debilidad se inclinan en la misma dirección que la pendiente (buzamiento conforme) que si lo hacen en la dirección contraria (buzamiento contrario) (Duque Escobar, 2024). El tectonismo activo en

la cordillera andina, con fallas como las de Romeral, Palestina, e Illangama-Guaranda, genera un fracturamiento intenso que reduce la resistencia de la masa rocosa y crea superficies preferenciales de falla (Aristizábal et al., 2010a; Duque Escobar, 2024).

Además, la meteorización y alteración de los materiales es un proceso progresivo que debilita las propiedades mecánicas del material de la ladera con el (Berenguer et al., 2022). En los ambientes tropicales y húmedos, como en la cordillera Oriental, los suelos alterados pueden alcanzar grandes espesores. La presencia de minerales inestables como la pirita framboide, que se altera químicamente, puede generar una descomposición del suelo y contribuir significativamente a la inestabilidad (Aristizábal et al., 2010). En la Figura 6 podemos observar la composición litológica que tiene el Ecuador, así como las estructuras tectónicas que afectan al país.

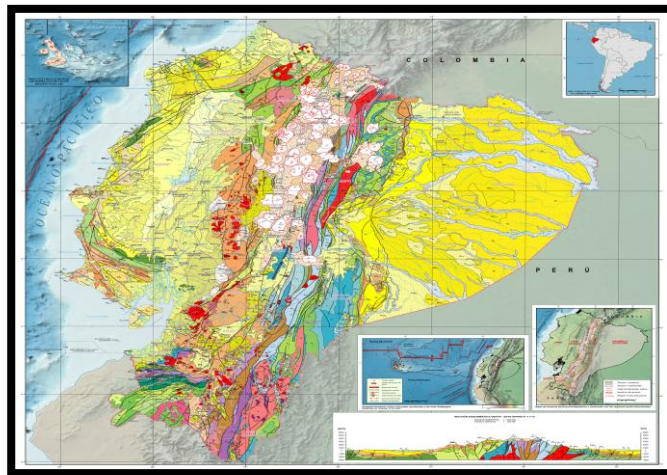


Figura 6. Mapa Geológico de la República del Ecuador escala 1:1.000.000.

Fuente: (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2025).

1.5.2 Geomorfología y topografía

Las características morfológicas del terreno, en particular la pendiente, son factores condicionantes fundamentales. A medida que el gradiente de la pendiente aumenta, las fuerzas desestabilizadoras (componente del peso que actúa paralela a la ladera) se incrementan, mientras que el Factor de Seguridad disminuye. Como resultado, los taludes de alta pendiente son muy susceptibles a caídos, volcamientos y flujos de detritos. La morfología general del relieve, moldeada por procesos tectónicos y glaciares en la región andina, genera laderas escarpadas que son zonas propensas a la remoción en masa. Sánchez Keane (2019), menciona que, la combinación del análisis espacial y los límites de consistencia del suelo permite delimitar las zonas críticas y priorizar el seguimiento antes de eventos hidrometeorológicos. Este enfoque se puede replicar en otras cuencas tropicales, ya que solo se necesitan datos básicos para generar capas de amenaza y orientar medidas preventivas, como el manejo de drenajes, las restricciones de uso del suelo y las alertas tempranas comunitarias. Además, los umbrales de humedad identificados pueden incorporarse a reglas operativas sencillas para cerrar temporalmente carreteras o taludes cuando el terreno supere niveles de riesgo predefinidos.

A continuación, se presenta una clasificación de pendientes y su relación con la estabilidad, adaptada de estudios geomorfológicos:

Tabla 2. Rangos de Pendiente y Grado de inestabilidad.

Grados de Pendiente	Porcentaje de Pendiente	Descripción	Umbral Geomorfológico	Grado de Inestabilidad
0°-2°	0-3.5%	Horizontal	Erosión nula o leve	Bajo
2,1°-5°	3.6-8.7%	Suave	Erosión débil, inicio de regueros	Bajo
5,1°-10°	8.8-17.6%	Moderada	Erosión moderada a fuerte, inicio de erosión lineal	Medio
10,1°-20°	17.7-36.4%	Fuerte	Erosión intensa, cárcavas incipientes	Alto
20,1°-30°	36.5-57.7%	Moderadamente escarpada	Cárcavas frecuentes, movimientos en masa, reptación	Alto
30,1°-45°	57.8-100%	Muy escarpada	Coluviamiento, solifluxión intensa	Muy Alto
>45°	>100%	Acantilada	Desprendimientos, derrumbes, corredores de detritos	Muy Alto

1.6 Propiedades físicas y mecánicas del suelo

Las propiedades intrínsecas del suelo, como la distribución de tamaños de grano, la plasticidad, el grado de meteorización, la estructura y la permeabilidad, condicionan directamente su resistencia y, en consecuencia, la estabilidad del talud. Cuando estas características se combinan con forzantes hidrológicas (por ejemplo, episodios de lluvia que incrementan la humedad del subsuelo), la capacidad del terreno para sostenerse disminuye y aumenta la probabilidad de fallo. Por esta razón, los estudios de estabilidad incorporan ensayos de laboratorio (corte y límites de plasticidad) y observaciones en campo en modelos que otorgan una mayor propensión a los materiales finos, modificados o con baja capacidad de drenaje en laderas empinadas. Esta evaluación geotécnica respalda los mapas de susceptibilidad empleados con fines de prevención y ordenación, además de posibilitar la determinación de prioridades para gestionar las aguas, controlar las cargas y reforzar áreas críticas.

1.6.1 Relaciones gravimétricas y volumétricas

Se basan en el modelo de tres fases (sólidos, agua y aire) y permiten definir propiedades como el peso específico de masa (γ_m), el contenido de humedad (ω), la relación de vacíos (e), la porosidad (n) y el grado de saturación ($G\omega$). Un aspecto práctico de estas relaciones es que un metro cúbico de suelo supera la tonelada, un factor que debe considerarse en el diseño de excavaciones para mitigar derrumbes (Aristizábal et al., 2010a). En la Figura 7 se dispone de un esquema de la composición de una muestra de suelo con sus diferentes fases, que nos permite entender

su distribución en base a los sólidos, líquidos y gases de los que puede estar conformada una muestra.

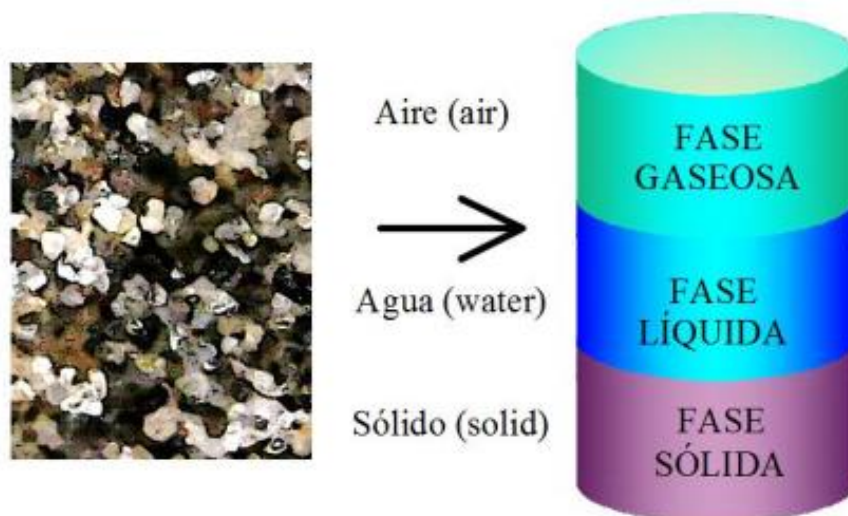


Figura 7. Esquema de una muestra de suelo y sus fases.

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

1.6.2 Granulometría y clasificación de suelos

El análisis granulométrico determina la distribución de tamaños de partículas de una muestra de suelo mediante el uso de tamices (Suárez, 1998). Junto con los límites de Atterberg, los resultados de este análisis son la base para clasificar un suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), propuesto por Casagrande en 1948. El SUCS clasifica los suelos en dos grandes grupos: de grano grueso (gravas y arenas) y de grano fino (limos y arcillas). El análisis también permite calcular los coeficientes de uniformidad (Cu) y de curvatura (Cc), que indican si un suelo está “bien gradado” (con partículas de

diferentes tamaños de manera proporcional) o “mal gradado” (con partículas de tamaño uniforme).

1.7 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg permiten cuantificar la plasticidad y, por tanto, predecir el comportamiento de los suelos finos desde el punto de vista ingenieril. El límite de contracción es el momento en que se acaba la disminución del volumen cuando el suelo se seca, el límite plástico señala el punto por debajo del cual ya no ocurre deformación sin que haya agrietamiento y el límite líquido indica el contenido de humedad a partir del cual comienza a fluir el suelo. El índice de plasticidad (que es la diferencia entre el límite plástico y el límite líquido) ofrece datos acerca de la retracción, la compresibilidad, la trabajabilidad y el potencial de hinchazón. Para clasificar, estos parámetros se encuentran en la carta de plasticidad de Casagrande para diferenciar arcillas y limos, y para nutrir sistemas como el SUCS. En el estudio de la estabilidad de taludes, conocer estos límites ayuda a prever la pérdida de resistencia durante las lluvias, la fisuración por secado y los cambios volumétricos que afectan al drenaje y a las tensiones. Se realizan ensayos según normas como la ASTM D4318, prestando atención a la preparación de la muestra y la temperatura.

En cuanto a estos límites podemos resaltar lo siguiente:

- **Límite Líquido (LL):** El contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta de manera plástica.
- **Límite Plástico (LP):** El contenido de humedad por debajo del cual el suelo deja de ser plástico y se vuelve semisólido.

- **Índice de Plasticidad (IP):** La diferencia entre el LL y el LP ($IP=LL-LP$), que representa el rango de humedad en el que el suelo es plástico. Un valor de IP bajo indica que el suelo es muy sensible a cambios de humedad y puede pasar rápidamente de un estado semisólido a uno líquido, lo que aumenta la susceptibilidad a deslizamientos (Aristizábal et al., 2010).

1.7.1 Resistencia al corte

Esta es la propiedad mecánica más relevante para la estabilidad. Como se mencionó, la ecuación de Coulomb establece que la resistencia al corte es la suma de la cohesión y la fricción. Para suelos cohesivos (arcillas), la falla tiende a ser rotacional, mientras que para suelos friccionantes (arenas), la falla es típicamente traslacional o plana (Aristizábal et al., 2010).

1.7.2 Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), conocido internacionalmente como USCS (Unified Soil Classification System), es un método ampliamente utilizado en geotecnia para identificar y clasificar los suelos con fines de ingeniería. Este sistema se originó en la década de 1940 como parte de los estudios realizados por Casagrande para proyectos de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, y posteriormente fue adoptado y perfeccionado por la American Society for Testing and Materials (ASTM) en la norma ASTM D2487. En la Figura 8, se evidencia un sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), donde se muestra el tamaño de las partículas y cómo se relacionan con los tipos de suelos.

Divisiones mayores		Símbolo de grupo	Nombres típicos	Criterios de clasificación para suelos granulares		
Suelos de grano grueso (más del 50% del material es mayor en tamaño que tamiz N° 200)	Gravas (Más de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz N° 4)	GW	Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino.	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = 1 < D_{30}^2/(D_{10} * D_{60}) < 3$		
		GP	Gravas pobremente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino.	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW.		
	Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	GM	$\frac{d}{u}$	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $I_p < 4$	A los materiales sobre la línea A con $4 < I_p < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo.
		GC		Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcillosas.	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $I_p > 7$	
	Arenas (Más del 50% de la fracción gruesa es menor que el tamiz N° 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW	Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino.	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = 1 < D_{30}^2/(D_{10} * D_{60}) < 3$	
			SP	Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino.	No cumplir todos los requisitos de gradación para SW.	
Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)		SM	$\frac{d}{u}$	Arenas limosas, mezclas arena-limo.	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $I_p < 4$	Si el material está en la zona sombreada con $4 \leq I_p \leq 7$ se considera de frontera y se le asigna doble símbolo.
SC		Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $I_p > 7$			
Suelos de grano fino (más del 50% del material pasa el tamiz N° 200)	Limo y arcillas (límite líquido $w_L < 50$)	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad.	1. Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. 2. Dependiendo del porcentaje de fino (fracción menor que el tamiz N° 200) Los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% - GW, GP, SW, SP Más del 12% - GM, GC, SM, SC De 5 a 12% - Casos de frontera que requieren doble símbolo.		
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arenas limosas, arcillas magras.			
		OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			
	Limo y arcillas (límite líquido > 50)	MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomeos, suelos elásticos.			
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas.			
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos.			
	Suelos altamente orgánicos	Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos.			

Figura 8. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

Fuente: (Aristizábal et al., 2010).

1.8 Los mecanismos detonantes de la falla

En este capítulo se abordan los dos factores naturales que pueden desencadenar movimientos en masa en regiones andinas y tropicales: el agua y los sismos. Ambos juegan un papel decisivo en la pérdida de estabilidad de las laderas.

Por un lado, se analiza cómo la hidrología de la ladera influye en su comportamiento. La lluvia ya sea intensa, breve o constante durante varios días puede alterar profundamente el equilibrio del terreno. Esto sucede porque el exceso de agua reduce la cohesión aparente de los materiales y aumenta la presión de poros, lo que disminuye la resistencia del suelo y facilita su deslizamiento.

Por otro lado, se estudia la influencia de la actividad sísmica, considerada una de las amenazas más importantes en zonas montañosas. Los movimientos telúricos generan fuerzas dinámicas que incrementan el esfuerzo cortante y, en algunos casos, provocan licuefacción en suelos saturados, haciendo que estos se comporten como un líquido y pierdan completamente su capacidad de soporte.

1.8.1 El rol primordial del agua

El agua es, con diferencia, el disparador más frecuente de los movimientos en masa: la infiltración durante lluvias intensas o prolongadas aumenta las presiones de poro, reduce las tensiones efectivas y debilita la resistencia al corte hasta que el talud se estabiliza. Los modelos físico-basados muestran cómo la dinámica de la infiltración controla el momento, la profundidad y la extensión del deslizamiento, y explican por qué los episodios de lluvia de larga duración, incluso con intensidades moderadas, pueden ser más peligrosos que los chubascos breves y violentos (Iverson, 2000).

Además, la posibilidad de inestabilidad aumenta de manera drástica más allá de ciertos umbrales de lluvia-duración (intensidad-duración) que han sido determinados a través de décadas de registros pluviométricos y

deslizamientos. Estos umbrales son la base de muchos sistemas de alerta temprana hoy en día. Simultáneamente, el uso de información sobre la precipitación obtenida a través de satélites ha extendido la supervisión a áreas con escasa instrumentación, lo que facilita la emisión de alertas prácticamente en tiempo real y una evaluación operativa del peligro. De cara al futuro, la variabilidad y el cambio climático podrían intensificar las lluvias extremas en varias regiones, lo que sugiere una exposición creciente a deslizamientos de tierra provocados por las precipitaciones y refuerza la necesidad de realizar un seguimiento hidrometeorológico y de gestionar el drenaje (Gariano & Guzzetti, 2016).

La inestabilidad de una ladera se puede desencadenar por dos tipos principales de eventos de lluvia:

1. **Lluvias cortas e intensas:** Tienen un efecto casi inmediato, causando una rápida reducción de la resistencia al corte.
2. **Lluvias de larga duración:** Actúan a largo plazo, provocando un aumento en la presión de poros en superficies de falla más profundas.

Para prever la ocurrencia de eventos como estos, es crucial el concepto de umbrales críticos de precipitación. En ese sentido, investigaciones realizadas en la cuenca del Río Chinchiná, en Colombia, han mostrado que las lluvias diarias que sobrepasan los 70 mm desencadenan movimientos superficiales. Por otro lado, los movimientos profundos se relacionan con precipitaciones acumuladas de más de 200 mm en un lapso de 25 días. En Bucaramanga, Colombia, se han propuesto

umbrales de alerta de 150 mm de lluvia acumulada en 15 días y 55 mm en las últimas 24 horas (Aristizábal et al., 2010).

Existen varios mecanismos hidrológicos a través de los cuales la precipitación puede desencadenar una falla (Aristizábal et al., 2010):

- **Reducción de la Cohesión Aparente:** En suelos parcialmente saturados, la infiltración de agua lluvia reduce la succión de la matriz del suelo. La succión es una presión de poros negativa que contribuye a la resistencia al corte. Al perderse, la resistencia disminuye y puede generar movimientos superficiales (Aristizábal et al., 2010).
- **Aumento de la Presión de Poros Positiva:** Cuando el suelo se satura completamente, la succión desaparece y se desarrolla una presión de poros positiva. Esta presión actúa separando los granos del suelo, lo que reduce drásticamente la fricción interna y la resistencia a la corte efectiva, un principio central de la mecánica de suelos (Aristizábal et al., 2010; Duque Escobar, 2022).
- **Generación de Flujo Subterráneo:** La precipitación puede generar una zona saturada temporalmente o un nivel freático “colgado” en estratos de suelo profundos. La presión negativa de los poros disminuye y se produce un flujo paralelo a la ladera debido a este nivel freático temporal, lo que provoca inestabilidad (Aristizábal et al., 2010).

La lluvia regula de manera directa y medible la estabilidad de las laderas, según lo confirma la evidencia: a medida que la precipitación se vuelve más intensa y duradera, aumenta también con mayor rapidez

la presión de los poros, disminuye la resistencia del material y, por ende, el factor de seguridad disminuye. En realidad, los modelos hidromecánicos y las pruebas físicas demuestran una conexión casi instantánea entre el aumento de la intensidad y la aceleración del deterioro de la estabilidad, lo que incluye el desplazamiento de la superficie de falla hacia cotas más someras en suelos no cohesivos.

Simultáneamente, los sistemas de umbrales de lluvia y duración que se utilizan en las advertencias tempranas establecen formalmente esta conexión al detectar aquellas combinaciones críticas entre la intensidad y el tiempo que superan un determinado límite, por encima del cual la probabilidad de deslizamiento se incrementa significativamente. Métodos más recientes han incluido incluso una tercera dimensión, la precipitación areal media, para identificar patrones espaciales complejos en los eventos de lluvia. Sin embargo, la supuesta aleatoriedad en la repartición de los comienzos de movimientos en laderas que parecen homogéneas a simple vista se debe a leves alteraciones locales de las propiedades hidráulicas, especialmente de la conductividad hidráulica saturada y no saturada. Las variaciones decimétricas en estratificación, la anisotropía y la compactación del terreno guían la infiltración, acumulan las presiones de los poros y determinan que la inestabilidad se presente en parches, incluso si llueve uniformemente a nivel regional.

Los estudios numéricos con campos aleatorios y las simulaciones en 3D demuestran que esta heterogeneidad a pequeña escala amplifica la dispersión de las respuestas como: el tiempo de disparo, la profundidad de la falla y el volumen movilizado, por lo que es necesario medir y parametrizar la variabilidad hidráulica para perfeccionar los modelos y

la gestión del drenaje. En resumen, la intensidad de la lluvia y la conductividad hidráulica variable actúan de manera acoplada: la primera acelera la pérdida de estabilidad y la segunda determina dónde y cuándo se produce la falla en el terreno.

Según Chinkulkijniwat et al. (2019), los deslizamientos someros provocados por la lluvia tienen un alto potencial de peligro, ya que el desplazamiento de la masa movilizada se acelera y puede llegar a distancias considerables desde su punto de origen. El panorama se complica debido al flujo transitorio de agua en suelos no saturados, a pesar de que el deslizamiento en una ladera empinada puede explicarse de manera general. Por lo tanto, para analizar la estabilidad bajo condiciones de lluvia, es fundamental entender cómo el agua de lluvia se infiltra y se desplaza en pendientes no saturadas y cómo esto influye en el factor de seguridad.

1.9 La sismicidad como disparador de inestabilidad

La sismicidad actúa como un disparador mayor de inestabilidad porque el sacudimiento modifica de forma súbita el equilibrio de las laderas, reduce resistencias, abre discontinuidades y, en presencia de pendientes pronunciadas o materiales poco cohesionados, transforma deformaciones subcríticas en fallas manifiestas. En ese sentido, la evidencia acumulada en revisiones globales muestra que los terremotos generan conjuntos extensos de deslizamientos cuya extensión espacial y tipo de movimiento guardan relación con parámetros sísmicos como son la: magnitud, intensidad local y de orden geológicos como: litología, estructura y topografía, de modo que pueden definirse límites superiores para el área afectada y para la distancia máxima de ocurrencia respecto

al epicentro o a la ruptura, con diferencias sistemáticas entre deslizamientos “disruptivos” como: caída y avalanchas de rocas y movimientos “coherentes” de tipo rotacional y traslacionales (Keefer, 2002).

Desde el punto de vista operativo, la utilización de fotografías aéreas, SIG e imágenes satelitales y los inventarios completos después del sismo han posibilitado afinar correlaciones, perfeccionar la cartografía de amenaza y, principalmente, dar prioridad a los asentamientos y corredores expuestos. No obstante, todavía es necesario fortalecer la documentación en áreas con actividad sísmica como Los Andes; allí las condiciones geológicas y el uso del suelo aumentan el riesgo y requieren modelos adaptados al entorno local para reducir pérdidas humanas y daños materiales.

1.9.1 Los sismos actúan como detonantes de dos maneras principales

- **Aumento del esfuerzo cortante:** La vibración y las fuerzas dinámicas de un sismo aumentan el esfuerzo cortante que actúa sobre la masa de suelo, empujándola más allá de su resistencia al corte.
- **Licuefacción:** Este fenómeno catastrófico ocurre en depósitos de arena no consolidados y saturados porque la vibración sísmica compacta los granos del suelo, lo que transfiere la carga del esqueleto de partículas al agua de los poros. Además, la presión de poros aumenta hasta igualar la presión total, la presión intergranular se hace nula, y el suelo pierde su resistencia al corte, comportándose como un líquido denso.

1.9.2 Factores que intervienen en torno a esta amenaza

a) Intervención humana

Los movimientos en masa no son solo “actos de la naturaleza”: la intervención humana provoca y mantiene inestabilidades cuando altera el corte, la carga y el agua de las laderas. A modo de ejemplo, las terrazas de construcción y los cortes viales descubren planos débiles y quitan el soporte basal; por tanto, la ampliación de caminos sin un diseño geotécnico estricto está relacionada con un aumento cuantificable de deslizamientos a lo largo del talud excavado (Robson et al., 2025). También es sumamente crucial el aporte de agua por parte del ser humano: el riego constante, las fugas de tuberías o los desagües deficientes incrementan la humedad y la presión de poro, lo que crea condiciones propicias para que ocurran fallas incluso en laderas que antes eran estables. A esto se añaden la minería y los canteros, que generan vibraciones y sobrecargas localizadas por medio de sus voladuras y alteraciones geométricas. Si estos fenómenos no son controlados, pueden poner en riesgo la estabilidad (Sevelka, 2022). En resumen, la mezcla de cortes, rellenos, agua agregada y pérdida de cobertura puede provocar que laderas pasen de un riesgo latente a una inestabilidad crónica. Por eso resulta tan fundamental la planificación territorial y el mantenimiento de los drenajes como la geología para prevenir perjuicios.

La urbanización rápida y el sellado del suelo también degradan el drenaje natural y aumentan la escorrentía, lo que incrementa el riesgo de fallo en zonas ya pendientes (Isola et al., 2023). De forma paralela, la

deforestación y la eliminación de la cobertura reducen el refuerzo radicular y la interceptación de la lluvia, lo que tiene efectos persistentes sobre la estabilidad tras la muerte y descomposición de las raíces (Gill & Malamud, 2017).

b) Urbanización y modificación del terreno

La expansión urbana desordenada en zonas montañosas se ha convertido en una de las principales causas de inestabilidad de laderas, porque transforma de manera directa la topografía natural y altera el equilibrio del terreno. Por un lado, la excavación de la base para abrir vías o generar plataformas de construcción elimina el sostén lateral que brindaba el talud, con lo cual disminuye la resistencia del material y aumentan las fuerzas desestabilizadoras hasta alcanzar la falla. Por otro lado, la colocación de rellenos en la parte media o alta introduce una sobrecarga que incrementa los esfuerzos internos y, si supera la capacidad resistente del suelo, también puede detonar el colapso. A esto se suma, con frecuencia, la falta de planificación y el escaso cumplimiento de la normativa en áreas de riesgo: cuando se levantan viviendas en laderas susceptibles sin estudios geotécnicos, el riesgo latente se convierte en amenaza inminente. Finalmente, el deterioro suele hacerse visible en las propias edificaciones mediante grietas en muros y pisos, señales tempranas de movimientos del terreno que, si se ignoran, preceden fallas más severas.

