

Universidad Andina Simón Bolívar

Sede Ecuador

Área de Gestión

Maestría Profesional en Gestión del Riesgo de Desastres

**Análisis de susceptibilidad a deslizamientos aplicado a grupos
socioeconómicos vulnerables, mediante Máxima entropía (MaxEnt), en
las parroquias: Cuenca, Nulti, Paccha, El Valle y Turi, del cantón
Cuenca**

Ricardo Adolfo Rodas Toral

Tutor: Fernando Mauricio Pavón Cevallos

Quito, 2025

Trabajo almacenado en el Repositorio Institucional UASB-DIGITAL con licencia Creative Commons 4.0 Internacional		
	Reconocimiento de créditos de la obra	
	No comercial	
	Sin obras derivadas	
Para usar esta obra, deben respetarse los términos de esta licencia		

Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Ricardo Adolfo Rodas Toral, autor del trabajo intitulado “Análisis de Susceptibilidad a deslizamientos aplicado a grupos socioeconómicos vulnerables, mediante Máxima entropía (MaxEnt), en las parroquias: Cuenca, Nulti, Paccha, El Valle y Turi, del cantón Cuenca”, mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster en Gestión del Riesgo de Desastres en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

25 de abril de 2025

Firma: _____

Resumen

La presente tesis tiene como objetivo principal evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en las parroquias Cuenca, Nulti, Paccha, El Valle y Turi, del cantón Cuenca, mediante el uso de modelos predictivos basados en el enfoque de máxima entropía (MaxEnt), incorporando variables físicas del terreno y factores socioeconómicos, en particular la distribución de los bonos de desarrollo humano. Esta integración busca generar mapas de susceptibilidad que no solo reflejen las condiciones geológicas y morfológicas del territorio, sino también la vulnerabilidad social de los grupos más expuestos a estos fenómenos naturales. La metodología adoptada combina herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) con técnicas de modelado probabilístico basadas en aprendizaje automático. Se utilizaron capas de entrada físicas (pendiente, litología, cobertura del suelo, índices derivados de modelos digitales del terreno, entre otras), además de datos socioeconómicos provenientes del Ministerio de Inclusión Económica y Social (MIES). El inventario de deslizamientos validado por la Universidad del Azuay fue clave como base para la calibración y validación del modelo, utilizando el índice AUC (Área Bajo la Curva) para evaluar su precisión. Los resultados demuestran que la incorporación de variables socioeconómicas mejora la precisión del modelo de susceptibilidad a deslizamientos, permitiendo identificar zonas donde la exposición al riesgo se ve amplificada por las condiciones de pobreza. Se concluye que el enfoque integrado de factores físicos y sociales proporciona una herramienta más completa para la gestión de riesgo de desastres, facilitando la priorización de zonas de intervención y la formulación de políticas públicas orientadas a la reducción del riesgo, especialmente en contextos urbanos en expansión y con alta desigualdad social.

Palabras clave: susceptibilidad, deslizamientos, vulnerabilidad socioeconómica, máxima entropía, análisis espacial

A mi esposa Daniela Flores y a Daniel, por su apoyo y amor, necesarios para culminar con éxito este reto.

Al equipo del IERSE de la Universidad del Azuay, por su ayuda y recomendaciones, en búsqueda de obtener la información y el conocimiento necesarios para el desarrollo de tesis.

A Fernando Pavón, por la ayuda brinda durante el proceso de titulación.

Tabla de contenidos

Introducción.....	13
Capítulo primero.....	21
1. Introducción a los riesgos de desastres.....	21
2. Los deslizamiento, características y tipos.....	25
2.1. Clasificación morfológica de un deslizamiento	26
2.2. Clasificación de los deslizamientos.....	27
3. Susceptibilidad	34
4. Capas de información	38
4.1. Modelo digital de elevaciones.....	39
4.2. Curvatura.....	40
4.3. Aspectos	40
4.4. Distancia a ríos	40
4.5. Pendientes.....	40
4.6. Cobertura del suelo.....	41
4.7. Litología	41
4.8. Stream power index (SPI)	41
4.9. Topographic Wetness Index (TWI).....	42
4.10. Terrain Rouggedness Index (TRI).....	42
4.11. Topographic Position Index (TPI).....	42
4.12. Sediment transport index (STI).....	42
4.13. Radiación solar	43
5. Inventario de deslizamientos	43
6. El método MaxEnt de máxima entropía	46
7. Bonos de desarrollo humano	49
7.1. Los bonos de desarrollo humano.....	49
Capitulo segundo	53
1. Construcción de cartografía e información base en SIG	53
2. Sistematización de un inventario de deslizamientos en SIG	59
3. Uso de datos sobre bonos para la población vulnerable en SIG.....	62
4. <i>Software</i> de máxima entropía (MaxEnt)	65
4.1. Datos de entrada tipo punto.....	65
5. Capas de información en formato ASCII	66

6. Preparar el <i>software</i> MaxEnt	68
Capítulo tercero	71
1. Resultados.....	71
1.1. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos para las parroquias Cuenca, Nulti, Paccha, El Valle y Turi del cantón Cuenca.....	71
1.2. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos, incorporando una variable socioeconómica	73
1.3. Análisis ROC y AUC	77
1.4 Gráfica de Jackknife.....	81
2. Discusiones	82
Conclusiones.....	87
Listado de referencias	90

Figuras y tablas

Figura 1. Partes de un deslizamiento de tierra.....	27
Figura 2. Caídas.....	28
Figura 3. Deslizamiento rotacional.....	29
Figura 4. Deslizamiento traslacional	30
Figura 5. Deslizamiento lateral.....	31
Figura 6. Reptación	32
Figura 7. Corrientes.	33
Figura 8. Inventario de deslizamientos 2021.....	45
Figura 9. Diagrama de flujo para proceso MaxEnt	48
Figura 10. Capas de información para el modelo MaxEnt	59
Figura 11. Deslizamientos por parroquia	60
Figura 12. Tipos de deslizamiento.....	61
Figura 13. Inventario de deslizamientos con áreas de influencia 2021	62
Figura 14. Personas en condiciones de pobreza en Cuenca	64
Figura 15. Bono de desarrollo humano e inventario de deslizamientos para la parroquia El Valle y Turi	66
Figura 16. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos con una variable socioeconómica	74
Figura 20. Cuerva AUC.....	79
Figura 21. Gráfica de jackknife	82
Figura 22. Deslizamiento Paccha junio 2025.....	89
Tabla 1 Partes de un deslizamiento	26
Tabla 2 Criterios para categorización de susceptibilidad	35
Tabla 3 Criterios para acceder al bono de desarrollo humano	51
Tabla 4 Descripción de las variables para modelamiento de susceptibilidad a deslizamientos	55
Tabla 5 Insumos para la determinación de susceptibilidad	67
Tabla 6 Contribución de las variables del modelo de susceptibilidad a deslizamientos	80

Introducción

Los deslizamientos a lo largo de la historia han representado un riesgo latente para las poblaciones cercanas a estos fenómenos naturales. La ocurrencia de deslizamientos está vinculada a una serie de problemas que generan cambios significativos en la vida de las personas que residen en zonas propensas a estos eventos. En el cantón Cuenca, hasta la fecha, no se ha llevado a cabo un análisis adecuado para identificar las áreas más susceptibles a la aparición de estos fenómenos. Los análisis realizados se han centrado en criterios generales, sin tomar en cuenta que la susceptibilidad es una propiedad del terreno que indica la propensión de las condiciones locales para que ocurran deslizamientos (Suarez 2009).

La susceptibilidad está influenciada por una serie de factores que pueden modificarla y ampliarla en el territorio. Estos factores incluyen las características morfológicas del suelo, su composición y caracterización, así como los sistemas dinámicos que ocurren en él. Además, no se pueden obviar los factores socioeconómicos y los grupos vulnerables presentes en la zona ya que todos estos elementos interactúan para determinar la posible ocurrencia de un deslizamiento y su potencial magnitud, traduciéndose en posibles daños e impactos sobre estos grupos vulnerables.

En este sentido, es crucial llevar a cabo un análisis más exhaustivo y detallado de la susceptibilidad a deslizamientos en el cantón Cuenca, incorporando tanto los aspectos geológicos, geográficos, etc. que puedan influir en la aparición y magnitud de estos eventos. Con una comprensión de la susceptibilidad, será posible implementar medidas preventivas y de mitigación más efectivas para proteger a la población y reducir el impacto de los deslizamientos en el futuro.

Sin embargo, además de estos factores, existen términos y eventos socioeconómicos que pueden afectar a la población y su capacidad de paliar los efectos de un deslizamiento, los cuales pueden ser medidos dentro de un análisis de susceptibilidad, pues la susceptibilidad también puede ser medida desde una situación social, donde las personas han visto deteriorada sus condiciones de vida y sus capacidades de subsistencia, en el que pueden darse condiciones de difícil acceso a los servicios públicos, presentando un ambiente debilitado y con un alto riesgo de perder sus bienes, propiedades o su sistema de sustento o de su familia (UNIR 2024).

El cantón Cuenca se encuentra ubicado al sureste del Ecuador en la sierra austral ecuatoriana. Se caracteriza por estar asentado en un valle interandino con una variada geología, una morfología donde predominan las pendientes y un clima muy cambiante, con fuertes temporales invernales y prolongadas lluvias, así como periodos de sequía. Estos factores, entre otros, condicionan y son detonantes para que se origine fenómenos de deslizamientos dentro del territorio, los cuales causan cientos de miles de dólares en daños y pérdidas, así como temor de la población. Pues los deslizamientos tienen efectos negativos significativos en los asentamientos y la vida humana, especialmente cuando los volúmenes movilizados son grandes y la velocidad de salida es alta (Di Napoli et al. 2022).

Parte de la susceptibilidad a deslizamientos viene dada por factores morfológicos y también por el número de personas que se encuentran asentadas en zonas conocidas por muchos años como inestables, en las cuales se da la presencia de ciertos grupos de alta vulnerabilidad, producto de brechas socioeconómicas. Aproximadamente 20 474 habitantes, que corresponde al 3,27 % de la población cantonal, habitan en zonas que se han identificado como alta y muy alta susceptibilidad a deslizamientos (Municipio de Cuenca 2022). Estos grupos usualmente se encuentran asentados en zonas de mayor peligro, como quebradas, litologías más propensas a generar inestabilidad, altas pendientes, alterando de manera significativa su factor de susceptibilidad. Estas características intrínsecas propias del territorio indican una susceptibilidad alta y si se añade una componente donde los asentamientos humanos, no cuentan con las capacidades necesarias para afrontar los desafíos de los fenómenos naturales, su susceptibilidad va ser aún más alta.

La vulnerabilidad social y susceptibilidad morfológica ha sido acentuada por el fenómeno del cambio climático, siendo las sequías más largas, con temperaturas altas y los inviernos más cortos, pero con precipitaciones más fuertes, que sobrepasan los datos históricos (Costa 2023). El clima no es un parámetro puntual, sino que se describe en términos de media y variabilidad a escala de tiempo determinada y estándar de temperatura, precipitaciones y vientos (Useros 2012). Este fenómeno de cambio climático está generando variaciones significativas en la ocurrencia de desastres. Los deslizamientos tienen como factor detonante las precipitaciones y en zonas de cordillera, ubicación del cantón Cuenca, estas lluvias pueden presentarse en gran cantidad y afectar a la estabilidad del suelo, lastimosamente no se han realizado mayores estudios sobre patrones de lluvia o cálculo de mapas de precipitación a escalas pequeñas, pues la falta

de datos ha sido una limitante para el cantón. Sin embargo, no se debe dejar de lado esta implicación del cambio climático y como está afectando a la población, en el desarrollo socioeconómico, su crecimiento demográfico, en las migraciones forzadas por fenómenos climáticos extremos y los resultados en mortalidad que son fenómenos conocidos a los que las administraciones deben enfrentarse (Useros 2012).

Según Di Napoli et al. (2022), una gran parte del área del cantón Cuenca se caracteriza por la presencia de deslizamientos que a menudo involucran actividades humanas o asentamientos. Cada uno de estos deslizamientos tiene su propia dinámica y peligrosidad, atribuida a su magnitud y la presencia de población expuesta, que sigue en constante crecimiento. Según el Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos (INEC), se estima una tasa de crecimiento del 15 % cada 7 años, pasando de 603.296 habitantes (dato de proyección) en 2017 a 596 101 habitantes en el año 2023, según el censo de población y vivienda (INEC 2023). Este crecimiento poblacional también implica un aumento en la infraestructura, lo que ha llevado a la expansión urbana hacia zonas con condiciones que determinan una mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

Tomando en cuenta este criterio de expansión urbana y crecimiento de la población, muchas de las nuevas construcciones se han realizado en las laderas que delimitan el cantón. Esto ha llevado a que más personas ocupen territorios con mayor inestabilidad y problemas asociados. Estos problemas conllevan a resultados negativos provocados para la población en constatación de crecimiento, debido a la falta de recursos y la incapacidad de enfrentarlos, lo que demuestra los efectos de indefensión que enfrentan estos grupos en su vida cotidiana (CEPAL 2001).

De esta manera, los deslizamientos son capaces de causar daños y pérdidas que generalmente se presentan en la infraestructura, como son: casas, vías, sistemas de alcantarillado, sembríos, entre otros que pueden verse destruidos parcialmente o en su totalidad, los cuales están estrechamente ligados a la pérdida de medios de subsistencia y servicios. Por ende, el desarrollo de la población se ve frenado, pues también estos eventos pueden generar afecciones en la salud de las personas y cambios bruscos en el desarrollo de sus actividades diarias, disminuyendo sus ingresos económicos. Mientras más susceptible sea el suelo y mayor cantidad de eventos se desarrollen, estos problemas serán mayores. Según Sellers et al. (2021), en el cantón Cuenca, se han detectado un total de 668 deslizamientos, lo que representa un riesgo latente para la población; sin embargo, esta información corresponde a fenómenos puntuales. El estudio del territorio requiere de una zonificación más detallada sobre la susceptibilidad del suelo a deslizamientos,

mejorando y profundizando el conocimiento sobre estos fenómenos. Toda esta información servirá para que los tomadores de decisiones, así como la población en general conozcan y prevean posibles riesgos en el cantón; pues evaluar y prevenir la exposición en términos de susceptibilidad a deslizamientos, es un paso fundamental para una planificación y gestión ambiental adecuada (Goetz et al. 2015).

La información sobre deslizamientos y su susceptibilidad para la toma de decisiones ha tenido un fuerte avance en los últimos años a nivel mundial y muchos insumos cartográficos han sido generados a partir de diferentes fuentes de información y escalas como modelos del terreno, características físicas del territorio, etc. Obtenidos mediante el uso de satélites, drones, LiDAR, aviones, etc. Sin embargo, muchas veces se deja de lado el componente poblacional dentro de los desarrollos de información y su uso para análisis más profundos, siendo este componente de vital importancia, debido a que estos grupos son los que ocupan el territorio. Tomando en consideración que la premisa de que deslizamiento se desarrolla lejos de la población no presume un alto riesgo, un deslizamiento que ocurre en zonas ocupadas por personas, repercutirá en pérdidas para la infraestructura, vivienda y por ende afección a grupos vulnerables que ocupan el territorio y tendremos un riesgo más alto.

La susceptibilidad a deslizamientos debe ser abordado desde el punto de vista de la tecnificación y uso de la información, así como la planificación, pues la afección de estos a la población está estrechamente relacionada con la ocupación del territorio, tomando como premisa que, si una porción de suelo es susceptible a deslizamientos y le sumamos la falta de capacidades de estos grupos e infraestructura a eventos adversos, la susceptibilidad de una zona aumenta de manera considerable. Siendo la construcción de un mapa, un tema que deja de estar ligado únicamente al suelo y sus características físicas, sino al contrario, usar a la población más vulnerable para delimitar estas zonas donde la intervención debe ser mayor.

Para el presente trabajo de titulación, se utiliza la metodología MaxEnt para la construcción de mapas de susceptibilidad mediante el uso de parámetros físicos, como morfología del terreno, geología presente, índices calculados a partir del modelo digital del terreno con resolución espacial de 3 metros. Tomando en cuenta a la población vulnerable por su estado socioeconómico, utilizando datos del Ministerio de Inclusión Económica y Social (MIES). La metodología MaxEnt se emplea para el modelado de mapas de predicción y probabilidad, utilizando una técnica de aprendizaje automático conocida como modelado de máxima entropía. Para desarrollar estos modelos, es esencial

utilizar capas de cobertura base disponibles o conocidas como información ambiental, capaces de determinar las condiciones físicas del territorio. Esta metodología emplea modelos probabilísticos que generan suposiciones específicas sobre los datos de entrada y los esfuerzos de muestreo de la herramienta, con el objetivo de reducir el sesgo. Simultáneamente, el método analiza y genera interacciones entre la información disponible, lo que permite seleccionar el escenario óptimo entre una serie de distribuciones de probabilidad (Boussouf et al. 2023).

El objetivo general de la investigación es evaluar la susceptibilidad a deslizamientos, en las parroquias de: Cuenca, Nulti, Paccha, El Valle y Turi, del cantón Cuenca, en base de los recursos técnicos y cartográficos disponibles, utilizando variables físicas y socioeconómicas.

Tiene 2 objetivos específicos 1) Analizar la susceptibilidad de los grupos socioeconómicos vulnerables, con relación a su ubicación en zonas de deslizamiento; 2) Evaluar la metodología MaxEnt para realizar mapas de susceptibilidad, mediante máxima entropía.

Este estudio se justifica dado que, en las últimas décadas, los países en desarrollo han experimentado un aumento en el impacto de desastres naturales debido al cambio climático en curso y la expansión sostenida de áreas urbanas (Di Napoli et al. 2023). Estos han repercutido en la calidad de vida de la población, pues se ha dado una expansión de las ciudades en zonas con un mayor porcentaje de ocurrencia de estos fenómenos, adicionando la planificación para los procesos de expansión y sumado a la grave crisis migratoria donde, las personas de las zonas rurales han decidido migrar a la ciudad en busca de oportunidades laborales, han llevado a que el riesgo aumente.

Se vuelve necesario disponer de herramientas que faciliten el crecimiento planificado de las ciudades y que este se lo haga de manera ordenada y pensando el futuro de la población, buscando alternativas que favorezcan y tomen como punto de partida el bienestar de cada individuo que se asiente en el territorio. En el cantón Cuenca existen parroquias que durante muchos años han sufrido el impacto de deslizamientos, estas se encuentran en el sur del cantón, donde la urbanización desmesurada y con poco control, ha desencadenado que parte de la población que vive y desarrolla sus actividades en estas áreas, haya tenido que aprender a vivir con estos fenómenos, mientras otros han tenido que abandonar sus hogares. Los gobiernos de turno han facilitado ciertas herramientas para ahondar de una u otra forma los efectos negativos, creando planes de contingencia, insumos e información sobre deslizamientos, como son los planes de

ordenamiento territorial (PDOT), clasificaciones de áreas de alta susceptibilidad tanto social como territorial, además de que se cuenta con una Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, que se mantiene en constante análisis de los riesgos que se presentan a nivel nacional, provincial y cantonal. Según el plan de uso y gestión del suelo del año 2022, existe una zonificación de amenazas por susceptibilidad fenómenos de remoción de masas (deslizamientos), de escala cantonal cuya información es entregada por la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y presenta los niveles de susceptibilidad entre 1 y 5, siendo 1 la categoría sin susceptibilidad y 5 la susceptibilidad más alta.

A pesar de estos esfuerzos, es necesario incorporar herramientas actualizadas de planificación urbana, por lo que se requiere una evaluación de susceptibilidad a deslizamientos de tierra y riesgos relacionados. En esta perspectiva, es necesario la construcción de un mapa de susceptibilidad, mediante metodologías probadas necesarias para plasmar los resultados del cruce e interpretación de la información en un resultado cartográfico. Siendo unas herramientas que permita un desarrollo de las parroquias más organizado y donde la información generada en el fomento la toma de medidas de prevención y mitigación ante los deslizamientos; no solo tomando en cuenta el componente geográfico y físico, sino la incorporación de la población más vulnerable desde el punto de vista social y económico, pues ellos son los que pueden sufrir de manera más extrema los efectos causados por los deslizamientos.

Conocer estas zonas donde la susceptibilidad es alta o muy alta, por medio de herramientas de gestión se puede llegar a resultados adecuados y favorables para todos y todas, basando en la premisa de que un mapa de susceptibilidad clasifica la estabilidad relativa de un área, en categorías que van de estable a inestable, es decir el mapa de susceptibilidad evidencia las condiciones para que puedan ocurrir deslizamientos (Suarez 2009). Estos análisis son mejorados mediante la inserción de ciertas variables socioeconómicas al estudio, como es el bono de desarrollo humano.

El presente documento detalla en tres capítulos el desarrollo del tema. El primer capítulo desarrolla los conceptos fundamentales sobre los deslizamientos, su clasificación, factores condicionantes tanto físicos como socioeconómicos, y presenta una revisión de la metodología de máxima entropía (MaxEnt) como herramienta de análisis de susceptibilidad. El segundo capítulo aborda el proceso técnico y metodológico para la elaboración de la cartografía base, la construcción del inventario de deslizamientos, la incorporación de datos sobre bonos de desarrollo humano y la preparación de las capas ambientales para el modelado con MaxEnt. El tercer capítulo presenta los resultados

obtenidos del modelo de susceptibilidad, incluyendo mapas temáticos, análisis de validación mediante curvas ROC y AUC, y la evaluación del aporte de cada variable mediante análisis de Jackknife, seguido de una discusión de los hallazgos. Finalmente, se exponen las conclusiones que destacan la utilidad del enfoque integrado físico-socioeconómico para la gestión del riesgo de deslizamientos en territorios con alta desigualdad social.

Capítulo primero

La susceptibilidad, tipos de deslizamientos y sus principales factores, tanto físicos como socioeconómicos

Este capítulo establece las bases conceptuales necesarias para comprender el fenómeno de los deslizamientos, su tipología y los factores que los condicionan. Se abordan las distintas clasificaciones morfológicas y mecánicas de los movimientos en masa, así como los factores internos y externos que inciden en su activación. Además, se explora el concepto de susceptibilidad y su importancia dentro de la gestión del riesgo de desastres, destacando el papel de la geomorfología, el clima, la litología y, de manera crucial, los factores socioeconómicos que agravan la exposición y vulnerabilidad de ciertos grupos poblacionales. También se analiza la utilidad de los mapas de susceptibilidad y su validación mediante técnicas cuantitativas, sentando las bases para su aplicación posterior.

1. Introducción a los riesgos de desastres

Riesgo se puede definir como una probabilidad de la población que tiene determinada vulnerabilidad tanto social como territorial, pueda verse afectada por un evento adverso causando daños y pérdidas, modificando su estilo de vida normal. Este término empieza a desarrollarse en la década de los ochenta, donde se toma como partida dos diferentes vertientes para llegar a una coherencia en la comprensión de este, la primera utiliza el carácter multidisciplinario los estudios de riesgo y como la diversidad de ideas y estudios puede llegar un análisis profundo. La segunda se ha encargado de buscar definiciones a una parte filosófica e intrínseca del riesgo, admitiendo que existen ciertas definiciones de este (Rojas et al. 2011).

Por esto los diferentes actores del riesgo, como son los tomadores de decisiones y la población como tal, buscan la forma de crear política y concientizar acerca de los problemas que puede producir el riesgo de desastres y como se puede convivir con el mismo. Al mismo tiempo la naturaleza puede ser mandataria al momento de producirse un deslizamiento, tomando en cuenta que en ciertas ocasiones esta puede ser impredecible y su fuerza puede sobrepasar algunas de nuestras capacidades. Pero se considera

importante aprender y trabajar por manejar de mejor manera la resiliencia hacia estos desastres. El primer paso que tomó fuerza y encaminó al mundo para una adecuada gestión del riesgo es la Conferencia Mundial sobre Desastres, realizada en la ciudad de Yokohama del 23 al 27 de mayo de 1994, donde las propuestas y los compromisos allí celebrados, empezaron a ser los cimientos para que nuestro planeta Tierra y sus habitantes enfrenten las amenazas (Maturana 2011).

La relación entre el ser humano y las fuerzas de la naturaleza es dinámica. La naturaleza de la cual somos parte está constante cambio, lo que la hace impredecible y generadora de consecuencias graves para la vida diaria de las poblaciones. Estos problemas que surgen entre la naturaleza y la población mundial son el punto de partida para llevar a cabo proyectos de estudio que buscan comprender y prevenir los desastres que afectan a la población, así como medir y planificar acciones para mitigar los daños causados.

A lo largo de la historia, el ser humano ha demostrado ser vulnerable frente a los desastres naturales debido a la imprevisibilidad y actividad de las poblaciones en el territorio. Estos eventos pueden ocasionar daños en la infraestructura, pérdidas económicas importantes e impactos negativos en la salud de la población. Actualmente, la sociedad está cada vez más informada, como es el caso de los deslizamientos que conforme crecen las ciudades estos se los percibe e identifica y su impacto es más alto, lo que ha aumentado la preocupación de la población y ha impulsado la realización de estudios más detallados sobre su ocurrencia.

El objetivo de estos estudios es ahondar en el conocimiento de estos fenómenos para poder desarrollar una mejor planificación de las ciudades, e incorporar a la vida diaria herramientas que promuevan la contingencia y adaptación de medidas preventivas ante posibles eventos naturales. De esta manera, se busca minimizar o mitigar los impactos negativos que puedan afectar a la población y a su entorno.