1.10 Deforestación y degradación de la cobertura vegetal

La cobertura vegetal es un elemento de defensa natural de bajo costo contra los movimientos en masa. Su remoción, o deforestación, es un

factor antrópico que aumenta significativamente la susceptibilidad de las laderas. Las raíces de las plantas y los árboles actúan como un sistema de refuerzo natural que une las partículas del suelo, incrementando su resistencia al corte superficial (Aristizábal et al., 2010; Sánchez Keane, 2018). La tala de árboles, los incendios forestales y las prácticas agrícolas inadecuadas (como sembrar a favor de la pendiente) debilitan esta red de raíces, dejando el suelo desprotegido (Aristizábal et al., 2010; Sánchez Keane, 2018).

La vegetación también tiene un papel hidrológico fundamental, además de su función de anclaje. Las plantas disminuyen la cantidad de agua que llega e infiltra en el suelo mediante la interceptación del follaje y la transpiración (Sánchez Keane, 2018; Aristizábal et al., 2010). Esto ayuda a conservar un nivel freático más reducido, lo que mejora la resistencia del suelo al corte efectivo (Aristizábal et al., 2010). Una investigación en los Andes colombianos calculó el valor de este servicio ecosistémico y determinó que la inversión en preservar los bosques es 16 veces más barata que reparar la infraestructura afectada por deslizamientos. Según Aristizábal et al. (2010), este descubrimiento destaca la relevancia de la reforestación y la bioingeniería como tácticas sostenibles de mitigación.

La pérdida de cobertura vegetal y la tala de árboles son factores que aceleran la erosión antrópica y el exceso de sedimentos en los ríos andinos, lo que modifica significativamente el balance geomorfológico y ecológico de cuencas y llanuras inundables. En esa línea, la remoción de los bosques hace que el suelo pierda su protección frente al impacto de la lluvia, disminuye la rugosidad superficial y la interceptación,

aumenta el escurrimiento y provoca tasas de denudación que son mucho más rápidas que los ritmos naturales. En las montañas tropicales de Colombia, donde el cinturón andino ha perdido bosques de manera constante, la combinación de imágenes satelitales y el modelo BQART demuestra cómo este proceso se va acumulando: alrededor del 9 % de la carga sólida del sistema Magdalena se debe a la deforestación, con 482 Mt de sedimentos liberados por la tala en tres décadas, un incremento del 33 % en las tasas de erosión (1972-2010) y un aumento anual de 44 Mt en la carga fluvial (Restrepo et al., 2015).

En términos de comparación, la degradación de la cobertura vegetal y la deforestación en África oriental (rift Norte Tanganyika - Kivu) y en los Andes colombianos (cuenca del Magdalena) presentan indicios geomorfológicos diferentes pero que se complementan entre sí acerca de la erosión y el transporte de sedimentos. La deforestación representa aproximadamente el 9 % de la carga sólida fluvial en el Magdalena, y se han liberado 482 Mt de sedimentos en un periodo de tres décadas. Esto ha llevado a que las tasas de erosión aumenten en más del 33 % (de 1972 a 2010) y que haya un incremento adicional de más de 44 Mt/año sobre la descarga. Asimismo, después de perder más del 70 % del bosque entre 1980 y 2010, cerca del 79 % de la cuenca está sometida a una erosión severa (un escenario prolongado y con una escala de cuenca). En el rift Norte Tanganyika - Kivu, la misma presión antrópica produce sobre todo una señal transitoria y coluvial: la deforestación dispara un pico de deslizamientos someros que dura ~15 años y eleva la erosión por deslizamientos entre 2 y 8 veces, para luego decaer hacia niveles cercanos al bosque, probablemente por agotamiento del regolito más inestable (Depicker et al., 2021).

1.11 Alteraciones en la hidrología de la ladera

Las actividades humanas pueden alterar de manera significativa el ciclo hidrológico de una ladera, lo que a menudo conduce a la inestabilidad (Aristizábal et al., 2010a; Duque Escobar, 2024). Si la construcción de infraestructura, como los sistemas de alcantarillado y acueductos, es deficiente, puede producirse una fuga de agua que sature el terreno en zonas específicas y cause un aumento de la presión de los poros, lo cual genera fallas (Sánchez Keane, 2019).

La pavimentación de taludes, a pesar de la creencia de que previene la erosión superficial, puede tener un impacto negativo. Cuando no se permite la infiltración uniforme, el agua de lluvia tiene que concentrarse en flujos preferenciales. Estos pueden saturar las capas más profundas del suelo y producir movimientos más amplios. La interrupción de los cursos de agua naturales y los cambios en el drenaje son factores que pueden agravar aún más la situación, como se observa en la erosión interna o piping, donde el agua que fluye por conductos subterráneos genera cavernas y derrumbes (Aristizábal et al., 2010).

1.12 Métodos de análisis de la estabilidad de taludes

Esta sección se centra en las herramientas y metodologías analíticas que permiten evaluar la estabilidad de los taludes. El eje principal de este análisis es el Factor de Seguridad (FS), un valor que expresa la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas que impulsan el movimiento a lo largo de una superficie crítica de deslizamiento. Para ello, primero se profundiza en el concepto de equilibrio límite, que constituye la base teórica de la mayoría de los métodos de análisis. Este enfoque permite

relacionar la resistencia del suelo, determinada por su cohesión y fricción interna con las fuerzas que actúan sobre la ladera, estableciendo si el terreno se encuentra en equilibrio, en condición crítica o en falla.

Luego, se abordan los métodos tradicionales de equilibrio límite (MEL), ampliamente utilizados en la práctica geotécnica. Estos métodos permiten analizar laderas con geometrías conocidas, ya sean rotacionales o traslacionales. Se explican en detalle los enfoques clásicos de Fellenius y Bishop Simplificado, así como métodos avanzados y las tecnologías modernas que están transformando el análisis geotécnico. Se destaca el uso del Método de Elementos Finitos (MEF), que permite modelar con mayor precisión la interacción esfuerzo-deformación dentro del terreno, la incorporación de herramientas geomáticas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los drones y la tecnología InSAR, utilizada para detectar deformaciones milimétricas en las laderas y anticipar posibles fallas. El dominio de estas metodologías marca la transición del aprendizaje teórico a la práctica profesional.

1.12.1 El factor de seguridad y el equilibrio límite

Para evaluar la estabilidad de un talud de manera cuantitativa, se recurre a la mecánica de suelos y, en particular, al concepto de Factor de Seguridad (FS) (Aristizábal et al., 2010). El FS es un valor adimensional que compara la capacidad de un talud para resistir la falla con el esfuerzo que actúa sobre él (Aristizábal et al., 2010). Como ya se ha mencionado, la falla se produce cuando el esfuerzo cortante (τ_d) a lo largo de una superficie de deslizamiento excede la resistencia al corte disponible (τ_f)

del material (Aristizábal et al., 2010; Duque Escobar, 2022). La resistencia al corte se rige por la ecuación de Coulomb:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

(Aristizábal et al., 2010)

La resistencia requerida para el equilibrio, en cambio, se define por:

$$\tau_d = c_d + \sigma' \tan \phi_d$$

(Aristizábal et al., 2010)

donde c_d y ϕ_d son la cohesión y el ángulo de fricción movilizados para mantener el equilibrio (Aristizábal et al., 2010).

El Factor de Seguridad se define como el cociente de la resistencia al corte disponible y el esfuerzo cortante desarrollado (Aristizábal et al., 2010):

$$FS = \tau_d / \tau_f = (c_d + \sigma' \tan \phi_d) / (c' + \sigma' \tan \phi')$$

El FS es un valor promedio que se calcula a lo largo de una superficie de falla potencial. Un valor de $FS > 1.0$ indica que el talud es estable, un $FS = 1.0$ representa el estado de equilibrio límite, y un $FS < 1.0$ indica una falla inminente (Suárez, 1998; Aristizábal et al., 2010). En la práctica del diseño de ingeniería, se suelen requerir valores de FS de 1.40 o superiores para garantizar un margen de seguridad adecuado. No obstante, el valor mínimo aceptable del FS puede variar dependiendo del tipo de talud, el tipo de suelo, y las condiciones de carga (Aristizábal et al., 2010). Es importante destacar que el FS no es una medida de la

probabilidad de falla, sino una indicación de la proximidad del talud al equilibrio límite.

1.13 Métodos tradicionales de equilibrio límite

Los métodos de equilibrio límite (MEL) son herramientas analíticas que se utilizan para evaluar la estabilidad de taludes, principalmente con superficies de falla circulares o poligonales (Suárez, 1998). Estos métodos se basan en el equilibrio estático de una masa de suelo dividida en franjas o dovelas.

1.13.1 Método de Fellenius (1927)

Este es uno de los métodos más simples del equilibrio límite para superficies de falla circulares (Bastardo, 2023). Se basa en la suposición de que las fuerzas laterales entre las dovelas no influyen en el equilibrio, lo cual simplifica enormemente el cálculo (Bastardo, 2023). Aunque es fácil de resolver, esta suposición es una simplificación significativa que puede producir resultados conservadores, especialmente para superficies de falla profundas (Suárez, 1998; Sismica Institute, 2023). El método no satisface todas las ecuaciones de la estática, lo que lo clasifica como un método aproximado (Bastardo, 2023).

1.13.2 Método de Bishop simplificado

Desarrollado como una mejora al método de Fellenius, el método de Bishop simplificado es más preciso para superficies de falla circulares (Sismica Institute, 2023). Se basa en el equilibrio de momentos y fuerzas verticales para cada dovela, aunque no satisface el equilibrio de fuerzas horizontales individuales. Esto lo hace más robusto que el de Fellenius,

y es uno de los métodos más comunes en la práctica geotécnica (Sismica Institute, 2023; Aristizábal et al., 2010).

En términos de estabilidad de taludes, la evolución desde el método de Fellenius (círculo sueco) hasta los métodos de Bishop, Spencer y Morgenstern-Price refleja primero un replanteamiento de las hipótesis sobre los esfuerzos entre rebanadas y, después, una ampliación sistemática de las condiciones de equilibrio consideradas. Por lo tanto, la labor de Fellenius es un buen punto de partida porque, al asumir que las fuerzas laterales son nulas (que se anulan en general), solamente cumple con el equilibrio de momentos en relación con un centro circular. Por lo tanto, aunque es simple y conservador, no toma en cuenta de manera explícita el rol de los esfuerzos cortantes y normales entre rebanadas. Por esta razón, su factor de seguridad (FS) podría no ser apropiado en circunstancias con presiones de poro altas, estratigrafías disímiles o geometrías que no sean circulares. Por otro lado, el método simplificado de Bishop establece un equilibrio de momentos y una descripción más realista de la presión normal en la base de cada rebanada; no obstante, continúa con una hipótesis acerca del sentido de las fuerzas laterales (sin resolver su componente tangencial), por lo que satisface tanto el equilibrio vertical como los momentos globales, pero no el equilibrio horizontal. Sin embargo, su iteración converge de manera sólida y ofrece factores de seguridad confiables en suelos homogéneos con presión intersticial conocida y en roturas que son aproximadamente circulares. El método de Spencer representa un progreso importante, pues establece al mismo tiempo el equilibrio global de fuerzas y momentos. Supone que la relación entre las partes tangenciales y normales de las fuerzas entre rebanadas es constante en

toda la superficie, lo cual le facilita determinar de forma coherente tanto la resultante vertical como la horizontal. Por lo tanto, es más apropiado y generalizable para estratigrafías complejas y superficies que no son circulares. En última instancia, el método Morgenstern-Price extiende el de Spencer al posibilitar cualquier función de distribución de esfuerzos laterales (seno, lineal, trapezoidal, etc.) conservando el equilibrio total. Por lo tanto, es más versátil y estrictamente estático a la vez.

En la práctica, cuando es necesario trazar automáticamente superficies críticas, agregar con detalle las presiones de poro (incluidas las redes de flujo) y las cargas sísmicas (pseudoe estáticas), y también cuando se trata de condiciones límite complejas, lo más conveniente es el método de Spencer o el de Morgenstern-Price. En cambio, los métodos de Fellenius y Bishop son útiles para comprobar o predefinir escenarios drenados con corte circular. En esta línea, la secuencia metodológica no solo aumenta la fidelidad física, sino que también disminuye los sesgos causados por la simplificación; por lo tanto, proporciona al proyectista márgenes de seguridad más realistas, particularmente en laderas con geometrías irregulares, materiales contrastados y drenaje transitorio.

1.14 Métodos avanzados y tecnologías de vanguardia

La evaluación de la estabilidad de taludes ha evolucionado con la integración de tecnologías avanzadas y métodos numéricos que superan las limitaciones de los métodos de equilibrio límite.

1.14.1 Análisis numérico

El método de elementos finitos (MEF) es una herramienta poderosa que permite un análisis más completo al modelar el comportamiento de un

talud no solo en términos de equilibrio de fuerzas, sino también considerando los estados de esfuerzo y deformación (Aristizábal et al., 2010). Software especializado como GEO5 utiliza el MEF y el método de reducción de parámetros de resistencia al corte (M-C) para simular escenarios complejos, incluyendo la interacción con el agua subterránea y la incorporación de elementos de estabilización como anclajes y pilotes (IIGE, 2024).

1.14.2 Modelos de susceptibilidad

Modelos como SHALSTAB, que es ampliamente utilizado, combinan un análisis del Factor de Seguridad con un modelo hidrológico para generar mapas de susceptibilidad (Villacis et al., 2023). Estos modelos son de gran utilidad para la planificación regional y la identificación de zonas propensas a deslizamientos (Villacis et al., 2023).

1.14.3 Teledetección y geomática

La integración de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha revolucionado el análisis de la inestabilidad. Una técnica que emplea información satelital para identificar y cuantificar alteraciones en la superficie terrestre con una exactitud de milímetros es el radar interferométrico de apertura sintética (InSAR). Esta habilidad es esencial para supervisar los movimientos emergentes de las pendientes. Las fotografías aéreas de alta resolución y los modelos digitales de elevación (DEM) se logran gracias al empleo de drones, los cuales constituyen la base para elaborar mapas pormenorizados que incluyen pendientes, geomorfología y otros elementos de susceptibilidad. Estas tecnologías, cuando se combinan con modelos de

estabilidad, permiten una transición del análisis estático a uno dinámico, combinando la medición de deformaciones reales con la modelación física de la inestabilidad.

1.15 Marco conceptual de la gestión de riesgos por movimientos en masa

La gestión de riesgos de desastres en Ecuador se enmarca dentro de la Ley Orgánica del Sistema Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres (LOSNGRD), publicada en el Registro Oficial Suplemento 163 de 19 de febrero de 2020. Esta normativa establece el marco conceptual y operativo para la reducción y manejo de los riesgos de origen natural o antrópico, incluyendo los movimientos en masa, tales como deslizamientos, flujos de lodo y caídas de rocas, que son fenómenos recurrentes en el territorio ecuatoriano.

1.16 Conceptos clave según la ley ecuatoriana

Entre los principales conceptos definidos en la ley y aplicables a la gestión de riesgos por movimientos en masa, se encuentran:

Gestión de Riesgos de Desastres: Conjunto de políticas, normas, procedimientos y actividades orientadas a prevenir, mitigar, preparar, responder y recuperar ante los efectos adversos de amenazas naturales o antrópicas. Incluye la articulación de los niveles de gobierno y la participación comunitaria (LOSNGRD, 2020, art. 4).

Amenaza: Probabilidad de que un fenómeno físico potencialmente dañino se presente en un lugar y tiempo determinados. Para el caso de los movimientos en masa, la amenaza está asociada a condiciones

geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y antrópicas que favorecen la inestabilidad del terreno (LOSNGRD, 2020, art. 5).

Vulnerabilidad: Susceptibilidad de una comunidad, infraestructura o ecosistema a sufrir daños ante la ocurrencia de un evento adverso. En movimientos en masa, depende de factores como la ubicación de asentamientos en laderas inestables, deforestación, calidad constructiva de viviendas y precariedad de servicios (LOSNGRD, 2020, art. 5).

Riesgo: Probabilidad de pérdidas o daños humanos, materiales, económicos o ambientales como resultado de la interacción entre amenaza y vulnerabilidad (LOSNGRD, 2020, art. 5).

Sistema Nacional Descentralizado de Gestión de Riesgos: Estructura institucional que articula a los distintos niveles de gobierno (central, provincial, cantonal y parroquial) para implementar las políticas de gestión de riesgos, con la Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR) como ente rector (Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres, 2024).

CAPÍTULO II

2 METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

La evaluación de la amenaza por movimientos en masa puede organizarse en cuatro enfoques: heurístico, estadístico, determinístico y probabilístico. Aunque son complementarios, se distinguen por su creciente complejidad y por la escala de aplicabilidad. Esta secuencia no es arbitraria, sino que refleja el grado de formalización del conocimiento, la cantidad y calidad de los datos necesarios, el esfuerzo computacional y, sobre todo, la manera en que cada enfoque trata la incertidumbre.

2.1 Enfoques

El estudio de la amenaza de movimientos en masa aborda 4 enfoques metodológicos, que aportan perspectivas complementarias para el análisis no solo de la susceptibilidad que describe la propensión espacial del territorio a experimentar movimientos en masa derivado de sus factores condicionantes sino de la amenaza en dónde se integra la probabilidad de ocurrencia tomando en consideración un horizonte temporal y la intensidad del evento. En ese sentido, la susceptibilidad se estima a mayor nivel de detalle mediante enfoques heurísticos y estadísticos. Mientras que para la amenaza es factible integrar en los métodos estadísticos variables de forzamiento y calendarios de recurrencia, o a su vez modelos determinísticos que logren representar la mecánica de la inestabilidad. Por otro lado, los enfoques probabilísticos toman relevancia al incorporar la incertidumbre con la

finalidad de sostener decisiones bajo criterios de aceptabilidad del nivel del riesgo.

2.1.1 Heurístico

El enfoque heurístico se apoya en el juicio experto para ponderar factores condicionantes como: la pendiente, litología, redes de drenaje, cobertura de suelo, densidad estructural, etc., y combinarlos en un índice sintético de amenaza o susceptibilidad, en donde lo relacionado a la amenaza hace referencia a la propensión espacial y, a esto, se suma la probabilidad de frecuencia en función del factor desencadenante, por ejemplo: la precipitación. Por otro, lado la susceptibilidad hace alusión a la propensión espacial en base a los factores que condicionan un determinado espacio geográfico.

Elmoulat et al. (2021) menciona que este tipo de método resulta eficaz por el valor que se añade al pronunciamiento del técnico que debe tener un vasto conocimiento sobre las características geomorfológicas y geológicas del lugar de estudio, y a su vez un parámetro importante de este enfoque es que permite la validación cruzada con datos previos sobre movimientos en masa. En ese sentido, un insumo importante son los inventarios de movimiento en masa de las instituciones a cargo de la gestión de riesgos de desastres. Es importante mencionar que debido a que muchos de los factores inmersos en este enfoque deben recibir ponderaciones, es vital la construcción de los mismos en base al conocimiento acumulado y las evidencias locales existente. Sin embargo, su capacidad de verificación cuantitativa es limitada y la

reproducibilidad depende de la transparencia con que se documenten los criterios.

En el marco del análisis del enfoque heurístico, existen diversas aplicaciones que serán comparados a continuación:

a) Evaluación semicuantitativa de la susceptibilidad a deslizamientos mediante AHP y combinación lineal ponderada

El primer método presentado por Zighmi et al. (2025), en dónde se realiza un enfoque semicuantitativo con la finalidad de evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca media del río Seybouse en Argelia. Cabe indicar, que se utiliza el métodos de análisis jerárquico de los procesos (AHP) elaborado por Saaty que facilita las comparaciones entre variables. Por otro lado, este enfoque enlaza un proceso analítico jerárquico con combinación lineal ponderado, en dónde se integran factores condicionantes como la pendiente, litologías, precipitación, distancias a fallas geológicas o a su vez a ríos y carreteras, índice de potencia de la corriente, e índice topográfico de la humedad. Es pertinente indicar que en este enfoque se categoriza a la precipitación como un factor condicionante, esto es relevante ya que en metodologías como la propuesta por la Secretaría Nacional de Gestión del Riesgo del Ecuador se menciona explícitamente como desencadenante (Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias – SNGRE, 2022). Tomando en consideración los aspectos tratados anteriormente se recomienda a nivel que técnico que si el producto es un mapa de susceptibilidad y se dispone solo de datos climatológicos se incluiría como factor condicionante. Por otro lado, si la finalidad es un mapa de

amenaza la precipitación necesariamente se seleccionaría como factor desencadenante. A continuación, en la Tabla 3, se detalla cada uno de los criterios que actúan como factores condicionantes:

Tabla 3. Factores condicionantes con sus respectivas ponderaciones relacionado al método de Evaluación semicuantitativa de la susceptibilidad a deslizamientos mediante AHP y combinación lineal ponderada.

Criterio	Justificación	Peso AHP	Fuente
Pendiente	El factor de pendiente favorece a la inestabilidad superficial del terreno.	0.19	Modelo digital de terreno (DEM)
Litología	Define resistencia al corte, meteorización y permeabilidad.	0.16	Mapa geológico
Distancia a drenajes	Laderas que se encuentran cercanas a fuentes hídricas presentan debilitamiento.	0.13	Red hidrográfica
Distancia a fallas geológicas	Indica fracturamiento y debilidad estructural.	0.11	Mapa de fallas
Distancia a carreteras	Alteración del medio. Cambios de drenaje inducidos.	0.07	Mapa de vialidad

Curvatura (perfil)	Controla la convergencia y divergencia de flujo y concentración de esfuerzos.	0.03	Datos derivados del DEM
Curvatura (plana)	Determina la convergencia planimétrica existente que favorece focos de escorrentía.	0.03	Datos derivados del DEM
Índice topográfico de humedad (TWI)	Analiza la saturación y presión sobre el suelo. Por ejemplo: Un elevado TWI aumente la saturación del suelo reduciendo el factor de seguridad.	0.03	Datos derivados del DEM
Índice de potencia de la corriente (SPI)	Capacidad erosiva del flujo.	0.02	Datos derivados del DEM
Cobertura vegetal	La presencia de vegetación interviene en la cohesión del suelo.	0.08	Imágenes satelitales: Cálculos de NDVI
Precipitación	Variable que favorece a la meteorización, saturación y recarga.	0.15	Mapa de isoyetas.

En la aplicabilidad de este método como se observa en la Figura 1, es relevante mencionar que se debe efectuar un diagnóstico de multicolinealidad que hace referencia al conjunto de pruebas para detectar cuando dos o más variables de tipo explicativo están correlacionadas entre sí, este diagnóstico se realiza para los once predictores. En ese sentido, al existir una multicolinealidad entre dos o más factores predictores generaría un doble conteo y sobredimensionamiento que afectaría la fiabilidad del mapa heurístico. A posteriori, se debe realizar la matriz pareada tomando en cuenta los pesos AHP, para finalmente clasificar en 5 clases: muy baja, baja, media, alta y muy alta susceptibilidad mediante la herramienta natural breaks que es un método de clasificación en Sistemas de Información Geográfica que identifica y agrupa valores de datos similares en clases o rangos.

El proceso de validación resulta imprescindible ya que permite controlar la autocorrelación espacial y a su vez garantiza el comparar con métricas objetivo. En el presente método se validó en base a un inventario de deslizamiento con una participación de relación 70/30, esta alusión hace relación al entrenamiento y la prueba respectivamente, utilizada para verificar el modelo. Es importante hacer énfasis que se debe evitar la selección de eventos cercanos para cada entrenamiento porque afectará al desempeño del modelo. A continuación, en la Figura 9 podemos observar el flujo metodológico para la consecución de la susceptibilidad a deslizamiento desde una evaluación semicuantitativa.

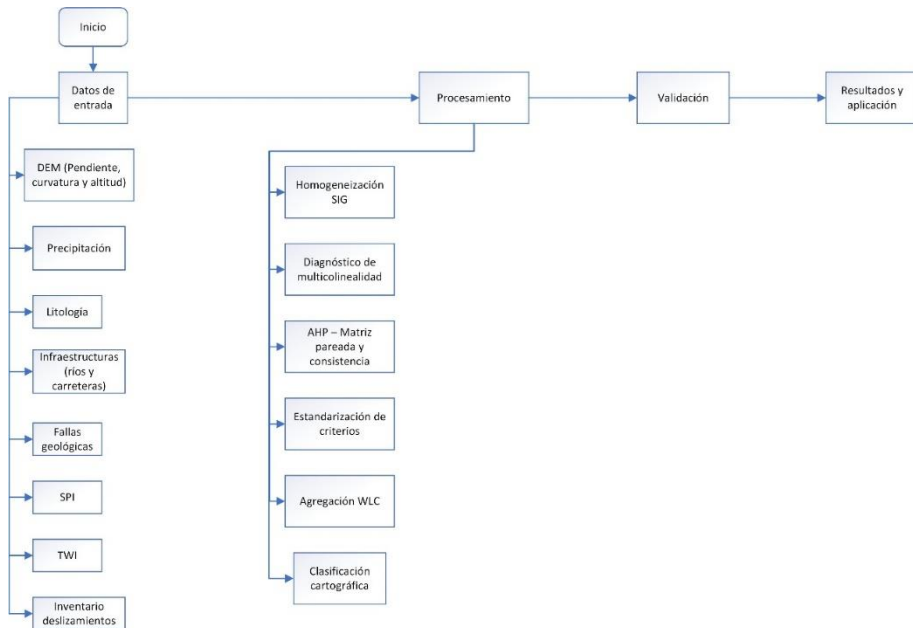


Figura 9. Flujo metodológico de la Evaluación semicuantitativa de la susceptibilidad a deslizamientos mediante AHP y combinación lineal ponderada.

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

b) Metodología de susceptibilidad / amenaza ante movimientos en masa

El segundo método es aquel presentado por una institución gubernamental y está es el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, que actualmente en Ecuador se denomina como Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos que consiste en un índice de susceptibilidad por ponderación heurística en dónde se distinguen factores condicionantes y desencadenantes, que sirven como insumos para generar un primer mapa de susceptibilidad por movimientos en masa y a posterior un mapa de amenaza por movimiento en masa como se observa en la Figura 10.

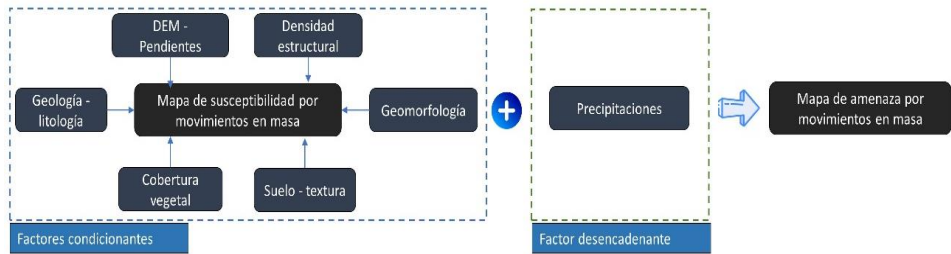


Figura 10. Factores involucrados en la metodología de susceptibilidad / amenaza ante movimientos en masa.

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

En cuanto al análisis de los factores condicionantes que se presentan en la metodología son aquellos asociados a las propiedades que brindan estabilidad al terreno y constituyen la base para generar el mapa de susceptibilidad. En ese sentido, podemos determinar los siguientes factores condicionantes: Geología, pendiente, cobertura vegetal, densidad estructural, textura del suelo y geomorfología. Cabe indicar que estos valores se ponderan debido a que controlan el equilibrio tensional y la respuesta hidromecánica de las laderas. A continuación, se detalla la importancia de cada uno de los factores mencionados anteriormente con la finalidad de resaltar su funcionalidad en el modelo:

- **Pendiente:** La pendiente condiciona la estabilidad porque incrementa el componente cortante del peso y reduce el margen de resistencia al corte. Por lo que, incrementos de presión de poros pueden llevar el factor de seguridad cerca de uno. También controla la escorrentía, el tiempo de residencia del agua y el espesor del suelo: las laderas empinadas suelen drenar

rápidamente, erosionarse más y presentar suelos delgados con menor anclaje radicular.

- **Litología:** Este factor se asocia directamente al estudio de las rocas existentes en el espacio geográfico que forma parte del proyecto, su importancia radica en que en el comportamiento hidrogeológico de las rocas esto visto desde el punto de como un macizo roco puede llegar a almacenar, transmitir y liberar agua. Además, su ponderación depende directamente de la condición natural de la roca, y del grado de meteorización y fracturamiento evidenciado. En ese sentido estudios precisan que la incidencia entre las unidades arcillosas, margas y depósitos cuaternarios en la distribución de movimientos en masa (Reichenbach et al., 2018)
- **Geomorfología:** Esta variable influye debido a que la forma del terreno controla el balance tensional entre aquellos esfuerzos cortantes y la resistencia al corte del material. En lo que se refiere a este factor se toma en cuenta para la asignación de su ponderación el mayor número de coincidencias existentes en cada categoría, siendo el factor escogido el que presente más de estás condiciones en el lugar de estudio.
- **Textura del suelo:** Este factor tomar especial relevancia debido a que la granulometría del suelo es un indicador de la permeabilidad, retención y resistencia del mismo. Por ejemplo: Los suelos arenosos de texturas gruesas tienen una mayor tasa de infiltración, lo que genera pérdidas de succión que deviene en su debilitamiento temporal, en caso de existir una pendiente alta o procesos de socavación puede ocasionar un movimiento en masa. Por otro lado, en el caso de suelo de carácter arcilloso con textura

final su capacidad de infiltración o drenaje es lento lo que provoca una mayor acumulación del agua lo que provoca mayor presión en sus poros y un declive en su resistencia favoreciendo los deslizamientos a nivel superficial.

- **Cobertura vegetal:** El tipo de cobertura vegetal influye directamente en parámetros como el refuerzo radicular y en procesos de infiltración. En ese sentido plantaciones forestales inciden en la disminución de susceptibilidad. Además, en este criterio se toma en cuenta edificaciones antrópicas, suelos desnudos que tienden a erosionarse y saturarse superficialmente elevando la probabilidad de movimientos en masa y cuerpos de agua que debido a su presencia pueden socavar bases de ladera e incidir en la degradación del suelo.
- **Densidad estructural:** Se asocia directamente este parámetro con las fallas geológicas, en ese sentido procesos de fracturamiento genera discontinuidades que disminuyen la resistencia del macizo rocoso favoreciendo los procesos de infiltración y estableciendo planos potenciales de despegue. Cabe indicar que Reichenbach et al. (2018) advierte de que variables como la “distancia a fallas” o la “densidad de lineamientos” solo son útiles si se conoce el ancho de la zona de falla y si sus propiedades mecánicas e hidrogeológicas difieren del entorno, ya que, de lo contrario, pueden resultar ambiguas o engañosas.

Posterior a la asignación de una ponderación de los factores condicionantes de acuerdo a sus características la metodología exige normalizar cada variable a un rango de 0 a 1 mediante una transformación de cambio de magnitud a escala fija, que permita

estandarizar los datos para su procesamiento mediante algebra de mapas, la fórmula que se menciona en la metodología propuesta por el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias – SNGRE (2022) es:

$$V_i = \frac{a_i - \min a_i}{\max a_i - \min a_i}$$

En dónde V_i corresponde al factor normalizado, a_i es el factor a normalizar, $\max a_i$ hace referencia al valor máximo del factor y $\min a_i$ al valor mínimo del factor. Cabe indicar que estas variables deben estar en formato ráster y en modo flotante de tal forma que se ajusten valores máximos y valores mínimos.

Por otra parte, la precipitación se trata como un factor desencadenante o detonante como se observa en la Figura 11. En ese sentido es importante recolectar las precipitaciones máximas en estaciones meteorológicas o su vez con conjuntos de datos de precipitación infrarroja (CHIRPS), que son insumos para generar curvas de excedencias mediante Intensidad, duración y frecuencia (IDF). Por otro lado, para cada estación se debe ajustar la curva de excedencia con la finalidad de extraer el valor de diseño definido para un tiempo de retorno. A posterior, los valores puntuales del diseño definido previamente se deben interpolar mediante Sistemas de Información Geográfica y en específico con el método geoestadístico Kriging Ordinario que permite generar un mapa continuo de probabilidades o valores de precipitación extrema, este archivo ráster generado representa el detonante que integra al generado para susceptibilidad. Es importante indicar que no se debe obviar la normalización del ráster pluvial con el fin de asegurar compatibilidad

entre datos. Finalmente, la amenaza por movimientos en masa se formula mediante la siguiente ecuación:

$$A_{mm} = S_{mm} + Precipitación$$

En dónde S_{mm} representa al archivo ráster generado de susceptibilidad. Finalmente, se realiza una clasificación no supervisada en cinco niveles: Muy baja, baja, media, alta y muy alta, en lo que se refiere a la validación se deben contrastar con el inventario para movimientos en masa midiendo una correlación entre el número de eventos y las clases.

La Figura 3 sintetiza con claridad la transición conceptual y operativa entre dos productos cartográficos que suelen confundirse, pero que responden a preguntas diferentes. Por lo tanto, el mapa (a) muestra la susceptibilidad a movimientos en masa, es decir, la probabilidad de que se produzca un deslizamiento de tierra si se diera una situación que lo provocara, teniendo en cuenta factores condicionantes relativamente estables en el tiempo, como la geología, la litología, las pendientes derivadas del modelo digital de elevaciones (DEM), la densidad estructural, la geomorfología, la cobertura vegetal y las propiedades del suelo.

En cuanto al panel (b), representa la amenaza en dónde al mapa de susceptibilidad presentado en el panel (a) se le ha integrado el factor desencadenante que viene a ser la precipitación, y que denota en dónde será más probable que se produzca un movimiento en masa y su intensidad en un escenario determinado de precipitación. Para ejemplificar, en el panel (b) se “activa” la predisposición del terreno

mostrada en el panel (a), modulándola con la lluvia esperada u observada, por lo que se tiende a expandir y conectar las zonas críticas.

Al incorporar la precipitación en el literal (b), el patrón cambia de fragmentado a coalescente en amplias franjas de ladera: aparecen manchas continuas de amenaza alta y muy alta que ensanchan los parches críticos de (a) y encienden corredores longitudinales a lo largo de las vertientes. Este efecto es consistente con la física del proceso: la lluvia intensa y/o sostenida aumenta la presión de los poros, reduce la resistencia al corte y debilita el contacto suelo-roca. Por lo que las áreas que en (a) eran potenciales, pero marginales pasan a ser efectivamente probables en (b). También se advierte un efecto de conectividad: al aumentar la amenaza, las unidades contiguas de susceptibilidad media/alta se conectan y amplifican los corredores de inestabilidad, un aspecto clave para estimar las longitudes de corrida y las posibles rutas de afectación hacia centros poblados o vías.

En la Figura 10 podemos observar el modelamiento realizado bajo el enfoque heurístico y bajo la adaptación de este enfoque por la institución rectora a nivel de gestión de riesgos del Ecuador.

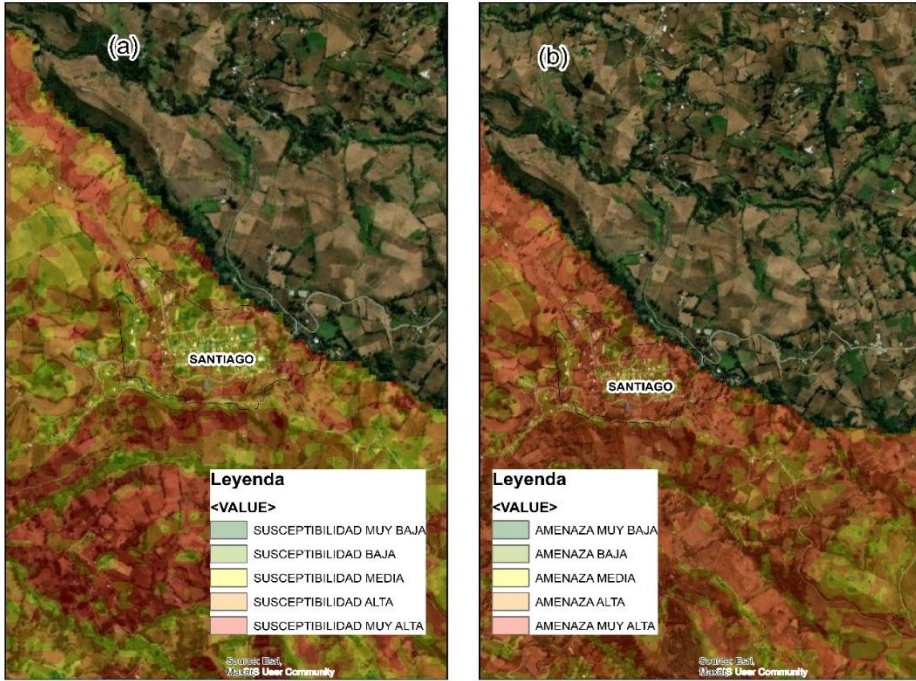


Figura 11. Mapa de susceptibilidad / amenaza ante movimientos en masa.

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

2.1.2 Estadístico

El enfoque estadístico incorpora inventarios de deslizamientos y establece relaciones cuantificables entre la ocurrencia de eventos y variables explicativas. En ese sentido, Lin et al. (2017) menciona que dentro de este enfoque el método de regresión logística es considerado el más popular en cuanto al modelado de movimientos en masa. Por otro lado, se han planteado análisis de movimientos en masa inducidos por sismos bajo enfoque estadísticos, en dónde se construyen modelos de susceptibilidad condicionados a eventos sísmicos, en donde esta amenaza actúa como disparador. En ese mismo contexto se resalta que para la aplicación se prescinde de información como la profundidad de

la falla, resistencia de materiales y niveles freáticos existentes y aun así logrando tasas altas de predictibilidad (Lee, 2014). Asimismo, Lee et al. (2008) resalta que al analizar un evento sísmico como factor desencadenante en un enfoque estadístico es recomendable:

1. Trabajar con un inventario por cada uno de los eventos de deslizamientos, evitando la multi - temporalidad para minimizar sesgos, controlar la no estacionariedad y mejorar la interpretabilidad y transferencia del modelo;
2. Incorporar explícitamente una métrica de intensidad sísmico, por ejemplo: la aceleración máxima del terreno (PGA) o una medida de intensidad;
3. Combinarla con factores ambientales (pendiente, litología, etc.) en un modelo multivariado de susceptibilidad;
4. Validar la capacidad predictiva y la transferibilidad del modelo aplicándolo a áreas vecinas o eventos posteriores que presenten rangos de intensidad sísmica similares. En términos de escala, es especialmente eficaz en coberturas municipales o de cuenca (p. ej., 1:10 000 a 1:50 000), donde existen inventarios históricos y covariables derivadas de modelos digitales de elevación, teledetección y cartografía geológica.

A continuación, se presenta métodos utilizados para el análisis de movimientos en masa bajo en el enfoque estadístico:

a) Regresión Logística Binaria (Binary Logistic Regression – BLR)

La regresión logística binaria es la técnica estadística más utilizada para el análisis de la susceptibilidad a los movimientos en masa. Cabe indicar

que este método realiza el modelamiento en base a la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en función de un conjunto de variables explicativas, tanto continuas como categóricas, lo que le confiere una gran flexibilidad frente a los métodos de regresión lineal múltiple, que solo aceptan variables continuas (Lin et al., 2017). Por ejemplo, bajo este método se puede realizar un inventario en dónde se compara la “presencia o ausencia” del evento frente a los “deslizamiento no muestreado”. En ese sentido para el primer registro cada celda recibe un 1 si se registró un deslizamiento y un 0 si no se ha registrado. Por otro lado, en el segundo registro se asumen los eventos como 0.

La construcción del modelo implica los siguientes pasos:

- Disponer de un inventario de deslizamientos fiable con información sobre la ubicación, tipo y fecha del evento;
- Seleccionar variables condicionantes y desencadenantes, por ejemplo: pendiente, litología, humedad, PGA, precipitación extrema, entre otros.
- Muestrear ausencias de forma equilibrada;
- Ajustar el modelo mediante máxima verosimilitud. En ese sentido, la validación se realiza mediante la división de los datos (70/30 o k-fold), la evaluación de las curvas ROC/AUC, la matriz de confusión y los criterios de información (AIC).

El diagrama presente en la Figura 12, sintetiza un flujo reproducible que tiene como finalidad preparar los datos para la modelación de la susceptibilidad frente a movimiento en masa mediante regresión logística binaria.

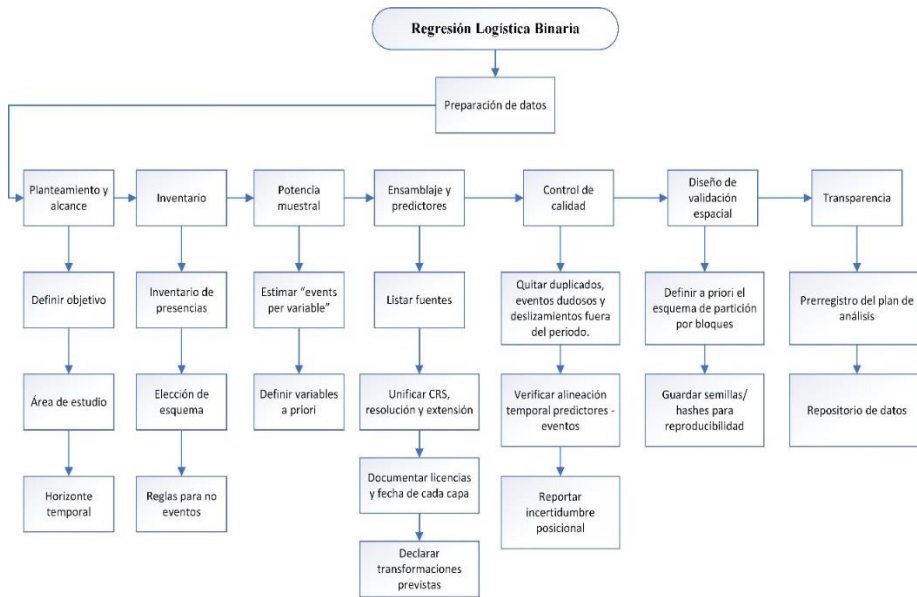


Figura 12. Esquema de preparación y control de calidad de los datos.

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

A continuación, en la Figura 13 se presenta el flujo reproducible que tiene como fin evidenciar de forma secuencia el procesamiento de datos.

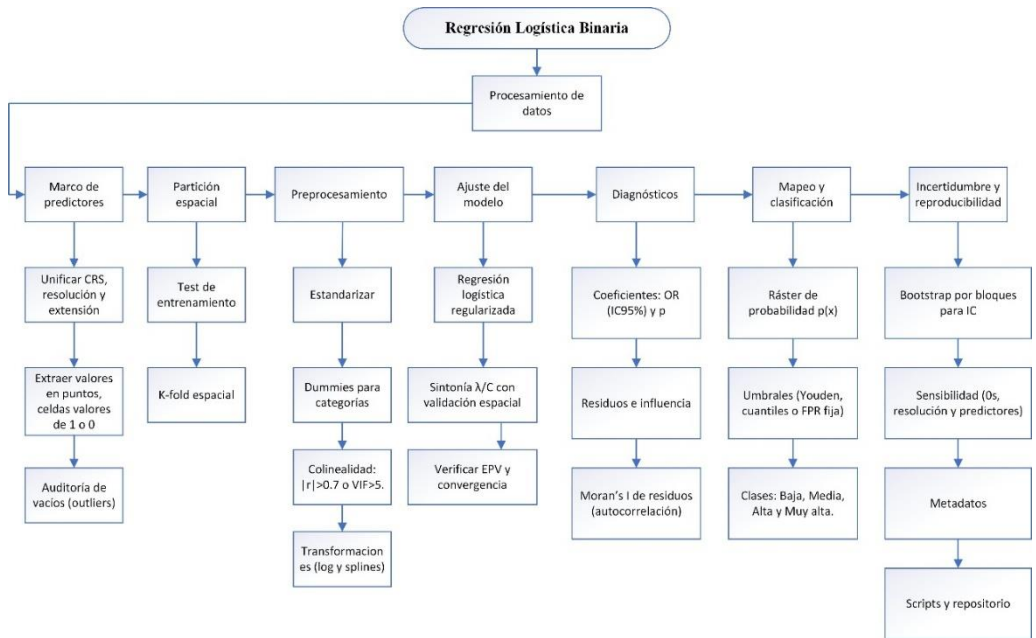


Figura 13. Diagrama de la metodología basada en evidencia ponderada e índices.

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

b) Modelos Basados en Evidencia Ponderada e Índices (Weight of Evidence – WoE / Index-Based)

Estos modelos asignan pesos estadísticos a las clases de factores condicionantes según la frecuencia relativa de la amenaza de deslizamientos observados. Cabe indicar que este enfoque se basa en la probabilidad bayesiana, en donde se calcula pesos positivos y negativos para cada clase de variable, que luego se combinan en una suma ponderada para obtener un índice de susceptibilidad. Cabe indicar que el resultado no es una probabilidad estricta, sino un indicador de comparación entre unidades de terreno (Reichenbach et al., 2018).

Es importante indicar que Cao et al. (2021) menciona que al solapar el mapa generado de inventario de deslizamientos con cada mapa factorial causal, se puede relacionar estadísticas espaciales con el fin de cuantificar los efectos de las clases de los factores que causan los deslizamientos asignando un peso positivo o negativo.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo de procesos de la metodología basada en evidencia ponderada e índices.

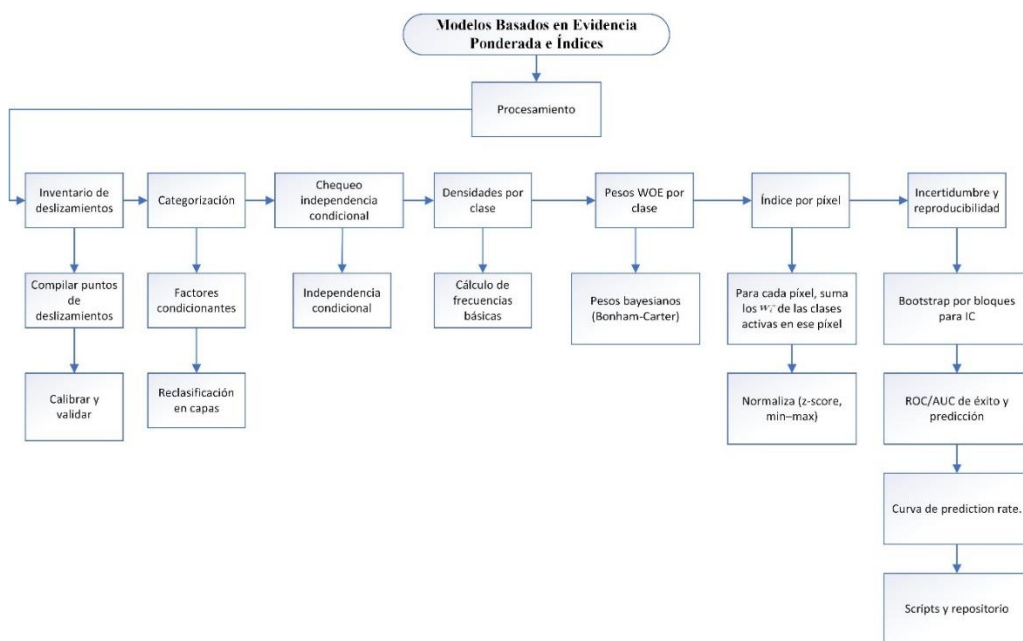


Figura 14. Diagrama de flujo del Modelos Basados en Evidencia Ponderada e Índices.