El cantón Cuenca y sus parroquias, debido a su ubicación geográfica, está asociado a un clima tropical, con una presencia de lluvia constante en todo el territorio y variaciones dependiendo de la altitud geográfica, que orográficamente se ve representado en elevaciones montañosas, valles, zonas costeras, etc. (Rojas et al. 2011). Estas elevaciones o cadenas montañosas contribuyen a la formación de microclimas donde la precipitación es un factor común y que puede llegar a ser muy intensa. La presencia de cadenas montañosas además de estar sujetas a un clima más extremo que las zonas costeras, presenta una característica que es parte importante del riesgo como son las altas

pendientes, que son determinantes al momento de que problemas asociados con la estabilidad se generen y un desastre natural pueda generarse.

Estos desastres son la confirmación de un riesgo que puede tener el territorio y provocan anualmente daños y pérdidas por sumas de cientos de miles de dólares. Según Munich Re (2024), las pérdidas del año 2022 ascendieron a 270 billones de dólares, siendo un impacto fuerte para las economías de los países, sobre todo aquellos que no disponen de los recursos necesarios. Sin embargo, además de las pérdidas económicas, la razón por la cual la gestión del riesgo toma sentido, radica en la pérdida de vidas que ha ascendido a los 2.5 millones de personas desde 1980 (Banco mundial 2023), puesto que no existe lugar en el planeta que este exento de sufrir un desastre. La severidad y el impacto de estos dependerá de muchos factores, sin embargo, no se puede obviar la probabilidad de ocurrencia.

La capacidad de respuesta de cada comunidad, influenciada por sus condiciones políticas, sociales, económicas y técnicas, determina la evaluación y en algunos casos la reducción del riesgo ante estos eventos, transformándose en la velocidad de respuesta ante una catástrofe. Según Ayala et al. (2002), la respuesta de un desastre es crucial para superar un desastre natural, contando con ayuda externa tanto a nivel local como internacional.

Un desastre, según la definición de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres UNISDR (2016), se refiere a la interrupción significativa del funcionamiento de una comunidad o sociedad en cualquier escala, causada por fenómenos peligrosos que interactúan con las condiciones de exposición, vulnerabilidad y capacidad. De acuerdo con esta interpretación, un desastre natural no se limita simplemente a la ocurrencia de fenómenos naturales como huracanes, deslizamientos o terremotos, sino que implica el impacto generado en zonas donde las personas desarrollan sus actividades.

Los desastres son considerados como extremos, dependiendo de una amenaza, para las cuales existe un amplio número de situaciones que pueden ser resultado de la combinación de procesos naturales o humanos (Rodríguez 2006). Si hablamos de humanos, el progreso y el avance de las sociedades han sido precursores del problema, por la ocupación del territorio sujeto a riesgos, asociados a la falta de planificación y preparación ante el riesgo (Ayala et al. 2002). Por ejemplo, la deforestación es también llamadas amenazas socio naturales. En base de esto y como se menciona anteriormente existe una noción que es muy amigable con estos conceptos de riesgo y de desastre, donde

la población será la más afectada y este ha sido uno de los ejes principales de la gestión del riesgo de desastres, que va de la mano con la prevención y la respuesta.

Estos conceptos son necesarios para poder palear los daños y pérdidas provocados, a este término se los denomina resiliencia el cual nace desde la física para describir como un cuerpo que, al ser deformado, es capaz de recuperar sus propiedades o forma original. A finales de los ochenta e inicios de los noventa, cuando se empieza tomar en cuenta el estudio del ser humano, a través de las Ciencias Sociales, este concepto físico de la “resiliencia”. Se pasa a la observación de conductas y capacidades en el ser humano dentro de sus grupos sociales, comunidades y como han enfrentado los efectos negativos de un desastre natural, siendo capaces de recuperar la normalidad, e incluso poder desarrollar nuevas técnicas y conocimiento para progresar (Maturana 2011). Para determinar esta resiliencia se determina condiciones de vida que la población afectada tiene en el normal desarrollo de actividades, como es el porcentaje de acceso agua potable, el porcentaje con acceso a telefonía móvil e internet, postas de salud por cada 10 000 habitantes, número de centros educativos por cada 10 000 habitantes, conexiones a redes eléctricas, etc. (Pavón 2021). Estas condiciones determinan la respuesta ante un desastre y su capacidad de recuperarse.

El término descrito en el párrafo anterior, que fundamenta el presente trabajo, se refiere a la prevención, un aspecto que ha sido relegado en gran parte de América Latina y otras regiones del mundo. Este concepto se basa en el precepto de que, por cada dólar invertido en prevención se pueden ahorrar hasta 15 dólares en la recuperación tras un desastre (UNDRR 2023). A partir de esta premisa, se plantea que invertir en la reducción de riesgos mediante el fortalecimiento de capacidades, la adopción de nuevas tecnologías y la mejora de la seguridad tanto social como económica, tanto a nivel individual como comunitario, resulta clave para disminuir las pérdidas humanas y económicas a gran escala. Esto contrasta con la práctica de esperar que ocurra un desastre para luego redirigir fondos hacia su mitigación. De esta manera, surgen diversos programas y medidas de prevención, como los sistemas de alerta temprana, la adquisición de seguros contra desastres y la inversión en el desarrollo de conocimiento sobre fenómenos naturales, entre otros.

2. Los deslizamiento, características y tipos

Los deslizamientos son fenómenos que han afectado a la población de manera directa y se pueden repetir varias ocasiones en un mismo lugar debido a sus características físicas y sus detonantes, donde el agua puede jugar un papel importante, así como la geología. Estos factores pueden ser pasivos o activos y deben combinarse y modificarse de manera conjunta; los pasivos condicionan el tipo de rotura del material y su mecanismo como la naturaleza de los materiales, relación estructura – ladera, pendientes, vegetación. Mientras los activos interfieren en los pasivos desencadenando una inestabilidad, estos pueden ser el clima, la meteorización, el agua, la erosión, sismicidad, etc. (Generalitat Valenciana 2024).

Estos eventos han sido ampliamente estudiados debido a los problemas que conllevan para la población, sobre todo la que está expuesta a condiciones de altas pendientes y clima variable. Para su definición diferentes autores han propuesto postulados acerca de estos; Según Varnes (1978), un deslizamiento se entiende como un movimiento hacia abajo y hacia afuera de los materiales que forman una ladera bajo influencia de la gravedad”. Highland et al. (2008), menciona que estos eventos son “Movimiento descendente de suelo, rocas y materiales orgánicos bajo el efecto de la gravedad y también la forma del terreno que resulta de ese movimiento”.

Varnes (1978), explican que existen varios factores que promueven la ocurrencia de deslizamientos, que son diferenciados entre procesos físicos (precipitaciones, expansión e hidratación de arcillas, etc.), origen antrópico (excavaciones en pie de ladera, irrigación, etc.), causas geológicas (materiales susceptibles, cizallamiento/discontinuidades, etc.) y causas morfológicas (erosión, incendios, etc.). Estos factores pueden ser englobados en dos grandes grupos definidos como internos y externos, que definen como actúan en la estabilidad de un talud y su aparición favorece a que una masa de tierra pierda estabilidad y se mueva.

- Internos: Disminuyen la resistencia de los materiales, usualmente son provocados por fisuras e intemperismo (Ayala 2000).
- Externos: Generan un incremento de la tensión o esfuerzo, los cuales provocan cambios geométricos o de su masa (Ayala 2000).
- Causas mecánicas: La mecánica de fallas de las pendientes, sus propiedades y características y la sobrecarga de los taludes por actividad antrópica.

2.1. Clasificación morfológica de un deslizamiento

Conocer la distribución de un deslizamiento en campo suele ser una tarea complicada en función de la extensión de este, su accesibilidad y peligrosidad. Sin embargo, es necesario conocer como este se divide y cuáles son sus partes, esto facilita esta ardua tarea que es determinar qué tipo deslizamiento que se estudia y cómo se debe manejar las medidas ingenieriles de mitigación y control (Highland et al. 2008), para esto han desarrollado una clasificación de estas partes, las cuales se presentan a continuación:

Tabla 1
Partes de un deslizamiento

Partes de un deslizamiento	Descripción
Corona o cabecera:	“Parte alta del talud o ladera, en donde se observa el lugar de corte del movimiento, generando el límite de éste, no suele mostrarse afección alguna hacia arriba del talud, a su vez sus bordes suelen presentar agrietamientos o rajaduras”.
Escarpe y escarpes secundarios:	“Son fácilmente identificables ya que en esta parte del deslizamiento se observa la ruptura del material y muestra un desbroce fuerte de vegetación y posee una fuerte pendiente en muchos deslizamientos. Se encuentra bajo la corona”.
Superficie de ruptura:	“Esta se encuentra en la cota más baja del cuerpo del material desplazado, por debajo de la superficie original del terreno”.
Cuerpo principal:	“Es la zona en donde se acumula el mayor volumen de materiales que han sufrido un movimiento, usualmente muestra un abultamiento de material. Se encuentra en la base de escarpe principal y sobre la superficie de ruptura”.
Zona de hundimiento:	“Es la zona donde se puede observar la cota más baja del deslizamiento pues es donde se produce este hundimiento del material, debido a las condiciones físicas de este y la morfología del terreno, se lo puede encontrar por debajo de la superficie de ruptura”.
Flancos (derecho e izquierdo):	“Son los límites del deslizamiento, presentan estrías generadas por el movimiento de la masa de material desprendida”.
Pie:	“Es el lugar de deposición del material y su determinación en campo es mucho más fácil de realizarla pues aquí se encuentra el material que se desplazó ladera hacia abajo”.
Extremo:	“Es el lugar donde descansa el deslizamiento y donde se puede observar los rodados que alcanzaron gran distancia en su trayectoria”.

Fuente: (Highland et al. 2008).

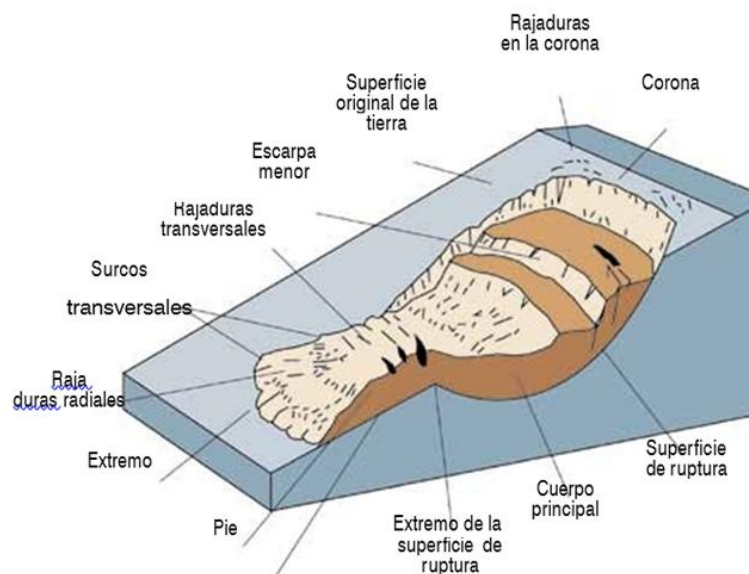


Figura 1. Partes de un deslizamiento de tierra
Fuente: (Highland et al. 2008)

2.2. Clasificación de los deslizamientos

Un deslizamiento es capaz de causar daños y pérdidas difíciles de sobrellevar para la población afectada, la magnitud del impacto depende en cierto grado del tipo de evento que se presente, tomando en cuenta su volumen, velocidad y siempre pensando en que las modificaciones antropogénicas al medio ambiente natural, los efectos climáticos, son los principales factores que pueden desencadenar deslizamientos de tierra (Di Martire et al. 2012).

La categorización de deslizamientos es influenciada por las condiciones geomorfológicas, de cobertura, clima y actividad. Es crucial entender que cada tipo de movimiento deja un distintivo en terreno, una característica que revela cómo ocurrió internamente el desplazamiento. Desde el punto de vista mecánico los tres tipos básicos de movimientos, que se describen como caídas, deslizamientos y flujos, los dos primeros se activan por roturas del terreno volviendo el material frágil, mientras que los flujos se asocian a deformaciones desarrolladas preferentemente en el dominio plástico de los materiales (Chacón 2012).

2.2.1. Caídas

Se le considera desprendimientos de roca o materiales consolidados, rebotando o rodando, siendo las pendientes superiores a los 50 grados las zonas donde mayor

ocurrencia de estos existe y a lo largo de una superficie con deformaciones en sus grietas de tracción, separando un bloque rocoso de un talud (Highland et al. 2008).

Los tipos de material desprendido varían en su tamaño y volumen desde rocas individuales, hasta grandes bloques, en ocasiones con partes de suelo consolidado. Si la pendiente supera los 76° se produce una caída libre, si se encuentra entre los 76 y 50 grados se produce un impacto contra el talud, o una rodadura (Highland et al. 2008).

Al tratarse de porciones de roca o suelo que se dependen a gran velocidad, el riesgo de daños sobre la salud de las personas aumenta, así como los problemas con la infraestructura debido al fuerte impacto de material en las bases de los taludes.

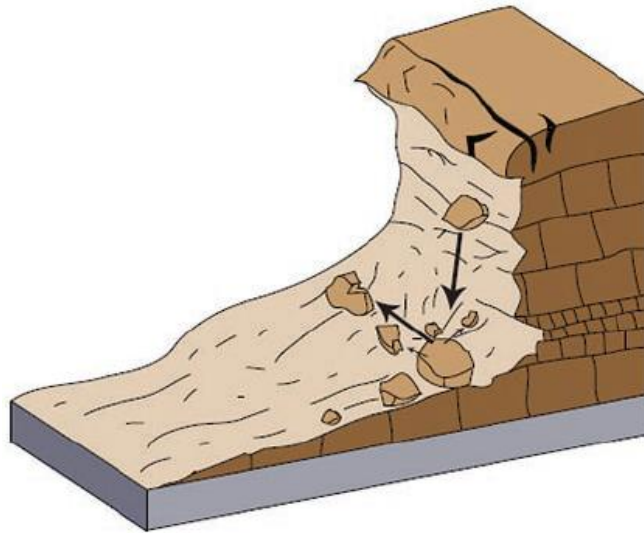


Figura 2. Caídas
Fuente: (Highland et al. 2008)

2.2.2 Deslizamiento rotacional

Este tipo de deslizamientos suele ser común en la zona del Azuay (IERSE 2021), sus características morfológicas suelen ser fáciles de reconocer en campo pues su corona suele tener una ruptura curvilínea y cóncava y su giro se da por la rotación en un eje que es paralelo al contorno de la ladera. Siendo el ángulo de pendiente un factor que favorece a la ocurrencia de estos y se encuentra entre los 20 y 40 grados (Highland et al. 2008). La cabecera del talud se mueve verticalmente hacia abajo presentando donde se puede apreciar un corte limpio, mientras la masa de material desplazado tiene la dinámica de un solo cuerpo en el cual no se generan cambios mayores durante (Chacón 2012)

Este tipo de evento es muy común en materiales homogéneos, con una misma composición y propiedades, que pueden variar muy poco con relación a granulometría,

plasticidad (ejemplo: rellenos de origen antrópico, depósitos de arcilla, limonitas y areniscas). Por el volumen de material y en correlación a las pendientes no tan inclinadas, este tipo de eventos puede llegar a producir velocidades de desplazamiento muy lentas (1,6 m/año) y moderadas (13 m/mes) dependiendo de la influencia de factores, como lluvias intensas, saturación por malos sistemas de drenaje, erosión, etc. (Ilustre Colegio de Ingenieros Geólogos 2008).

En base de su velocidad que es muy lenta generalmente, no se les considera potencialmente mortales, sin embargo, pueden ser generadores de daños y pérdidas, pues el gran volumen de material desplazado puede afectar a la infraestructura que se encuentren en la zona de influencia y sus alrededores (Ilustre Colegio de Ingenieros Geólogos 2008).

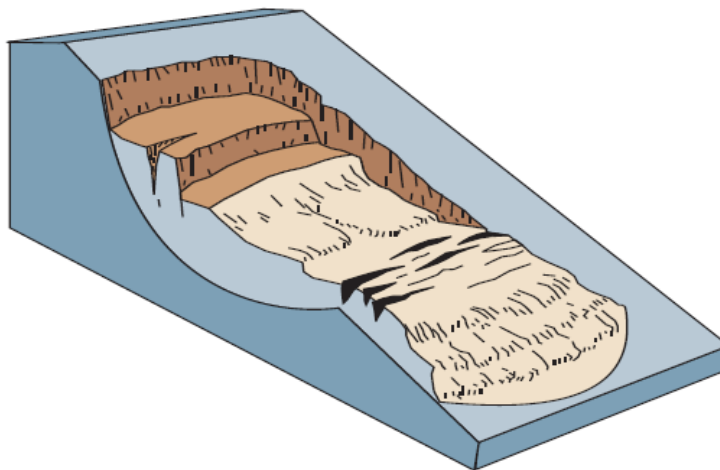


Figura 3. Deslizamiento rotacional
Fuente: (Highland et al. 2008)

2.2.3 Deslizamiento de traslación o traslacionales

Los deslizamientos de traslación dentro de todos los descritos el presente documento, son los más comunes en la superficie terrestre. Las fallas estructurales y pérdida de estabilidad de los taludes están dadas por las discontinuidades geológicas tales como fallas, juntas, o el contacto entre la roca y el suelo, donde se puede percibir grietas verticales y paralelas al talud, lo que determina que su dinámica sea diferente a los de tipo rotacional, pues el material desplazado puede moverse hacia afuera o hacia abajo y hacia afuera, por una superficie de ruptura plana y; a diferencia del rotacional, éste no se inclinará hacia atrás, sino que se moverá en la dirección de la ladera a una misma velocidad (Highland et al. 2008).

Puesto que ocurren en terrenos donde las pendientes pueden encontrarse medianas abruptas, facilitando que este material desplazado pueda alcanzar largas distancias y altas velocidades desde los (1,8 m/hora) o muy rápidas (3 m/min), pudiendo provocar daños a la salud de las personas e infraestructura. (Ilustre Colegio de Ingenieros Geólogos 2008). Estas velocidades, pendientes y la saturación de los materiales pueden provocar que, en ciertas circunstancias este se rompa, generando un flujo de material o corriente de escombros.

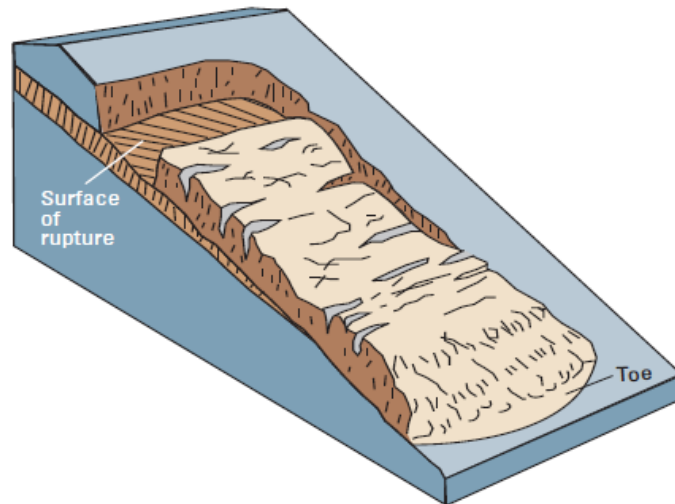


Figura 4. Deslizamiento traslacional
Fuente: (Highland et al. 2008).

2.2.4 Deslizamientos laterales

Son deslizamientos que se presentan en cuencas donde ha existido una acumulación prolongada de sedimentos los cuales están poco consolidados o estratificados y con una cohesión alta (Chacón 2012), la misma forma de la cuenca asume que las pendientes donde estos eventos se desarrollan pueden variar entre los 10 grados o menos, o en zonas planas, debido a estas características sus velocidades pueden estar dentro de los (1.6m/año) a moderado (13m/mes).

Este tipo de deslizamiento se comporta como un hundimiento y un pequeño arrastre, producto de la licuefacción o deformación plástica del material inferior el cual será más blando, mientras que el material superior puede estar compuesto de materiales granulados, canto rodado o porciones de roca (Highland et al. 2008). De esta manera la tierra firme o con características uniformes se desliza o se fractura, moviéndose lentamente fuera del suelo estable sin que se muestren fracturas en ciertos casos.

Según Varnes et al. (1978), estos eventos se dividen en dos grupos:

1. El primero donde se percibe una fracturación del material compacto, por licuefacción del material más blando que se encuentra en una capa inferior, donde predominan arcillas, que en condiciones de saturación se vuelve un líquido denso, moviendo bloques más densos en la capa superior.

2. El deslizamiento afecta a todo el bloque logrando que no sean visibles zonas de corte. En este la saturación no es muy alta, sin embargo, la presencia de agua es suficiente humedecer y ablandar las arcillas, las cuales se moldean y se aplanan lateralmente, provocando que la fracturación de la capa superior se divida en bloques que se hunden en la capa inferior.

Este tipo de movimientos podemos encontrarlos en todas partes del mundo, donde exista una arcilla licuable, generalmente el movimiento es lento (1,6 m/año) a moderado (13 m/mes), mostrando al principio ciertos agrietamientos, pero puede llegar un momento en el que se propague muy rápidamente y logre ocupar grandes extensiones de terreno, (ICOG 2008).

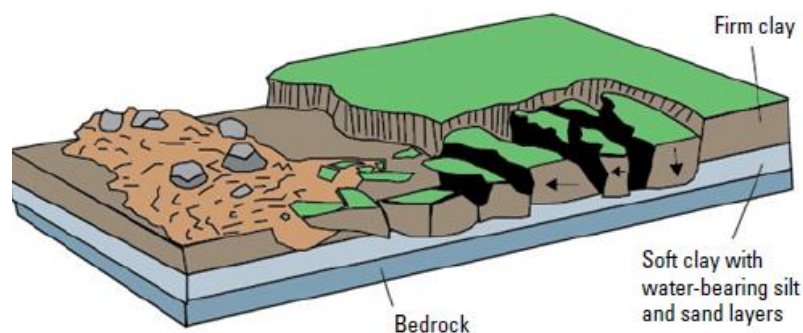


Figura 5. Deslizamiento lateral
Fuente: (Highland et al. 2008).

2.2.5. Reptación

Este es un movimiento de delgadas capas de suelo clástico, por efecto de la gravedad con la ayuda de ciclos de hielo-deshielo o humectación-dsecación (Highland et al. 2008), esto genera una fuerte relación entre el esfuerzo cortante y la resistencia residual y del esfuerzo efectivo normal, debido a la recuperación de la resistencia de los suelos, por lo que se provoca una fuerte disminución de la velocidad de este tipo de deslizamiento (Wang et al. 2018) y generalmente son muy lentos, siendo muchas de las veces imposible de visualizarlos. La falta de velocidad conlleva a que las partes de un deslizamiento (figura 6), sean casi imposibles de visualizar, incluso la vegetación puede

crecer sin problema en este tipo de deslizamientos, sin embargo, existen ciertas características que nos demuestran la existencia de una reptación como son:

Las señales que presenta este tipo de evento pueden hacerse visibles en periodos largos de tiempo.

Deformación de laderas de alta montaña generando surcos, pues tienen profundidad y poca velocidad.

La vegetación puede crecer, sin embargo, crecerá inclinada en función de este movimiento muy lento del suelo.

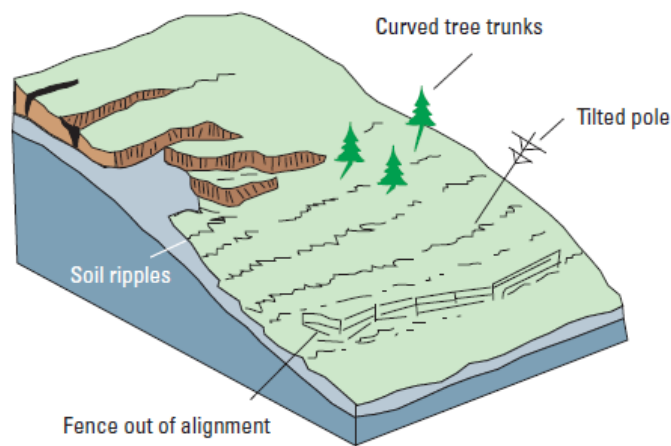


Figura 6. Reptación
Fuente: (Highland et al. 2008).

2.2.6. Corrientes

Este tipo de deslizamientos son muy comunes en suelos que han sufrido procesos de deshielo de antiguos glaciares, donde los estratos superficiales están muy poco cohesionados y la presencia de agua es muy alta, mientras que las pendientes son muy fuertes por sobre los 25 grados y llegando a los 50 grados. Una característica importante es que debido a que su factor detonante principal son las precipitaciones extremadamente fuertes o prolongadas, se obtiene un suelo con características de sobresaturación, creando un líquido viscoso donde existe una mezcla heterogénea de suelo, materia vegetal, hielo (Highland et al. 2008).

Se identifican depósitos considerables de sedimentos y escombros, los cuales tienden a concentrarse en una zona específica de extensión larga y estrecha. Es importante destacar que estos movimientos de masa, a diferencia de los mencionados anteriormente,

suelen manifestarse en la superficie del terreno, depositando el material en la base del talud y formando lo que se conoce como un abanico de escombros.

Son movimientos continuos de muy corta duración, sus masas desprendidas están muy próximas entre sí y por lo general no se conservan (Suárez (2009). Esto se ve explicado debido a velocidad a la que ocurre es extremadamente alta (5 m/s) y por ende el riesgo aumenta, sobre todo con población cercana, pues arrastran grandes bloques de roca, árboles, suelo, etc.,

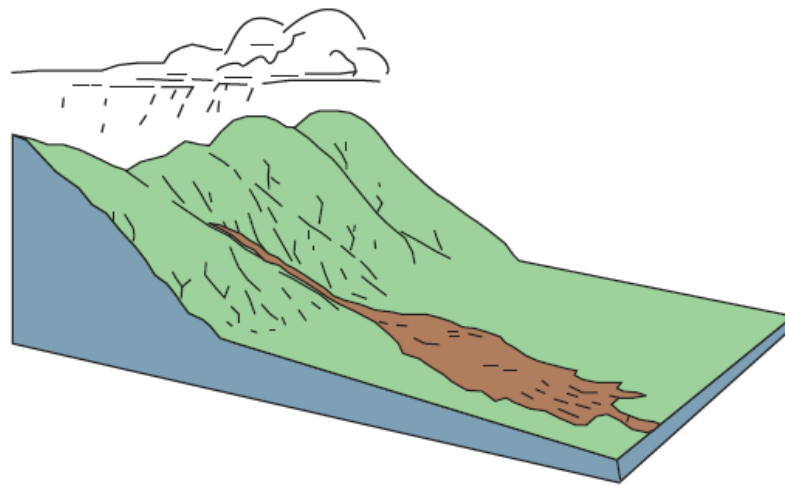


Figura 7. Corrientes.
Fuente: (Highland et al. 2008).

2.2.7 Movimientos complejos

Una vez que un deslizamiento ha tenido lugar, otros factores pueden intervenir en la masa de terreno previamente desplazado, como es la intervención antrópica, lluvias, cambios en los coeficientes de fricción de los materiales por pérdida de resistencia, etc. Esto provoca que se detone tipo de movimiento, a este tipo de eventos se los conoce como movimientos complejos, los cuales son el resultante de la combinación de dos o más tipos de movimientos de masa. Con mucha frecuencia los movimientos de un talud incluyen una combinación de dos o más de los principales tipos de desplazamiento (Suarez 2009)

Este tipo de deslizamiento es uno de los más comunes, puesto que cada masa de suelo se empezará a comportarse de forma diferente durante su avance ladera abajo, entre los que se presenta mayor frecuencia son los deslizamientos complejos que se forman a partir de un deslizamiento traslacional o rotacional que, por condiciones antes mencionadas, se convierte en una corriente. Al ser eventos que no tienen una forma ni características propias y únicas, en algunos casos, ocurren velocidades diferentes en

función del tipo de deslizamiento que se produzca en determinado momento y se requiere definir cada uno de ellos (Suarez 2009).

3. Susceptibilidad

El crecimiento de la población en las ciudades y la expansión de asentamientos sobre áreas peligrosas han aumentado en gran medida el impacto de los desastres naturales. Los países en vías de desarrollo pueden tener dificultades para paliar los daños y los altos costos de controlar los riesgos naturales por una deficiente planificación del uso del suelo y falta de tecnología. Al mismo tiempo que las sociedades industrializadas son cada vez más reacias a invertir dinero en medidas que puedan reducir los riesgos naturales (Guzzetti 2009). Todo esto conlleva a una falta de preparación y respuesta, manejando una alta susceptibilidad en el territorio.

La susceptibilidad es la probabilidad de que se desarrolle un deslizamiento en un tiempo determinado, debido a las condiciones del suelo, clima, etc. Se encuentra influenciada por una serie de factores que pueden modificarla, los cuales incluyen las características morfológicas del suelo, su composición y caracterización, así como los sistemas dinámicos que ocurren en él. Además, no se pueden obviar los factores socioeconómicos y los grupos vulnerables presentes en la zona ya que todos estos elementos interactúan para determinar la posible ocurrencia, la cual puede traduciéndose en daños e impactos sobre estos grupos vulnerables.

Se han propuesto y probado varios métodos y enfoques para determinar la susceptibilidad a deslizamientos. La cartografía geomorfológica, el análisis de inventarios de deslizamientos, métodos de clasificación basados en estadísticas (Chowdhury et al. 1999). Sin embargo, esta no considera el tamaño, por ejemplo, la longitud, anchura, profundidad, área o volumen de los deslizamientos de tierra, pero las evaluaciones de susceptibilidad pueden prepararse para deslizamientos de diferentes tamaños (Reichenbach et al. 2018). Estos enfoques y métodos con los cuales se puede determinar la susceptibilidad pueden ser cualitativos o cuantitativos y directos o indirectos. En la parte cuantitativa de la susceptibilidad se producen estimaciones numéricas de la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento, mientras que los enfoques cualitativos son subjetivos, representando la susceptibilidad de forma descriptiva (Reichenbach et al. 2018).

Todos los enfoques y métodos propuestos en la literatura pueden agruparse en cinco categorías (Tabla 2). Para el análisis de la susceptibilidad se busca tomar una parte

de estas y agruparlas en un solo modelo, donde la representación de la realidad del terreno y de la población se vea plasmada para pronosticar una posible ocurrencia de un deslizamiento. Estas categorías son: cartografía geomorfológica, análisis de inventarios de deslizamientos de tierra, enfoques heurísticos o basados en índices, métodos basados en procesos y métodos de modelado basados en estadísticas (Reichenbach et al. 2018).

Tabla 2
Criterios para categorización de susceptibilidad

Categoría	Descripción
Muy baja	Imperceptible ocurrencia de deslizamientos
Baja	Casi ninguna ocurrencia de deslizamientos
Media	Poca ocurrencia de deslizamientos
Alta	Mayor ocurrencia de deslizamientos

Fuente: Tatar (2012).

Estos enfoques, también pueden verse desde otra orientación, donde priman los análisis ya sea desde el punto de vista de la experiencia o mediante el método teórico. El análisis por medio de la experiencia, la observación directa es la directriz del sistema (Suarez 2009), donde se analizan un inventario de deslizamientos en una determinada zona y se busca encontrar una relación entre estos y los factores tanto detonantes como intrínsecos. El modelo teórico coincide crear mapas de susceptibilidad con los factores que promueven que la probabilidad que un deslizamiento se desencadene, mostrando una relación que mantiene cada evento con determinado factor (Suarez 2009). Sin embargo, no existe un procedimiento estandarizado para la preparación de mapas de susceptibilidad. Pues los factores técnicos, tecnológicos, uso de herramientas informáticas y la experiencia del técnico, son necesarios al momento de evaluar y determinar la metodología a ser utilizada para determinado modelo.

Para estos análisis la geomorfología, juega un papel muy importante, explica la realidad del suelo, que es el elemento donde un deslizamiento ocurre, sin suelo, no hay fallamiento, sin fallamiento no hay deslizamiento. Esta geomorfología debe ser representada en mapas, los cuales deben constar de un investigador experto para evaluar y mapear las condiciones reales y potenciales de inestabilidad de pendiente (Reichenbach et al. 2018) y su mapeo.

Los mapas según la Asociación Cartográfica internacional corresponden “a la representación convencional gráfica de fenómenos concretos o abstractos, localizados en la Tierra o en cualquier parte del Universo”. Por otra parte, el Instituto Geográfico Militar (2013) expone que un mapa es una “Representación convencional de la superficie

terrestre o cualquier cuerpo celeste o parte de ellos sobre un plano y generalmente escala”. Estos nos ayudan a interpretar y conocer de mejor manera cualquier proceso, pues permite analizarlo y divulgarlo. Los mapas han sido utilizados desde hace miles de años, pues se habla que los Babilonios plasmaron el territorio en estos.

Su desarrollo ha tenido un fuerte avance con el pasar de los años. Con la llegada de los ordenadores y sistemas informáticos orientados a la gestión de datos espaciales que contribuyen a la investigación y el trabajo profesional en Ciencias de la Tierra y Ambientales (Sarría 2014); (Ali et al. 2019). Sumado a su gran aporte para la gestión del riesgo pues los mapas han sido de utilidad al momento de representar datos obtenidos a partir de insumos actualizados y de herramientas de modelamiento logrando predecir el comportamiento de las amenazas (Pavón et al 2022). De esta manera estos insumos cartográficos tomaron un rumbo donde crearlos, leerlos e interpretarlos donde sea necesario, usando una computadora, amplió de manera significativa su uso no solo científico, sino de la población en general.

En la actualidad muchos usuarios tanto científicos, tomadores de decisiones y población en general, utilizan los mapas y particular un apartado enfocado a visualizar la susceptibilidad del territorio ha ganado espacio. Permitiendo entender el contexto sobre determinados fenómenos en el territorio con un enfoque hacia la gestión del riesgo que es una de las ramas del conocimiento donde más se utiliza este tipo de representaciones cartográficas, siendo la susceptibilidad a deslizamientos una de estas aristas. Por ende, se encuentra en constante crecimiento a nivel mundial, donde los modelos cada vez son mejores y sus análisis más profundos, mediante el uso de variables, estar sujetos a comprobación estadística y usando herramientas de machine learning. Para lograr esto se puede utilizar diferentes capas de información obteniendo modelos de mayor resolución espacial y mejores escalas, dichas capas nutren estos productos cartográficos y pueden ser obtenidas de diferentes fuentes, dependiendo de las condiciones técnicas y recursos de cada lugar de estudio.

Según Haninia et al. (2021), se pueden utilizar once factores para desarrollar un modelo de susceptibilidad a deslizamientos y plasmarlo en un mapa, como la elevación, ángulo de pendiente, aspecto de pendiente, formación geológica, precipitación media anual, uso del suelo/cobertura del suelo, distancia al pueblo, distancia a fallas, distancia a carreteras, distancia a arroyos y Índice de vegetación normalizado (NDVI). Además de un inventario de deslizamientos obtenido de diferentes métodos e insumos como pueden

ser imágenes satelitales disponibles esperando obtener la mejor resolución, revisión de datos históricos o levantamiento en campo.

Un caso donde se aplicó este tipo de metodologías para compartir información para la toma de decisiones. Es el caso de seguridad vial en zona de deslizamiento en la autopista Karakoram. Se tomó diferentes factores incluyendo la litología, sismicidad, intensidad de lluvia, fallas, elevación, ángulo de pendiente, aspecto, curvatura, cobertura de suelo e hidrología (Ali et al. 2019). Hughes et al. (2020) por su parte coinciden en gran número con los factores utilizados, donde aplican para sus análisis de susceptibilidad, factores como, un inventario de deslizamientos de tierra, pendientes, curvatura de la superficie, tipo de suelo, geología, precipitación media anual, uso y humedad del suelo, distancia a carreteras y cuerpos de agua.

Cada mapa puede ser generado mediante diferentes metodologías y diferentes herramientas. En el presente trabajo se plantea usar el *software* MaxEnt, el cual mediante un algoritmo de máxima entropía genera un modelo de susceptibilidad a deslizamientos. Para ello utiliza factores que contribuirán de mayor o menor medida al modelo, como son la pendiente, el mapa de orientaciones, planitud, curvatura, Índice de Humedad Topográfica (TWI). Así mismo la distancia al curso de agua, posición relativa de la pendiente, distancia a caminos, uso del suelo, geología (Di Napoli et al. 2022). De igual manera Bravo (2023) utiliza 14 factores para modelar la susceptibilidad por métodos de aprendizaje automático, siendo la pendiente, la litología MDT, SPI, TWI, radiación solar, cobertura del suelo, distancia a ríos y caminos, NDVI, STI, curvatura, aspectos. Capas necesarias para la generación de un mapa de susceptibilidad a deslizamientos. Gracias a los sistemas de información geográfica (SIG), cantidad de estos factores pueden ser obtenidos a partir de un modelo digital del terreno con 3 metros de resolución espacial, que para el caso de la zona de estudio es entregado por el Ministerios de Ganadería Agricultura y Pesca, a través de su proyecto SIGTIERRAS.

Los mapas de susceptibilidad a deslizamientos deben ser validados, mediante el uso de cartografía e insumos oficiales o publicados. Esto puede hacerse mediante la observación y análisis de un técnico experto y las fuentes de obtención de la información, sin embargo, es mejor llegar a una validación más exhaustiva donde los métodos numéricos pueden ser el factor que se requiere para que no exista una alta subjetividad. Al momento de comprobar la veracidad de un determinado modelo, el análisis de curvas Receiver Operating Characteristic (ROC) por sus siglas en inglés, constituye un método estadístico para determinar la exactitud un modelo en específico. Donde este coeficiente

dependiendo de su valor entrega que tan bien construido fue mediante el análisis los factores utilizados, las pruebas de entrenamiento y de prueba del test. Permitiendo comparar la capacidad discriminativa de dos o más test diagnósticos que expresan sus resultados como escalas continuas. También se lo puede hacer mediante el punto de corte de una escala continua en el que se alcanza la sensibilidad y especificidad más alta o la evaluación de la capacidad discriminativa de la prueba (Cerdeira et al. 2011).

Se han realizado estudios para determinar este coeficiente ROC aplicado a un mapa de susceptibilidad de deslizamientos. En los cuales los resultados de las métricas de rendimiento revelaron con un AUROC de 0.879 resultó altamente confiable el modelo (Haninia et al. 2021). Por otro lado, Hughes (2020), propone que un valor ROC de 0.87 del área bajo la curva característica operativa del receptor, prueba que el modelo ha sido coherente. Sin embargo, los modelos obtenidos pueden logra resultados situados entre lo regular y bueno. Estadísticamente hablando, dependiendo que valor tome el ROC, el cual puede ir desde 0.76 hasta 0.86 (Di Napoli et al. 2022). Estos valores se pueden mejorar realizando cálculos del sobreajuste donde el *software* toma como prioritario las zonas más cercanas a los puntos del inventario de deslizamientos mediante el método estadístico de *crossvalidate* o validación cruzada.

4. Capas de información

Para los análisis de susceptibilidad, las capas de información base son necesarias para realizar las interacciones entre esta información. Permitiendo que las diferentes metodologías informáticas puedan realizar modelos de susceptibilidad basados en correlación de los datos y manejar determinados pesos para cada uno de los factores. Para el análisis de factores determinantes y la elaboración de un mapa de susceptibilidad con SIG, es necesario contar con las capas de factores (Herrera-Coy et al. 2023). Dichas capas cartográficas de factores condicionantes, han sido obtenidas de fuentes de información geográfica oficial del Ecuador, siendo uno de los más relevantes el modelo digital del terreno (MDT) de 3 metros de resolución espacial, generado por el proyecto SIGTIERRAS, que es la base para el cálculo de diferentes índices expuestos en la metodología. De la misma manera la geología y cobertura del suelo, pertenecientes al mismo proyecto gubernamental. Gracias a esto los datos ambientales necesarios para alcanzar un modelo de máxima entropía, cuentan con el respaldo de que la información está verificada por organismos rectores nacionales, encargados de la información cartográfica dentro del territorio nacional.

A partir del (MDT), se pueden obtener diferentes productos derivados como la pendiente, índice de curvatura, el índice de posición topográfica (TPI), el índice de humedad del suelo (TWI), el índice de rugosidad del terreno (TRI), entre otros. Mientras que otras capas como la litología y la cobertura del suelo han sido obtenidas de fuentes de información como es el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). Estos se escogen en función de que los deslizamientos son inducidos por una combinación de numerosos factores condicionantes interrelacionados, donde uno puede tener más peso en el análisis que otro (Liu et al. 2022). Autores como Di Martire et al. (2012) plantean que la pendiente y la litología tienen gran influencia, y dependiendo de la resolución espacial de la capa, mejora la delimitación de regiones dentro del modelo, así como las escalas y resoluciones de los insumos, obteniendo mejor detalle del resultado. Sin embargo, no existe bibliografía precisa y/o universal o procedimientos preestablecidos para llegar a una identificación de estos factores condicionantes pues dependerá en gran parte de la zona de estudio y sus características geológicas, la disponibilidad de datos, el método de evaluación y la escala del análisis (Liu et al. 2022).

En el caso del proyecto SIGTIERRAS, los productos se generaron mediante la captura de 86.040 fotografías aéreas de una superficie de 226.489 kilómetros cuadrados. Utilizando cámaras fotogramétricas de alta precisión y avanzados sistemas de navegación, como GPS e instrumentos inerciales en aeronaves. Tras un proceso de corrección digital para eliminar las distorsiones de las cámaras, estas imágenes se transformaron en ortofotografías con una resolución espacial de entre 30 y 50 cm². Además, se generó un (MDT) con una resolución de entre 3 y 5 metros (SIGTIERRAS, 2014).

Después de revisar información estatal disponible, además de diferentes fuentes de consulta como es el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE), en el presente documento se busca usar un total de 11 capas de información relacionados a los factores condicionantes para la posible ocurrencia deslizamientos en las parroquias,

4.1. Modelo digital de elevaciones

Los modelos digitales de elevación forman parte del grupo de datos del relieve que contienen información sobre la superficie terrestres. Constan de una estructura numérica donde se presentan los valores de altitud o elevación de las formas del relieve, donde podemos visualizar de manera digital las montañas, planicies, cañones, depresiones, etc. Y dependiendo del tipo de modelo que se genere, las estructuras

antrópicas. Gracias al modelamiento de estos espacios geográficos el modelo digital de elevaciones nos permite conocer cómo se encuentran las alturas, o desniveles, las pendientes, volúmenes, etc. Convirtiéndose en un factor determinante de las condiciones físico-ambientales y para atender emergencias o catástrofes originadas por desastres naturales (Días 2015).

4.2. Curvatura

La curvatura plana es un parámetro geométrico de la superficie terrestre; describe el cambio de pendiente en inclinación o aspecto. En el plano vertical paralelo a la dirección de la pendiente se considera como la curvatura de perfil y se utiliza comúnmente en la cartografía de susceptibilidad (Anis et al. 2019). El mapa de curvatura se obtuvo por medio del uso de un (MDT) 3 metros de resolución espacial.

4.3. Aspectos

El mapa de aspecto u orientaciones determina mediante el uso de un MDT. La exposición a las condiciones climáticas locales y algunos procesos atmosféricos como la lluvia, el viento, la luz solar y la humedad del suelo. Los valores que se encuentran entre 0 y 1 determinan como los elementos antes descritos pueden interactuar con el terreno mediante su orientación. Es decir, entre 0 todo tendrá una dirección hacia el sur y para los valores cercanos a 1 la dirección será hacia el norte (Bravo et al. 2023).

4.4. Distancia a ríos

Los ríos y las redes de drenaje como, quebradas, tienen una participación en los modelos de susceptibilidad de deslizamientos ya que acumulan aguas y saturan la superficie y el área subsuperficial circundante (Anis et al. 2019). El mapa de distancia y ríos se derivó una red de drenaje obtenida de la cartografía de libre acceso del Instituto Geográfico Militar escala 1:50.000, por medio del uso de la distancia euclidiana, se procesó este modelo.

4.5. Pendientes

La pendiente es la medida de la inclinación de la superficie de terreno y se mide en grados o porcentaje. Si hablamos de grados, esta puede estar dispuesta entre los 0 y 90 grados, donde los 90 grados serán el máximo de inclinación. La pendiente tiene una importancia alta al momento de análisis los factores para la ocurrencia de un

deslizamiento y se encuentra definida como un parámetro de entrada en los estudios de susceptibilidad (Çellek 2020). Esta favorece a que la velocidad aumente o disminuya debido al cambio en altura, cambiando los flujos de agua y cómo se comportan los materiales que han fallado en dirección a la pendiente. Cuanto más empinada sea la pendiente, mayores son las posibilidades de su falla, un aumento en el esfuerzo cortante y a una disminución en el esfuerzo normal. Usualmente se producen por el hundimiento y levantamiento de la superficie terrestre (Prasad 2017).

4.6. Cobertura del suelo

El uso y cobertura de suelo constituye un aspecto importante para la generación de mapas de susceptibilidad a deslizamiento, permite caracterización y especialización de las unidades del paisaje, así como también influye en la formación y evolución de los suelos. La presencia o ausencia de estos parámetros del suelo influye en la estabilidad de los taludes y ayuda al suelo reteniendo humedad. Para el mapa de uso del suelo se utiliza el desarrollado por el proyecto SIGTIERRAS a una escala de 1:25 000.

4.7. Litología

La litología entre los factores a ser utilizados para el modelamiento de susceptibilidad a deslizamientos, es uno de los más importantes. Esta promueve los cambios en la estabilidad de los taludes, dado que las diferentes unidades litológicas tienen diferentes grados de susceptibilidad, por ejemplo, la unidad de arcilla es más propensa a fallar que la unidad calcárea (Anis et al. 2019). Las formaciones geológicas del cantón, ha sido obtenida a partir de la litología contenida en la información geomorfológica, generada por la Unidad Ejecutora MAGAPPRAT en el proyecto SIGTIERRAS y publicada en el año 2015 a escala 1:25 000.

4.8. Stream power index (SPI)

Mide las tasas de erosión en unidades de potencia (vatio), dentro de la geomorfología cuantitativa. Pues existen procesos erosivos que modifican el paisaje y es necesario calcular esta potencia o poder erosivo de ríos o arroyos. “Predice la erosión neta en áreas de perfil convexo y de convexidad tangencial (zonas de convergencia y de aceleración de flujo), así como la deposición (de sedimentos) neta en áreas de perfil cóncavo (zonas de disminución de la velocidad de flujo)” (Bustos y Bermúdez 2017).

4.9. Topographic Wetness Index (TWI)

Es usado para caracterizar la diversidad y complejidad topográfica espacial de los terrenos de deslizamientos y a su vez poder caracterizar un deslizamiento. Este se define mediante la fórmula matemática $TWI = \ln(A/\tan\beta)$, donde A es el área contribuyente aguas arriba y $\tan\beta$ es la pendiente local (Rózycka et al. 2017).

4.10. Terrain Rouggedness Index (TRI)

Usa la elevación de una celda central, a la cual se le restan los valores de elevación de las celdas vecinas. Las diferencias resultantes se multiplican entre sí, se suman y se elevan al cuadrado una vez más, buscando definir la heterogeneidad morfológica. Este índice define las diferencias de elevación, donde la presencia de un escarpe con características para producir un deslizamiento aumente el valor promedio de TRI (Rózycka et al. 2017).

4.11. Topographic Position Index (TPI)

El índice de posición topográfica permite describir aspectos morfológicos del terreno a través del cálculo y sectorización de las pendientes. El TPI es un método de clasificación de la posición de la pendiente y de tipos de geomorfología.

El resultado del TPI depende de la escala ya que utiliza valores de sus cercanías, las longitudes medidas y la disposición de la pendiente (Pawar et al. 2007). Se interpreta mediante los valores obtenidos, siendo los valores positivos ubicaciones con alta elevación (Cimas), los negativos representan depresiones o zonas más bajas (Valles), si se obtienen valores cercanos al cero las zonas serán planas (Calderón et al. 2020).

4.12. Sediment transport index (STI)

El STI se basa en el Índice Topográfico (TI) y la variación espacial en propiedades del suelo relevantes hidrológicamente. El STI funciona como un indicador crítico para medir la probabilidad de que una ubicación en el paisaje genere escorrentía por saturación excesiva. Se lo calcula mediante el uso de variables asociadas a las áreas donde existe una contribución de aguas arriba mediante el contorno de las cuencas hidrológicas, además de la pendiente y transmitancia del suelo (Wu et al. 2016).

4.13. Radiación solar

La radiación solar es la principal fuente de energía que impulsa muchos de los procesos físicos y biológicos, lo que la convierte en un componente básico del paisaje y sus procesos naturales y las actividades humanas. Esta requiere estar asociada al terreno que es donde el sol va a reflejarse, por lo que la topografía, que compone las pendientes, la altitud, las horas etc. Determina la variabilidad espacial y la cantidad de insolación que se presenta en la superficie terrestre. En el análisis de deslizamientos, los patrones de clima son importantes por la presencia de agua y este factor puede determinar en ciertos grados la variabilidad del microclima, regímenes térmicos del aire y del sol, la evapotranspiración, la humedad del suelo (ESRI 2022).

5. Inventario de deslizamientos

Uno de los fenómenos naturales más comunes son los deslizamientos. Estos tienen distintos detonantes siendo el principal las precipitaciones, así como también por terremotos, cambios de temperatura y/o acciones antropogénicas (Ayala et al. 2002). Cada año los deslizamientos causan innumerables muertes y graves daños a infraestructuras y medio ambiente. En base de esto se ha visto necesario identificar, registrar y obtener información acerca de estos fenómenos. Pues estos datos serán un punto de partida para organizar de mejor manera el territorio y poder tomar decisiones, buscando soluciones para la mitigación de los efectos negativos de estos fenómenos naturales.

Los deslizamientos son desplazamientos de suelo o roca en una ladera en sentido descendente y hacia el exterior esta (Escobar et al. 2017). Siendo esta una denominación general que puede clasificarse en movimientos de diversos tipos. Este tipo de fenómenos presentan una dinámica relativamente lenta, por lo cual pasan desapercibidos si no se visualizan evidencias geomorfológicas como grietas en el suelo y son difíciles de tratarlos de manera específica debido a la cantidad de causas que pueden generarlos. Estos fenómenos se sitúan dentro de la categoría de riesgos ya que se originan en la corteza terrestre y pueden desencadenar importantes desastres con pérdidas incalculables.

Una parte crucial de la gestión de riesgos radica en la identificación de las áreas susceptibles a diversos tipos de desastres, con el fin de fundamentar decisiones informadas. En este contexto, el mapeo de amenazas constituye un elemento fundamental, donde el inventario de deslizamientos emerge como un componente de suma importancia para las instituciones, autoridades y población en general. Este enfoque busca impulsar el

desarrollo de manera apropiada. De este modo, la cartografía de deslizamientos representa espacialmente las zonas con susceptibilidad o probabilidad relativa de verse afectadas por dichos movimientos, buscando además que sea fácilmente interpretable incluso por aquellos que no son expertos en la materia (Gómez 2017).