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

En base a la Figura 14, podemos mencionar que la aplicación de la metodología requiere principalmente de un inventario de deslizamientos y capas temáticas clasificadas en función de factores condicionantes

como: pendiente por clases, geología, cobertura, etc. Por otro lado, para cada clase, se determina la densidad de deslizamientos, que hace referencia a la proporción de deslizamiento por cada clase y se compara con la densidad esperada si estos fueran aleatorios. Para puntualizar se concluye que las clases con una densidad superior a la media reciben pesos positivos, lo que incrementa la susceptibilidad, mientras que las clases con una densidad inferior a la media reciben pesos negativos. Finalmente, el resultado final se clasifica en rangos (baja, media o alta susceptibilidad).

c) Aprendizaje automático

El aprendizaje automático (AA) o más conocido como machine learning por sus siglas en inglés, se ha consolidado como eje metodológico para cartografiar la susceptibilidad a los movimientos en masa, debido a que tiene la capacidad de modelar las relaciones complejas entre los inventarios de deslizamientos y los factores condicionantes y desencadenantes. Cabe indicar que entre los métodos de clasificación asociados se encuentran los siguientes:

- Sistemas de lógica difusa;
- Máquinas de apoyo;
- Random Forest;
- Ensamblados graduales;
- Máquina de vectores de soporte.

A continuación, en la Figura 15 se pueden identificar las tendencias actuales a nivel de cartografía de susceptibilidad basado en algoritmos de aprendizaje automático:

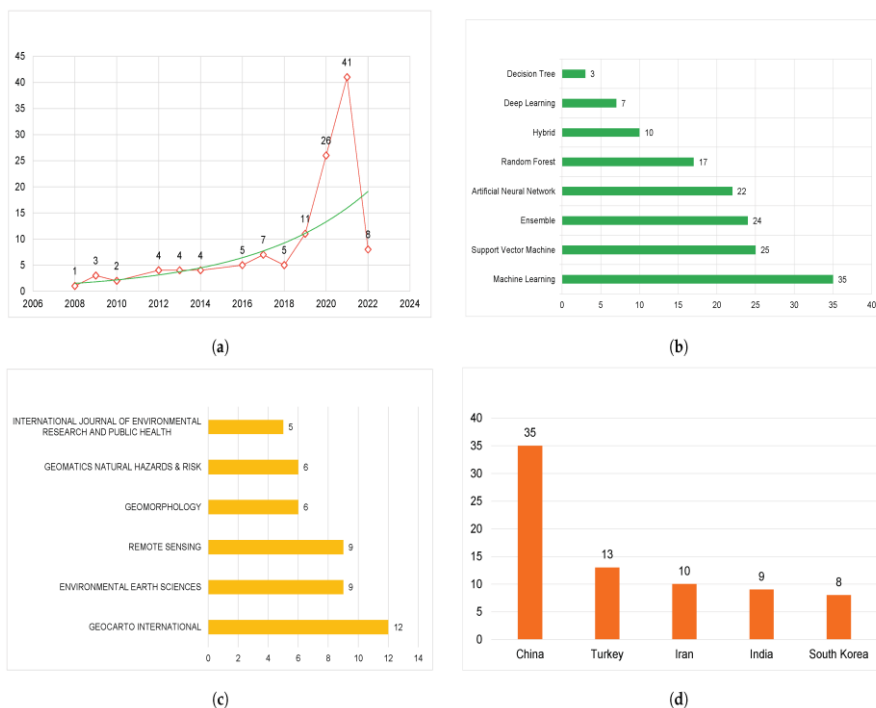


Figura 15. Tendencias a nivel de cartografía de susceptibilidad.

Fuente: (Ado et al., 2022).

Tomando en consideración el nivel de impacto socio económico de la amenaza de movimientos en masa, diversos investigadores han buscado ampliar la gama de metodologías que se pueden utilizar con el fin de minimizar su impacto.

Un punto a tomar en cuenta en este tipo de procesamientos es el que menciona Ado et al. (2022) en su investigación, que tuvo como fin el realizar una encuesta bibliográfica asociado el mapeo de susceptibilidad a deslizamiento de tierra y el aprendizaje automático, en dónde

menciona que los factores condicionantes más utilizados son: índice topográfico de la humedad (TWI), pendiente y orientación, distancia a ríos, cobertura y uso del suelo y curvatura en planta que sustentan la modelización como se observa en la Figura 15. Por otro lado, el trabajo de campo sigue siendo la principal vía para elaborar inventarios de deslizamientos. Es importante indicar que, para evaluar el rendimiento, la métrica estándar que más se utiliza es la curva de operador (AUC), en dónde muchos de los mapas de susceptibilidad presentan un $AUC > 0,90$, lo que les confiere un alto nivel de fiabilidad e incluso los enfoques convencionales pueden ofrecer predicciones muy precisas.

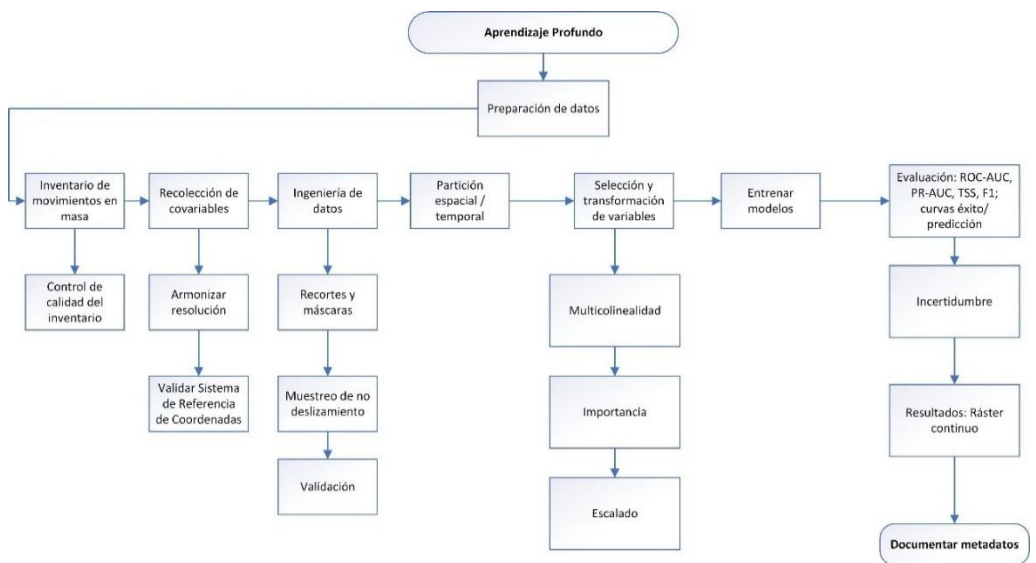


Figura 16. Esquema para la aplicación de metodologías de aprendizaje profundo.

2.1.3 Determinístico

Los métodos determinísticos para movimientos en masa son enfoques físico-mecánicos que estiman el factor de seguridad (FS) a partir del equilibrio de fuerzas en laderas y a su vez acoplando la hidrología para el análisis y modelamiento. Cabe indicar que, en su forma clásica, el modelo de talud infinito evalúa la resistencia, tomando como parámetros: cohesión, fricción y esfuerzos efectivos frente a la tracción gravitacional. Por otro lado, el componente hidrológico representa cómo la infiltración de la lluvia aumenta las presiones de los poros y reduce el factor de seguridad generando un aumento del nivel de riesgo. Es importante indicar que Stralen (2015) afirma que este tipo de modelos son dependientes de la precisión de los datos, generando de esta forma un grado de incertidumbre en los resultados.

Entre los modelos más difundidos están:

a) SHALSTAB

El modelo SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability Model) fue desarrollado por a partir del modelo físico de control topográfico sobre deslizamientos someros propuesto por Montgomery y Dietrich, y de un proceso de validación y aplicación realizado a posterior. Se trata de un modelo físico determinista que combina un esquema hidrológico en estado casi estacionario en donde se toma en cuenta la estimación de las presiones de los poros a partir de la convergencia del flujo y el área de contribución específica con el modelo del talud infinito que es un criterio de Mohr-Coulomb para calcular, en cada celda de la cuadrícula, la condición de inestabilidad potencial (Montgomery & Dietrich, 1994).

En cuanto al uso es importante indicar que SHALSTAB es adecuado para laderas poco profundas y análisis a escala de cuenca en entornos lluviosos o montañosos. Se utiliza para la zonificación de la susceptibilidad, la priorización de la gestión forestal y de carreteras, y a su vez la evaluación de escenarios de lluvia cuando no se dispone de series hidrológicas detalladas. Por otro lado, sus límites aplicabilidad están relacionados directamente con la hidrología estacionaria y la geometría 1D de talud infinito. A continuación, en la Tabla 4 se puede evidenciar estos supuestos. Cabe indicar que los estudios comparativos existentes evidencian un buen rendimiento de este modelo cuando el inventario es coherente y se ha realizado un preprocesamiento topográfico minucioso (Dietrich et al., 2001; Machado do Pinho & Filho, 2022).

Tabla 4. Supuestos clave de SHALSTAB.

Hidrología estacionaria	Flujo subterráneo en régimen cuasi - estacionario
	Recarga uniforme
	Flujo paralelo a la ladera
	Medio poroso homogéneo / isótropo
	Superficie freática simple
	Representación topográfica agregada
Geometría 1D de talud infinito	Plano de falla paralelo a la superficie
	Extensión “infinita”

Propiedades uniformes
Presiones de poros hidrostáticas simples
Carga y dinámicas omitidas
Aplicabilidad

En términos operativos, SHALSTAB requiere un DEM, del cual se derivan dos insumos topográficos clave: la pendiente (θ , en radianes) y el área de contribución específica (A , en $\frac{m^2}{m}$) análogos al índice de humedad topográfica. A estos se suman parámetros geotécnicos e hidráulicos distribuidos espacialmente por unidades: cohesión (c), ángulo de fricción (ϕ), peso unitario/densidades del suelo y del agua (γ ó ρ), profundidad efectiva del suelo (z) y una tasa de recarga/infiltración que aproxima el efecto de la lluvia. Con estos parámetros, el modelo estima el factor de seguridad (FS) o, en implementaciones comunes, la recarga crítica (mm/día) que llevaría el factor de seguridad (FS) para cada celda, generando mapas de estabilidad relativa, como se observa en el esquema presentado en la Figura 17.

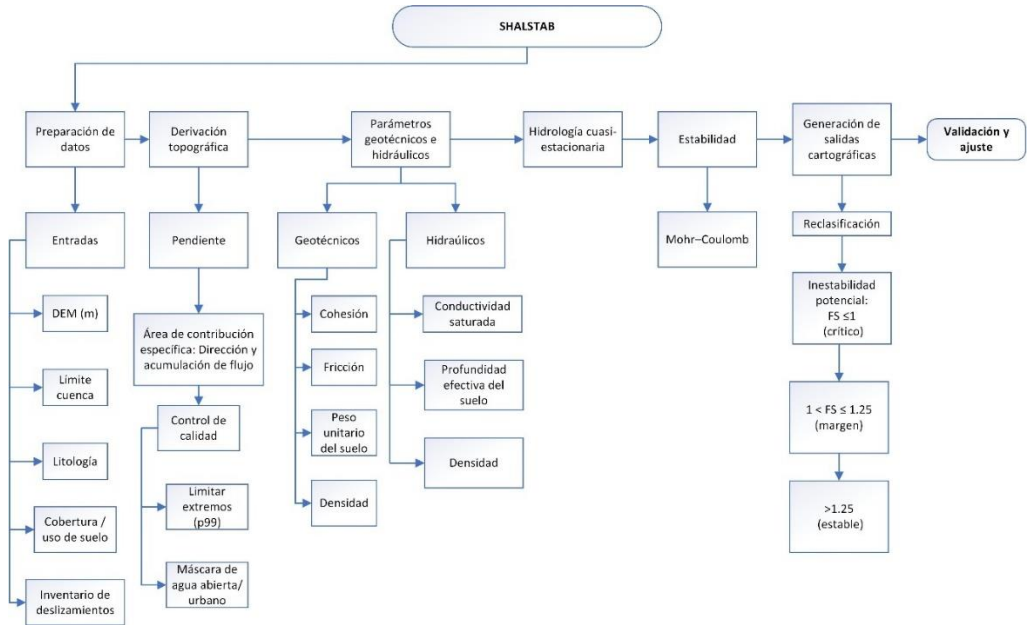


Figura 17. Esquema de operativización del método SHALSTAB.

b) SINMAP

SINMAP (Stability Index Mapping) fue desarrollado por R. L. Pack y D. G. Tarboton investigadores de la Universidad Estatal de Utah, junto con colaboradores como C. N. Goodwin, como una herramienta físico-determinista utilizada para cartografiar la inestabilidad somera a escala de cuenca. Cabe indicar que su base teórica integra el modelo de talud infinito (criterio de Mohr-Coulomb) con una hidrología cuasi-estacionaria que aproxima la saturación del suelo a partir del área de contribución específica y la pendiente, en sintonía con el concepto del índice topográfico de humedad (TWI). El esquema admite parámetros inciertos, definidos mediante distribuciones uniformes entre límites específicos, que pueden ajustarse y calibrarse para cada región basándose en datos de suelo, vegetación y geología. Cabe señalar que

esta metodología incorpora una calibración visual e interactiva basada en desplazamientos observados, en dónde se modifican los parámetros para que el mapa de estabilidad incluya la mayor cantidad posible de desplazamientos en las zonas de bajo índice de estabilidad, al tiempo que se reduce la extensión de dichas zonas en áreas donde no se han registrado eventos, de esta forma evitando clasificar en exceso áreas como inestables (Pack & Tarboton, 2025). Por otro lado, en la Figura 18 se evidencia cada uno de los procesos a seguir para la consecución del modelamiento de la amenaza de movimientos en masa desde la recolección de datos, pasando por el procesamiento de parámetros geotécnicos e hidráulicos hasta su validación y ajuste.

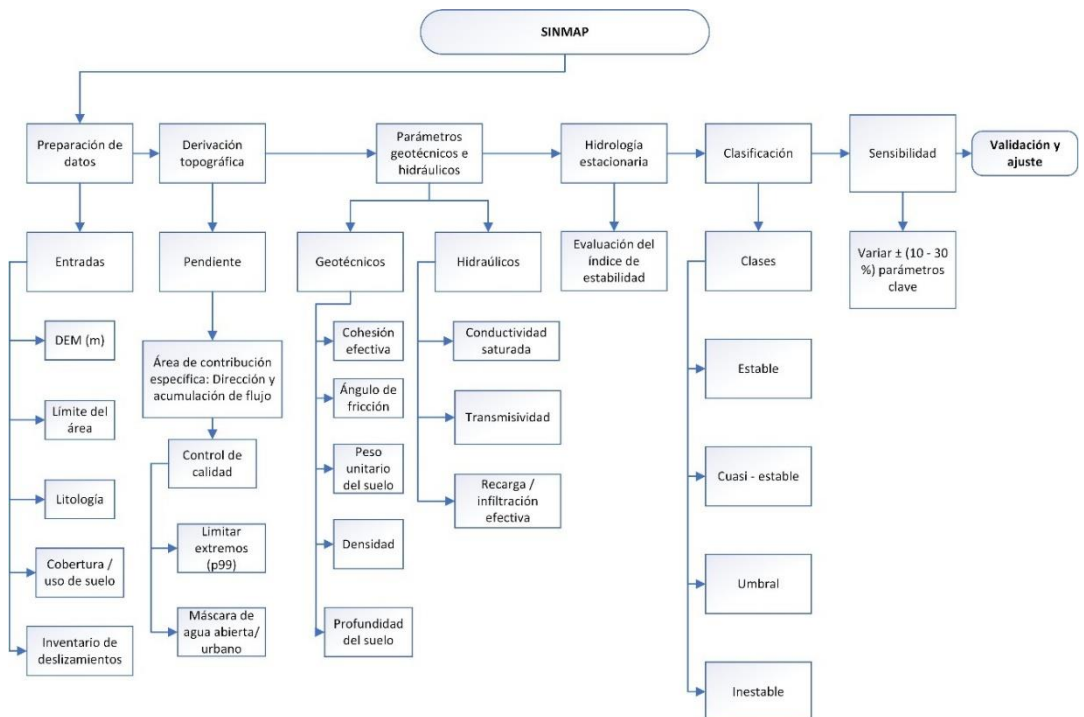


Figura 18. Esquema de operativización del método SINMAP.

c) *TRIGRS*

TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability) fue desarrollado por el U.S. Geological Survey (USGS) y sus autores son Rex L. Baum y William Z. Savage y Jonathan W. Godt y se publicó por primera vez en 2002 como el informe USGS OFR 2002-424 (v1.0) y, posteriormente, en 2008, como el informe USGS OFR 2008-1159 (v2.0). Se trata de un modelo físico determinista transitorio que calcula, celda por celda, la evolución del factor de seguridad (FS) durante eventos de lluvia, acoplando un esquema de infiltración transitoria 1D con el modelo de talud infinito. Además, el módulo de infiltración sigue soluciones analíticas de flujo no permanente a modo de linealización tipo Iverson con la finalidad de estimar la evolución de la presión intersticial y su efecto sobre la resistencia al corte a lo largo del tiempo (Baum et al., 2002).

En la Figura 18 se evidencia un esquema operativo que resume cada una de las fases del método TRIGRS desde su inicio con la preparación de datos hasta la presentación de los productos finales.

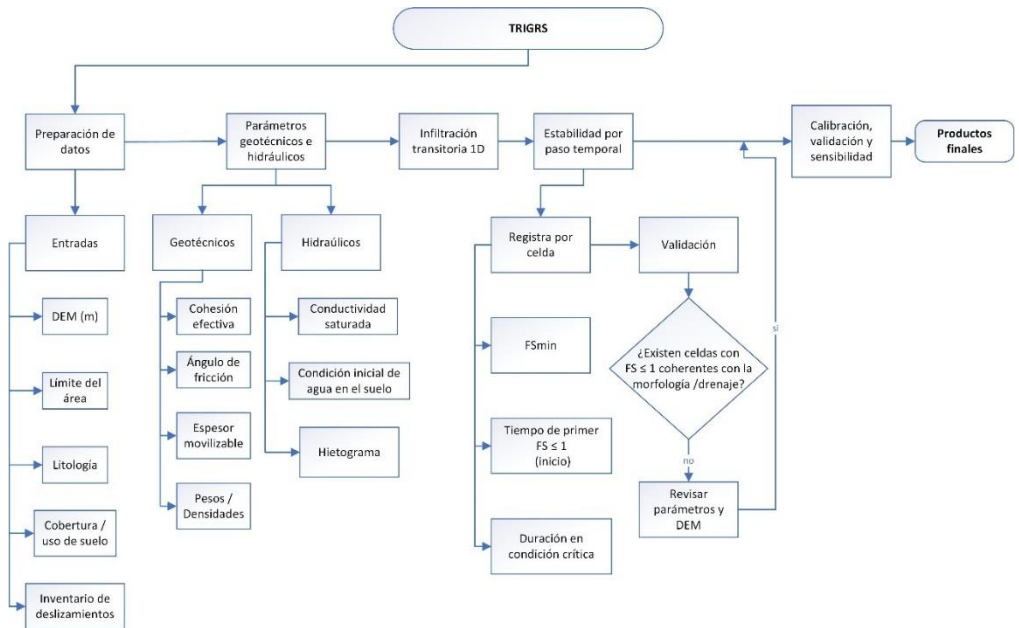


Figura 19. Esquema de operativización del método TRIGRS.

2.1.4 Probabilístico

Los métodos probabilísticos para el análisis de movimientos en masa representan la incertidumbre inherente del sistema mediante variables aleatorias y funciones de probabilidad. En lugar de proporcionar un único valor determinista, como, por ejemplo: el factor de seguridad fijo. Por el contrario, estos enfoques generan medidas de verosimilitud, como la probabilidad de fallo o índices probabilísticos de susceptibilidad, a partir de la variabilidad de parámetros geotécnicos, como la cohesión, la fricción y el espesor. También tienen en cuenta parámetros hidrológicos como la conductividad, la humedad, la humedad inicial y la recarga. También se tienen en cuenta los parámetros geométricos, como la pendiente y la curvatura. Finalmente, están los parámetros desencadenantes, que son las precipitaciones. La formulación puede

basarse en distribuciones de probabilidad (normal, lognormal, beta o triangular) y/o en procesos estocásticos que modelan fenómenos temporales, por ejemplo: series de precipitación (Berti et al., 2012).

Entre sus ventajas, se destaca:

- Trazabilidad de los supuestos;
- Cuantificación explícita de la variabilidad;
- Facilidad para combinar fuentes de información heterogéneas.

A nivel de modelos probabilísticos, se debe tener en cuenta que la fase de recolección de datos es crucial, ya que el cálculo de la probabilidad de deslizamiento depende de factores como la cohesión efectiva del suelo, el ángulo de fricción y la conductividad hidráulica saturada, entre otros. Además, es necesario comprender las dependencias entre variables, ya que algunos parámetros están correlacionados: por ejemplo, los suelos más densos tienen una mayor fricción y la presencia de mayor cobertura vegetal genera más cohesión por las raíces. Por otro lado, Una especificación adecuada de distribuciones de probabilidad y correlaciones mejora la robustez de los resultados y evita sesgos en la probabilidad de falla.

a) Modelo probabilístico para determinar la amenaza de deslizamiento a escala de cuenca

El trabajo investigativo por parte de Guzzetti et al. (2005) propone un marco probabilístico a escala de cuenca que estima la amenaza de deslizamientos de tierra, y que tiene como responder la localización, frecuencia y la magnitud de esta amenaza. Para ello, los autores

construyen un inventario multitemporal a partir de fotografías aéreas tomadas entre 1955 y 1999 y subdividen la cuenca en unidades geomorfológicas e hidrológicas. A posterior, con estas unidades, proceden a calcular la probabilidad espacial de ocurrencia mediante un análisis discriminante de variables temáticas como: morfología, litología, estructura y uso del suelo. A continuación, estiman la frecuencia temporal por unidad dividiendo el número de eventos catalogados entre la duración del período observado y, mediante un modelo de Poisson, obtienen la probabilidad de excedencia de al menos un evento en distintos horizontes temporales. Finalmente, ajustan la distribución frecuencia por área de los deslizamientos para modelar la magnitud o tamaño, y así evalúan la probabilidad de que el área supere umbrales dados. Cabe señalar que la combinación de estas tres probabilidades produce mapas cuantitativos de peligro por unidad de mapeo, que han sido probados en la cuenca del río Staffora ubicado en los Apeninos del norte, Italia. Este método demuestra que la integración de inventarios multitemporales con estadística clásica y modelos de ocurrencia y magnitud que permiten cartografiar esta amenaza de forma reproducible y con una concienciación explícita de la incertidumbre a escala de cuenca.

En la Figura 20, se observa un esquema operativo para la aplicación del método de peligro probabilístico a escala de cuenca.