Según Ríos (2015) el inventario de deslizamientos es, con mucho, el más importante, para un análisis de riesgos o susceptibilidad a deslizamientos, pues proporciona la información necesaria sobre la ubicación de los fenómenos de deslizamiento en el territorio y sus características. Estas generalmente son el tipo de deslizamiento, los volúmenes y el daño causado. “Las bases de datos de inventario de deslizamientos deben mostrar información sobre la actividad de los deslizamientos y por lo tanto, requieren información de deslizamientos multitemporales sobre regiones más grandes” (Ríos 2015).

A nivel nacional, se enfrenta el desafío adicional de la falta de monitoreo periódico, lo que dificulta la realización de acciones concretas para mitigar el impacto de los fenómenos de remoción de masas. La ausencia de datos para describir el movimiento, determinar las velocidades de desplazamiento y verificar su comportamiento a lo largo del tiempo constituye una limitación significativa (Zárate et al. 2011).

La generación de información y el uso de imágenes satelitales han experimentado una evolución positiva en el tratamiento de los datos. A continuación, se describen brevemente las técnicas utilizadas para el mapeo de un inventario de deslizamientos.

Una de ellas es la técnica de Interferometría SAR Diferencial (DInSAR). En la cual se observa la misma escena desde distintas posiciones orbitales y en diferentes momentos. La diferencia de fase se expresa como la suma de varios términos (topografía, atmósfera, desplazamiento, ángulo de incidencia, ruido, etc.). Esta técnica puede aislar la contribución del desplazamiento que ocurre entre las dos adquisiciones (Pierluigi et al 2016).

Por otro lado, se puede disponer de un método en el cuál tenemos completo control del levantamiento de información. Pues se lo realiza directamente en el lugar donde un deslizamiento se está produciendo, gracias al uso de las nuevas tecnologías se puede llegar a disponer de aplicaciones o formularios digitales en los cuales el técnico, puede levantar toda la información relacionada en campo. Obteniendo sobre todo la coordenada GPS de ubicación del deslizamiento con errores inferiores a los 10 metros.

El aplicativo móvil para inventario de deslizamientos regionales (MARLI), es una plataforma de acceso abierto simple pero eficiente para reportar eventos de

deslizamientos utilizando el sistema *Open Data Kit*. Su diseño permite un reporte rápido, sencillo y rentable, con un beneficio adicional y especializado (Sellers et al. 2021). Este aplicativo permite levantar la información más relevante sobre deslizamientos en campo, evitando el uso de formularios físicos. Toda la información recolectada en campo dentro de fichas virtuales, donde consta la georreferenciación de cada fenómeno, el estado, su peligrosidad, volumen deslizado, geología presente, detonante de cada deslizamiento, infraestructura dañada, etc., Se lo carga a una base de datos, la cual es descargable y nos entrega un archivo en formato CSV, con el cual se puede trabajar en cualquier *software* que soporte este tipo de archivo como es el caso de los SIG.

Mediante esta información se ha generado el mapa de inventario de deslizamientos para el cantón Cuenca (Figura 8). El cual es un insumo de relevancia para el desarrollo local, ordenamiento del territorio, etc. Este mapa se encuentra ligado a un sistema de georreferenciación WGS 84 zona 17 sur y está disponible dentro de las bases de datos del IERSE organismo de la Universidad del Azuay. Sin embargo, para el presente se ha tomado únicamente la información relevante a las parroquias de estudio, para obtener únicamente los deslizamientos que se han levantado en esta área, con un total de 318 eventos de deslizamiento en las 5 parroquias.

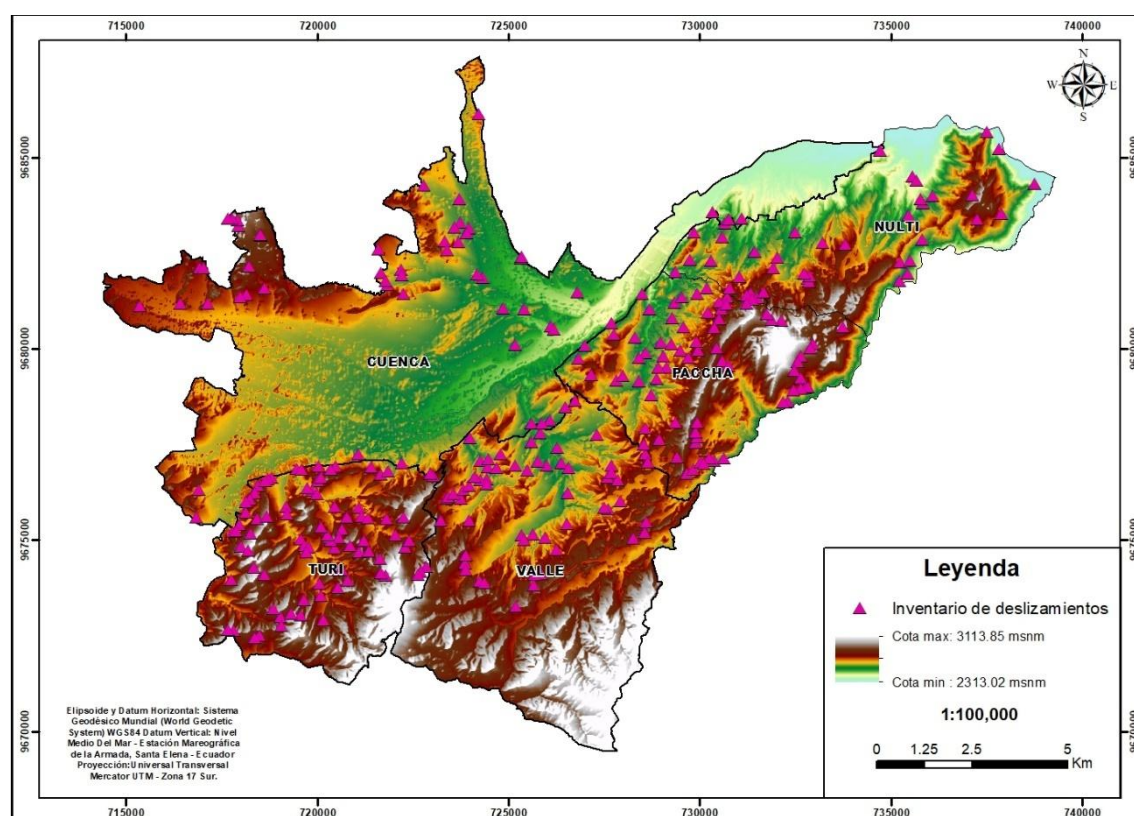


Figura 8. Inventario de deslizamientos 2021.
Fuente: SIGTIERRAS (2010), (IERSE 2021)

6. El método MaxEnt de máxima entropía

La cartografía enfocada a la generación de susceptibilidad tiene un gran impacto en el mundo contemporáneo, pues la gestión del riesgo se ha convertido en un eje relevante para la toma de decisiones. Desarrollar conocimiento acerca de los deslizamientos, puede convertirse en una medida popular para reducir las consecuencias de estos, debido a que permite representar la distribución espacial de la probabilidad de un fenómeno de deslizamiento se pueda presentar en un área. Todo esto basado en el entorno geográfico y sus diferentes factores detonantes (Achu et al. 2023).

Para modelar una cartografía de susceptibilidad a deslizamientos y basados en el uso de nuevas tecnologías en la computación, se ha desarrollado técnicas y métodos de aprendizaje automático y estadístico con sus ventajas y desventajas. Dentro de estas metodologías podemos resaltar la máquina de vectores de soporte (Support Vector Machine), el bosque aleatorio (Tree Boost) y la entropía máxima (MaxEnt), los cuales ha contribuido a la gestión de la información de riesgos naturales (Javidan et al. 2021).

La entropía máxima se ha utilizado con éxito dentro del campo del aprendizaje automático o *machine learning* para cartografía riesgos que afectan al planeta y a la población. Los deslizamientos son uno de los principales ejes de estos estudios, debido a su alta peligrosidad, sobre todo en zonas de altas pendientes, clima y geología variada. Debido a esto la herramienta MaxEnt permite que el análisis se vuelve más exitoso, debido a su implementación rápida y sencilla, así como a sus robustas funciones matemáticas y fundamentos teóricos (Achu et al. 2023). Entonces es un *software* de aprendizaje automático, en el cual se manejan diferentes factores de modelamiento y submodelos generados durante este aprendizaje, para estimar la distribución de probabilidad de ciertas variables bajo un principio de aleatoriedad. Siendo esto un indicador que permite medir el grado de variabilidad. Por lo que este modelo funciona como la interpretación de un valor esperado de la información contenida en los datos (Boussouf et al. 2023).

Proporciona una medida de la incertidumbre o la falta de estructura en un sistema de datos. Si esta corresponde a un valor alto, hay más desorden o incertidumbre en los datos y si el valor de la entropía es bajo, los datos tienden a estar más organizados o disminuyendo su incertidumbre (Boussouf et al. 2023). Definiendo de forma automática el valor esperado de la auto información que una variable puede presentar, por lo tanto, se refiere a la cantidad de información en esa variable disponible (Bianchini et al. 2022) y

como puede interactuar con otras en un número finito de interacciones para analizar estadísticamente diferentes modelos.

Los modelos estadísticos necesitan un detallado inventario de deslizamientos de tierra en al menos una parte del área de estudio para desarrollar y validar el modelo. Al mismo tiempo que requiere de factores ambientales, morfológicos, índices del terreno, etc., correspondientes al área de estudios. Aunque son intuitivos y fáciles de entender, estos métodos requieren que el modelador tenga datos sobre la ausencia de deslizamientos, lo cual puede ser difícil de obtener en la práctica. (Achu et al. 2023).

Como se menciona, el *software* de aprendizaje automático MaxEnt, requiere de una serie de datos que le permiten construir el modelo probabilístico uniforme en función de su distribución de probabilidades, mediante el análisis de las relaciones entre las variables usadas para el modelo. Por lo que para el presente trabajo se han utilizado varias fuentes de información ya sean elaboradas por organismos estatales, privados, así como subproductos de esta. Toda esta información debe ser procesada e ingresada de la siguiente manera en MaxEnt (Figura 11):

1. Puntos georreferenciados del inventario de deslizamientos, donde conste únicamente sus coordenadas UTM en X & Y (correspondiente al sistema de referencia utilizado).
2. Puntos georreferenciados de los bonos de desarrollo humano, donde conste únicamente sus coordenadas UTM X & Y (correspondiente al sistema de referencia utilizado).
3. Archivo CSV generado a partir de los datos sistematizados de punto 1 y 2.
4. Información ráster de la zona de estudio, con valores de píxel uniformes. Para el presente documento se ha utilizado una resolución espacial de 3 x 3 metros.
5. La información tipo ráster, transformada a formato ASCII de la zona de estudio correspondiente a las 5 parroquias. Siendo importante que el sistema de referencia coincida con el utilizado en los puntos 1 y 2. Además de mantener límites geográficos definidos para cada archivo.
6. Introducir la información a *software* MaxEnt, donde la muestra corresponde al inventario de deslizamiento y los bonos de desarrollo humano. Y en las variables ambientales los factores correspondientes de la zona de estudio en archivos tipo ASCII.
7. Configurar el *software* MaxEnt y procesar la información.

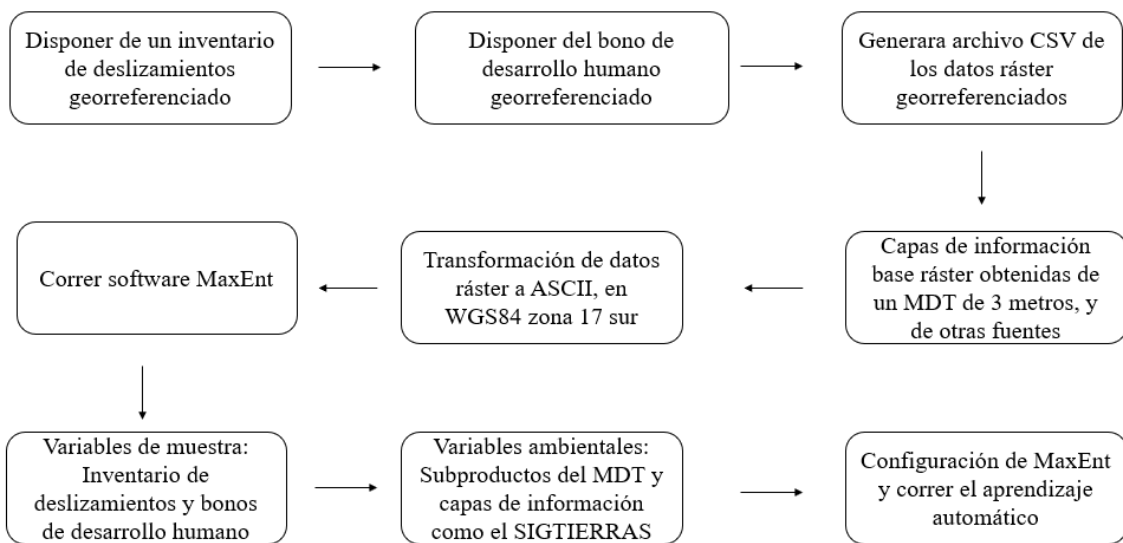


Figura 9. Diagrama de flujo para proceso MaxEnt
Fuente y elaboración propias

Con esta información MaxEnt, utiliza un algoritmo iterativo para procesar un modelo final y alcanzar el mejor ajuste de una función de distribución; “el proceso de ajuste implica un recorrido aleatorio en el espacio de los parámetros (los coeficientes para cada predictor) con la asignación de un valor de parámetro. Por iteración, el *software* propone nuevos valores de parámetros tratando de aumentar la ganancia hasta su asíntota permitiendo analizar el comportamiento futuro, en base a el número de iteraciones definido” (Boussouf, et al. 2023). El algoritmo lo que busca, es maximizar la ganancia para alcanzar un modelo más certero y cercano a la realidad de la susceptibilidad del territorio. “El recorrido aleatorio, que genera puntos para ver la probabilidad de ocurrencia, mediante una probabilidad uniforme de dentro de un espacio geográfico y se aleja de esta distribución debido a las restricciones de los datos, como son las variables de muestra y continúa en iteraciones sucesivas hasta que el aumento en la ganancia caiga por debajo de un umbral de convergencia, es decir cuando no estén sobre ajustados los datos al modelo, este se encuentra de forma predeterminada en MaxEnt” (Phillips et al. 2006).

7. Bonos de desarrollo humano

7.1. Los bonos de desarrollo humano y la distribución para la población vulnerable

Según el (Ministerio de Inclusión Económica y Social 2024), el bono de desarrollo humano en el Ecuador es una transferencia monetaria mensual de USD 55,00. Tiene como objetivo ayudar a las familias que enfrentan vulnerabilidades económicas. Está destinada a los representantes de hogares en situación de pobreza y extrema pobreza, de acuerdo con el Registro Social vigente, que no estén afiliados a sistemas de seguridad social contributiva, salvo en el caso del Seguro Social Campesino y el Trabajo No Remunerado en el Hogar. Se prioriza a la mujer que sea jefa de hogar o cónyuge, o a quien tenga la responsabilidad de tomar decisiones de compra, siempre que su edad esté entre 18 y 64 años.

La Constitución de Ecuador establece el objetivo de promover el Buen Vivir mediante políticas públicas y acciones directas del Estado. En este contexto, se encarga a la Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES) la tarea de diseñar planes que faciliten este Buen Vivir, el cual se define como "el desarrollo que implica alcanzar el Buen Vivir para todos y todas, en paz y en armonía con la naturaleza, así como la continuidad indefinida de las culturas humanas. El Buen Vivir implica que se amplíen las libertades, oportunidades, capacidades y potencialidades de las personas, permitiendo que se logren de manera simultánea los objetivos de vida que la sociedad, los territorios y las diversas identidades colectivas consideran deseables" (EC Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo 2007). A partir de este principio, se reafirma la necesidad de que el Ministerio de Inclusión Económica y Social elabore planes que fomenten este Buen Vivir, lo que llevó a la creación del Bono de Desarrollo Humano. Este se otorga a nivel nacional con un total de 621 861 usuarios, mientras que la proforma del presupuesto general del Estado se ha destinado cerca de 720 millones de dólares anuales que se entregaron el en año 2023, correspondientes al 0,58 % del PIB del país

Originalmente este bono se enfocaba en toda la población de bajos recursos, pero recibió una modificación variando la población objetivo y se toma en consideración únicamente a la parte de la población pobre que se encuentra en situación pobreza extrema, es decir que perciben menos de 51,60 dólares al mes, correspondiente al 10,6 % de la población del Ecuador (EC INEC 2024). No obstante, el punto de corte establecido es ligeramente superior a la línea de pobreza extrema (Martínez et al. 2017), que en cierto

modo es la situación que miles de personas en el Ecuador afrontan, propiciada y perpetuada por acciones y omisiones de los Estados y otros agentes económicos. De esta manera las políticas públicas, la segregación social y la desigualdad han transmitido la pobreza de generación en generación. Todo esto basado en un sistema que ha manejado normas y reglas estructurales y sistémicas de orden social, político, económico y cultural, que a menudo no se abordan y fomentan que las brechas socioeconómicas no cambien con el tiempo y se mantengan o en ciertos casos empeoren (Naciones Unidas 2017).

Esto se ha manejado por muchos años pues la protección social se dirigía principalmente a los trabajadores formales, dejando fuera a aquellos que no estaban integrados en el mercado laboral. Creando un sistema sin garantías, beneficios y derechos de la universalidad en el acceso a la protección social, fragmentando los recursos públicos y limitando la atención a aquellos que no contribuían a sistemas de pensiones públicos o privados (Martínez et al. 2017). Todas estas limitaciones por parte de los gobiernos, fomentó que la empresa privada tome acciones, que imposibilitaban a las personas ganar un salario digno, o dejándolas en el desempleo, el cual es uno de los principales precursores de la pobreza extrema. Según el INEC (2023) la desigualdad, hace referencia a la forma en que se distribuye el ingreso per cápita del hogar dentro de la sociedad y este nivel de pobreza alcanzó el 22,6 % de la población. Siendo el sector rural o periurbano el más afectado con un 46,4 % de pobreza. Sin embargo, las crisis económicas y los programas de ajuste estructural generaron un cambio de paradigma hacia una perspectiva de reducción de la vulnerabilidad a largo plazo, en lugar de simplemente abordar la pobreza en el corto plazo. Este cambio llevó a una reevaluación de las transferencias monetarias como instrumentos para mejorar el capital humano y superar la pobreza en el largo plazo (Martínez et al. 2017).

Con el fin de afrontar y mitigar estos problemas, se instaura el bono de desarrollo humano, conocido en 1989 como el Bono Solidario, el cual es entregado en el Ecuador a la población económicamente más vulnerable, buscando un alivio inmediato de la pobreza a través de la transferencia de dinero para incrementar la capacidad de consumo e Incrementar y fortalecer el capital humano para detener la transmisión intergeneracional de la pobreza en función del acceso a educación, salud y evitando el trabajo infantil. Este bono se basa en los programas de transferencias monetarias que corresponden a estrategias de las políticas de protección social, que tienen como objetivo principal la disminución de la pobreza. (MIES 2016). Estas políticas consisten la entrega de dinero que el gobierno otorga a estos grupos socioeconómicos vulnerables. a cambio de que

cumplan con ciertas condiciones, usualmente relacionadas con la inversión en capital humano, como la atención médica y la asistencia escolar de niños y jóvenes (Fiszbein et al. 2009).

En el año 2007, se inició un proceso para reestructurar los planes y políticas asociadas al bono de desarrollo humano, asociados a la reforma constitucional que se encontraba en curso. Donde se determina que el enfoque asistencialista ya no era viable pues las personas tienen que desarrollarse por sí solas, por medio de ayuda buscando tener un impacto en la reducción de la pobreza. Por lo que el MIES en 2008 propone que el bono sea una herramienta de gestión de "protección para la promoción", que se vinculaba con la inclusión económica y contribuía a la construcción de un piso de protección social con el objetivo de erradicar la pobreza en el corto y mediano plazo, según lo establecido en el Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017 y la Estrategia Nacional para la Igualdad y Erradicación de la Pobreza.

El principio de corresponsabilidad es un eje fundamental por medio del cual el Estado, las familias, las comunidades y la sociedad colaboran en la construcción del Buen Vivir, garantizando el bienestar básico y el cuidado mutuo de todas las personas a lo largo de su ciclo de vida. Desde esta perspectiva, la condicionalidad dentro del Bono de Desarrollo Humano (BDH) se entendió como un elemento de corresponsabilidad en el cumplimiento de diversas áreas como la salud materno-infantil, la educación, la vivienda y la erradicación del trabajo infantil y la mendicidad, logrando que las nuevas generaciones puedan tener un mejor estilo de vida (Martínez et al. 2017).

Por lo que se plantea que el Bono de Desarrollo Humano sea una transferencia monetaria mensual de USD 50 dirigida a familias que cumplen con las condicionalidades de corresponsabilidad en educación y salud. La transferencia es recibida por el representante del núcleo familiar, preferiblemente una mujer.

Los criterios de protección para calificar para el Bono de Desarrollo Humano (Tabla 3):

Tabla 3

Criterios para acceder al bono de desarrollo humano

Ser representante de las familias que viven en situación de pobreza y extrema pobreza
Usuario que no acceda a seguridad social contributiva, a excepción de Seguro Social Campesino y Trabajo no Remunerado en el Hogar
Usuario con niños con discapacidad dentro del hogar
Usuario con edad comprendida entre los 18 y 64 años
Usuario domiciliado en el territorio nacional

Fuente: MIES, 2016

Capítulo segundo

La cartografía para susceptibilidad y *software* de Máxima Entropía

En este capítulo se detalla el proceso de construcción de la cartografía temática y las capas de información necesarias para modelar la susceptibilidad a deslizamientos. Se describe la obtención y procesamiento de variables ambientales derivadas del modelo digital del terreno, que es una fuente de información cartográfica oficial del Ecuador, como pendientes, curvatura, índices topográficos, y otras relacionadas con la cobertura y uso del suelo. Además, se explica cómo se sistematizó el inventario de deslizamientos y cómo se integraron los datos socioeconómicos, en particular los bonos de desarrollo humano. Finalmente, se introduce el software MaxEnt como herramienta de modelado basada en aprendizaje automático, destacando sus requerimientos técnicos, ventajas y preparación previa al modelado.

1. Construcción de cartografía e información base en SIG

Los SIG son herramientas con las cuales se puede consolidar y sistematizar datos espaciales y territoriales. Es decir, cualquier información que pueda estar asociada al territorio y que pueda tener un componente de georreferenciación. Buscando la transformación del formato análogo a la digital, mejorando de manera significativa la calidad de los datos y facilitando analizar las relaciones que existen los diferentes datos, presentando esta información en formato de fácil divulgación y acceso (Gutiérrez et al. 2011). De igual manera, los SIG permiten la automatización de procesos mediante el uso de modelos cartográficos y código de programación *Python* para la construcción de escenarios (Pavón et al. 2021).

Se deben obtener estas relaciones del componente geográfico digital y los análisis más profundos. Buscando realizar un proceso de generalización donde la información con mayor detalle se cruza con información de menor detalle, alcanzando una escala única. Durante muchos años el territorio ha sido analizado desde una perspectiva enteramente física, es decir, analizando el suelo como tal (topografía, geología, etc.), dificultando el poder profundizar en su estructura espacial y dimensional. Sin embargo, las variables que lo componen han tomado tal trascendencia (Gutiérrez et al. 2011), que son las que definen las condiciones de cambios en el tiempo e identificar posibles riesgos que puedan asociarse a determinados procesos como son los deslizamientos.

Es así cuando los SIG permiten manejar la información producida por la Geomática, logrando capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada. Todo esto con el fin de resolver problemas complejos de planificación territorial y gestión (Geoambientales 2015). Además, que este *software* permite la automatización mediante flujos de trabajo, los cuales encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento, alimentando la salida de una herramienta como entrada en otra herramienta para la transformación de los datos (Pavón, 2019). En el presente trabajo se busca usar este postulado para sistematizar, transformar y analizar la información disponible, con el objetivo de que los análisis de susceptibilidad estén asociados a una base de datos sólida, donde se ha buscado que el modelo digital del terreno, el mapa de cobertura y uso de la tierra, etc. Sean datos de entrada en el modelo de máxima entropía y obtengan un peso dentro de este.

Cabe recalcar que el SIG dentro de la metodología presentada, es utilizado para la creación, de estos datos conocidos como datos de ambiente que serán utilizados por MaXEnt para las procesar las interacciones necesarias, buscando alcanzar los datos estadísticos que validen un modelo. Así, la herramienta SIG facilita los cálculos necesarios para crear distintos índices, recorta la información asegurándose de que los límites geográficos coincidan en todas las capas y añade un sistema de referencia uniforme vinculado al datum WGS 84, zona 17 sur (UTM). Basado en que el mapeo de susceptibilidad y otros análisis del riesgo deben estar basados deben tener ese soporte cartográfico.

Toda esta información que es ingresada a un SIG y procesada y nace de la necesidad de determinar variables que se han propuesto para la conformación de la susceptibilidad, basados en una serie de análisis y segmentación. De todo el abanico de opciones de información que existe disponible o puede ser generada, buscando satisfacer esa necesidad de poder resolver un problema específico. Determinando de esta forma los alcances y limitaciones enmarcados por las características de la información fuente. En este estudio se consideran las variables más relevantes (Tabla 4), las cuales deben ser seleccionadas de acuerdo con su pertinencia temática y sus características. Esto permitirá una adecuada evaluación de la amenaza por deslizamientos. Es necesario también determinar el orden de importancia de estas variables dentro del estudio, tanto para su análisis como para su procesamiento posterior (SGA 2017).

Para la selección de la información que es procesada, sistematizada y generada mediante herramientas, se ha realizado una recopilación de información de diferentes

autores que han señalado a diferentes fuentes de información como las principales para desarrollar un análisis de susceptibilidad. Estos pueden subdividirse en cuatro grandes grupos que comprenden los datos de inventario de deslizamientos, factores ambientales, factores desencadenantes y elementos en riesgo (Ríos 2015). De los cuales es importante, la cobertura vegetal interrumpida o ausente, anómala, características de la pendiente relacionada con sus cambios, el uso de MDT para determinar la morfología, diferentes características de la superficie, que se han logrado trabajando con un MDT de 3 metros de resolución espacial, además se considera importante el uso de mapas relacionados con las características de drenaje superficial 1:5000 (Soeters 1996).

Para el presente trabajo se utilizan 16 fuentes de información (Tabla 4), que se ha considerado necesarias para construir el modelo de susceptibilidad a deslizamientos mediante máxima entropía MaxEnt, esta información ha sido procesada mediante *software* de (SIG), necesario al momento de realizar los cálculos ráster para producir estos modelos. Estas capas son archivos geospaciales que cubren toda el área de estudio y contienen información ambiental distribuida espacialmente en celdas o píxeles con límites uniformes, representan variables del entorno que pueden influir en la presencia o ausencia de un fenómeno. Además, se ha realizado una revisión bibliográfica que permita determinar las capas de información temática que se han utilizado en diferentes estudios de susceptibilidad, buscando evitar subjetividad en la elección de esta cartografía.

Tabla 4

Descripción de las variables para modelamiento de susceptibilidad a deslizamientos

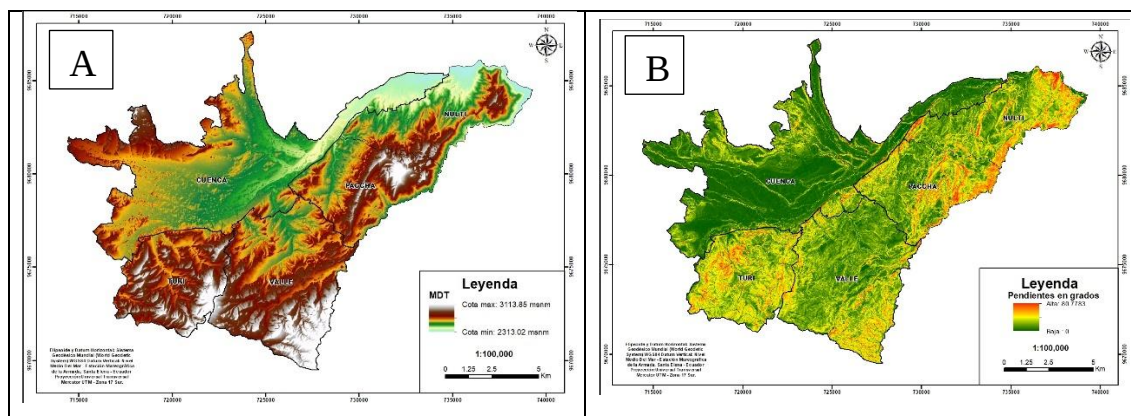
Variable para análisis	Análisis
Modelo digital del Terreno (MDT)	El MDT, ha sido el punto de partida para la obtención de datos topográficos e índices. Dentro del estudio tiene la función principal de entregar el valor de cada píxel relacionado a la altura de terreno. Siendo el píxel más alto corresponde a 3113.85 m.s.n.m y el más bajo, siendo la cota más baja, un valor de 2313 m.s.n.m. Este es producto del proyecto SIGTIERRAS donde por medio de fotografía aérea y orto rectificación se genera el modelo con un valor de píxel de 3 metros.
Modelo de pendientes	La pendiente se genera a partir de un MDT y se refiere a la tasa de cambio de elevación de una celda a la siguiente, es decir, muestra la inclinación en cada celda de una superficie ráster. En SIG se calcula mediante la formula: Siendo el valor máximo obtenido 77.07 grados y el mínimo correspondiente a 0, siendo una zona plana del territorio.
Modelo de curvatura de la superficie	La curvatura es la derivada segunda de la superficie, o la pendiente de la pendiente, obtenida por medio del MDT de 3 metros, si el valor de curvatura es positivo la superficie es convexa hacia arriba, si es negativa indica que la superficie es cóncava hacia arriba.
Modelo de Aspectos (Orientación)	Permite conocer la dirección de la pendiente. Para cada valor de píxel del ráster se integra la dirección de brújula a la que apunta la superficie en esa ubicación. Se mide en el sentido de las agujas del reloj en grados de 0 (hacia el norte) a 360 (hacia el norte, nuevamente).

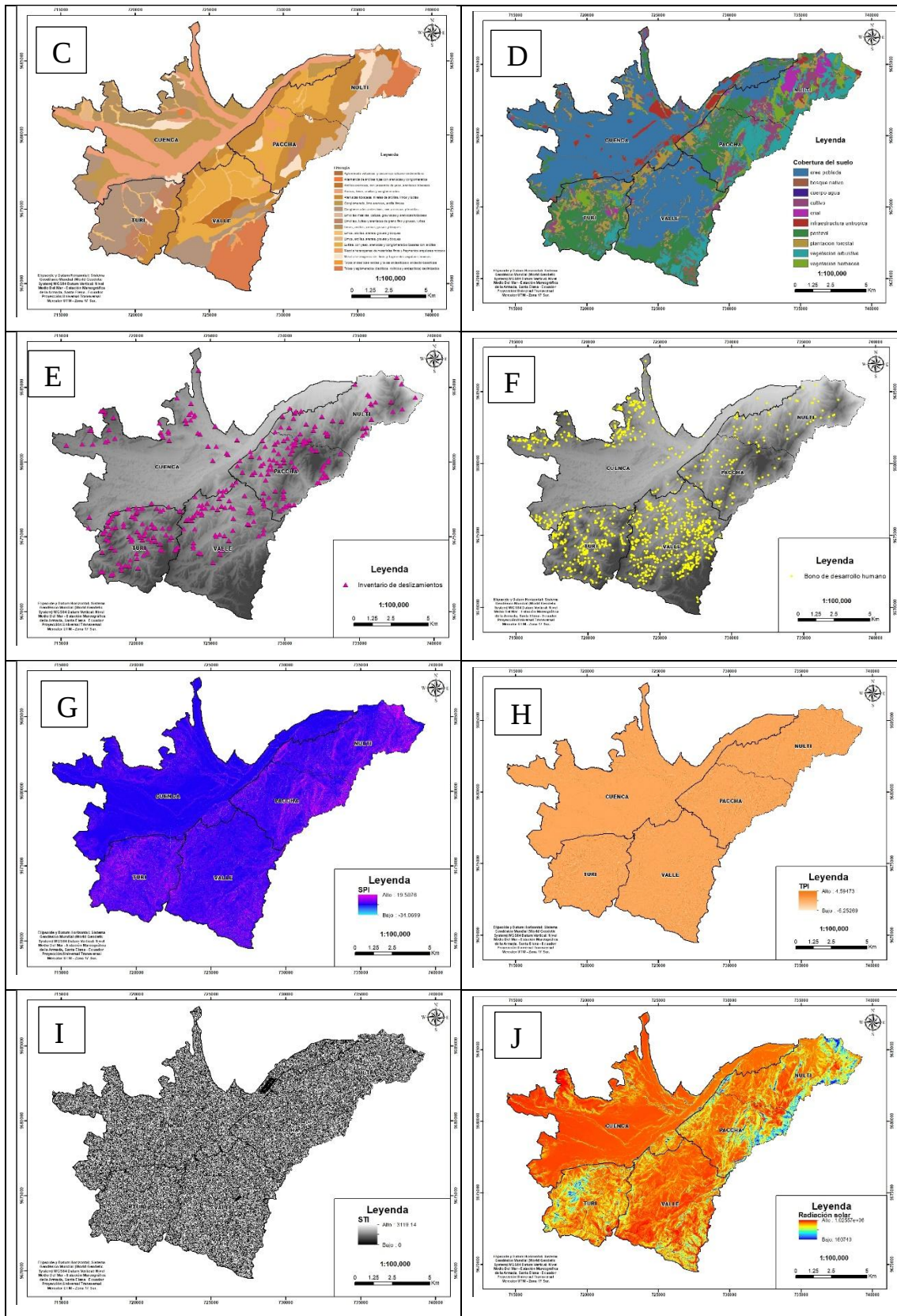
Mapa litológico	La litología es obtenida del proyecto SIGTIERRAS a escala 1:25000, de todas las litologías presentes, en el área de estudio los deslizamientos ocurrieron más en materiales de mezcla heterogénea con materiales finos, además de presencia alta de areniscas, tobas y aglomerados y una alta presencia de conglomerados andesíticos, con capas de arcilla, limonitas, lutitas, arenas. Alcanzando más del 58% de ocurrencia de deslizamientos asociados a esta litología.
Mapa de cobertura del suelo	La cobertura es obtenida del proyecto SIGTIERRAS a escala 1:25000, de todas las coberturas presentes, en el área de estudio los deslizamientos ocurrieron más zonas de pastizal, vegetación arbustiva y plantaciones forestales, donde la deforestación es común. Alcanzando más del 65% de ocurrencia de deslizamientos asociados a esta cobertura de suelo.
Topographic wetness index (TWI)	Calculado a partir de productos derivados del modelo digital del terreno de 3 metros de resolución espacial, este índice se muestra la condición de humedad del suelo, obtenida mediante al logaritmo natural de la acumulación de flujo y la tangente de las pendientes Sørensen, (Zinko & Seibert 2006), se calcula por medio de la fórmula:
Terrain Ruggedness Index (TRI)	Calculado mediante el uso de estadísticas focalizadas, la cuales, para cada ubicación de celda de entrada, calcula una estadística de los valores dentro de una vecindad especificada alrededor de ella, buscando obtener los valores máximos, mínimos y promedio y realizando operaciones entre estos, obteniendo, expresando la diferencia de elevación entre celdas adyacentes de una cuadrícula de elevación digital, (Shaw et al. 1999).
Stream Power Index (SPI)	Calculado a partir del mapa de acumulación de flujo y de las pendientes, permitiendo medir la tasa de erosión del suelo, mediante el uso de logaritmo natural y tangente de la pendiente, se lo calcula mediante la formula:
Topographic Position Index (TPI)	Calculado mediante el uso de estadísticas focalizadas, la cuales, para cada ubicación de celda de entrada, calcula una estadística de los valores dentro de una vecindad especificada alrededor de ella, buscando obtener los valores promedio y realizando una operación de resta entre ráster, obteniendo, buscando patrones de cambio del relieve y su evolución (Skentos 2017)
Sediment Transport Index (STI)	Calculado mediante productos derivados del modelo digital del terreno de 3 metros, como es la acumulación de flujo y las pendientes, permite interpretar como es el flujo de partículas y su radio de movimiento, fruto de la erosión y transporte. Usando la función potencia en SIG, se elevan los valores de las celdas ráster en función de los valores encontrados en otro ráster, siendo el caso pendientes y acumulación de flujo. Se lo calcula mediante la fórmula:
Distancia a ríos	Se obtiene mediante el uso de la distancia euclidiana, que describe la relación de cada celda con un conjunto de orígenes basado en la distancia en línea recta, es decir la distancia medida desde cada celda hasta el origen más cercano usando como punto de partida un archivo vectorial de ríos obtenidos del IGM 1: 50000, recortadas para el área de estudio.
Distancia a caminos	Se obtiene mediante el uso de la distancia euclidiana, que describe la relación de cada celda con un conjunto de orígenes basado en la distancia en línea recta, es decir la distancia medida desde cada celda hasta el origen más cercano usando como punto de partida un archivo vectorial de vías obtenidos del IGM 1:50000, recortadas para el área de estudio
Inventario de deslizamientos	Se cuenta con 370 puntos georreferenciados generados por el IERSE en el año 2020, de zonas donde ha ocurrido o está ocurriendo un deslizamiento dentro de la zona de estudio. Donde 245 siendo el 66%, corresponden a rotacionales que conforme avanzan, se convierten en complejos, donde pueden verse pequeños traslacionales, caídas, flujos, etc. El otro 34 % de deslizamientos se clasifican en caídas, flujos, laterales, traslacional y otro
Bono de desarrollo humano	Para el presente estudio se usa como variable socioeconómica, el bono de desarrollo humano, el cual y en conjunto con el inventario de deslizamientos son los datos de entrada del modelo. Esta capa de información se encuentra en formato

	CSV y cuenta con 1365 puntos georreferenciados de personas que reciben el bono.
Radiación solar	Especifica cómo se comporta la radiación solar en la superficie del terreno, permitiendo conocer cómo puede evaporarse el agua más lento o rápido dependiendo de la topografía, pues deriva la radiación solar entrante de una superficie de ráster. Para este modelo se usa el modelo digital del terreno con resolución de 3 metros, especificando el parámetro anual de radiación el año de creación del MDT, siendo el 2014.

Fuente y elaboración propias

La selección de factores condicionantes (Figura 12), constituye un paso fundamental en la generación apropiada de Modelos de Susceptibilidad a Deslizamientos mediante el método MaxEnt. Para el presente trabajo, la selección de dichos factores se basó en la disponibilidad de información en el área de estudio, siendo importante destacar que no existe una estandarización de un número de capas específicas a ser seleccionadas, dado que las características de cada área de estudio son heterogéneas (Bravo 2023). Se consideraron un total de 14 factores correspondientes a las variables ambientales, dejando de lado los datos tipo punto CSV correspondientes al inventario de deslizamientos y los bonos de desarrollo humano que son variables de muestra. Estos factores o variable ambientales incluyen 10 factores topográficos, 1 de cobertura terrestre, 1 geológico, 1 hidrológico y 1 factor infraestructura. Siendo importante y relevante señalar que toda la información recopilada proviene de fuentes oficiales del gobierno de Ecuador.





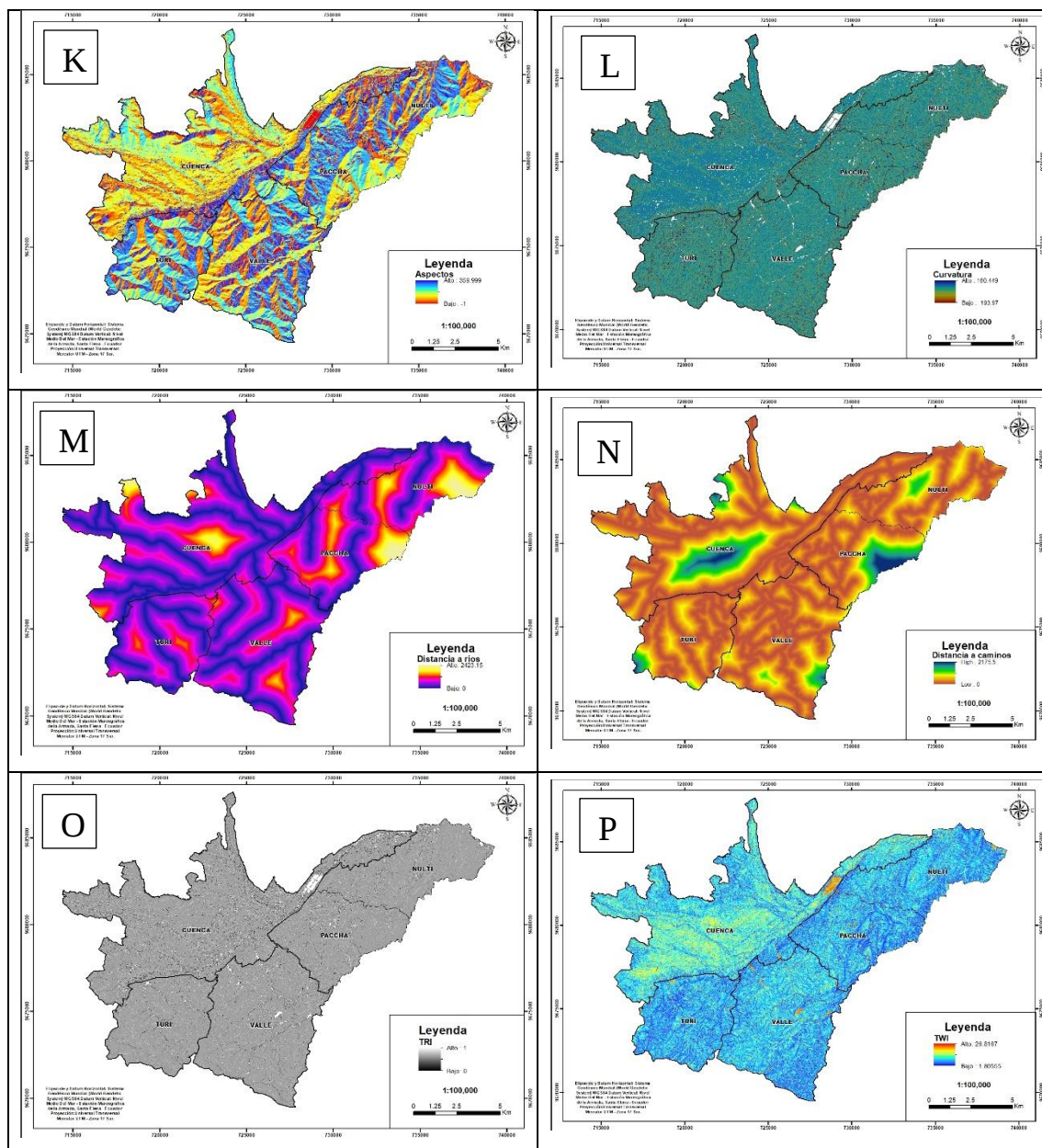


Figura 10. Capas de información para el modelo MaxEnt, MDE (A), Pendientes (B), Litología (C), Cobertura del suelo (D), Inventario de deslizamientos (E), Bono de Desarrollo Humano (F), SPI (G), TPI (H), STI (I), Radiación solar (J), Aspectos (K), Curvatura (L), Distancia a ríos (M), Distancia a caminos (N), TRI (O), TWI (P)
Fuente: SIGTIERRAS (2010), MIES (2022).

2. Sistematización de un inventario de deslizamientos en SIG

Para la determinación de un inventario de deslizamientos es necesario que este se encuentre depurado, es decir, que las características de cada evento sean revisadas y organizadas, con el fin de manejar una base de datos georreferenciada y verificada. Para levantar los datos es necesario llevar a cabo un levantamiento en campo, para la cual los formularios tradicionales han sido reemplazados por formularios digitales, usando dispositivos móviles inteligentes, permitiendo la recopilación de datos (Sellers et al.

2021). Para esto se digitaliza toda la información disponible y convierte en formato shapefile para que pueda ser manejada en cualquier SIG. En dichos archivos se puede visualizar una lista de puntos correspondiente a cada deslizamiento, donde se ha digitalizado un punto para cada deslizamiento basándose en una localización, tanto GPS como de correspondencia con la zona de levantamiento en campo. Siendo uno de los puntos relevantes la serie de atributos obtenida del aplicativo MARLI.

Mediante esta información se generó el mapa de inventario de deslizamientos para la zona de estudio que comprende las parroquias Cuenca, Turi, El Valle, Paccha y Nulti, con una estandarización de la información. Mediante una parametrización de los datos y permitiendo una buena caracterización y geolocalización de cada deslizamiento, todo esto dentro de la zona de estudio se cubre un total de 194.2 km². Adicional, mediante el uso de herramientas de geoprocésamiento, se transformó al sistema de coordenadas UTM WGS 84 zona 17 Sur, considerando que la información se encontraba en un sistema de *coordenadas* globales WGS84 planas. Pues es necesario que toda la información esté georreferenciada a un mismo marco geodésico de referencia para su utilización dentro de MaxEnt. Además, es necesario obtener únicamente los puntos que se encuentran dentro de la zona de estudio, pues se cuenta con una base de datos con 672 eventos distribuidos en 18 parroquias, mientras que para las parroquias incluidas en el área de estudio este número se reduce a 245 eventos de deslizamiento, distribuidos como se indica en la (Figura 11).

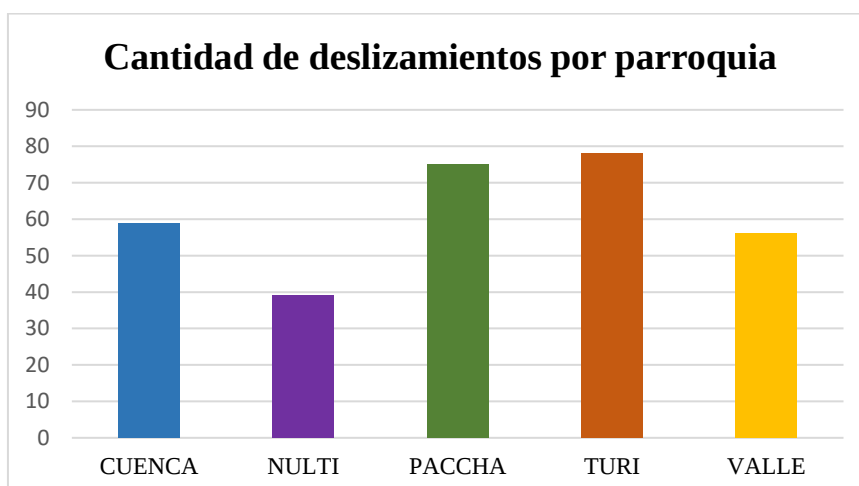


Figura 11. Deslizamientos por parroquia
Fuente: IERSE (2021).

Adicionalmente se determinó el número de deslizamientos que se tiene por cada categoría, siendo el de tipo rotacional el más frecuente con un total de 245 eventos (Figura 12), los cuales están asociados a los tipos de suelo arcillo limoso con presencia de limonitas y con pendientes sobre los 25 grados.

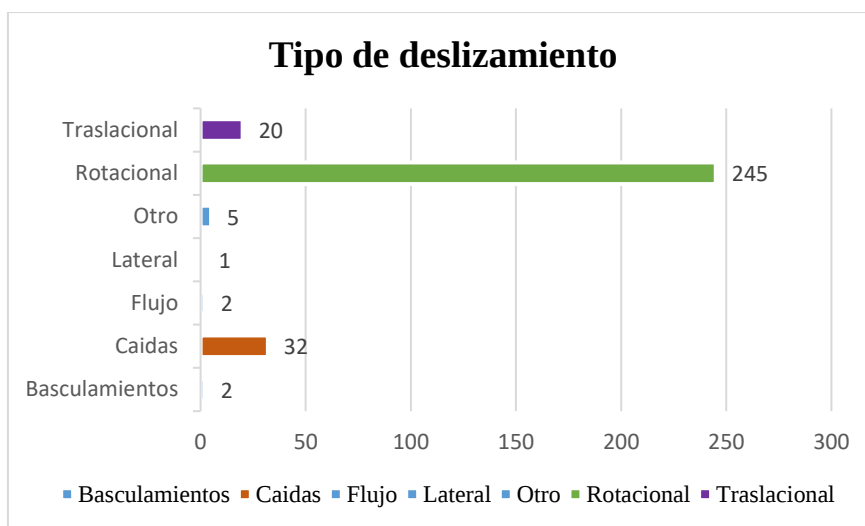


Figura 12. Tipos de deslizamiento
Fuente: IERSE (2021).

A través del uso de SIG, se generó la base de datos con información relevante del inventario de deslizamientos para la zona de estudio. Este es transformando a un formato CSV depurado, donde únicamente consta el nombre deslizamiento como identificador único y las coordenadas este y norte UTM en WGS 84 zona 17 Sur y constituye uno de los insumos principales en conjunto con el bono de desarrollo humano para los datos de entrada del modelo de susceptibilidad a deslizamientos mediante la herramienta MaxEnt. En la (Figura 13) se muestra cómo se encuentran las áreas aproximadas de afección de cada tipo de deslizamiento. Como una aproximación de lo que sucede en el territorio y una muestra del nivel de afección que causan cada deslizamiento en la zona de Paccha

Estas áreas son levantadas mediante percepción de volúmenes del técnico y verificadas mediante un mapa de sombras de 3 metros, buscando los cambios del terreno que verifican la presencia de un deslizamiento. Entre lo analizado conta, los cortes, hundimientos, abultamientos, etc. Sin embargo, es necesario utilizar esta información como base para determinar mediante técnicas de aprendizaje automática como se puede llegar a comportar todo el territorio para una posible ocurrencia de un nuevo deslizamiento, una reactivación de uno antiguo o el incremento en el volumen y velocidad de uno activo. Siendo este el motivo del presente trabajo de titulación, donde mediante el

uso de esta información podemos llegar a modelar la susceptibilidad del 100% del área de estudio.