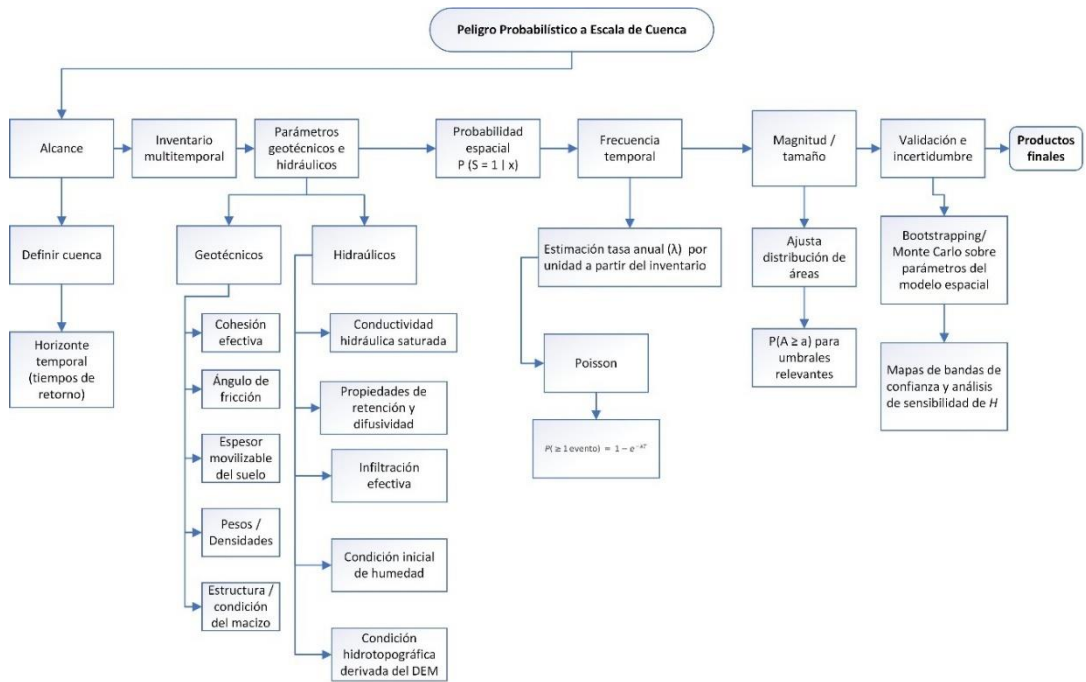


Figura 20. Esquema de operativización del método peligro probabilístico a escala de cuenca.

b) Procesos puntuales y modelos espacio-temporales bayesianos (LGCP/INLA) para movimientos en masa

La propuesta metodológica de Lombardo et al. (2020) se delinea como un marco bayesiano para predecir la ocurrencia espacio - temporal de deslizamientos tratándolos como realizaciones de un proceso puntual, esto hace alusión a que cada deslizamiento se representa como un punto aleatorio en el espacio. Cabe indicar que este método modela el recuento de deslizamientos por unidad de mapeo mediante una distribución de Poisson cuya media es la intensidad, es decir, el número esperado de eventos y, en la escala logarítmica, incorpora efectos fijos de covariables temáticas y morfométricas, así como efectos aleatorios que capturan

dependencias espaciales, temporales y espacio-temporales no observadas, como, por ejemplo: control estructural y factores desencadenantes pluviométricos. Esta estructura define un proceso de Cox log-gaussiano (LGCP). Es importante mencionar que la inferencia se resuelve mediante INLA (Integrated Nested Laplace Approximation), que permite ajustar modelos latentes gaussianos de alta dimensión con gran eficiencia.

La Figura 21, ilustra una aplicación típica del enfoque bayesiano espaciotemporal con procesos puntuales (LGCP/INLA) sobre unidades de ladera. En ese sentido, tenemos 3 paneles en donde el categorizado con (A) muestra la intensidad esperada de deslizamientos medidos por el número medio de eventos por cada unidad, obtenida al combinar covariables topográficas, geológicas y desencadenantes con efectos espaciales y temporales latentes. Por otro lado, en el panel B se presenta la susceptibilidad que hace referencia a la probabilidad de ocurrencia, que es derivada de la misma estructura probabilística. Finalmente, el panel C que integra ambos resultados en un mapa predictivo de síntesis que resulta útil para priorizar la gestión, ya que identifica los sectores en los que coinciden intensidades altas y probabilidades elevadas. Además, se incluye un resumen porcentual de las clases.

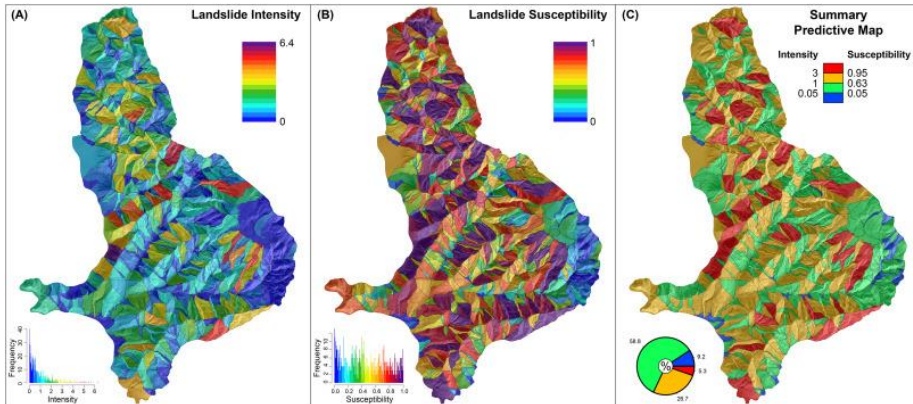


Figura 21. Aplicación típica del enfoque bayesiano espacio-temporal con procesos puntuales (LGCP/INLA) sobre unidades de ladera.

Fuente: (Lombardo et al., 2020).

A continuación, en la Figura 22 se puede evidenciar el esquema metodológico de los procesos puntuales y modelos espacio-temporales bayesianos (LGCP/INLA).

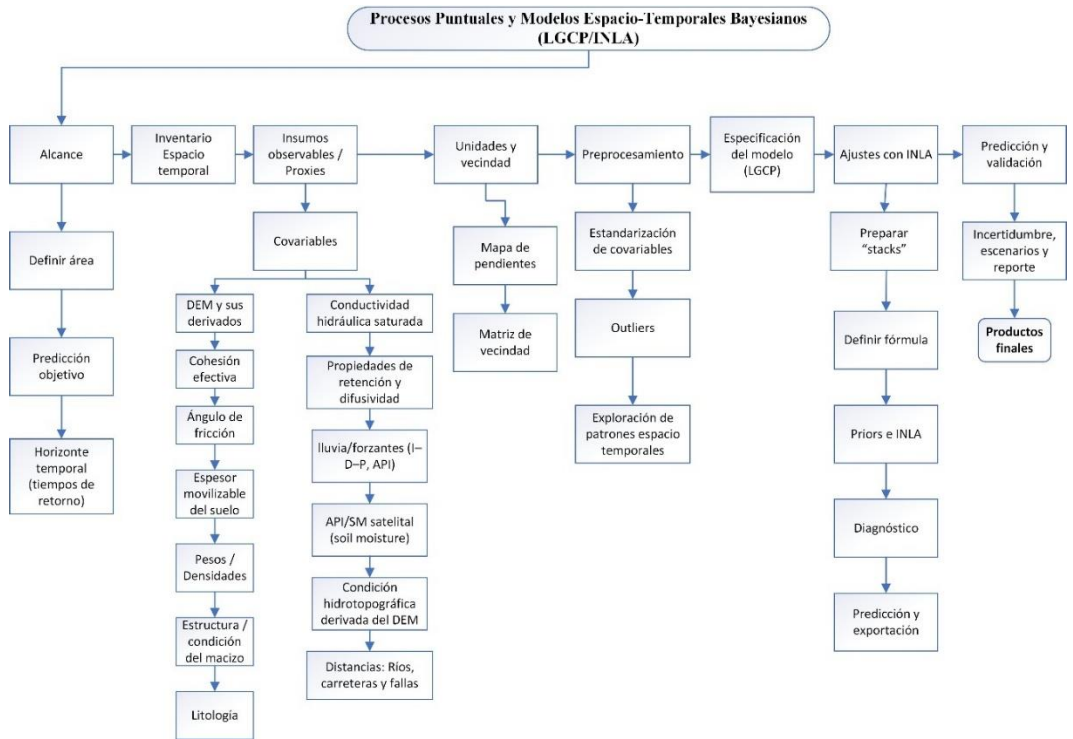


Figura 22. Esquema de operativización del método procesos puntuales y modelos espacio-temporales bayesianos (LGCP/INLA).

2.2 Enfoques para el análisis de movimientos en masa: comparación y guía de uso

La Tabla 5, sintetiza los cuatro enfoques más utilizados para el análisis de movimientos en masa: heurístico, estadístico, determinístico y probabilístico, con el fin de ofrecer una guía práctica y comparativa para la selección metodológica en función de los objetivos, los datos disponibles y la escala de trabajo.

Tabla 5. Marco comparativo de metodologías heurísticas, estadísticas, determinísticas y probabilísticas.

Eje de comparación	Heurístico	Estadístico	Determinístico	Probabilístico
Propósito	Índice sintético de susceptibilidad o amenaza a partir de ponderaciones expertas.	Probabilidad de ocurrencia a partir de relaciones empíricas evento-covariables.	Factor de Seguridad (FS) o índices físicos por celda/sector (estado estable o transitorio).	Probabilidad de falla (Pf) o peligro integrando variabilidad y aleatoriedad.
Datos mínimos	DEM; Litología; Geología; Drenaje; Uso de suelo. Cobertura vegetal; Inventario; Precipitación	Inventario; DEM; Covariables: - Pendiente, - TWI, - Litología, - Uso, - Distancias,	DEM (pendiente y área de contribución); Parámetros geotécnicos; Parámetros hidráulicos.	Distribuciones de parámetros; Inventarios multitemporales; Precipitación (IDF/series).

		- PGA/lluvia (opcional).		
Modelamiento	Ponderación experta (AHP + WLC); Reglas y reclasificaciones.	Modelos bivariados / multivariados.	Ecuaciones físicas (talud infinito) con hidrología (steady-state): SHALSTAB ; SINMAP ; TRIGRS.	Distribuciones / procesos estocásticos.
Tratamiento de incertidumbre	Implícito; Vía juicio experto; Sensibilidad de pesos.	Parcial (intervalos, validación, CV espacial); no siempre explícita.	Sensible a errores de parámetros.	Explícito: distribuciones, correlaciones, bandas creíbles; propagación Monte Carlo/INLA.
Escala típica	Municipal–cuenca (1:10k–1:50k).	Municipal–regional (1:10k–1:50k); requiere inventarios.	Ladera–cuenca (celdas 5–30 m); eventos de lluvia.	Cuenca–regional; requiere inventarios multitemporales y/o series climáticas.

Validación	Éxito/predicción con inventario; revisión de multicolinealidad; CV espacial simple.	ROC-AUC / PR-AUC, success/prediction rate, CV espacial/temporal; prueba externa.	Comparación con inventarios/fechas; Sensibilidad (\pm en c, ϕ , z, Ks, R); Coherencia morfológica.	Bootstrap/Monte Carlo, intervalos creíbles, prueba fuera-de-muestra por periodo/unidad; métricas de puntuación (log-score/CRPS).
Ventajas	Rápido, transparente, exige pocos datos, útil como línea base.	Capta patrones complejos; buen desempeño con inventarios sólidos; transferible con cuidado.	Fundamento en la física; permite escenarios de lluvia (TRIGRS) y medidas de manejo.	Cuantifica Pf / peligro con incertidumbre; integra dónde-cuándo-cuán grande.
Limitaciones	Subjetividad; reproducibilidad depende de documentar criterios; riesgo de doble conteo.	Requiere inventarios de calidad; sesgo espacial; extrapolación limitada.	Supuestos (talud infinito, hidrología 1D / steady-state); mucha sensibilidad a parámetros.	Exige datos y elección correcta de distribuciones/correlaciones; mayor complejidad computacional.

Uso	Diagnóstico rápido, falta de datos, apoyo a planificación inicial.	Hay inventarios y se busca mapa predictivo robusto (lluvia/sismo como covariables).	Evaluar estabilidad física y escenarios de lluvia; diseño y priorización de medidas.	Análisis con incertidumbre: Pf y peligro (integrando tasa y tamaño) o modelos espacio-temporales.
------------	--	---	--	---

2.3 De susceptibilidad a amenaza

El hablar del paso de susceptibilidad a amenaza engloba la interacción de los factores condicionantes con los factores desencadenantes o detonantes. Cabe recalcar que al hablar de susceptibilidad hace referencia a la propiedad espacial en la cual se cuantifica la propensión del terreno a que ocurran deslizamientos bajo condiciones genéricas, y a partir de factores como es la morfometría que engloba pendientes, curvaturas, TWI, entre otros. Por otro lado, está la geología, uso y cobertura del suelo que son factores que influyen directamente en la estabilidad de un terreno. En alusión al término de amenaza, es cuando se activa esa predisposición del terreno por la acción de un factor desencadenante que puede ser definido en el tiempo y cuando es pertinente con una escala de magnitud.

La Figura 23, presenta una representación del paso de la susceptibilidad (S) a la amenaza (H) mediante la incorporación explícita de un forzante o desencadenante (P) y un horizonte temporal (T). En el eje X se ubica la susceptibilidad $S(x)$, un valor adimensional normalizado en $[0,1]$ que

resume la propensión espacial de cada unidad del terreno en función de factores condicionantes relativamente estables, como es la morfometría, geología, uso y cobertura del suelo. En el eje Y se representa el forzante P, igualmente normalizado en [0,1], que captura la intensidad efectiva del detonante en la ventana de análisis; en el contexto pluviométrico, P puede provenir de precipitación de diseño mediante curvas IDF, lluvia observada con lluvia antecedente / API o, en escenarios sísmicos, de parámetros como PGA.

El mapa de calor revela cuatro zonas interpretativas:

- Baja amenaza (S y P bajos), típica de laderas estables bajo lluvias modestas;
- Región limitada por S (P alto, pero S bajo), que sugiere que, aun con lluvias fuertes, la predisposición del terreno restringe el peligro;
- Región limitada por P (S alto, pero P bajo), donde la ladera es propensa pero el detonante no alcanza niveles críticos; y
- Alta a muy alta amenaza (S y P altos), que concentra las prioridades de intervención.

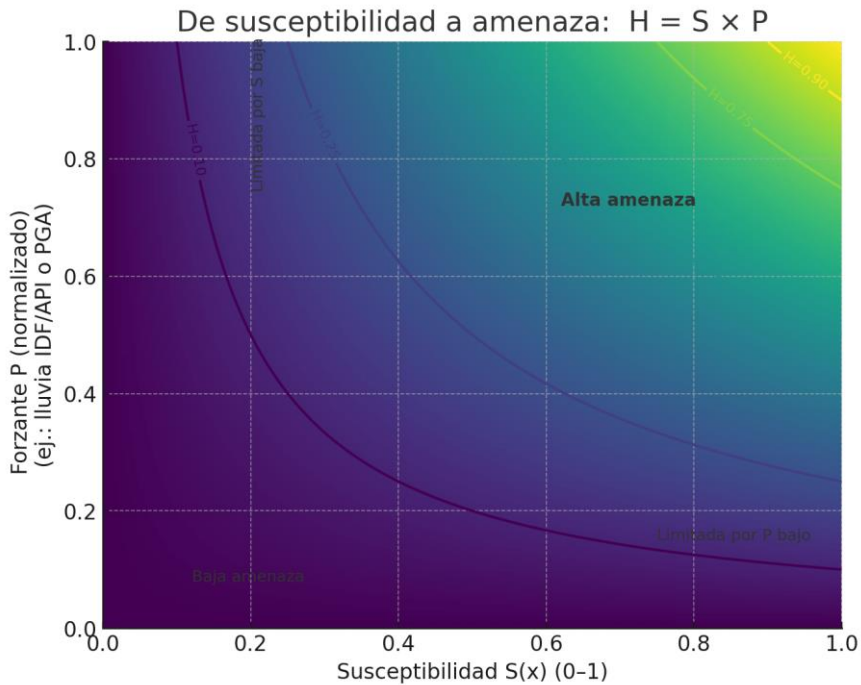


Figura 23. Representación gráfica del paso de la susceptibilidad a amenaza.

Cabe indicar que Segoni et al., (2018) que la combinación de mapas de susceptibilidad de alta resolución espacial con umbrales estadísticos de precipitación con alta resolución temporal y espaciamiento extenso produce una definición dinámica de la amenaza, con información importante de la locación y posibles fechas de ocurrencia del deslizamiento, y con qué nivel (H0–H4). Esta lógica reduce la generalización espacial de los sistemas de alerta y focaliza la respuesta en fracciones del área en vigilancia. Cabe mencionar que los niveles que se hace referencia son:

- H0 - Nula: Sin condiciones para la activación;
- H1 - Baja: Activación improbable, se recomienda vigilancia básica;

- H2 - Media: Condiciones favorables en algunos sectores, se puede considerar pre – alerta.
- H3 - Alta: Alta probabilidad de ocurrencias;
- H4 - Muy alta: Condiciones críticas generalizadas.

CAPÍTULO III

3 ESTUDIOS DE CASO EN LA PROVINCIA DE BOLÍVAR

En la provincia de Bolívar el riesgo de movimientos en masa ha aumentado notablemente poniendo en peligro infraestructuras esenciales como son los ejes viales de la provincia, infraestructuras educativas, comerciales, turísticas, entre otras. Por ello toma especial relevancia revisar estudios de caso en dónde se aplicaron diversos enfoques para determinar zonas de susceptibilidad y modelos de amenaza. Cabe indicar, que según la Secretaría Nacional de Planificación (2024) en su estrategia territorial nacional para el eje de gestión de riesgos ha determinado que en el periodo comprendido entre 2010 a 2024 que se han suscitado 309 eventos directamente asociados a movimientos en masa en la provincia de Bolívar que han dejado 2070 personas afectadas, por ello los estudiantes existentes se deben transferir a toda la provincia con la finalidad de reducir el nivel de riesgo.

3.1 Estudio de la amenaza de deslizamiento en la colina San Bartolo – Guaranda – Ecuador.

3.1.1 Problemática

El caso de estudio se localiza en la colina de San Bartolo, dentro del tejido urbano de Guaranda capital de la provincia de Bolívar, una ciudad asentada sobre un relieve colinar que condiciona de manera significativa la estabilidad geomorfológica. Cabe indicar que el enclave presenta pendientes medias a fuertes, superficies de escurrimiento concentrado y coberturas heterogéneas en las que se alternan vegetación, suelos desnudos y ocupación urbana. A ello se suma la presencia de materiales

volcánicos meteorizados y coluviales de baja a media competitividad, cuya respuesta hidromecánica frente a episodios de lluvia intensa provoca estados límite de estabilidad en la parte superficial del perfil del suelo. Cabe indicar que la combinación de una morfometría desfavorable y una exposición antrópica, derivado de la construcción de viviendas, vialidad y servicios emplazados en el pie de monte y las laderas medias convierte a la colina San Bartolo en un laboratorio natural para evaluar la transición conceptual entre la susceptibilidad y la amenaza. En este tipo de estudios es siempre pertinente la adquisición de datos topográficos que permitan realizar un diagnóstico fiable.

A continuación, en la Figura 24, se evidencia la ubicación geográfica de la zona de estudio.

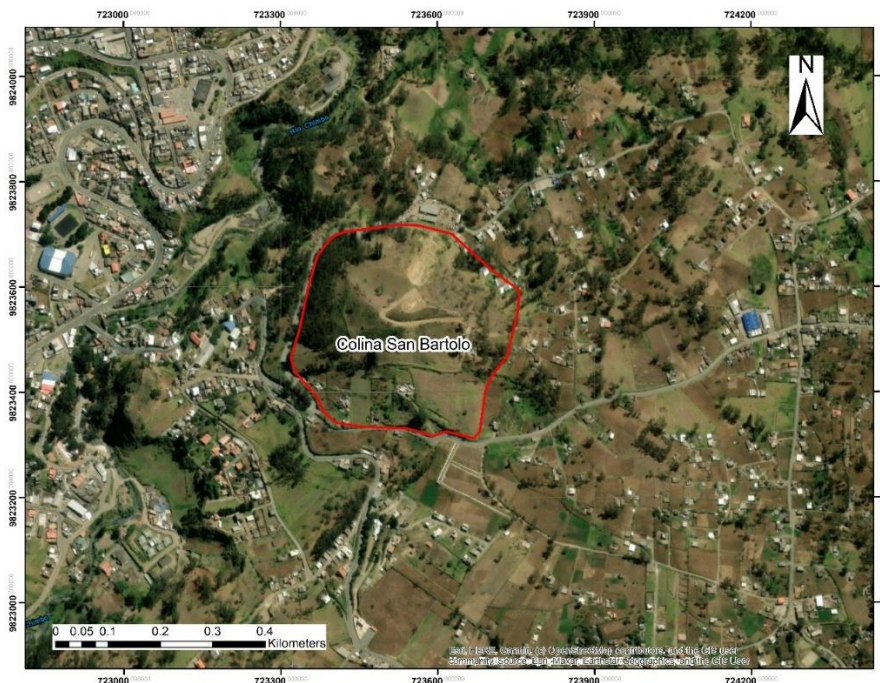


Figura 24. Ubicación geográfica de la colina San Bartolo.

3.1.2 Enfoque metodológico

Se utilizó un modelo físico-determinístico de ladera infinita con hidrología topográfica estacionaria tipo SHALSTAB para estimar estados relativos de estabilidad somera a partir de modelos digitales de elevación (DEM) y parámetros básicos del medio como: ángulo de fricción, densidad/espesor movilizable y recarga efectiva. En paralelo, se elaboró un índice heurístico de susceptibilidad / amenaza propuesta por la institución rectora de la gestión de riesgos de desastres del Ecuador, en dónde se ponderan factores condicionantes como: pendiente, litología / geomorfología, cobertura, densidad estructural y textura del suelo y un desencadenante pluviométrico representativo. Por último, se realizó una evaluación de la vulnerabilidad física de las edificaciones mediante una matriz de indicadores constructivos y de emplazamiento con el fin de vincular la condición del terreno con el potencial de daño.

3.1.3 Principales resultados

El análisis determinista delimita franjas de inestabilidad preferente en laderas con mayores pendientes y convergencia de flujo somero, mientras que el índice heurístico reproduce patrones concordantes en sectores donde coexisten pendientes pronunciadas y coberturas menos protectoras. Cabe mencionar que la superposición con la cartografía de edificaciones evidencia concentraciones de exposición en el pie de monte y en crestas con urbanización incipiente, lo que permite identificar microzonas prioritarias para la gestión de drenajes, el control de la escorrentía y el ordenamiento constructivo a nivel local, tomando

en consideración que estas zonas pueden ser polos de expansión urbana de la ciudad.

En la Figura 25, se puede identificar la aplicación de dos enfoques diferentes para el análisis de la amenaza de deslizamiento a nivel de susceptibilidad, en el panel “a” se encuentra el análisis determinístico y en el panel “b” el heurístico, en donde se verifica un porcentaje de similitud en los modelamientos. En ese sentido el utilizar dos metodologías de diferentes enfoques en una misma locación contribuye directamente al proceso de validación y fiabilidad de los resultados.

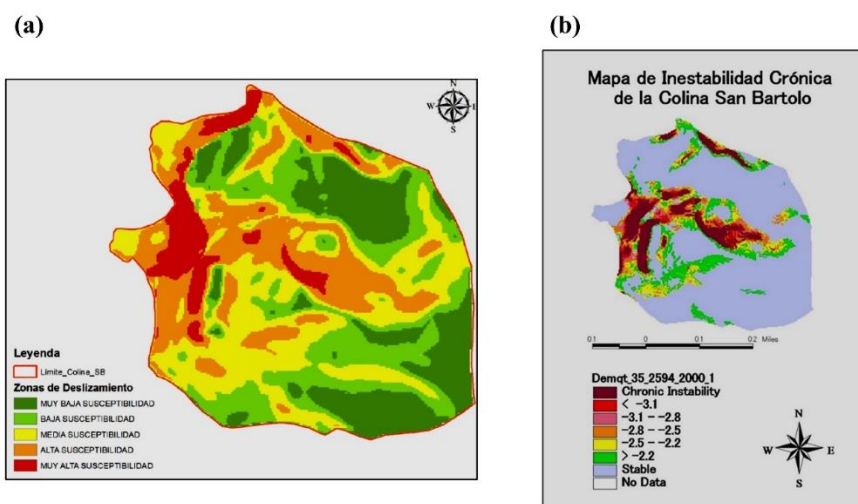


Figura 25. Análisis determinístico (b) vs heurístico (a).

Fuente: (Amangandi & Bayas, 2024).

3.1.4 Validación y evaluación de desempeño

La consistencia se verifica mediante la concordancia espacial entre ambos productos: determinístico y heurístico, y la revisión morfológica

de campo. Además, se contrastan los mapas con registros locales de ocurrencias y señales de inestabilidad como: escarpes, grietas y socavaciones. Además, se comprueba su coherencia con la estructura del drenaje y la lógica del relieve. Por otro lado, como control metodológico, se revisan los sesgos por autocorrelación espacial y las redundancias entre predictores.

3.1.5 Limitaciones del estudio

El alcance espacial reducido limita la extrapolación regional y la hipótesis de hidrología estacionaria y geometría 1D puede que no capte los efectos locales (rellenos, cortes y drenajes subterráneos). Por otro lado, la ponderación heurística depende de la calidad de las reclasificaciones y los pesos, y la vulnerabilidad, de los criterios discretos y la variabilidad entre los evaluadores. Entre las futuras mejoras sería pertinente incluir en este tipo de investigaciones inventarios multitemporales, simulaciones transitorias de precipitación, validaciones espaciales y temporales más estrictas que aseguren una mayor fiabilidad de los productos generados.

3.2 Análisis de los movimientos en masa y su relación con elementos expuestos en el barrio América, cantón San Miguel de Bolívar.

3.2.1 Problemática

El estudio se centra en el barrio América, perteneciente al cantón de San Miguel de Bolívar, que se caracteriza por tener un relieve urbano - colinar y con antecedentes de inestabilidad de taludes que han devenido en movimientos en masa puntuales que han afectado a la movilidad y a

las actividades económicas locales. Cabe indicar que el Ecuador ha sido catalogado como un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, es aquí donde toman relevancias los estudios que asocian variables climáticas a problemas locales (Secretaría Nacional de Planificación, 2025). En este contexto, Bonilla Vergara & Castro Nuñez, (2025) menciona que el trabajo de investigación tiene como propuesta central el identificar las condiciones de estabilidad de los taludes, caracterizar los elementos expuestos y proponer medidas para reducir el nivel de riesgo, esto con la finalidad de incrementar el nivel de conocimiento relativo a la gestión de riesgos de desastres en la localidad.

A continuación, en la Fig. 25 se evidencia la ubicación geográfica de la zona de estudio.



Figura 26. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

3.2.2 Enfoque metodológico

El estudio adopta un enfoque mixto, debido a que integra una línea determinística y geotécnica apoyada con una línea espacial de exposición en un mismo marco analítico. Por un lado, se estima el factor de seguridad (FS) con el software GEO5 mediante el método de Bishop estándar que es un procedimiento clásico de equilibrio límite utilizado para evaluar la estabilidad de taludes, parametrizando las propiedades índice y de resistencia del suelo (Adeoti et al., 2023). Por otro lado, mediante el software ArcGIS se construyen capas morfométricas y se georreferencian los elementos expuestos, que se cruzan con las franjas de inestabilidad resultantes para derivar en mapas de intersección en donde resaltan los niveles de riesgo y exposición.

3.2.3 Principales resultados

El modelado por perfiles identifica cuatro taludes con factor de seguridad inferior al criterio de aceptación en condiciones drenadas y en un escenario pseudoestático. Además, se destacan crestas y contrafuertes con mayores gradientes y tramos afectados por cortes de vía. Por otro lado, la síntesis mediante sistemas de información geográficos (SIG) muestra la coincidencia de sectores de inestabilidad con alta densidad de elementos esenciales que pueden ser afectados como la vía estatal E-491 que conecta la sierra centro con la costa ecuatoriana. Por otro lado, se define microzonas críticas y corredores de afectación preferentes para eventos producto de factores desencadenantes como la precipitación.

3.2.4 Validación y evaluación de desempeño

La consistencia se verifica mediante:

- Coherencia geomorfológica entre el factor de seguridad y la estructura de pendientes;
- Verificación en campo de indicadores de inestabilidad como: escarpes, grietas y fenómenos de socavación. Además, de su concordancia con la cartografía de exposición;
- Revisión histórica de eventos para comprobar la plausibilidad de los sectores clasificados como críticos.

3.2.5 Limitaciones del estudio

El dominio espacial reducido a un lugar específico limita su transferibilidad de resultados. Además, el enfoque determinístico depende de parámetros geotécnicos y utiliza geometría 2D por perfiles y un esquema pseudoestático simplificado para sismos. Por otro lado, la identificación de la exposición se basa en fichas declarativas que pueden estar sesgadas y a su vez no existe un inventario multitemporal independiente que permita métricas predictivas (ROC/PR) o validación temporal. En ese sentido, un punto de mejora es ampliar el muestreo in situ e incorporar series pluviométricas como insumo para simulaciones hidromecánica transitoria, así como aplicar una validación espacial y temporal para robustecer la inferencia y la priorización. Un aspecto de especial relevancia que podemos evidenciar en la presente investigación es que el enfoque determinístico depende de parámetros geotécnicos con alta incertidumbre como es la cohesión efectiva, ángulo de fricción efectiva y el contenido de humedad, y no se evidencia un análisis de sensibilidad ni propagación de errores.

3.3 Análisis de la estabilidad de taludes ante la amenaza de deslizamientos del cerro Cuchicahua ubicado en el cantón Chillanes.

3.3.1 Problemática

El estudio de caso se ubica en el cerro Cuchicahua, perteneciente a la parroquia central del cantón de Chillanes, provincia de Bolívar, Ecuador. En dónde donde se han reportado recientemente grietas y deslizamientos en laderas que atraviesan la vía principal de ingreso al cantón. En ese sentido, este fenómeno aumenta la exposición de viviendas e infraestructuras barriales.

Para la presente investigación el diagnóstico se basa en el uso de datos geomáticos generados específicamente para este propósito: una ortofoto y un modelo digital de elevación (DEM) obtenidos mediante fotogrametría con dron, a partir de los cuales se derivan la pendiente, la iluminación de relieve, la vegetación y el tipo de suelo, con el fin de caracterizar la morfometría y reconocer los factores que condicionan la inestabilidad.

Por otro lado, esta locación responde a una problemática de carácter regional y esto es debido al relieve colinar de la provincia de Bolívar y a los episodios pluviométricos intensos favorecen la activación de fallas someras, mientras que la ocupación antrópica ha introducido cortes y modificaciones del drenaje que reducen la estabilidad en sectores críticos. Cabe indicar que Paredes et al. (2025) menciona que los escenarios de riesgos son exacerbado debido a la alta variabilidad climática de los contextos andinos.

A continuación, en la Figura 27 se evidencia la ubicación geográfica de la zona de estudio.

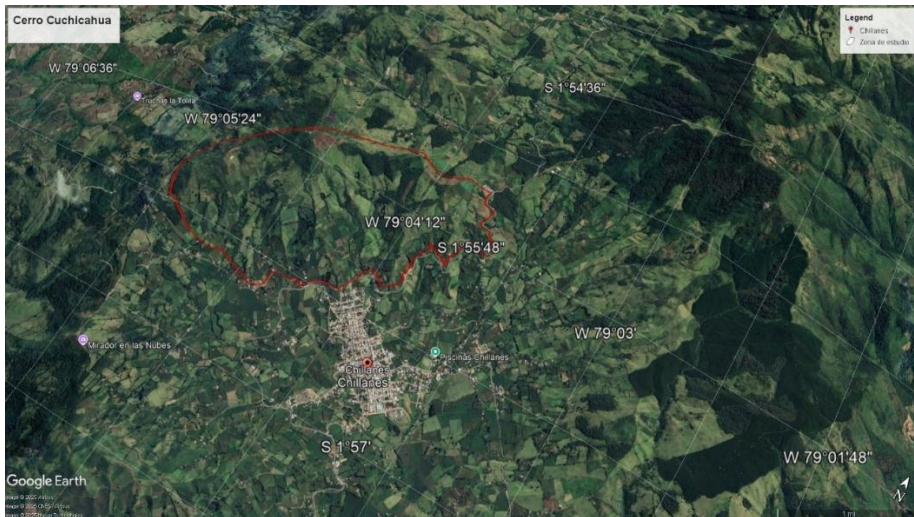


Figura 27. Ubicación geográfica de la zona de estudio, sector “cerro Cuchicahua”.

3.3.2 Enfoque metodológico

El estudio adopta un enfoque determinista de equilibrio límite aplicado por perfiles mediante el software geotécnico GEO5 en dónde se realiza diferente tipos de tareas desde estudios geológicos hasta diseño geotécnico avanzando (GEO 5, 2025). Por otro lado, Se aplicó el método de Bishop (simplificado) como núcleo del análisis determinístico de estabilidad, resolviendo el factor de seguridad (FS) para superficies de falla circulares mediante equilibrio límite por rebanadas y solución iterativa. Además, la parametrización se construyó con: peso unitario del suelo en condiciones seca y saturada para capturar variaciones de esfuerzos efectivos, cohesión efectiva, ángulo de fricción efectiva como parámetros resistentes drenados, geometría del talud derivada del DEM, y un coeficiente sísmico horizontal pseudoestático

conforme a la NEC, para representar la acción inercial equivalente en escenarios sísmicos

Las entradas provienen de tres fuentes:

1. Cartografía y modelo digital de elevación para definir la geometría del terreno;
2. Trabajo de campo para ubicar y verificar rasgos de inestabilidad y materiales;
3. Estimaciones auxiliares de propiedades del suelo como: peso unitario en seco y saturado, cohesión y ángulo de fricción, obtenidas de fichas y referencias técnicas.

3.3.3 Principales resultados

Se evalúan ocho perfiles, en donde seis resultan estables con $FS > 1,50$ y dos perfiles resultan inestables, con $FS = 1,12$ y $FS = 0,95$, por debajo del umbral adoptado. Para uno de los casos críticos se reporta la superficie de falla circular (centro, coordenadas y radio) y el balance de fuerzas/momentos, confirmando $FS < 1,50$. Por otro lado, la cartografía de pendientes identifica franjas $30-45^\circ$ y $>45^\circ$ como dominios morfológicos concordantes con las zonas críticas.

En la Figura 28 se evidencian los perfiles que capturan abanicos de pendiente que convergen hacia el borde sur - sureste de la montaña (zona de pie). A continuación, se presenta la interpretación de cada uno de los perfiles:

- **Perfiles 1–3 (flanco occidental):** $FS > 1,50$ con paisaje de grilla que muestra valores altos casi uniformes, en donde la curvatura es

suave y el pie carece de cortes antrópicos relevantes. Cabe indicar que dominan reservas de estabilidad y el riesgo es bajo salvo cambios de drenaje.

- **Perfil 4 (centro):** $FS > 1,50$, aunque el mapa de la grilla sugiere franja de valores intermedios de FS medio cuando la interfase suelo–roca converge hacia el pie. Es importante priorizar control de escorrentía para evitar ascenso del nivel freático.
- **Perfil 5 (preludio a la zona crítica):** FS cercano al umbral ($1,5 \pm$); la grilla insinúa valles locales de FS ligados a cortes viales y topografía de pie más abrupta. Algo que resaltar es que este perfil representa una zona de transición hacia el sector de falla potencial.
- **Perfil 6 (flanco oriental):** Comportamiento estable ($FS > 1,5$) con gradientes altos, pero pie relativamente confinado.
- **Perfiles 7–8 (críticos):** $FS = 1,12$ y $FS = 0,95$, los mínimos globales de la campaña. En la grilla, el valle de FS es nítido y la superficie crítica circular intercepta el pie recortado por la vía, indicando pérdida de confinamiento y probable falla rotacional somera en condiciones drenadas. Por otro lado, bajo lluvia o ascenso del nivel freático, se espera descenso adicional del FS.

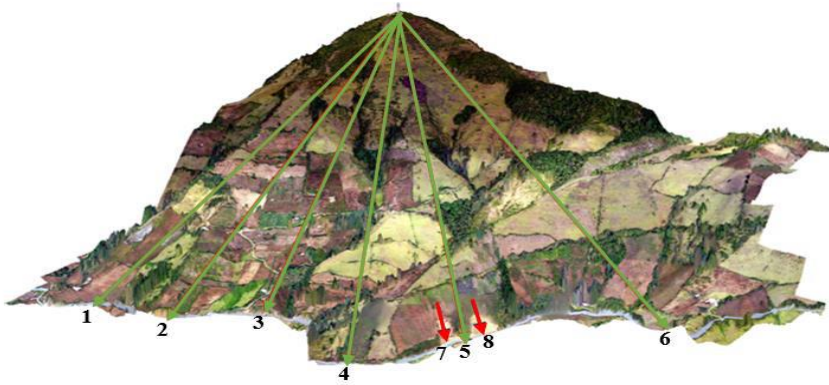


Figura 28. Perfilamiento radial de estabilidad de ladera: Cerro Cuchicahua.

Fuente: (Quinatoa & Sisa, 2024).

3.3.4 Validación y evaluación de desempeño

En el presente trabajo de investigación, para cada perfil (1–8) se presentan tablas de verificación con el balance de fuerzas activas y pasivas. Además, de momentos deslizantes y estabilizadores, junto con el factor de seguridad y la superficie de falla circular. Esto permite verificar que la solución cumple el equilibrio límite y que la búsqueda en grilla y en optimización se localiza el mínimo reportado (FS_min). Por otro lado, no se ha realizado una validación externa frente a observaciones independientes, como por ejemplo mediante un inventario multitemporal. Además, no se evidencia un análisis de sensibilidad e incertidumbre de parámetros geotécnicos o condiciones hidráulicas. En consecuencia, el rendimiento del modelo se basa en la consistencia mecánica interna y en la coherencia cualitativa con la morfometría, pero sin métricas predictivas ni control de la robustez paramétrica.

3.3.5 Limitaciones del estudio

1. Determinístico 2D por perfiles: No capta efectos 3D ni transitorios hidrológicos;
2. Parametrización geotécnica: Basada en clasificaciones de suelos (franco arenoso y franco arcilla arenosa). Además, no se reporta ensayos de resistencia con su variabilidad ni análisis de sensibilidad e incertidumbre;
3. Ausencia de inventario multitemporal de deslizamientos para retro ajuste y validación externa.
4. Sin prueba de escenarios;
5. Cobertura espacial limitada a ocho secciones, sin un barrido sistemático del relieve (malla 2D/3D). En conjunto, es útil como diagnóstico preliminar determinístico, pero requiere refuerzo de datos geotécnicos, hidrología transitoria y validación cuantitativa para consolidar su uso en diseño y gestión del riesgo.

3.4 Análisis de susceptibilidad ante deslizamientos y sus afectaciones a elementos expuestos en la vía Guanujo – Echeandía sector “Piedra Blanca”.

La vía Guanujo - Echeandía, y en específico en el sector de Piedra Blanca, se ha visto afectada de manera recurrente por deslizamientos de tierra que interrumpen la conectividad y causan pérdidas socioeconómicas. En el presente estudio de caso se determina la susceptibilidad a los deslizamientos y a su vez se hace énfasis en las afectaciones a los elementos expuestos. El contexto local presenta laderas escarpadas, precipitaciones significativas y uso vial intensivo debido a que forma parte del eje provincial. Cabe destacar que los

pesos empleados en la combinación lineal. Por otro lado, en la vertiente determinística y geotécnica, se utiliza GEO5 bajo el método de Bishop con el fin de evaluar la estabilidad en perfiles seleccionados, incluyendo el cálculo del factor de seguridad con y sin componente sísmico, obtenido bajo el coeficiente horizontal conforme a la Norma Ecuatoriana de Construcción. Como aporte complementario, se presenta un análisis de diferencias del terreno en el software Global Mapper para apoyar la interpretación morfológica.

3.4.2 Principales resultados

El mapa de susceptibilidad elaborado con la metodología propuesta por Salcedo et al., (2017). En esta investigación se clasifica el corredor en cinco categorías: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. En ese sentido se evidencia un predominio de clases media y alta, sumado a un patrón coherente con la morfometría local: pendientes entre 44,5% y >100%, de “muy fuerte” a “muy escarpada”, como se observa en la Figura 30. Además, la presencia de suelos arenosos y gravas que, bajo saturación, reducen el margen de estabilidad superficial.

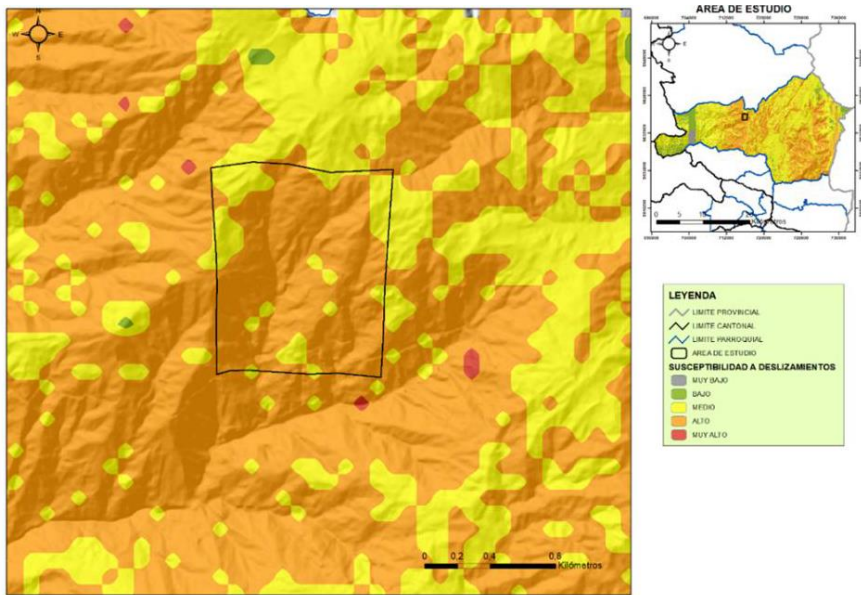


Figura 30. Susceptibilidad a deslizamientos, sector “Piedra Blanca”.

Fuente: (Castro & Guerrero, 2025).

La superposición de líneas de ruptura (geométricas), sobre el mapa de susceptibilidad ayuda a delimitar zonas de posible deslizamiento y a explicitar la continuidad lateral de escarpes, lo que mejora la interpretabilidad de las franjas de inestabilidad dentro del derecho de vía. Además, un mapa de predicción como se observa en la Figura 31, en el que se distinguen focos de erosión química e hídrica que se correlacionan con las líneas de ruptura y refuerzan la hipótesis de activación preferente en sectores de convergencia de escorrentía.

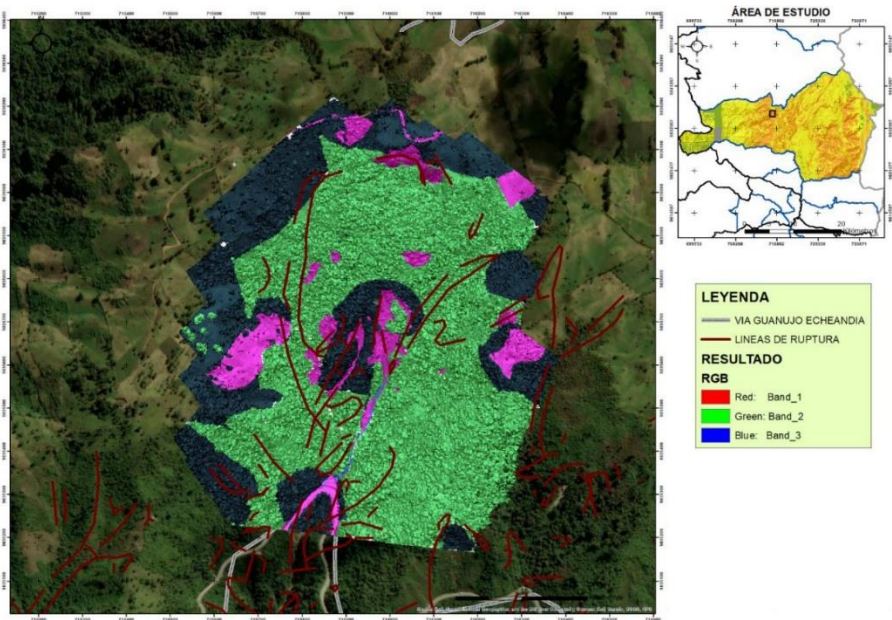


Figura 31. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos y su correlación con líneas de ruptura, sector “Piedra Blanca”.

Fuente: (Castro & Guerrero, 2025).

En términos de exposición, la intersección entre el trazado vial y la zonificación de susceptibilidad permite cuantificar segmentos afectados por clase. En ese sentido, el informe registra, para el corredor analizado, tramos de susceptibilidad alta y media sobre la vía; en cifras de síntesis, se mencionan aproximadamente 7,20 km (alta) y 0,10 km (media) dentro del ámbito de análisis, sustentando la priorización de medidas de intervención y mantenimiento por tramo.

3.4.3 Validación y evaluación de desempeño

En lo que se refiere al método heurístico aplicado, se describe la formulación de ponderaciones tomando en cuenta la metodología

propuesta por Salcedo et al., (2017). Sin embargo, no se documenta un procedimiento cuantitativo de validación predictiva, como, por ejemplo: contraste con inventario independiente, curvas ROC/PR o matriz de confusión. Además, los perfiles geotécnicos sí se someten a revisión paramétrica en dónde se valida el escenario bajo presencia o no de amenaza sísmica. Sin embargo, no se reporta el análisis probabilístico de incertidumbre en parámetros.

3.4.4 Limitaciones del estudio

1. La susceptibilidad depende de cinco factores con pesos fijos, sin exploración de multicolinealidad ni sensibilidad;
2. No se informa de la validación externa con métricas objetivas;
3. El componente determinístico es puntual y no transitorio;
4. La muestra geotécnica es limitada para caracterizar la variabilidad espacial;
5. La estimación sísmica se incluye mediante el coeficiente pseudoestático de la Norma Ecuatoriana de Construcción, pero sin análisis de escenarios;
6. La identificación de elementos expuestos se basa en la superposición de Sistemas de Información Geográficos. Sin embargo, su éxito depende de la calidad geométrica y temporal de la base de datos.

CAPÍTULO IV

4 APLICACIONES PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO Y LINEAMIENTOS OPERATIVOS

En el presente capítulo se abordará la aplicabilidad a nivel de gestión de riesgos de desastres del estudio de la amenaza de movimientos en masa, en dónde toma relevancia que el analizar la amenaza permite generar recursos e insumos para la planificación territorial, debido a que al cartografiar la incidencia de esta amenaza se puede delimitar zonas que no son viables para la construcción. Además, el tener una visión global de la problemática permite la aplicación de medidas de reducción del riesgo de riesgo de desastres y a su vez fomentar procesos de monitoreo de la amenaza por parte de las autoridades locales y nacionales. Por otro lado, los procesos de carácter investigativo son un recurso que brinda apoyo en las actividades de respuesta en dónde la premisa es reducir los tiempos de actuación de las comunidades frente a la materialización de la amenaza.

4.1 Planificación territorial

La gestión de riesgos de desastres en Ecuador ha tomado especial relevancia desde la aprobación de la Ley Orgánica Integral para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres (LOGIRD), en dónde se establece un marco jurídico vinculante que ordena toda la gestión del riesgo en el Ecuador.

A partir de la LOGIRD se definen principios rectores como:

- Autoprotección.

- Descentralización subsidiaria.
- Transparencia.
- Equidad.

Además, se fijan conceptos técnicos como:

- Amenaza.
- Riesgo.
- Vulnerabilidad.
- Resiliencia.

Tomando en consideración la importancia de la presente ley, es relevante mencionar que obliga a transversalizar la prevención, mitigación, preparación, respuesta y recuperación en la planificación y gestión de entidades públicas y privadas. Por otro lado, clarifica competencias entre la rectoría del gobierno central y la acción de los Gobiernos Autónomos Descentralizados. Un hito importante es la creación del Sistema Nacional Descentralizado con sus comités y unidades institucionales, en dónde como premisa se garantiza la seguridad de la población ante el riesgo de desastres. (Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres, 2024). Es importante indicar que, la LOGIRD en conjunto el Marco de Sendai 2015-2030 comparten una visión preventiva y sistémica del riesgo: Sendai desplaza el foco desde la “gestión de desastres” hacia la gestión del riesgo. Cabe indicar

que este marco define siete metas globales e introduce cuatro prioridades de acción como:

- Comprender el riesgo.
- Fortalecer la gobernanza.
- Inversión para la resiliencia.
- Preparar y reconstruir mejor (Naciones Unidas, 2015).