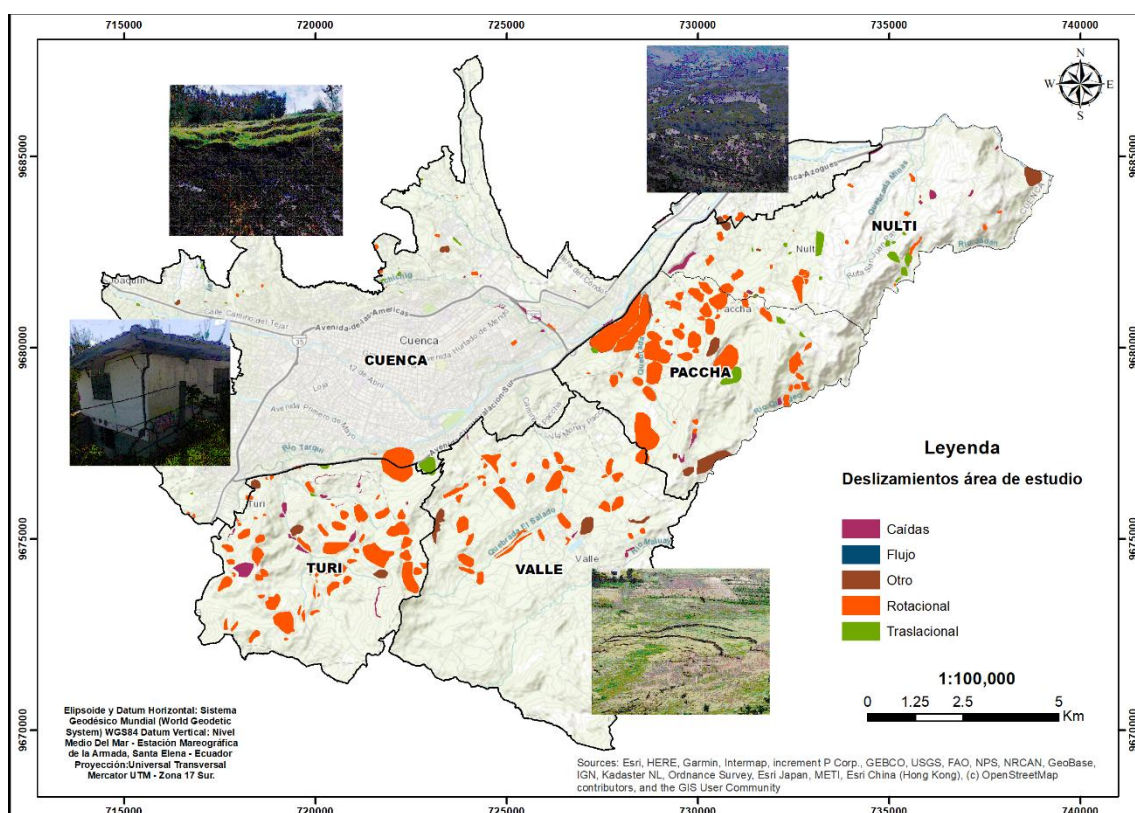


Figura 13. Inventario de deslizamientos con áreas de influencia 2021

Fuente: SIGTIERRAS (2010), (IERSE 2021)

3. Uso de datos sobre bonos para la población vulnerable en SIG

La economía de Ecuador atraviesa momentos críticos con un déficit fiscal que alcanza los 5.000 millones de dólares, que significan casi un 4% del PIB. Mientras que el banco central pronostica que la economía en el país solo crecerá un 0.8% para el año 2024, en que se traduce esto, para el 2023 1 de cada 4 personas que viven el Ecuador viven en condiciones de pobreza, alrededor de 4,5 millones y de estos 2 millones viven en la pobreza extrema (INEC 2023).

La actual situación económica, caracterizada por un bajo crecimiento económico, un mercado laboral deteriorado y una reducción del margen fiscal en muchos países, fomenta que la brecha de desigualdad crezca. Por lo tanto, es crucial evitar y prevenir los retrocesos en materia socioeconómica, asegurándose de que la inversión social y la recaudación fiscal estén entre las prioridades protegidas. Esto es esencial porque los costos relacionados con la persistencia de la pobreza y la desigualdad en América Latina

no solo afectan a quienes experimentan estas condiciones, sino a toda la sociedad en su conjunto (Naciones Unidas 2017).

Los estudios en materia de susceptibilidad a deslizamiento son un aporte que profundiza y permite interpretar de mejor manera las causas que detonan estos eventos, siendo posible determinar que porción del territorio está más propensa a sufrir un deslizamiento. Pero las personas en condiciones de vulnerabilidad social y económica ¿Pueden aumentar su vulnerabilidad al estar cerca a estas zonas de susceptibilidad alta?, ¿Es posible demostrar que una variable social puede demostrar también la vulnerabilidad de las clases socioeconómicas relegadas? Se busca unir a la susceptibilidad del territorio basado en sus propiedades físicas, pueda ser unida a una variable social, demostrando de manera cartográfica como él puede variar la susceptibilidad en función de incorporar personas a zonas de alta y muy alta vulnerabilidad, pensando que, si estos grupos se ven afectas por un deslizamiento, las condiciones de vida y de vulnerabilidad pueden cambiar, tomando en cuenta que es difícil explicar la vulnerabilidad como tal, pues existen varias áreas académicas que la definen dependiendo del contexto, siendo en el presente trabajo un contexto asociado a su participación dentro de los fenómenos dinámicos del suelo y su cambio al momento de encontrarse en una zona susceptible a deslizamientos.

La vulnerabilidad social es el resultado de los impactos provocados por acciones y patrones propios de cada sociedad y sus tomadores de decisiones y expresa la incapacidad de los grupos más débiles de la sociedad para prevenirlos, neutralizarlos (Naciones Unidas 2001). Pero al momento de presentarse un desastre, esta crece y las personas tienen que convivir con el problema, sin las herramientas necesarias. Ante esto es necesario plasmar esto buscando comprender como podría comportarse esta vulnerabilidad de los grupos sociales en función de una susceptibilidad física propia de cada zona y como se puede pensar en maneras de evitar y mejorar las condiciones de vida ante un posible desastre, tomando en cuenta que dispone de una herramienta visual y cartográfica de las zonas donde ambos análisis están juntos e indican como puede comportarse la susceptibilidad mixta, sin dejar de lado que son dos análisis unificados buscando obtener un análisis físico social.

Para identificar a las personas que se encuentren en condiciones de vulnerabilidad se ha referido el estudio al bono de desarrollo humano, que el Ministerio de Inclusión Económica y Social entrega a las personas en condiciones de pobreza y pobreza extrema (Figura 14). Los datos se encuentran disponibles en tablas, donde constan varios atributos como las zonas de entrega de bonos, la provincia, la parroquia y las coordenadas UTM

de ubicación del lugar de residencia de cada persona y su edad, sin nombres debido a que es información delicada y debe ser tratada de manera anónima para su uso. Un dato clave es la cantidad de personas que actualmente reciben el bono con un total de 1365 personas de las cuales el 52.8% viven en condiciones de extrema pobreza, en condiciones de vivienda y de acceso a servicios básico muy baja o nula, debido a que mensualmente alcanza a recibir menos de USD 47, mientras que el otro 47.1% viven en condiciones de pobreza con un salario para subsistir menos a USD 84 mensuales. Es decir, muchos de ellos viven con USD 2 al día. Esto es importante al momento de contrarrestar las cifras económicas con la realidad física del territorio, pues con estos ingreso y acceso a servicios, se vuelve muy difícil adquirir resiliencia ante un desastre y poder palear sus efectos negativos (INEC 2021).

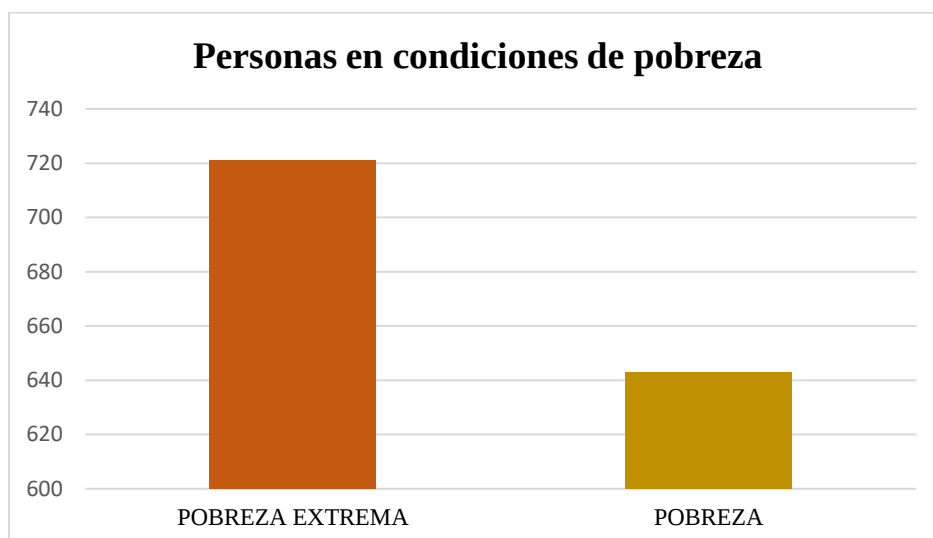


Figura 14. Personas en condiciones de pobreza en Cuenca
Fuente: INEC (2021).

Fue necesario utilizar la tabla del bono de desarrollo humano para poder obtener los datos correctamente georreferenciados en WGS84 zona 17 sur y que estos correspondan a las zonas de estudio del presente trabajo. Por lo que se realizó una conversión formato XLS a shapefile, con el objeto de poder realizar un mapa diagnóstico de la ocupación de personas en condiciones de pobreza en el territorio y su posterior transformación a formato CSV. Todo esto para ser incorporado en la herramienta MaxEnt como capa de entrada en conjunto con los deslizamientos, resaltado que el CSV consta únicamente con el identificativo bono y las coordenadas este y norte UTM.

4. Software de máxima entropía (MaxEnt)

Es fundamental establecer una metodología que utilice herramientas y factores interrelacionados, de modo que estas interacciones puedan asignar probabilidades altas o bajas de ocurrencia de deslizamientos. Para ello, se emplea el método de máxima entropía, que aplica restricciones para determinar la mejor distribución de probabilidad entre múltiples alternativas generadas, basándose en información que indica la presencia de un evento en un punto específico. Es importante señalar que la herramienta MaxEnt, al ser un modelo de aprendizaje automático, predice que las áreas sin puntos de deslizamiento son menos susceptibles a estos eventos, considerando también factores intrínsecos como la pendiente, la geología y otros.

En el presente trabajo se demuestra la aplicación del modelado MaxEnt para predecir la distribución de la susceptibilidad a deslizamientos en las parroquias Cuenca, Turi, Nulti, Paccha y el Valle del cantón Cuenca. Para esto es necesaria una preparación y sistematización previa de datos. Siendo los insumos o datos de muestra el inventario de deslizamientos 2021 realizado por el IERSE de la Universidad del Azuay y los bonos de desarrollo humano detallados en bases de datos del MIES. Para ello, se utilizó el *software* MaxEnt, desarrollado por Steven J. Phillips de AT&T Labs junto con Miroslav Dudik y Robert E. Schapire de la Universidad de Princeton, que a partir del año 2012, se han desarrollado mapas de susceptibilidad a deslizamientos usando este método, como (Vorpahl et al. 2012); (Felicísimo et al. 2013); (O'Banion et al. 2014); (Davis et al. 2015); (Lombardo et al. 2016); (Kornejady et al. 2017); (Kerekes et al. 2018); (Jiao et al. 2019); (Pandey et al. 2020).

4.1. Datos de entrada tipo punto

Como primer paso, es necesario preparar la información de entrada en formato CSV, la cual se visualiza como un shapefile en la (Figura 15). En este trabajo, se han utilizado bases de datos que incluyen un inventario de deslizamientos proporcionado por el IERSE de la Universidad del Azuay y datos sobre el bono de desarrollo humano del MIES. Para ello, se ha determinado el centroide de cada punto, así como sus coordenadas en sistema de referencia WGS 84 zona 17 sur. Estos datos en formato CSV se ingresa en la sección samples o muestras, lo que permite identificar con precisión los lugares de ocurrencia de deslizamientos y la entrega de bonos.

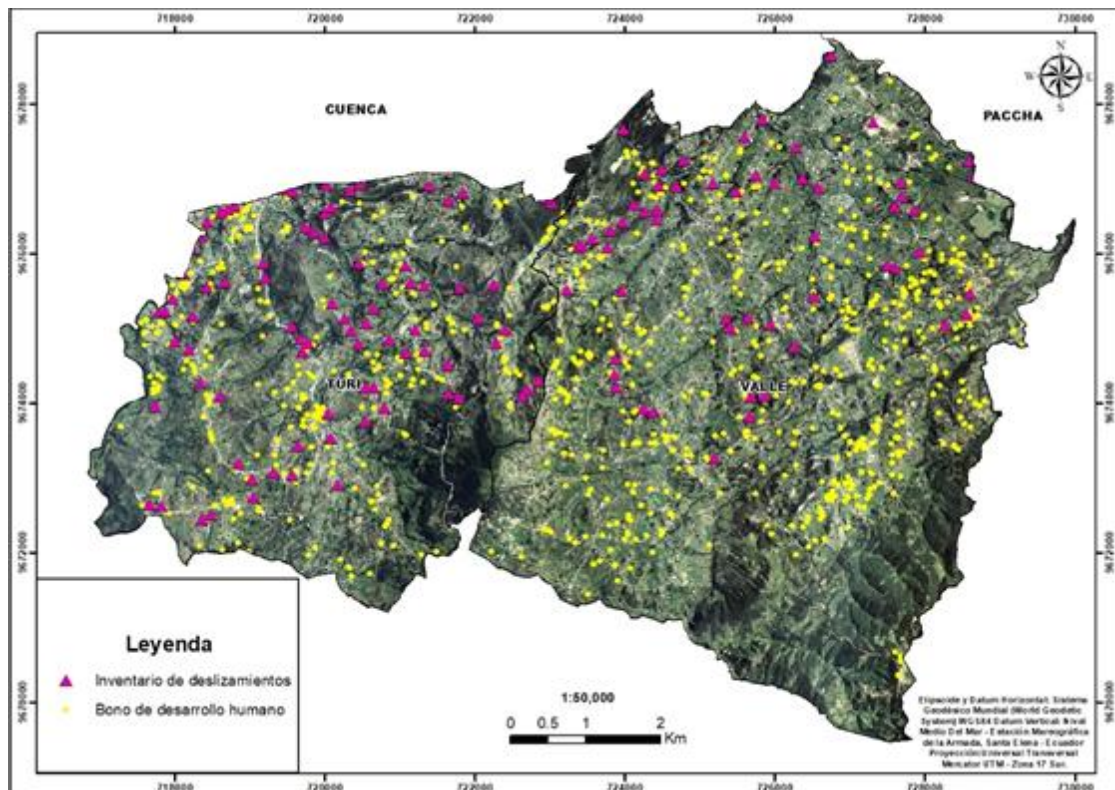


Figura 15. Bono de desarrollo humano e inventario de deslizamientos para la parroquia El Valle y Turi

Fuente: SIGTIERRAS (2010), MIES (2022).

5. Capas de información en formato ASCII

Las capas de información que contienen datos físicos del territorio como son la cobertura, geología, pendientes, índices del suelo, etc. (Tabla 5). Estos deben ser procesados de manera diferente a los datos de entrada “simples”, pues estos se los prepara mediante un SIG, con el fin de obtener un archivo tipo ASCII, que permite que estos archivos puedan ser abiertos sin ninguna restricción de *software*. Las 16 capas de información inicial que se han preparado para su posible uso dentro del *software* MaxEnt en la sección de datos *environmental layers*, se debe incluir si la variable a utilizar es continua o categórica, por ejemplo, para la variable pendiente se configuró de forma continua, mientras que la geología será utilizada de forma categórica. Estos datos en combinación con los *samples*, son parte de las iteraciones que el *software* realiza, por cada iteración, el *software* propone nuevos valores de parámetros tratando de aumentar la ganancia hasta su asíntota, es decir, buscando alcanzar la mayor ganancia, o hasta el

número de iteraciones definido por el usuario, siempre que este por debajo del umbral de convergencia predefino en el *software* (Boussof et al. 2023).

Tabla 5
Insumos para la determinación de susceptibilidad

Insumo	Descripción	Fuente/Escala
Modelo Digital de Elevaciones (MDE)	Datos de altitud o elevación que permiten visualizar montañas, planicies, cañones, depresiones, etc., útiles para conocer alturas, pendientes y volúmenes.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. Resolución 3 metros.
Curvatura	Parámetro geométrico que describe el cambio de pendiente. Usado en cartografía de susceptibilidad.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. Resolución 3 metros.
Mapa de Aspecto	Determina la orientación del terreno en relación con condiciones climáticas locales como lluvia, viento y humedad.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. Resolución 3 metros.
Distancia a ríos	Mapa basado en redes de drenaje; utiliza distancia euclidiana para identificar áreas afectadas por saturación.	Instituto Geográfico Militar, escala 1:25,000.
Pendientes	Mide la inclinación del terreno en grados o porcentaje, importante para estudios de susceptibilidad a deslizamientos.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. Resolución 3 metros.
Cobertura del suelo	Caracterización de uso del suelo para identificar su influencia en la estabilidad de taludes.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. 1:25,000.
Litología	Identifica unidades litológicas con diferentes susceptibilidades a deslizamientos (arcilla más propensa que calcárea).	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. 1:25,000.
Stream Power Index (SPI)	Mide tasas de erosión y potencia erosiva de ríos o arroyos, utilizado para predecir erosión neta y deposición en el terreno.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. Resolución 3 metros.
Topographic Wetness Index (TWI)	Caracteriza la complejidad topográfica espacial y deslizamientos mediante una fórmula matemática.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. Resolución 3 metros.
Terrain Roughness Index (TRI)	Mide heterogeneidad morfológica en función de diferencias de elevación.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. Resolución 3 metros.
Topographic Position Index (TPI)	Describe aspectos morfológicos del terreno mediante cálculos de posición y pendientes, diferenciando cimas, depresiones y zonas planas.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. Resolución 3 metros.
Sediment Transport Index (STI)	Indicador de probabilidad de generación de escorrentía por saturación excesiva, basado en áreas de contribución y pendiente.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. Resolución 3 metros.
Radiación solar	Analiza patrones climáticos asociados a la topografía, como insolación, evapotranspiración y humedad del suelo.	Proyecto SIGTIERRAS, 2010. Resolución 3 metros.
Inventario de deslizamientos	Registro de deslizamientos, incluyendo información para mitigar impactos negativos.	IERSE, 2021.
Bono de desarrollo humano	Registro de las personas en condiciones De pobreza que acceden al bono.	MIES, 2023.

Fuente y elaboración propias

6. Preparar el *software* MaxEnt

MaxEnt utiliza un algoritmo de aprendizaje automático que requiere la configuración de ciertos parámetros, dependiendo del modelo y de los resultados estadísticos esperados. En este trabajo, se ha configurado el *software* con el objetivo de alcanzar un ROC superior a 0.7. Por medio de modificar y realizando las iteraciones necesarias y sus correlaciones correspondientes. Es crucial definir el número de replicaciones o corridas del modelo para promediar los resultados, lo que permite aprovechar todos los datos disponibles y conocer la variabilidad del modelo. Para el modelo desarrollado, se han buscado los valores óptimos que generen un resultado confiable.

Diversos autores, como Rivera et al. (2021), sugieren configurar el *software* con 5 réplicas; sin embargo, dado la alta correlación de los datos y la abundancia de puntos de deslizamiento y bonos de desarrollo humano, se optó por 10 réplicas ya que el *software*, por defecto, establece 1.

Es importante determinar el tipo de ejecución de la réplica a utilizar ya que MaxEnt ofrece tres opciones: *Crossvalidate*, *Bootstrap* y *Subsample*. El método *Crossvalidate*, propuesto por Kohavi (1995), realiza divisiones aleatorias de los datos de entrenamiento, calibrando un modelo en un número determinado de grupos y evaluándolo en los excluidos, lo que proporciona una mejor estimación para la validación cruzada. Por su parte, el método *Bootstrap*, introducido por (Efron y Tibshirani 1983), crea réplicas a partir de un conjunto de datos de tamaño n , muestreando instancias uniformemente con reemplazo. Esto significa que se pueden obtener valores repetidos en las muestras. La técnica *Subsample* permite establecer el número de réplicas y el porcentaje a retener de cada ejecución, siendo útil cuando el modelo tiene un nivel moderado a alto de ocurrencias.

Para este modelo, se utilizó la técnica *Bootstrap* ya que garantiza que en cada ejecución (un total de 10 en este estudio) se tomen en cuenta los casos de presencia y ausencia de deslizamientos y los bonos de desarrollo humano. Cada muestra se prueba una vez de manera aleatoria, creando nuevos subconjuntos en cada corrida y entrenando el modelo con cada conjunto. Esto permite que el modelo se ajuste a las zonas donde hay presencia de puntos de deslizamiento o bonos, aproximando la distribución desconocida y generando aleatoriamente muestras Bootstrap (Badii et al. 2007).

Otro parámetro importante en MaxEnt es el *Random test percentage* o porcentaje de prueba, que evalúa el rendimiento del modelo al retener un cierto porcentaje de los

datos de presencia para su evaluación. Sin estos datos reservados, el *software* usaría solo los datos de entrenamiento (Young 2011). Para el mapa de susceptibilidad, se ha decidido que el 25% de los datos sean de prueba, lo que permite realizar análisis estadísticos simples (Phillips et al. 2006).

Finalmente, el número de iteraciones es un aspecto crucial en la configuración de MaxEnt. Este parámetro determina cuántas veces se realiza el proceso, asegurando que el modelo tenga el tiempo necesario para alcanzar una convergencia adecuada. Se ha optado por 1000 iteraciones, dado que el *software* admite entre 500 y 5000. Al elegir un número adecuado de iteraciones, se busca una buena convergencia sin prolongar excesivamente los tiempos de procesamiento (Pawar et al. 2007). Si el modelo no cuenta con suficiente tiempo para converger, puede sobreestimar o subestimar las relaciones.

Capítulo tercero

Mapa de susceptibilidad a deslizamientos, incorporando una variable socioeconómica

Este capítulo presenta los resultados del modelo de susceptibilidad a deslizamientos generado con la metodología de máxima entropía (MaxEnt), incluyendo la incorporación de variables socioeconómicas para un análisis más integral del riesgo. Se analizan los mapas obtenidos para las parroquias Cuenca, Nulti, Paccha, El Valle y Turi, mostrando las zonas clasificadas en diferentes niveles de susceptibilidad. Se evalúa la precisión del modelo mediante curvas ROC y el índice AUC y se aplica el análisis de Jackknife para determinar la contribución individual de cada variable. Los resultados permiten identificar zonas prioritarias de intervención donde se superponen condiciones físicas desfavorables y vulnerabilidad social, resaltando la importancia de enfoques interdisciplinarios en la planificación territorial y la gestión del riesgo.

1. Resultados

1.1. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos para las parroquias Cuenca, Nulti, Paccha, El Valle y Turi del cantón Cuenca

La tecnología geoespacial y el aprendizaje automático proporcionan un marco para cartografiar los eventos pasados de deslizamientos y combinar los factores causantes de deslizamientos para producir mapas de susceptibilidad. Por lo que se ha convertido en una parte integral de la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos (Rahman et al. 2020). Buscando obtener los mejores resultados, aproximando lo mejor posible los análisis a la realidad del territorio.

MaxEnt es una herramienta de aprendizaje automático que ha permitido realizar análisis de datos que se relacionan directamente con el aumento de la susceptibilidad del territorio a deslizamientos. Gracias al uso de este *software*, sumando a esfuerzos por estandarizar, procesar, realizar modelamiento de índices e información relevante sobre el terreno, además de un control de calidad mediante la evaluación de datos obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo, se ha generado un mapa de susceptibilidad para las parroquias Cuenca, Nulti, Paccha, El Valle y Turi, del cantón Cuenca del cantón Cuenca. Este mapa representa la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en diversas

áreas de cada parroquia, tomando en cuenta diferentes variables que se han analizado y relacionado entre sí. Siendo una parte relevante el inventario de deslizamientos, que componen un punto de partida para especificar la distribución de los eventos y que MaxEnt pueda tomar la información cerca a estos para determinar de mejor manera las zonas susceptibles. En base a esto se han identificado zonas del territorio que están sujetas a susceptibilidad, pues sus condiciones determinan que el suelo puede estar relacionado con algún evento ya sea nuevo, reactivado o futuro, Sin embargo, es necesario recalcar que una determinada zona que muestre una susceptibilidad muy alta o alta, no garantiza la presencia de un deslizamiento ya que pueden o no ocurrir eventos en dichas áreas de las parroquias de estudio. Lo que se ha comparado con la incidencia de deslizamientos en el cantón Cuenca, donde y de manera inversa, en áreas con una susceptibilidad media o baja, es posible que ocurran eventos de remoción de masa debido a diversos factores como sobrecarga en taludes, cambios en la red de drenaje, alteraciones en la cobertura del suelo, actividad minera sin regulación, entre otros. La intensidad de estos factores puede activar diferentes tipos de deslizamientos.

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos se lo clasifica en una escala categorizada, dispuesta entre muy bajo, bajo, medio y alto, lo que permite discriminar entre zonas que presentan una susceptibilidad estos niveles de susceptibilidad. El mapa a continuación muestra el resultado del procesamiento con el *software* MaxEnt donde se han procesado un total de 13 parámetros, correspondientes a 2 capas de muestra y 11 parámetros ambientales, de las 16 iniciales (Tabla 3). Para obtener este resultado se han realizado diferentes corridas del modelo buscando ajustar los parámetros, de tal manera que los estadísticos finales y la distribución de la susceptibilidad sean los más óptimos. Se debe tomar en cuenta que los 3 parámetros removidos son curvatura y los índices STI, TRI. Pues MaxEnt determina que estos no generan peso ni influencia en la conformación del mapa final, con valores entre 0 y 0.2, dentro de la importancia en la permutación de las variables, siendo datos que pueden introducir ruido dentro del modelo, en lugar de mejorarlo.