La gestión del riesgo de desastres encuentra en la planificación territorial un escenario privilegiado para traducir diagnósticos técnicos en acciones concretas. En ese sentido, los resultados obtenidos a partir de estudios de amenaza, vulnerabilidad y exposición permiten generar insumos valiosos para orientar las decisiones de ordenamiento, uso y ocupación del suelo. Watson et al. (2022) en su estudio analiza la reducción de riesgos de desastres desde un enfoque de disponibilidad de espacios verdes y su relación con la expansión urbana, esto visto desde la perspectiva que al identificar estos espacios pueden ser utilizados como refugios en situaciones de emergencia, y en caso de que la expansión urbana los elimine, se perdería un espacio clave a nivel de respuesta a emergencias. Por otro lado, la planificación territorial no se limita a un ejercicio normativo, sino que se constituye en una herramienta estratégica para reducir condiciones de riesgo preexistentes y prevenir la generación de nuevos escenarios de amenaza. Tomando como referencia la idea anterior, Dandoulaki et al. (2023) afirma que en el campo de la planificación espacial se destaca la necesidad de métodos

interdisciplinarios y colaborativos con la finalidad de generar procesos de resiliencia y sostenibilidad.

Los resultados derivados de evaluaciones multiescalares, que van desde el nivel local hasta el regional, deben integrarse a los instrumentos de planificación, tales como planes de desarrollo y ordenamiento territorial (PDOT), planes metropolitanos o provinciales, y planes específicos de manejo ambiental. En ese sentido, Lucatello & Alcántara-Ayala, (2024) menciona que las soluciones basadas en la naturaleza como un enfoque para la reducción del riesgo de desastres favorecen a la adaptación al cambio climático mejorando la resiliencia de los ecosistemas. Por otro lado, el proceso de integrar los instrumentos a la planificación nacional, regional o local exige no solo la representación cartográfica de amenazas como inundaciones, deslizamientos o sequías, sino también la consideración de factores socioeconómicos, culturales y ambientales que condicionan la resiliencia de las comunidades.

La incorporación de estos insumos a la planificación territorial implica fortalecer los mecanismos de coordinación interinstitucional. Entidades nacionales, gobiernos autónomos descentralizados y actores comunitarios deben compartir información y responsabilidades en la definición de zonas seguras, áreas de protección ambiental, corredores de evacuación y localización de infraestructuras críticas. Además, la planificación debe ser flexible, con capacidad de actualizarse frente a cambios en el contexto climático, demográfico o económico. En ese contexto, Puente-Sotomayor et al., (2021) menciona que una exigencia actual es la adecuada planificación del uso de la tierra urbana para de esta forma reducir el nivel de riesgo por movimientos en masa y afirma

que muchas regiones de Latinoamérica carecen de acción preventivas a nivel de gestión de riesgos de desastres.

La planificación no puede deslindarse de la gestión de riesgos de desastres, es por ello que se debe articular procesos participativos por parte de las comunidades y los resultados técnicos. Cabe indicar que esto hace alusión que la información técnica que se genere por parte de instituciones que se dedican a la investigación en este campo se ponga a disposición de la colectividad la información técnica. En ese sentido el conocimiento generado se integra con el saber local, construyendo planes territoriales que respondan a las necesidades existentes. En ese sentido, Vasileiou et al., (2022) hace énfasis el valor de incluir y escuchar a las comunidades en la evaluación y gestión del riesgo. Además, el integrar saberes locales con conocimiento científico materializa la participación activa. Ese de relevancia resaltar que, al combinarse, se empodera a las comunidades y se logran intervenciones ajustadas a necesidades y sensibilidades locales.

Finalmente, la planificación territorial debe proyectarse hacia escenarios futuros, considerando el impacto del cambio climático y la creciente presión sobre los recursos naturales. Anticipar posibles dinámicas de expansión urbana, degradación ambiental o incremento en la frecuencia de eventos extremos resulta fundamental para diseñar territorios resilientes, sostenibles y seguros. Paredes et al. (2024) menciona que es importante comprender y abordar los diferentes desafíos asociados a eventos climáticos extremos en el contexto ecuatoriano.

4.2 Medidas de reducción del riesgo

Las medidas de reducción del riesgo de desastres constituyen el núcleo operativo de la gestión integral, ya que convierten los diagnósticos y los planes en acciones concretas que disminuyen la vulnerabilidad y mitigan los efectos de los peligros de origen natural o provocados por el ser humano. Cabe indicar que se debe distinguir entre medidas estructurales y no estructurales, que son complementarias y necesarias para garantizar resultados a largo plazo. En cuanto a las medidas estructurales incluyen obras y adaptaciones físicas, como diques, muros de contención, sistemas de drenaje, refuerzos sísmicos y soluciones basadas en la naturaleza para estabilizar laderas y restaurar ecosistemas. En cuanto a ejemplos prácticos podemos evidenciar tecnologías como: cortinas de guiado, barreras contra desprendimientos, barreras móviles de protección, entre otras.

Por otro lado, las medidas no estructurales incluyen: normativa, ordenamiento del suelo, educación, seguros, incentivos económicos, planificación de emergencias y los sistemas de alerta temprana. A pesar de que la normativa a nivel nacional existe desde el año 2024, es un reto la actualización de ordenanzas y cuerpos normativos por parte de los Gobiernos Autónomos Descentralizados que según la LOGIRD se asigna un plazo de 240 días a partir de aprobación de la ley. Por otro lado, un eje importante de acción es que a partir de la normativa nacional se generen políticas públicas que permitan generar procesos de gobernanza a nivel de gestión de riesgos logrando convertirse en estrategias que sean sostenibles en el tiempo.

Existen varios estudios de caso en donde se evidencia la implementación de estas alternativas como, por ejemplo: en laderas urbanas, drenajes superficiales y subsuperficiales, y detalles constructivos correctos han reducido fallas recurrentes. Por otro lado, la experiencia de Hong Kong documenta cómo el rediseño de cunetas, bajantes y subdrenes, junto con inspección y limpieza, mejora de forma tangible el desempeño de taludes en temporada de lluvias (Hui et al., 2007). En lo que respecta a la estabilidad vial y urbana, los muros de contención y las soluciones de suelo reforzado son habituales. Aunque existen casos de fallos debidos a un diseño o una operación deficientes que sirven de lección, los refuerzos y el control del agua son fundamentales para garantizar su éxito (Alimohammadi & Memon, 2023). En cuanto al peligro fluvial, los diques y las obras de alivio han protegido grandes extensiones, por ejemplo durante la crecida del Misisipi en el 2011, la operación planificada de aliviaderos y cortes controlados del sistema evitó colapsos catastróficos en los centros poblados, lo que ilustra la importancia de tener en cuenta escenarios extremos y establecer protocolos de emergencia (Luna et al., 2007).

La reducción del riesgo exige integrar la equidad y la inclusión social en todas las fases, desde el diseño hasta la ejecución, porque la exposición, la fragilidad y la capacidad de respuesta no se distribuyen por igual. En ese sentido las pruebas muestran que las mujeres y las niñas se enfrentan a cargas desproporcionadas en situaciones de desastre, incluida una mayor vulnerabilidad a la violencia. Por lo tanto, son necesarias que se establezcan estrategias con enfoque de género que vayan más allá de la mera participación y que garanticen recursos, liderazgo y protección efectiva, por ejemplo, servicios de salud sexual y reproductiva y canales

seguros de denuncia. Thurston et al. (2021) menciona que los eventos climáticos extremos y otros peligros naturales son cada vez más frecuentes, intensos y prolongados a nivel global. Entre los factores de riesgo propuestos se incluyen el incremento de los estresores cotidianos, fallas en la aplicación de la ley, mayor exposición a entornos inseguros, profundización de desigualdades de género preexistentes y normas sociales inequitativas.

Por otro lado, las personas con discapacidad informan de barreras físicas, comunicativas e institucionales que les impiden evacuar, acceder a los albergues o recibir información en formatos accesibles. Por ello, la reducción del riesgo de desastres inclusiva para las personas con discapacidad (DiDRR) exige ajustes razonables, señalética accesible, alertas multimodales y la participación de las organizaciones de personas con discapacidad en la toma de decisiones. En el caso de las personas mayores, los efectos adversos son más duraderos, desde el deterioro funcional hasta la mortalidad diferida, por lo que los planes deben incluir registros nominales, apoyo para medicamentos y redes de cuidado vecinal que funcionen cuando se interrumpen los servicios. Cabe indicar que Rafiey et al. (2016) menciona que es pertinente distinguir las dimensiones y tiempos del desastre. En la fase inmediata, las personas mayores sí concentran mayor riesgo por limitaciones sensoriales y físicas, comorbilidades y barreras socioeconómicas que agravan el impacto y dificultan la evacuación, el acceso a medicamentos y la continuidad de cuidados; de hecho, la propia literatura reconoce que los adultos mayores figuran entre los grupos más vulnerables a los impactos inmediatos y a afectaciones de salud física tras desastres naturales. Sin embargo, ser vulnerable no equivale a ser totalmente

frágil ni de manera uniforme. A mediano y largo plazo, algunos estudios muestran que los adultos mayores tienen mejores indicadores de salud mental positiva que las cohortes jóvenes. Esto matiza el panorama y exige políticas diferenciadas por dimensión: física, funcional y psicosocial. En ocasiones, se plantea la comparación entre agudo y recuperación, refiriéndose a lo siguiente: en la fase aguda, que dura horas o semanas, el riesgo para los adultos mayores aumenta debido a las limitaciones motoras y sensoriales, comorbilidades, polifarmacia y obstáculos para moverse o acceder a servicios. Esto se traduce en mayor probabilidad de lesiones, descompensaciones, por ejemplo: interrupción de fármacos crónicos, y mortalidad en el impacto inmediato, en comparación con grupos más jóvenes. Vale mencionar que la literatura documenta que su bienestar físico es más afectado justo después del desastre, debido a disminución de la alerta sensorial, deterioro funcional y condiciones crónicas, además de desventajas socioeconómicas y de acceso. Sin embargo, en la etapa de recuperación a lo largo de meses o años, el escenario se vuelve más matizado: a pesar de que siguen existiendo retos relacionados con vivienda segura, continuidad de cuidados y recursos, diversos estudios muestran que las personas mayores tienen mejores puntuaciones en salud mental positiva que los jóvenes (, lo cual indica una mayor capacidad para regular emociones, afrontar situaciones y "inocularse" debido a vivencias anteriores con estresores. No significa que no haya riesgo, pero sí que la vulnerabilidad psicológica a largo plazo no tiene por qué ser más alta únicamente por el hecho de ser mayor.

La sostenibilidad financiera es un componente esencial para la efectividad de estas medidas. No es suficiente con atender a las

emergencias: para que el riesgo de desastres no sea más un apéndice opcional o que dependa de fondos extraordinarios, la planificación de los presupuestos públicos y privados tiene que incluir la disminución del riesgo de desastres a través de todos sus aspectos. Así, la distribución de recursos permanentes asociados a programas con objetivos e indicadores definidos asegura que la continuidad se mantenga más allá de los períodos de gobierno. Además, es conveniente diversificar las fuentes: presupuestos de varios años, fondos de contingencia, seguros y bonos catastróficos, alianzas entre los sectores público y privado, y tasas o contribuciones destinadas a la prevención y el mantenimiento, cuando proceda. Al mismo tiempo, la cooperación internacional puede aportar financiación en condiciones favorables y asistencia técnica, siempre y cuando esté alineada con las prioridades locales. Por último, la sostenibilidad también implica gastar mejor: realizar análisis de coste-beneficio y de ciclo de vida, etiquetar el gasto en reducción del riesgo y rendir cuentas a la ciudadanía. Asimismo, es apropiado que las fuentes de financiación sean diversas: presupuestos de varios años, fondos de contingencia, seguros y bonos catastróficos, alianzas entre los sectores público y privado y, cuando proceda, tasas o contribuciones destinadas a la prevención y el mantenimiento. La cooperación internacional puede brindar financiación en condiciones favorables y asistencia técnica, siempre alineada con las prioridades locales.

Es conveniente diversificar las fuentes: presupuestos de varios años, fondos de contingencia, seguros y bonos catastróficos, alianzas entre los sectores público y privado y, cuando proceda, tasas o contribuciones destinadas a la prevención y el mantenimiento. Al mismo tiempo, la cooperación internacional puede aportar financiación en condiciones

favorables y asistencia técnica, siempre alineada con las prioridades locales. Por último, la sostenibilidad también implica gastar mejor: realizar análisis de coste-beneficio y de ciclo de vida, etiquetar el gasto en reducción del riesgo y rendir cuentas a la ciudadanía. En resumen, las acciones que disminuyen el riesgo son la conexión entre la planificación y la acción. Son la expresión práctica de la voluntad social y política de reconocer que los fenómenos naturales son inevitables y de comprometerse a minimizar sus efectos adversos lo más posible, a través de intervenciones coordinadas, inclusivas y sostenibles. Asimismo, determinan marcos normativos, financiamiento estable y sistemas de supervisión con indicadores que se pueden verificar para asegurar la mejora y la continuidad. La participación de las comunidades y los actores clave se incluye con una perspectiva interseccional para dar prioridad a aquellos que tienen mayor vulnerabilidad. Igualmente, se fundamentan en la evidencia científica y en el aprendizaje constante, de tal manera que cada acontecimiento robustezca la resiliencia a nivel institucional y comunitario.

4.2.1 Estrategias de intervención del riesgo

En Ecuador, la gestión del riesgo se organiza en tres enfoques complementarios: prospectivo, correctivo y reactivo. En esa línea, la gestión prospectiva opera antes de que surja el riesgo y tiene como objetivo dirigir el desarrollo a través de la zonificación de los usos del suelo, las pautas para ubicar las infraestructuras críticas, la planificación territorial y las regulaciones constructivas apropiadas para el peligro. Asimismo, incluye herramientas como la evaluación estratégica del medio ambiente, el análisis de escenarios de cambio climático y la

protección de los ecosistemas reguladores (bosques y páramos) para impedir que surjan nuevas exposiciones. La gestión correctiva actúa sobre los riesgos que ya han ocurrido en el territorio y mezcla soluciones estructurales y no estructurales, por ejemplo: estabilización y drenaje de taludes, control de erosión, reforestación y recuperación de coberturas, ampliación o reubicación de redes de servicios, refuerzo sísmico de construcciones y, si es necesario, la relocalización con asistencia de asentamientos. Esta gestión se fundamenta en investigaciones técnicas (de vulnerabilidad y amenaza) y en el fortalecimiento del cumplimiento de las normativas. La gestión reactiva, finalmente, se activa en circunstancias de emergencia e incluye la preparación (protocolos, simulacros, alerta temprana), la respuesta a tiempo (búsqueda y rescate, refugios, logística y comunicación de riesgo) y la recuperación integral (rehabilitación y reconstrucción desde el punto de vista de mejorar lo que existía). Estos tres enfoques no son secuencias independientes, sino un sistema integrado que disminuye las pérdidas, fortalece la resiliencia y garantiza un desarrollo seguro y sostenible.

La correcta gestión del riesgo requiere un enfoque integral y proactivo. No es suficiente reaccionar a los desastres con medidas correctivas; es imperativo anticipar los peligros y planificar el desarrollo de manera sostenible para evitar la creación de nuevos riesgos en el futuro. La distinción entre intervención prospectiva y correctiva es la clave para una gestión del riesgo eficaz y a largo plazo.

Dentro de las buenas prácticas para la intervención del riesgo podemos incluir el ejemplo como Colombia que de acuerdo con lo establecido en la Ley 1523 de 2012, la gestión del riesgo se concibe como un proceso

social integrado por tres componentes esenciales: conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres. Su finalidad es salvaguardar la seguridad y el bienestar de las comunidades, mejorar su calidad de vida y aportar al desarrollo sostenible.

Este procedimiento puede dividirse en tres fases principales: el análisis del riesgo, la evaluación del riesgo y las acciones de prevención y mitigación del riesgo. Cada una de estas etapas está compuesta por un conjunto de actividades y procedimientos que pueden llevarse a cabo con distintos grados de complejidad y detalle, en función del carácter y la extensión del estudio.

4.2.2 Análisis del riesgo

El análisis del riesgo integra de manera sistemática la peligrosidad: intensidad, extensión, frecuencia y duración de los eventos, con la vulnerabilidad: susceptibilidad física, fragilidades sociales, capacidad de respuesta y resiliencia; para estimar los daños, costes y pérdidas potenciales en escenarios determinados. Para ello, se parte de la caracterización de las amenazas, por ejemplo: curvas de intensidad-frecuencia, periodos de retorno, mapas de inundación o movimientos en masa y de la exposición mediante inventarios de población, edificaciones, infraestructuras y ecosistemas. Asimismo, se utilizan funciones de daño o curvas de vulnerabilidad que vinculan el nivel de la ocurrencia con el grado de afectación. En términos metodológicos, puede ser abordado cualitativamente a través de matrices de riesgo y juicios expertos. En cambio, de manera semicuantitativa por medio de escalas ordinales, índices compuestos ponderados o, alternativamente,

cuantitativa a través de modelos determinísticos y probabilísticos, dependiendo de los datos existentes y los objetivos de gestión. Para calcular la pérdida anual esperada (AAL) y otras medidas como PML o VaR, se utilizan las simulaciones de Monte Carlo, los árboles lógicos, la inferencia bayesiana y las curvas de excedencia de pérdidas en los métodos probabilísticos. En los enfoques espaciales, es posible combinar capas de amenaza, exposición y vulnerabilidad mediante el uso de SIG y teledetección para crear mapas de riesgo y determinar las intervenciones que tienen prioridad. Asimismo, el estudio incluye la incertidumbre (tanto aleatoria como epistémica) por medio de bandas de confianza, análisis de sensibilidad y escenarios alternativos. Además, toma en cuenta interacciones multiamenaza (cadenas y efectos en cascada) y tendencias del cambio climático que modifican la gravedad y la probabilidad de los sucesos. La validación se basa en registros históricos de eventos, análisis retrospectivos de daños observados y calibración de funciones de daño. La participación de los actores locales complementa la evidencia técnica, mejora la calidad de los inventarios y otorga legitimidad a los resultados. Finalmente, los productos (matrices, mapas, curvas de pérdidas y carteras de medidas) informan la gestión.

4.2.3 Análisis de la amenaza

El estudio de la amenaza contempla tres fases: la construcción de un modelo geológico-geotécnico, la definición de escenarios y la zonificación de la amenaza. El modelo geológico-geotécnico incorpora los elementos que propician inestabilidad, tales como las propiedades geomorfológicas, geológicas y geotécnicas que establecen la inclinación

natural del terreno. A pesar de que las intervenciones humanas muestran fluctuaciones más dinámicas en el tiempo y el espacio, se consideran también como factores condicionantes debido a su impacto en la estabilidad de las laderas.

El análisis produce un mapa de áreas homogéneas, que posibilita la caracterización de zonas con comportamientos parecidos. Elementos como la lluvia intensa o los sismos, que actúan como detonantes, se evalúan en términos probabilísticos para construir escenarios actuales y potenciales de amenaza. Dichos escenarios describen la ubicación, tipología, volumen de material, distancia de recorrido, velocidad y frecuencia de los movimientos, insumos indispensables para vincularse posteriormente con los análisis de vulnerabilidad.

4.2.4 Análisis de la vulnerabilidad

El objetivo del estudio de la vulnerabilidad es averiguar el grado de susceptibilidad de los elementos expuestos a daños y la magnitud espacial en que ocurre dicha susceptibilidad; esto se hace con el propósito de dividir el territorio en zonas categorizadas como de baja, media o alta vulnerabilidad y, por ende, establecer un orden para priorizar las intervenciones. El proceso comienza con un inventario minucioso de la población, de las edificaciones, de los sistemas de energía y agua, del equipamiento educativo y sanitario, de los servicios de emergencia y del transporte. También incluye los medios de vida locales y las aplicaciones del suelo. Después, la fragilidad se evalúa a través de tres conjuntos de variables fundamentales. En primer lugar, la tipología constructiva que abarca los materiales más utilizados, la

cantidad de pisos, el sistema resistente, la regularidad en planta y altura, la antigüedad y el nivel de acatamiento de las normas. En segundo lugar, las circunstancias de exposición, como la densidad poblacional, la proximidad a fuentes de riesgo, la ubicación en planicies propensas a inundaciones o en laderas, las interferencias con cauces o fallas y los patrones temporales de ocupación. En tercer lugar, la resistencia y la capacidad, que incluyen el estado de conservación, el grado de refuerzo, la redundancia de servicios, la accesibilidad, los tiempos de respuesta y la organización a nivel comunitario. Se calculan estados de daño posibles ante intensidades de amenaza definidas, como la aceleración sísmica, el tirante o la velocidad de flujo, o la presión de empuje en laderas, usando funciones de daño y curvas de fragilidad específicas por tipo. Se incorporan estimaciones probabilísticas que muestran variabilidad e incertidumbre cuando es posible, se calibra con inspecciones de campo y registros históricos, y se integra toda la información en sistemas de información geográfica utilizando métodos multicriterio o índices ponderados. El resultado son mapas que indican zonas y redes con más tendencia a sufrir daños e impactos anticipados sobre la vida, la vivienda, los equipos y los medios de subsistencia. Estos mapas sirven para orientar decisiones sobre el fortalecimiento, la reubicación selectiva, la protección de servicios esenciales y las estrategias no estructurales de disminución de vulnerabilidad.

4.2.5 Cálculo del riesgo

El cálculo del riesgo integra de forma operativa la amenaza, la vulnerabilidad, la capacidad y el valor de los elementos expuestos para estimar pérdidas económicas probables por año y población

potencialmente afectada, y para orientar con evidencia las decisiones de gestión territorial y reducción del riesgo. Se parte de escenarios de amenaza que describen intensidad, extensión y frecuencia, se cruzan con inventarios de exposición que detallan personas, viviendas, infraestructura y ecosistemas, y se aplican funciones de daño y de fragilidad que convierten la intensidad del fenómeno en grados de afectación y en costos directos e indirectos. La capacidad se añade a esta base como un elemento moderador que disminuye la probabilidad de daño y la extensión de las pérdidas, las cuales se comprenden como el conjunto de condiciones institucionales, comunitarias, financieras, técnicas y ambientales que permiten prepararse, responder y recuperarse. Se elabora un índice de capacidad para ponerla en funcionamiento, utilizando variables comprobables como la presencia y la cobertura de alerta temprana, la robustez de las redes de protección social y salud, el exceso de infraestructuras críticas, la accesibilidad a través de rutas seguras, la disponibilidad de fondos para contingencias, el grado de organización comunitaria y los conocimientos sobre autoprotección. Este índice se incorpora al modelo en calidad de coeficiente de atenuación, que modera la pérdida anual esperada, la pérdida vinculada a períodos de retorno y los conteos de población expuesta. Así, las áreas con el mismo valor expuesto, la misma amenaza y el mismo grado de vulnerabilidad muestran riesgos diferentes dependiendo del nivel de capacidad. El resultado se presenta en mapas y tablas que indican las pérdidas más grandes esperadas y revelan qué tipos de redes o construcciones predominan el riesgo residual. Además, muestran cómo se disminuye el riesgo al mejorar las capacidades. Con ello se priorizan refuerzos, reubicaciones, obras de control, medidas

normativas, esquemas de aseguramiento y programas de fortalecimiento institucional y comunitario, documentando supuestos, márgenes de incertidumbre y un cronograma de actualización periódica.