Las variables que se ha utilizado para el modelamiento de la susceptibilidad son: la pendiente, litología, cobertura del suelo, modelo digital de elevaciones, distancia a caminos y ríos, radiación solar, aspectos, índice TWI, SPI y TPI, sumando un total de 11. Además de 2 parámetros de muestra donde se indica con exactitud posicional la ubicación de deslizamientos y bonos de desarrollo humano en la zona de estudio, que afectan a la susceptibilidad real de deslizamientos en cada parroquia. Debido a que son datos

verificados de presencia de las muestras, cada una de estas variables tiene un diferente porcentaje de permutación dentro del *software*, es decir, un determinado peso para el modelo, pues cada capa de información tiene un nivel diferente de susceptibilidad que afectará el mapa de susceptibilidad general de deslizamiento.

1.2. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos, incorporando una variable socioeconómica

Los resultados del mapa de susceptibilidad a deslizamientos muestran una estrecha relación entre las 13 variables utilizadas y como estas en convergencia con un inventario de deslizamientos pueden generar un producto. En el cual se encuentre plasmada la susceptibilidad del territorio a sufrir un deslizamiento. Sin embargo, otras variables como el nivel de empleo, los puntos de acceso a servicios básicos, etc., que corresponden al desenvolvimiento de la población en el territorio y que no tienen relación directa con el componente geológico, orográfico de territorio pueden ser introducidas dentro de la metodología. Siendo el aprendizaje automático una herramienta que las puede procesar con el objetivo de cambiar la interpretación de una susceptibilidad intrínseca del territorio.

Esta variable que tiene relación con el componente de análisis más social y económico de la población que puede estar sujeta a un deslizamiento, es necesaria para entender la susceptibilidad desde otro ángulo o perspectiva. Pues la población no debe ser dejada de lado y transformas en parte del estudio. Para lograr esto, en el presente trabajo se ha introducido al modelamiento de susceptibilidad el bono de desarrollo humano, que incorpora una visión social y económica para este análisis y que permite presentar variaciones en el modelo anterior, esperando un aumento ligero de los valores de salida en el mapa. Se debe tomar en cuenta que esta variable cambia en cierto modo la perspectiva de la evaluación de la susceptibilidad. Debido a que se debe entender que el mapa generado hace caso a una distribución de la susceptibilidad territorial en los lugares donde las personas de escasos recursos económicos. Por ende, las más vulnerables ingresan a ser parte del territorio y se vuelven parte de una susceptibilidad territorial-social. Dado esta premisa, no se debe ver la susceptibilidad como únicamente como un análisis del suelo sino como esta puede interactuar con la población, alcanzando a mostrar visualmente la vulnerabilidad que pueden tener estos grupos ante un posible deslizamiento. Pues debido a sus condiciones socio económicas sobrellavar este tipo de fenómenos es muy difícil.

El mapa de susceptibilidad se ha generado por medio de la introducción del bono desarrollo humano al mapa con un total de 1365 personas que tienen acceso a este bono y 307 deslizamientos (Figura 16). Obteniendo una suerte de mapa donde se indica como la vulnerabilidad de estas personas puede verse expresada en combinación con los posibles efectos que el suelo pueda presentar en función de la ocurrencia de un deslizamiento.

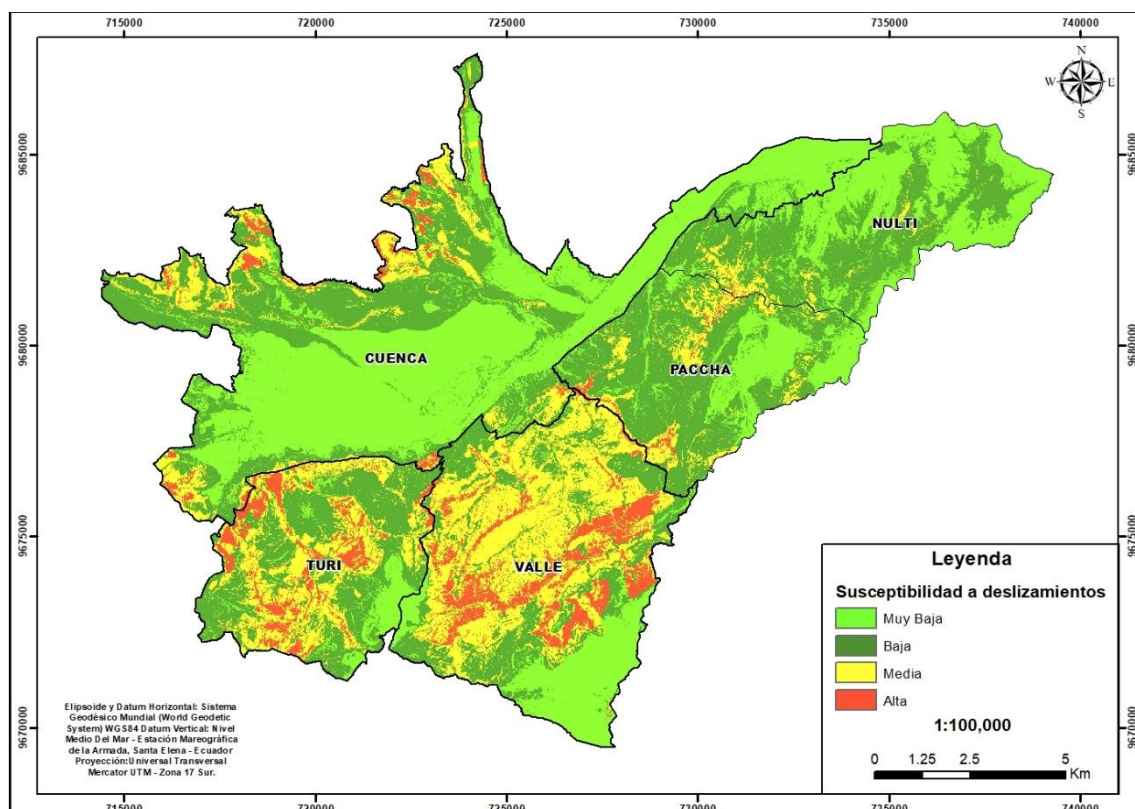


Figura 16. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos con una variable socioeconómica
Fuente: SIGTIERRAS (2010), MIES (2022).

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos con variables socioeconómicas (Figura 16 y 17), se ha realizado mediante el método predictivo Cloglog que utiliza las predicciones para convertirlas en probabilidades y con una validación estadística *Bootstrap*. Obteniendo un modelo validado estadísticamente y en función de puntos de muestreo validados y oficiales. Para este mapa se obtuvo los siguientes resultados del porcentaje de afección en función del área (Figura 18). Con un 36,15 % (7012 ha) del área total categorizada como región de muy baja susceptibilidad, un 28,42 % (5512 ha) de región de baja susceptibilidad, un 28,73 % (5572 ha) de la región de susceptibilidad moderada (principalmente distribuida en el área sur oeste), un 6,68 % (1296 ha) de la región de alta susceptibilidad (principalmente distribuida en el área sur oeste). Cabe

recaltar que el área urbana de la ciudad de Cuenca presenta una susceptibilidad muy baja en la mayor parte de su territorio, a excepción de las zonas de expansión urbana, pues no se han levantado puntos de deslizamiento dentro del inventario, debido a que generar información se ha vuelto difícil pues la infraestructura y las constantes obras no permite delimitar de manera correcta fenómenos de este tipo, únicamente son visibles aquellos que han causado muchos daños y pérdidas como es el caso de la ciudadela Jaime Roldós. Además, es importante tomar en cuenta que no existe información relevante sobre bonos de desarrollo humano en esta área en específico, pues al tener población en condiciones socioeconómicas regulares a buenas, no se entregan muchos bonos de desarrollo humano en la zona urbana, siendo mejor distribuidos en la zona rural, donde las condiciones de vida pueden ser más precarias, por lo que se tiene una ausencia de datos en la zona urbana necesarios para el entrenamiento del modelo.

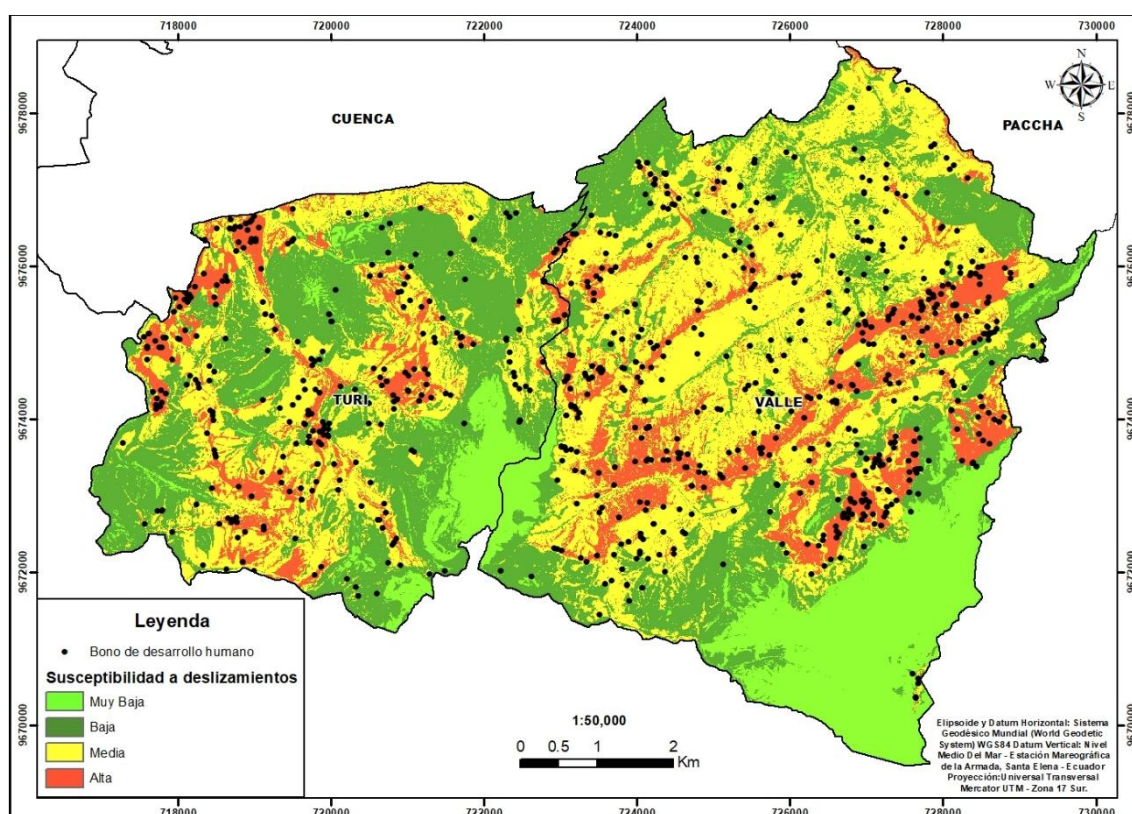


Figura 17. Mapa de susceptibilidad para las parroquias Turi y El Valle

Fuente: SIGTIERRAS (2010); MIES (2022). Elaboración propia.

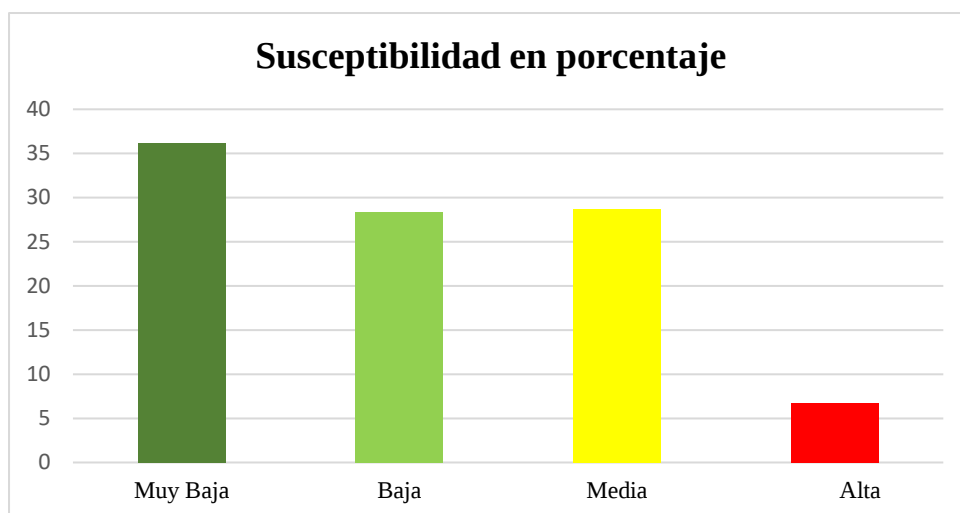


Figura 18. Susceptibilidad de las parroquias de estudio en porcentaje
Fuente y elaboración propias.

Con el análisis de susceptibilidad basado en datos socioeconómicos y tomando en consideración estudios anteriores, se puede apreciar un aumento de su vulnerabilidad en función de las condiciones del suelo y como este puede ser propenso a generar un deslizamiento. Además, se ha determinado que un grupo grande de las personas que acceden al bono de desarrollo humano, se encuentran en las parroquias de Turi y El Valle (Figura 20), donde la susceptibilidad es alta o muy alta y que son zonas del cantón donde se conoce que los fenómenos de inestabilidad son recurrentes y están delimitados dentro del PDOT de cantón Cuenca. Del total de personas que reciben el bono y por ende su capacidad de mitigar el efecto de un deslizamiento puede ser muy baja y como se puede observar en el mapa de susceptibilidad (Figura 19), aumentan las zonas de susceptibilidad a deslizamientos en función que su presencia de bonos y puede provocar un aumento sustancial de la vulnerabilidad (zonas en amarillo y rojo). Se determina que el 86,7 % de los bonos de desarrollo humano están presentes en estas zonas, con un total de 656 (48 %) personas en zonas de rango medio y 528 personas en zonas de rango alto (39 %).

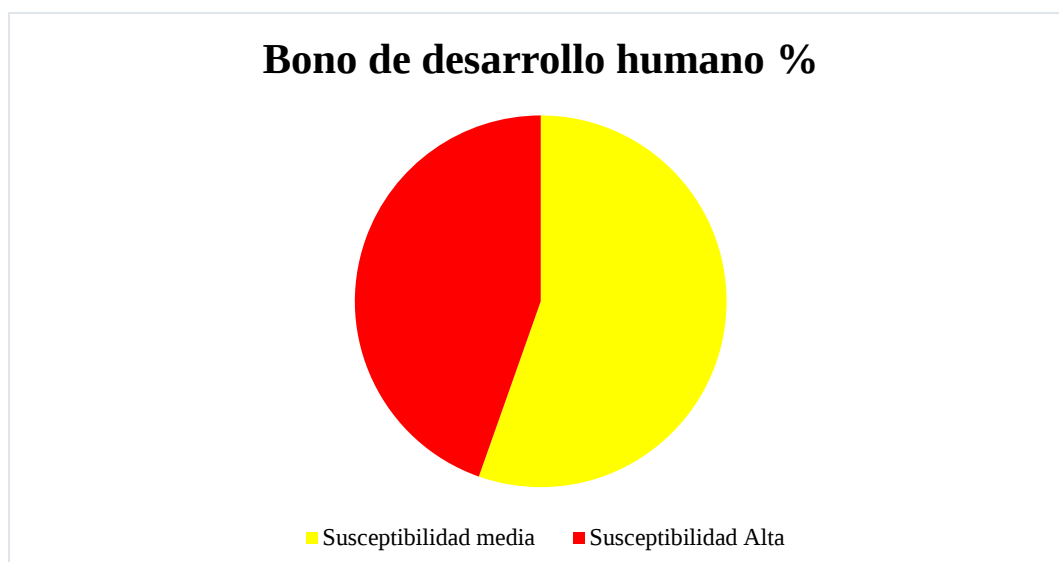


Figura 19. Bono de desarrollo humano en porcentaje que coincide con susceptibilidad alta y media
Fuente y elaboración propias.

La grafica de pastel (Figura 19) presenta como se dividen las 1184 personas que acceden al bono de desarrollo humano y se encuentran distribuidas en el territorio en o cerca de las zonas de susceptibilidad y vulnerabilidad dentro de las parroquias Turi y El Valle.

1.3. Análisis ROC y AUC

La calidad de los datos utilizados para el mapa de susceptibilidad a deslizamientos debe evaluarse midiendo la precisión del modelo. Esto implica analizar cuántas predicciones correctas se han realizado en relación con el total de corridas, dependiendo de los resultados de estos indicadores, podemos determinar si el modelo supera la aleatoriedad o si su rendimiento es aceptable o excelente.

Existen diversos índices que pueden emplearse para la evaluación y validación de un modelo de susceptibilidad. Esta evaluación se realiza cuantificando la concordancia entre el modelo de clasificación de susceptibilidad y la distribución de deslizamientos de tierra utilizada para su entrenamiento, así como sus réplicas. Por otro lado, la validación implica estimar la capacidad predictiva del modelo utilizando distintas capas de información que contribuyan a la susceptibilidad a deslizamientos.

Como se mencionó anteriormente, hay varios índices estadísticos valiosos para evaluar la capacidad discriminativa y comparar la validez relativa del modelo generado a partir de iteraciones entre las variables y réplicas. MaxEnt utiliza el Área Bajo la Curva (AUC) de la Curva Característica Operativa del Receptor (ROC), que se obtiene de los

gráficos de salida. La ROC es una herramienta estadística fundamental que evalúa la capacidad de discriminación de un modelo binomial al representar las medidas de sensibilidad y especificidad en función de diferentes valores de umbral. La sensibilidad mide la tasa de verdaderos positivos, lo que indica la capacidad del modelo para detectar eventos positivos (Boussouf et al. 2023).

Los valores del ROC y el AUC varían entre 0.5 y 1. Un valor más cercano a 1 indica una mejor predicción del modelo, mientras que un AUC de 1 refleja un ajuste perfecto. En contraste, valores cercanos o inferiores a 0.5 sugieren que el modelo carece de buena capacidad discriminativa. Alcanzar un valor de AUC válido requiere un análisis cuidadoso de la información considerada como factores ambientales y de las capas de muestra, que en este estudio representan el inventario de deslizamientos y los indicadores de desarrollo humano (Boussouf, et al. 2023). Según Swets (1988), un AUC inferior a 0.7 se considera de baja capacidad discriminativa, mientras que uno inferior a 0.9 puede ser útil para ciertos propósitos, catalogándose los AUC superiores a 0.9 como de alta precisión. Un AUC entre 0.80 y 0.89 se considera bueno, de 0.70 a 0.79, regular o inferior a 0.70, malo, indicando baja capacidad discriminativa.

Después de realizar las corridas de MaxEnt, se determinó un AUC de 0.80, lo que implica un 80% de certeza en los datos. Esto sugiere que el modelo tiene una buena capacidad predictiva y que la susceptibilidad presentada es coherente con las variables territoriales que pueden provocar deslizamientos en la zona de estudio, es decir este valor expresa que dentro del presente trabajo y para el modelo de susceptibilidad incorporando una variable socioeconómica, se garantiza con este valor que se dispone de un área bajo la curva coherente con la comparación de variables, la sensibilidad del método MaxEnt

en función de la especificidad de cada variable ambiental y que a su vez presenta un buen desempeño del modelo.

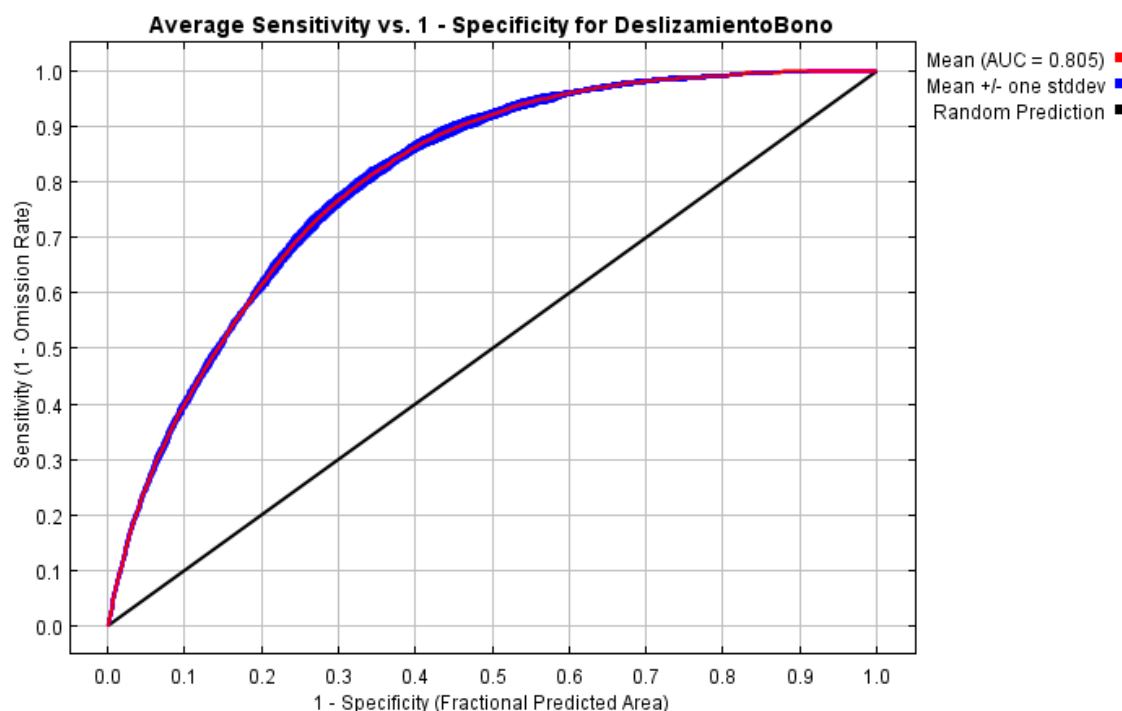


Figura 17. Cuerva AUC
Fuente: MaxEnt (2024)

Para interpretar la (Figura 20), es importante considerar ciertas condiciones. Si se utilizan los mismos datos para el entrenamiento y la validación, las curvas de color rojo y azul estarán muy cercanas. Sin embargo, al dividir los datos en dos subconjuntos uno para el entrenamiento y otro para la validación, como el 25% de los datos de prueba es común que la curva roja (entrenamiento) muestre un AUC superior al de la curva azul (validación). Esto se debe a que la curva roja refleja el ajuste del modelo a los datos de entrenamiento, mientras que la curva azul evalúa su capacidad predictiva con los datos de validación, lo cual es crucial para conocer la eficacia del modelo (Figura 21).

Una tercera curva, de color turquesa, representa un modelo aleatorio y sirve como validación. Si la curva azul se encuentra por debajo de la turquesa, esto indica un rendimiento inferior al azar. Cuanto más cerca esté la curva azul de la esquina superior izquierda del gráfico, mayor será la capacidad del modelo para predecir presencias en la muestra de validación (Phillips et al. 2006).

Como se muestra en la Figura 20, tanto las curvas de entrenamiento como de prueba están por encima de la curva AUC/ROC de 0.5, que corresponde al umbral mínimo donde un modelo puede tener concordancia con la realidad del territorio. Es importante

resaltar que para alcanzar estos valores AUC/ROC y poder validar el modelo, es necesario comprender las contribuciones que las variables ambientales han tenido en el modelo, pues están son las que entregan la información al *software* para realizar las predicciones. En este sentido la (Tabla 4) proporciona estimaciones de las contribuciones relativas de las variables ambientales al modelo de susceptibilidad de deslizamientos utilizando variable tanto físicas del territorio como una variable socioeconómica. Para determinar la primera estimación, en cada iteración del algoritmo de entrenamiento, se agrega el aumento en la ganancia regularizada a la contribución de la variable correspondiente, o se resta de ella si el cambio en el valor absoluto de lambda es negativo. Para la segunda estimación, para cada variable ambiental a su vez, los valores de esa variable en los datos de presencia de entrenamiento y de fondo se permutan aleatoriamente. El modelo se vuelve a evaluar en los datos permutados y la caída resultante en el AUC de entrenamiento se muestra en la tabla, normalizada a porcentajes. Al igual que con el método de eliminación de variables, las contribuciones de las variables deben interpretarse con precaución cuando las variables predictoras están correlacionadas.

Tabla 6
Contribución de las variables del modelo de susceptibilidad a deslizamientos

Variable	Porcentaje de contribución	Importancia en la permutación
Cobertura	39.1	40.7
Litología	31.8	28.3
Modelo de elevaciones	15.8	10.4
Distancia a caminos	4.8	4.7
Radiación solar	3.2	6.4
Pendientes	2.3	3.7
Aspectos	1.2	2
Distancia a ríos	0.9	1.8
TWI	0.5	0.7
TPI	0.3	0.5
SPI	0.1	0.8

Fuente: MaxEnt (2024).

Además de analizar las curvas AUC/ROC del modelo de susceptibilidad generado es importante mencionar que existen otras pruebas que permiten analizar el comportamiento de cada variable y su interacción dentro del modelo mediante la prueba de jackknife para la importancia de variables y su uso dentro del modelo, por medio de la cual se puede cuantificar el sesgo y la varianza de una estadística, calculando el sesgo y

el error estándar para una estadística, pero no para un intervalo de confianza (Badii et al. 2007).