4.2.6 Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo traduce el diagnóstico técnico en reglas claras para decidir dónde, cómo y con qué urgencia intervenir, mediante dos acciones centrales que se retroalimentan: la definición de criterios de seguridad, aceptabilidad y tolerancia, y la elaboración de mapas de zonificación del riesgo que clasifican el territorio en alto, medio y bajo. Primero se establecen límites de referencia que incluyen métricas de pérdidas anuales probables, el grado de afectación a la población, la interrupción de servicios fundamentales y los plazos de recuperación, además de tener en cuenta la equidad y la protección de grupos priorizados. Estos criterios se comunican en bandas y escalas que hacen posible determinar si un nivel de riesgo es tolerable bajo ciertas condiciones, aceptable o inaceptable y, por lo tanto, necesita ser reducido sin demora. La aceptabilidad cambia en función de las realidades económicas, sociales y culturales. Por lo tanto, se utilizan indicadores que son comparables entre municipios para tomar decisiones coherentes, como la relación entre el valor de los bienes expuestos y la pérdida anual esperada, la proporción de población vulnerable en zonas con alto riesgo o la parte del presupuesto local que podría estar comprometida por un evento grave. La zonificación del riesgo se lleva a cabo con estos criterios, la cual consiste en combinar mapas de amenaza, vulnerabilidad, capacidad y valor expuesto para diferenciar áreas y categorías con distintos grados de riesgo. Además, se

asigna un portafolio de acciones estructurales y no estructurales a cada categoría. La evaluación incluye análisis de incertidumbre y sensibilidad para prevenir la sobreconfianza y da prioridad a medidas sólidas en diferentes contextos climáticos y de uso del suelo. El resultado es un marco operativo que orienta las restricciones y los permisos de uso del suelo, la inversión en infraestructura, los planes de respuesta y los esquemas de aseguramiento. Además, tiene una ruta para actualizarse regularmente que garantiza la coherencia entre las pautas y el desarrollo del territorio.

4.3 Monitoreo y alerta temprana

La columna vertebral de la gestión operativa del riesgo está constituida por el monitoreo y los sistemas de alerta temprana, pues posibilitan anticipar la ocurrencia de sucesos peligrosos y poner en marcha reacciones adecuadas para proteger vidas y bienes. Asimismo, incorporan tecnologías de vigilancia, que van desde sensores en el lugar hasta radares y satélites, junto con protocolos institucionales transparentes y sistemas de comunicación social confiables. Así, no solo identifican indicios tempranos, sino que además establecen quién toma las decisiones, cómo se coordinan y a quiénes se les informa. En ese sentido, la vigilancia deja de ser episódica y se transforma en una red persistente que aprende de cada suceso, ajusta los umbrales y optimiza los procedimientos. No obstante, su efectividad está condicionada por la calidad de los datos, la interoperabilidad entre las instituciones y la confianza que tenga la comunidad en los canales de aviso. Por lo tanto, es tan relevante como la tecnología en sí misma el fortalecer las capacidades locales, realizar simulacros y conservar mensajes sencillos

y coherentes. Así, la alerta se convierte en una acción preventiva y efectiva.

El seguimiento comprende la recopilación constante de datos sobre el clima, el agua, la geología y el medioambiente a través de radares, estaciones automáticas, sistemas satelitales y sensores remotos. En centros especializados, esta información se transmite y consolida en tiempo real, utilizando modelos predictivos para prever el desarrollo de erupciones volcánicas, crecidas de ríos, tormentas severas y movimientos en masa. Así, no solo se observa lo que sucede, sino también lo que podría suceder en las horas o días siguientes. Los equipos técnicos, por otro lado, validan y depuran la información para disminuir los errores y calibrar los parámetros y límites de acuerdo con el entorno local. No obstante, la utilidad del sistema depende de la calidad, continuidad e interoperabilidad de las fuentes; por ello, la calibración periódica, el mantenimiento y la redundancia de sensores son indispensables. Finalmente, cuando los modelos convergen y la señal de riesgo es clara, la información se traduce en alertas oportunas y comprensibles, capaces de activar protocolos de respuesta y proteger a la población con decisiones fundamentadas.

El sistema de alerta temprana se basa en cuatro elementos fundamentales que se interrelacionan: la identificación y el monitoreo del peligro, el análisis de riesgos, la divulgación de información y la capacidad de respuesta ciudadana. Sin embargo, para prevenir errores que pongan en peligro la eficacia del conjunto, es esencial que cada eslabón funcione de manera coordinada. Por ejemplo, si una alerta técnicamente perfecta no se entrega a las comunidades en riesgo a

tiempo o, peor todavía, si estas no saben qué acciones específicas tienen que tomar, pierde su valor. Por lo tanto, es fundamental que, además de medir y modelar, los resultados se traduzcan en mensajes simples, relevantes y apropiados desde el punto de vista cultural. Además, la capacitación de la comunidad a través de protocolos claros, simulacros y educación fortalece la última etapa de alerta. Finalmente, la retroalimentación posterior a cada evento facilita el ajuste de límites, la mejora de las vías de comunicación y la definición de los roles institucionales. En síntesis, si estos cuatro elementos se encuentran unidos de manera continua y fiable, la alerta se transforma en una acción preventiva que salva vidas.

La difusión de alertas ha aumentado significativamente gracias al empleo de tecnologías de la información y la comunicación; por lo tanto, se combinan mensajes de texto, redes sociales, aplicaciones móviles, radio local y sistemas comunitarios de sirenas para que el aviso sea claro y llegue a quienes lo requieren con rapidez. Asimismo, los altavoces barriales y las pantallas electrónicas en las vías ayudan a consolidar la "última milla" cuando hay poca conectividad. No obstante, la tecnología no asegura la eficacia por sí misma: si no hay educación o organización social, una notificación puede ser ignorada o causar confusión. Por lo tanto, es fundamental robustecer la alfabetización en riesgo y establecer protocolos sencillos como: ¿qué hacer?, ¿a dónde ir? y ¿a quién notificar? Además, practicarlos de manera regular a través de simulacros. Además, es conveniente diversificar los canales para garantizar redundancia y considerar tanto idiomas como culturas locales, así como formatos accesibles para personas con discapacidad o

de edad avanzada. Así, la señal de alarma se transforma en una acción concreta, puntual y segura para la comunidad.

Un elemento fundamental es que la comunidad participe en el diseño y funcionamiento de los sistemas de alerta. No solo brinda manos y ojos en el terreno, sino también criterios pragmáticos acerca de cómo, cuándo y a quién notificar. De esta manera, la participación de actores locales en el establecimiento y mantenimiento de estaciones, en la verificación de datos (por ejemplo, niveles del río y lluvias fuertes) y en la difusión de mensajes refuerza la responsabilidad compartida y, más que nada, la confiabilidad de las alertas. Asimismo, las brigadas comunitarias y los comités barriales contribuyen a establecer puntos de reunión, rutas de evacuación y funciones específicas por vivienda, lo que disminuye la improvisación. Por otro lado, el conocimiento local de los ciclos estacionales y las señales medioambientales que complementan la tecnología y posibilitan la adecuación de protocolos y umbrales a la situación real del territorio. Además, procesos de participación tales como la elaboración colectiva de mapas, los simulacros y las evaluaciones posteriores a los eventos producen un aprendizaje constante.

No solo los modelos y los sensores determinan la efectividad de los sistemas de alerta temprana y monitoreo, sino también cómo estos se integran con la población y sus circunstancias. Cuando se asegura la inclusión, teniendo en cuenta la edad, el género y la discapacidad, y se fijan mecanismos de retroalimentación precisos, el sistema aprende, se corrige a sí mismo y se torna más sólido, relevante y sustentable. Asimismo, si los actores locales se involucran en la difusión de

mensajes, en la verificación de datos y en el mantenimiento elemental, la credibilidad se incrementará y la respuesta será más rápida. Simultáneamente, la redundancia de los canales de comunicación, la interoperabilidad entre instituciones y la calidad de los datos aseguran que una señal de riesgo se transforme oportunamente en acciones específicas, como el cierre de un segmento vial, la evacuación o la protección de servicios esenciales. Ahora bien, estos sistemas no eliminan la ocurrencia de desastres, pero reducen de manera significativa sus impactos al acortar el tiempo entre la detección y la acción. Por tanto, constituyen una inversión estratégica en prevención que exige actualización tecnológica continua, financiación estable y, sobre todo, el compromiso continuado de la sociedad en su conjunto. En resumen, con inclusión, aprendizaje y recursos, la alerta deja de ser un aviso aislado y se transforma en protección efectiva.

BIBLIOGRAFÍAS

- Adeoti, G. O., Agbelele, J. K., Yabi, C. P., Kinhoun, R. N., & Alamous, É. A. (2023). Strategies for Advancing Road Construction Slope Stability: Unveiling Innovative Techniques for Managing Unstable Terrain. *Open Journal of Civil Engineering*, 13(4), 572-616. <https://doi.org/10.4236/ojce.2023.134041>
- Ado, M., Amitab, K., Maji, A. K., Jasińska, E., Gono, R., Leonowicz, Z., & Jasiński, M. (2022). Landslide Susceptibility Mapping Using Machine Learning: A Literature Survey. *Remote Sensing*, 14(13), 3029. <https://doi.org/10.3390/rs14133029>
- Alimohammadi, H., & Memon, A. A. (2023). Case Study of Mechanically Stabilized Earth (MSE) Retaining Wall Failure in the State of Tennessee; Recommendations for Future Design and Constructions. *Journal of Civil Engineering Researchers*, 5(1), 52-65. <https://doi.org/10.61186/JCER.5.1.52>
- Amangandi, M., & Bayas, J. (2024). *Estudio de la vulnerabilidad física de las edificaciones ubicadas en la colina “San Bartolo” del cantón Guaranda frente a la ocurrencia de deslizamientos, en el periodo septiembre–diciembre 2024* [Tesis de grado, Universidad Estatal de Bolívar; Facultad de Ciencias de la Salud y del Ser Humano: Carrerta de Ingeniería en Riesgos en Desastres]. <https://dspace.ueb.edu.ec/items/9c1d0aa6-7d8f-455a-b43b-8bbd23839eef>

- Aristizábal, E., Martínez, H., & Vélez, J. I. (2010a). UNA REVISIÓN SOBRE EL ESTUDIO DE MOVIMIENTOS EN MASA DETONADOS POR LLUVIAS. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(131), 209-227. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.34\(131\).2010.2413](https://doi.org/10.18257/raccefyn.34(131).2010.2413)
- Aristizábal, E., Martínez, H., & Vélez, J. I. (2010b). Una Revisión sobre el estudio de movimietnos en masa detonados por lluvias. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(131), 209-227. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.34\(131\).2010.2413](https://doi.org/10.18257/raccefyn.34(131).2010.2413)
- Ávila, G., & Cubillos, C. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa: Escala detallada*. Servicio Geológico Colombiano.
- Bastardo, C. (2023, octubre 13). [Guía práctica] Análisis de Estabilidad de Taludes (Fellenius y Bishop). *Sismica Institute*. <https://sismica-institute.com/guia-practica-analisis-de-estabilidad-de-taludes-fellenius-bishop/>
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2002). TRIGRS; a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. *Open-File Report*, Article 2002-424. <https://doi.org/10.3133/ofr02424>
- Berenguer, I. F., Haramboure, Y. G., & Tristá, J. G. (2022). Estabilidad de taludes en presas de tierra considerando el ángulo de succión del suelo no saturado. *Ingeniería y Desarrollo*, 40(1), 71-91.

- Berti, M., Martina, M. L. V., Franceschini, S., Pignone, S., Simoni, A., & Pizziolo, M. (2012). Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research (Earth Surface)*, 117, F04006. <https://doi.org/10.1029/2012JF002367>
- Bonilla, J. L., & Castro, F. M. (2025). *Análisis de movimientos en masa y susceptibilidad de elementos expuestos en el barrio América del cantón San Miguel, provincia Bolívar, 2024* [Universidad Estatal de Bolívar; Facultad de Ciencias de la Salud y del Ser Humano Carrera de Ingeniería en Riesgos de Desastres]. <https://dspace.ueb.edu.ec/handle/123456789/8228>
- Borja, C. (2023). *El desastre de La Comuna y La Gasca*. Saramanka Warmikuna.
- Cao, Y., Wei, X., Fan, W., Nan, Y., Xiong, W., & Zhang, S. (2021). Landslide susceptibility assessment using the Weight of Evidence method: A case study in Xunyang area, China. *PLOS ONE*, 16(1), e0245668. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245668>
- Castro, I. R., & Guerrero, M. J. (2025). *Análisis de susceptibilidad ante deslizamientos y sus afectaciones a los elementos expuestos en la vía Guanujo-Echeandía sector Piedra Blanca, en el periodo septiembre – diciembre 2024* [Universidad Estatal de Bolívar; Facultad de Ciencias de la Salud y del Ser Humano: Carrera de Ingeniería en Riesgos en Desastres]. <https://dspace.ueb.edu.ec/handle/123456789/8254>

- Corpoboyacá. (2020, noviembre 27). *ABC Lo que debes saber sobre los movimientos en masa*. Corpoboyacá. <https://www.corpoboyaca.gov.co/noticias/abc-lo-que-debes-saber-sobre-los-movimientos-en-masa/>
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43(1), 27-29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Dandoulaki, M., Lazoglou, M., Pangas, N., & Serraios, K. (2023). Disaster Risk Management and Spatial Planning: Evidence from the Fire-Stricken Area of Mati, Greece. *Sustainability*, 15(12), 9776. <https://doi.org/10.3390/su15129776>
- Depicker, A., Govers, G., Jacobs, L., Campforts, B., Uwihirwe, J., & Dewitte, O. (2021). Interactions between deforestation, landscape rejuvenation, and shallow landslides in the North Tanganyika–Kivu rift region, Africa. *Earth Surface Dynamics*, 9(3), 445-462. <https://doi.org/10.5194/esurf-9-445-2021>
- Dietrich, W. E., Bellugi, D., & Real De Asua, R. (2001). Validation of the Shallow Landslide Model, SHALSTAB, for forest management. En M. S. Wigmosta & S. J. Burges (Eds.), *Water Science and Application* (Vol. 2, pp. 195-227). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/WS002p0195>
- Duque Escobar, G. (2024). *Manual de geología para ingenieros*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3145>

- Elmoulat, M., Brahim, L. A., Elmahsani, A., Abdelouafi, A., & Mastere, M. (2021). Mass movements susceptibility mapping by using heuristic approach. Case study: Province of Tétouan (North of Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00192-0>
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- GEO 5. (2025). *Soluciones | GEO5 Software Geotécnico*. <https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/soluciones/>
- Gill, J. C., & Malamud, B. D. (2017). Anthropogenic processes, natural hazards, and interactions in a multi-hazard framework. *Earth-Science Reviews*, 166, 246-269. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.002>
- Graw, V., Dedring, T., Hiby, R., Jara-Alvear, J., Guzman, P., & Juergens, C. (2022). Regressive Erosion at River Coca in Northeast Ecuador: Landslide Monitoring with Sentinel-1 to Support Disaster Risk Management. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 90(5), 457-471. <https://doi.org/10.1007/s41064-022-00221-z>
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1), 272-299. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>

- Hui, T. H. H., Sun, H. W., & Ho, K. K. S. (2007). *REVIEW OF SLOPE SURFACE DRAINAGE WITH REFERENCE TO LANDSLIDE STUDIES AND CURRENT PRACTICE* (No. 210). The Government of the Hong Kong Special Administrative Region.
- Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2025). *Mapas Temáticos 1'1000.000* –. <https://www.geoenergia.gob.ec/mapas-tematicos-11000-000/>
- Isola, F., Lai, S., Leone, F., & Zoppi, C. (2023). Land Take and Landslide Hazard: Spatial Assessment and Policy Implications from a Study Concerning Sardinia. *Land*, *12*(2), 359. <https://doi.org/10.3390/land12020359>
- Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, *36*(7), 1897-1910. <https://doi.org/10.1029/2000WR900090>
- Keefer, D. K. (2002). Investigating Landslides Caused by Earthquakes – A Historical Review. *Surveys in Geophysics*, *23*(6), 473-510. <https://doi.org/10.1023/A:1021274710840>
- Lee, C.-T. (2014). Statistical seismic landslide hazard analysis: An example from Taiwan. *Engineering Geology*, *182*, 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.023>
- Lee, C.-T., Huang, C.-C., Lee, J.-F., Pan, K.-L., Lin, M.-L., & Dong, J.-J. (2008). Statistical approach to storm event-induced landslides susceptibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *8*(4), 941-960. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-941-2008>

- Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres, 488 55 (2024). https://ip-lexis-com-ec.ezbiblio.usfq.edu.ec/sistema/visualizador-norma/GOBIERNO-LEY_ORGANICA_PARA_LA_GESTION_INTEGRAL_DEL_RIESGO_DE_DESASTRES
- Lin, G.-F., Chang, M.-J., Huang, Y.-C., & Ho, J.-Y. (2017). Assessment of susceptibility to rainfall-induced landslides using improved self-organizing linear output map, support vector machine, and logistic regression. *Engineering Geology*, 224, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.05.009>
- Lombardo, L., Opitz, T., Ardizzone, F., Guzzetti, F., & Huser, R. (2020). Space-time landslide predictive modelling. *Earth-Science Reviews*, 209, 103318. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103318>
- Lucatello, S., & Alcántara-Ayala, I. (2024). Sustainable Synergy: Strengthening disaster risk reduction in Latin America and the Caribbean through nature-based solutions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 113, 104860. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104860>
- Luna, R., Summers, D., Hoffman, D., Rogers, D., Sevi, A., & Witt, E. (2007). *Geotechnical Reconnaissance of the Mississippi River Delta Flood-protection System After Hurricane Katrina* (Circular) [Circular]. USGS.

- Machado do Pinho, T., & Filho, O. (2022). Landslide susceptibility mapping using the infinite slope, SHALSTAB, SINMAP, and TRIGRS models in Serra do Mar, Brazil. *Journal of Mountain Science*, 19(4), 1018-1036. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7057-z>
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>
- Naciones Unidas. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030* (No. A/RES/69/283). Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR). <https://www.undrr.org/es/framework-marco-de-sendai-para-la-reduccion-del-riesgo-de-desastres-2015-2030>
- National Research Council, & Division on Engineering and Physical Sciences. (1991). *March 5, 1987, Ecuador Earthquakes: Mass Wasting and Socioeconomic Effects*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/1857>
- Pack, R., & Tarboton, D. (2025). *Sinmap 2.0 For ArcGIS 9.x*. <https://hydrology.usu.edu/sinmap2/>
- Paredes, D., Palacios, J., & Montero, J. (2024). Análisis de la vulnerabilidad de infraestructuras críticas como represas, puentes y carreteras ante eventos asociados al fenómeno de: El Niño –

Oscilación Sur en la Costa ecuatoriana. *AlfaPublicaciones*, 6(1.1), 45-61. <https://doi.org/10.33262/ap.v6i1.1.454>

Paredes, D. S., Rivera, E. F., Baldeón-Egas, P., & Toasa, R. M. (2025). The Multiscale Assessment of Infrastructure Vulnerability to River Floods in Andean Areas: A Case Study of the Chibunga River in the Parish of San Luis, Ecuador. *Sustainability*, 17(17), 7915. <https://doi.org/10.3390/su17177915>

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

Quinatoa, D., & Sisa, T. (2024). *Análisis de estabilidad de taludes ante la amenaza de deslizamiento del cerro Cuchicahua parroquia central del cantón Chillanes, en el periodo septiembre—Diciembre 2024* [Tesis de grado]. Universidad Estatal de Bolívar; Facultad de Ciencias de la Salud y del Ser Humano: Carrerta de Ingeniería en Riesgos en Desastres.

Rafiey, H., Momtaz, Y. A., Alipour, F., Khankeh, H., Ahmadi, S., Sabzi Khoshnami, M., & Haron, S. A. (2016). Are older people more vulnerable to long-term impacts of disasters? *Clinical Interventions in Aging*, 11, 1791-1795. <https://doi.org/10.2147/CIA.S122122>

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility

models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60-91.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176.
[https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

Salcedo, D., Padilla, O., Morales, B., & Toulkeridis, T. (2017). Evaluación de susceptibilidad a deslizamientos mediante lógica fuzzy y técnicas de evaluación multicriterio en la avenida Simón Bolívar, Quito. *Revista Geoespacial*, 14(2), 1-20.

Sánchez Keane, N. (2019). Evaluación de métodos para la gestión y evaluación de riesgos a deslizamientos en la subcuenca del río gatún, utilizando sig. *Centros: Revista Científica Universitaria*, 8(2), 10-21.

Secretaría Nacional de Planificación. (2024). *Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024—2025, Eje de Gestión de Riesgos* (p. 53).
<https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/2024/05/PND24-25Eje5.pdf>

Secretaría Nacional de Planificación. (2025). *Plan Nacional de Desarrollo 25—29 Ecuador no se detiene*. Secretaría Nacional de Planificación.
https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/2025/08/PlanNacionalDeDesarrollo25-29_EcuadorNoSeDetiene.pdf

Segoni, S., Tofani, V., Rosi, A., Catani, F., & Casagli, N. (2018). Combination of Rainfall Thresholds and Susceptibility Maps for

Dynamic Landslide Hazard Assessment at Regional Scale. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00085>

Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias – SNGRE. (2022). *Metodología de susceptibilidad / amenaza ante movimientos en masa*. Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias – SNGRE. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec>

Stralen, H. (2015). *Metodologías para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa*. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.

Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Thurston, A. M., Stöckl, H., & Ranganathan, M. (2021). Natural hazards, disasters and violence against women and girls: A global mixed-methods systematic review. *BMJ Global Health*, 6(4). <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2020-004377>

Varnes, D. (1978). Slope Movement types and processes. *Transportation Research Board Special Report*, 11-33.

Vasileiou, K., Barnett, J., & Fraser, D. S. (2022). Integrating local and scientific knowledge in disaster risk reduction: A systematic review of motivations, processes, and outcomes. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 81, 103255. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103255>

Watson, C. S., Elliott, J. R., Ebmeier, S. K., Vásquez, M. A., Zapata, C., Bonilla-Bedoya, S., Cubillo, P., Orbe, D. F., Córdova, M., Menoscal, J., & Sevilla, E. (2022). Enhancing disaster risk resilience using greenspace in urbanising Quito, Ecuador. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(5), 1699-1721. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1699-2022>

Zighmi, K., Zahri, F., Faqeih, K., Al Amri, A., Riheb, H., Alamri, S. M., & Alamery, E. (2025). AHP multi criteria analysis for landslide susceptibility mapping in the Tellian Atlas chain. *Scientific Reports*, 15(1), 25747. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10819-z>



Movimientos en masa: fundamentos, evaluación de la amenaza y aplicaciones, se publicó en el mes de diciembre de 2025.

ISBN: 978-9907-0-0557-8

**Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
[https://grupobl.com/
publicaciones@grupobl.com](https://grupobl.com/publicaciones@grupobl.com)**

BIOGRAFÍA DE LOS AUTORES

Daniel Santiago Paredes Gaibor:

Trabajó en la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas de Quito, Gourmet Food Transformando sus publicaciones en referencias mundiales Service GFS S.A. y Trade Alliance Corporation, con un enfoque en la seguridad ocupacional y la gestión ambiental. Actualmente, es docente en la Universidad Estatal de Bolívar, en la carrera de Ingeniería en Riesgos de Desastres.

Johanna Fernanda Dueñas Durán:

Ingeniera en Geología, con más de 15 años de experiencia en el sector petrolero y educación, especializada en el análisis de rípios y en el uso de software para control litológico. Complementó su formación con una maestría en Prevención y Gestión de Riesgos en el IAEN.

MOVIMIENTOS EN MASA: FUNDAMENTOS, EVALUACIÓN DE LA AMENAZA Y APLICACIONES

Estimado lector, este texto analiza los movimientos en masa en Ecuador como un desafío geológico crítico que requiere una gestión integral entre el Estado, la academia y la comunidad. El autor advierte sobre la peligrosidad de la expansión urbana en zonas inestables y la necesidad de superar la falta de conocimiento técnico para evitar la construcción social del riesgo. Mediante el uso de tecnologías avanzadas como los sistemas de información geográfica y el análisis histórico de desastres, el documento propone fortalecer la gobernanza y la planificación territorial para reducir la vulnerabilidad de las poblaciones. Se concluye que el estudio de esta amenaza es vital para la resiliencia del país, dado que los registros históricos muestran una alta recurrencia de estos eventos en el territorio nacional.

Agradecemos a todos los lectores que se acercan a esta obra con ánimo de aprender, aplicar y transformar.



UEB
UNIVERSIDAD
ESTATAL DE BOLIVAR

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
[https://grupobl.com/
publicaciones@grupobl.com](https://grupobl.com/publicaciones@grupobl.com)

ISBN: 978-9907-0-0557-8