1.4 Gráfica de Jackknife

La siguiente imagen muestra los resultados de la prueba de Jackknife (Figura 22) de importancia de variables. Esta gráfica permite analizar cómo actúa cada variable en modelo, es decir, si por sí sola puede generar un buen modelo y ser de relevancia en este (barra azul) o caso contrario si la variable no actuara como sería el desarrollo del modelo su mejora o se ve afectado por esta ausencia (barra turquesa). Cada barra expresa si el modelo puede variar en función de cada variable, siendo la barra azul relevante, pues esta muestra como cada una de las variables mejora el modelo cuando se la utiliza. La variable ambiental con mayor ganancia es litología, por lo que parece tener la información más útil por sí sola para el modelo, además que si la removemos se puede disminuir considerablemente la calidad de los datos obtenidos. Por otro lado, La variable ambiental que no tiene demasiada relevancia en el modelo, pero aporta es distancia a ríos y su ausencia tampoco influye mucho en el modelo final, sin embargo, ese pequeño aporte proporciona información adicional al momento de realizar las iteraciones.

Esta grafica permite analizar de mejor manera como ha sido el comportamiento de cada variable y como han intervenido en la generación de la curva AUC/ROC determinando al igual que en la tabla anterior la influencia que ha tenido cada una en el modelo, siendo la litología, MDE y cobertura, las más relevantes dentro del estudio, siendo importante recalcar que cada capa de información ha tenido su influencia en el modelo de susceptibilidad. Esto nos indica que las variables de MDE y litología están ayudando a MaxEnt a obtener un buen ajuste con los datos de entrenamiento, pero la variable de cobertura anual generaliza mejor, dando resultados comparativamente mejores en los datos de prueba reservados.

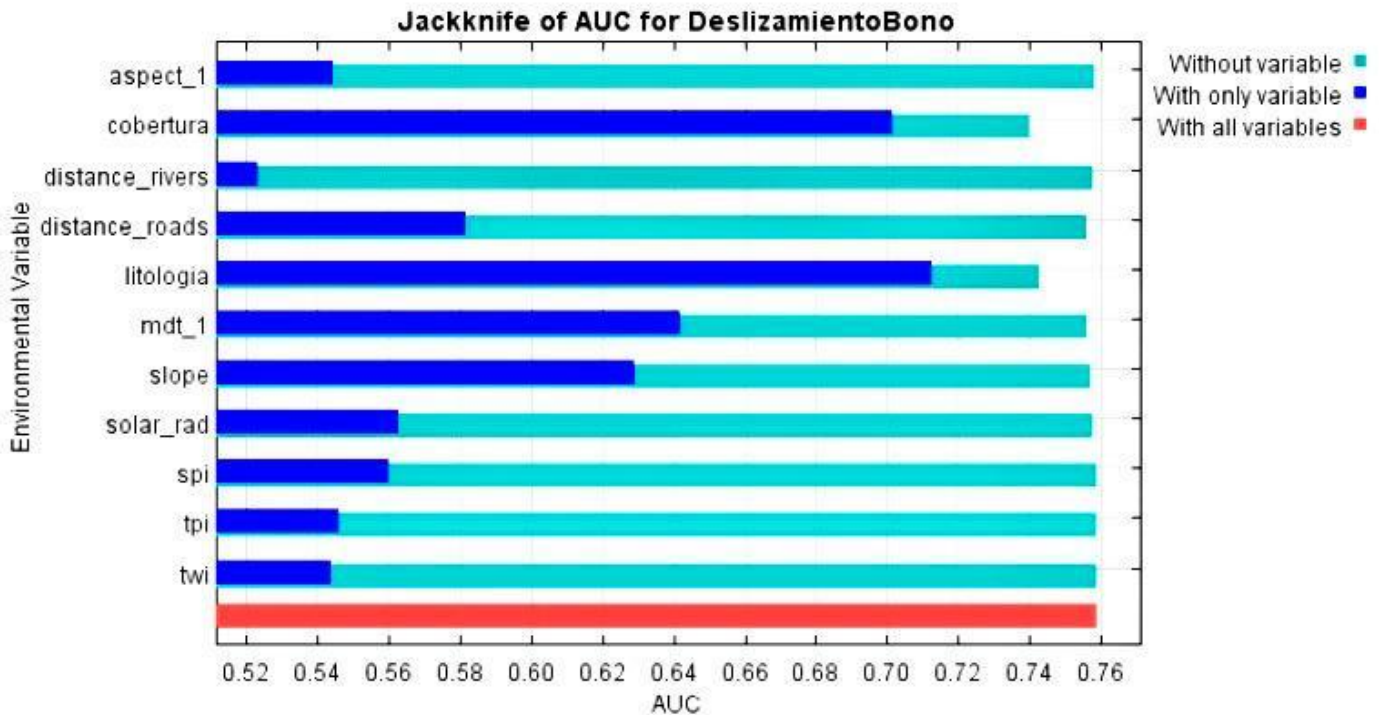


Figura 18. Gráfica de jackknife
Fuente: MaxEnt (2024).

2. Discusiones

La evaluación y modelamiento de la susceptibilidad debe ser abordada con la mayor exactitud posible en el uso de la información de entrada, las capas de validación del método a emplear, con el fin de construir un modelo con un porcentaje de validación alto.

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos, incorporando una variable socioeconómica, ha sido el resultado de un proceso de construcción y uso de variables tanto ambientales como de muestra (Inventario de deslizamientos, Bonos de desarrollo humano), buscando que estas tengan una correlación coherente y que no sean mutuamente excluyentes.

El mapa final, obtenido mediante el método de máxima entropía utilizando el software MaxEnt, ha permitido desarrollar un producto validado estadísticamente con un AUC de 0.805, en el cual se ve plasmada la susceptibilidad a deslizamientos con la intervención de un problema socioeconómico, permitiendo analizar una cierta vulnerabilidad del territorio, de las personas o grupos vulnerables, y la posibilidad de un impacto que puedan sufrir si un deslizamiento ocurriese.

Este mapa puede servir como método de comparación con diferentes fuentes de información oficiales que han generado mapas de susceptibilidad a deslizamientos, como es la Secretaría de Riesgos, la Dirección de Riesgos del Municipio de Cuenca, entre otras entidades. Además, permite realizar análisis más profundos y de mayor resolución, pues toda la información usada se encuentra en resolución espacial de 3 metros.

Es importante tomar en cuenta que la información disponible para las capas ambientales corresponde a modelos e información del año 2010, como son los datos obtenidos del SIGTIERRAS, los cuales representan el uso de información que debería ser actualizada para lograr mejores resultados, no solo a nivel del cantón Cuenca, sino nacional.

Sin embargo, para los datos de muestra, se ha visto primordial revisar y utilizar datos lo más recientes posible, usando el inventario de deslizamientos y los bonos de desarrollo humano, que son datos comprendidos entre el año 2021 y 2023, obteniendo un mapa de susceptibilidad a deslizamientos que puede ser utilizado para tomar decisiones, en base a que se ha incorporado a la población dentro del estudio.

La metodología de máxima entropía, mediante el uso de MaxEnt, ha permitido desarrollar un mapa apto para conocer las condiciones de susceptibilidad a deslizamientos a las que está expuesto el territorio y las personas que lo ocupan, aún más si estas se encuentran en estado de vulnerabilidad socioeconómica y cuyas capacidades de respuesta ante un posible evento son menores y requieren de un apoyo por parte de las autoridades y tomadores de decisiones. Estas predicciones son advertencias para mejorar el control y el crecimiento urbano, determinar las zonas de intervención donde exista una mayor probabilidad de que se suscite un deslizamiento, y encontrar grupos de personas que puedan presentar mayores problemas.

La susceptibilidad es más alta en las parroquias de Turi y El Valle, lo cual tiene concordancia con la información obtenida de los análisis de campo sobre la ocurrencia de deslizamientos, más aún cuando una temporada invernal afecta al cantón Cuenca. Además, mucha población vulnerable, correspondiente a clases socioeconómicas medias y bajas, ocupa estas parroquias; a diferencia de la zona de Nulti, donde su población corresponde a clases socioeconómicas media alta y alta.

Sin dejar de lado que los datos juegan un papel importante en esto: mientras más actualizados sean y la calidad de estos sea alta, la precisión y su nivel de aplicabilidad serán mejores, y su replicabilidad en otras partes del país puede ser posible, sobre todo en parroquias o cantones que aún no cuenten con planes de gestión de riesgos extensos.

Se ha visto necesario que estos estudios sean el punto de partida para realizar análisis de ordenamiento territorial, aplicando un enfoque dirigido al riesgo, puesto que el desarrollo urbano, el crecimiento de la población y de la ciudad deben estar en armonía con, y convivir de manera ordenada con, los problemas propios del suelo, como es el caso de los deslizamientos, sobre todo en las parroquias de Nulti, Turi y Paccha.

Se busca que este crecimiento se dé en zonas donde la susceptibilidad es menor y un desastre pueda ser mitigado de mejor manera, resaltando que la preparación y prevención son herramientas que nos permiten resolver estos riesgos de manera más completa e invirtiendo menos recursos. Estos modelos permiten realzar una prevención, delimitando zonas donde existe una probabilidad alta de que se desencadene un deslizamiento.

Según Chester Sellers PhD, experto en riesgos naturales de la ciudad de Cuenca, docente de la Universidad del Azuay. *“Desde el enfoque de la geología regional y con base en el conocimiento acumulado sobre el comportamiento geomorfológico de la cuenca del río Tomebamba y sus alrededores, es posible afirmar que los modelos de susceptibilidad a deslizamientos construidos mediante técnicas de Máxima Entropía ofrecen una representación robusta del comportamiento del terreno, aun cuando algunas capas geológicas o físicas no estén disponibles. Esto se debe a que la variabilidad espacial de los deslizamientos en la región está fuertemente influenciada por factores topográficos, uso del suelo y condiciones antrópicas, que han sido adecuadamente incorporados en el modelo a través de variables socioeconómicas espacialmente explícitas.*

La literatura científica reciente y estudios locales de inventario de deslizamientos respaldan el enfoque de integrar variables humanas como densidad de población, tipo de infraestructura y acceso a servicios, ya que, en zonas urbanas y periurbanas como Cuenca, estos factores tienen un peso significativo en la activación o intensificación de procesos de inestabilidad del terreno. A pesar de que la presencia de capas como la litología detallada o la hidrología subterránea puede enriquecer el modelo, su omisión no invalida el análisis, especialmente cuando la metodología aplicada ha sido calibrada con eventos históricos y validada con mapas de inventario existentes en la zona.

Finalmente, es importante considerar que, en áreas urbanas complejas como Cuenca, donde el crecimiento urbano y las modificaciones al relieve natural influyen activamente en la ocurrencia de deslizamientos, los modelos de susceptibilidad deben

reflejar tanto los factores físicos como los patrones de ocupación humana. En este sentido, el enfoque empleado logra capturar la dinámica real del riesgo y se alinea con los enfoques actuales en estudios de amenazas multivariadas. Por tanto, se puede concluir con fundamento técnico que la ausencia de ciertas capas no compromete la utilidad del mapa para la toma de decisiones ni subestima la amenaza en el contexto local”.

Conclusiones

El método de máxima entropía, escogido para evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa tanto del suelo o territorio como la susceptibilidad incorporando una variable socioeconómica del Ecuador, a la escala 1:125.000, puede ser utilizado de manera efectiva y fácil utilizando el software MaxEnt, que maneja un algoritmo de aprendizaje automático basado en la máxima entropía.

Este método permite configurar los parámetros de procesamiento en función de los resultados que se pretende obtener, y también en función de los datos de entrada y de ambiente, permitiendo analizar nuevas capas de información o disminuir esta cantidad en base al acceso y a la calidad de la información que se disponga.

Las variables ambientales con mayor ganancia cuando se las utiliza de forma aislada son la litología y la cobertura, que aportan de manera más significativa al tener la información más útil por sí solas, con un 32 % de influencia en el modelo. Por lo tanto, las variables ambientales que más disminuyen la ganancia cuando se las omite corresponden a la litología y la cobertura, demostrando que, sumando al MDE con un 16 % de influencia, tienen mucha información que no está presente en las otras variables. Los valores presentados son promedios de ejecuciones replicadas.

Las capas de información de análisis seleccionadas parecen ser apropiadas para las condiciones geológicas, geomorfológicas y socioeconómicas del área de estudio, así como para la escala y el propósito del presente trabajo de titulación. No obstante, es fundamental emplear información actualizada y validada para su representación, como es el caso del inventario de deslizamientos del año 2021 y los Bonos de Desarrollo Humano de 2023, siendo estos claves en la generación del mapa de susceptibilidad.

Además, la información correspondiente a litología, cobertura y modelo de elevaciones ha sido la más representativa dentro del análisis, con contribuciones entre el 38,3 %, el 35,6 % y el 14,5 %. Es importante el uso de los datos del inventario de deslizamientos actualizado al 2021 para el cantón Cuenca, con un total de 307 eventos, y el Bono de Desarrollo Humano con un total de 1.365 puntos georreferenciados. Estos datos han sido sistematizados y se encuentran completos, lo cual ha servido para que el proceso MaxEnt, al momento de hacer validaciones y analizar la susceptibilidad, maneje de manera correcta las predicciones y las probabilidades. Estos datos están respaldados

mediante una verificación estadística AUC, con un valor de 0,80, correspondiendo a un modelo con una certeza buena.

Como se observa en el estudio del mapa de susceptibilidad, cada vez existen más personas que se ven afectadas y se encuentran en situación de vulnerabilidad ante la ocurrencia de deslizamientos, a pesar de que existen normas específicas de zonificación de susceptibilidad por parte del Municipio de Cuenca y de la Secretaría de Gestión de Riesgos.

Según Schuster (2007), se han dado muchos avances significativos en la implementación de medidas correctivas contra los deslizamientos de tierra, pues la sobrepoblación humana en zonas urbanas a nivel mundial ha incrementado el riesgo general de deslizamientos en estos entornos de desarrollo de actividades, incluyendo a los grupos en condiciones de pobreza y pobreza extrema, cuya vulnerabilidad es aún mayor, en contraparte con su baja capacidad de resiliencia.

No se puede dejar de lado el cambio climático, que es un posible detonante de nuevos desastres como deslizamientos, pues, como seres humanos, vivimos en el Antropoceno, que ha marcado —mediante el desarrollo tecnológico y la contaminación desmesurada de la Tierra— una trayectoria difícil, que aleja al planeta del ciclo límite glacial-interglaciar hacia nuevas condiciones climáticas más cálidas y una biosfera profundamente diferente.

En la actualidad, se ha presentado una temperatura global de 1 grado centígrado por encima de una línea base preindustrial; se acerca a la envolvente superior de las condiciones interglaciares durante los últimos 1,2 millones de años. Más importante aún es que las actividades antrópicas comprometen el sistema climático a condiciones más allá de las condiciones interglaciares pasadas. Esto arremete en condiciones de mayor susceptibilidad del suelo, debido a la presencia de fuertes lluvias en cortos periodos de tiempo. Además, este cambio climático está alterando también las estructuras económicas, y los grupos vulnerables presentan mayores dificultades al momento de poder mitigar cualquier desastre.

Este mapa de susceptibilidad a deslizamientos, incorporando una variable socioeconómica, se presenta como un verdadero aporte para los PDOT y la planificación territorial per se, donde se incluyen las vulnerabilidades socioeconómicas, lo que nos permite, de manera inclusiva, llevar a la palestra del ordenamiento las necesidades de las poblaciones más necesitadas.

Finalmente, como etapa de validación con ocurrencias independientes sobre el mapa de susceptibilidad a deslizamientos con una variable socioeconómica. Se realiza una validación externa del modelo, utilizando datos distintos a los que usó para generar dicho producto. Esta validación se la realiza mediante la georreferenciación de un punto de deslizamiento rotacional activo, con fecha junio del año 2025, ubicado en la parroquia Paccha. Siendo un deslizamiento que no fue utilizado para entrenar el modelo de máxima entropía en MaxEnt y que ha servido como prueba externa para verificar que el modelo tiene capacidad predictiva. Pues el deslizamiento se ha activado en una zona de la parroquia Paccha donde se pronostica una susceptibilidad media a la ocurrencia de un deslizamiento, según el mapa generado en el desarrollo del presente trabajo (Figura 22).

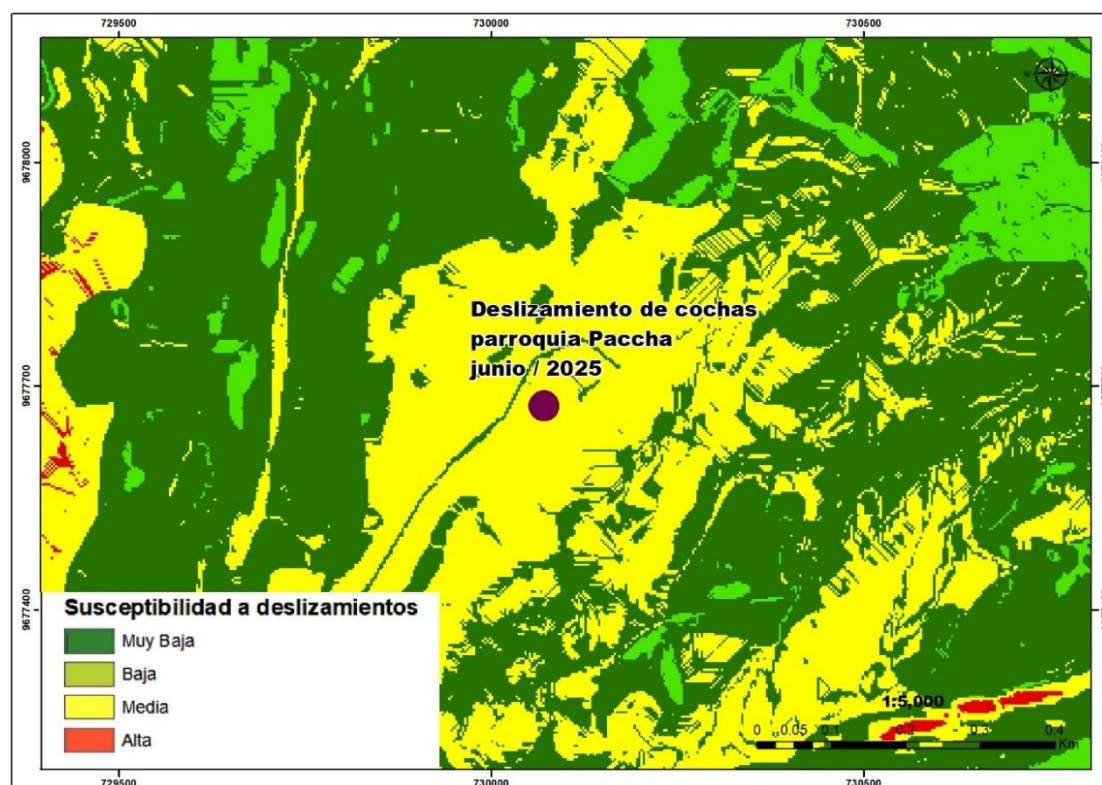


Figura 22. Deslizamiento Paccha junio del 2025.
Fuente: Levantamiento en campo propia.

Listado de referencias

- Achu, A. L., C. Aju, Mariano Di Napoli, Pranav Prakash, Girish Gopinath, E. Shaji, & Vinod Chandra. 2023. "Machine-Learning Based Landslide Susceptibility Modelling with Emphasis on Uncertainty Analysis". *Geoscience Frontiers* 14 (6): 101657. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101657>.
- Ali, Sajid, Peter Biermanns, Rashid Haider, and Klaus Reicherter. 2019. "Landslide Susceptibility Mapping by Using a Geographic Information System (GIS) along the China–Pakistan Economic Corridor (Karakoram Highway), Pakistan". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19 (5): 999-1022. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-999-2019>.
- Anis, Zorgati, Gallala Wissem, Vakhshoori Vali, Habib Smida, and Gaied Mohamed. 2019. "GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Bivariate Statistical Methods in North-Western Tunisia". *Open Geosciences* 11 (1): 708-26. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0056>.
- Ayala, J., y J. Olcina. 2002. *Riesgos Naturales*. Madrid: Editorial Síntesis.
- Badii, M., J. Castillo, A. Wong, and J. Landeros. 2007. "Precisión de los Índices Estadísticos: Técnicas de Jackknife & Bootstrap". *Innovaciones de Negocios* 4 (1): 63–78.
- Bianchini, Silvia, Pierluigi Confuorto, Emanuele Intrieri, Paolo Sbarra, Diego Di Martire, Domenico Calcaterra, & Riccardo Fanti. 2022. "Machine Learning for Sinkhole Risk Mapping in Guidonia-Bagni di Tivoli Plain (Rome), Italy". *Geocarto International* 37 (27): 16687-715. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2113455>.
- Boussouf, S., T. Fernández, and A. Hart. 2023. "Landslide Susceptibility Mapping Using Maximum Entropy (MaxEnt) and Geographically Weighted Logistic Regression (GWLR) Models in the Río Aguas Catchment (Almería, SE Spain)". *Natural Hazards* 117 (1): 207–35. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05857-7>.
- Bravo, Esteban, Tomás Fernández del Castillo, Chester Sellers, & Jorge Delgado. 2023. "Analysis of Conditioning Factors in Cuenca, Ecuador, for Landslide Susceptibility Maps Generation Employing Machine Learning Methods". *Land* 12 (6): 1135. <https://doi.org/10.3390/land12061135>.

- Bustos, Xavier, and Mauricio Bermúdez. 2017. "Determinación y Comparación de Índices de Erosión Teóricos Cuencas del Flanco Surandino Venezolano, Apoyado en Sistemas de Información Geográfica y Programación Python". *Terra Nueva Etapa* 33 (2): 1–15.
- Calderón, Heyddy, José Pérez, Marcel Chow, and Juan Reyna. 2020. "Índice de Posición Topográfica (TPI) para Identificar Áreas Inundables y Zonificación de Especies Vegetales en un Manglar del Pacífico Sur de Nicaragua". *Revista Torreón Universitario* 9 (26): 124–46. <https://doi.org/10.5377/torreon.v9i26.10264>.
- Cartaya, Scarlet. 2015. "La Gestión de Riesgos de Desastres y el Uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG): Algunas Consideraciones". *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4742.5122>.
- CEPAL. 2017. *Brechas, Ejes y Desafíos en el Vínculo entre lo Social y lo Productivo*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Çellek, Seda. 2020. "Effect of the Slope Angle and Its Classification on Landslide". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20 (6): 1847–63. <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-87>.
- Cerda, Jaime, and Lorena Cifuentes. 2011. "Uso de Curvas ROC en Investigación Clínica: Aspectos Teórico-Prácticos". *Revista Chilena de Infectología* 28 (2): 138–44.
- Chacón, José. 2012. "Movimientos de Ladera: Clasificación, Descripción y Evolución Espacial y Temporal". En *Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería*, 1–15.
- Cruden, David M., & David J. Varnes. 1996. "Landslide Types and Processes". In *Landslides: Investigation and Mitigation*, edited by A. Keith Turner and Robert L. Schuster, 36–75. Washington, DC: National Academy Press.
- Davis, Jerry, and Leonhard Blesius. 2015. "A Hybrid Physical and Maximum-Entropy Landslide Susceptibility Model". *Entropy* 17 (6): 4271–92. <https://doi.org/10.3390/e17064271>.
- Díaz, Juan, and Javier Durón. 2015. "El Uso de Modelos Digitales de Elevación y Ortoimágenes para la Determinación de los Cauces de Cuencas Hidrológicas de la Zona de Tixtla, Guerrero". *Revista Geográfica* 155: 93-109.
- EC INEC. 2021. "Boletín de Pobreza, Junio 2021". *INEC*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/POBREZA/2021/Junio-2021/202106_Boletin_pobreza.PDF.

- . 2023a. “Conozcamos Cuenca a través de sus cifras”. INEC. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/conozcamos-cuenca-a-traves-de-sus-cifras/>.
- . 2023b. “Pobreza y desigualdad, junio 2023”. INEC. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/POBREZA/2023/Junio/202306_PobrezayDesigualdad.pdf.
- . 2024. “Indicadores de pobreza y desigualdad, junio 2024”. INEC. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/POBREZA/2024/Junio/202406_PobrezayDesigualdad.pdf.
- EC Instituto Geográfico Militar. 2013. *Especificaciones Técnicas para el Diseño y Simbolización de Mapas a Escalas 1:500,000, 1:1,000,000 y 1:2,000,000*. Quito: IGM.
- EC Ministerio de Inclusión Económica y Social. 2016. *El Estado del Buen Vivir – Bono de Desarrollo Humano*. Quito: MIES.
- EcoCommons Support Portal. 2022. “MaxEnt”. *EcoCommons Australia*. <https://www.ecocommons.org.au/educational-material/>.
- Escobar, P., and G. Duque. 2017. **Geotecnia para el Trópico Andino**. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Fiszbein, Ariel, & Norbert Schady. 2009. *Transferencias Monetarias Condicionadas*. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Generalitat Valenciana. 2024. “Factores que Intervienen en la Estabilidad del Terreno”. En *Guía de Estabilidad de Terrenos*. Valencia: Generalitat Valenciana.
- Girimonte, Patricia, and Javier Garcia. 2020. “El Índice NDVI y la Clasificación de Áreas Sembradas: Aprendizaje Automático No Supervisado ‘K-Means’”. *Revista de Investigación en Modelos Matemáticos Aplicados a la Gestión y la Economía* 7: 1–15. http://www.economicas.uba.ar/institutos_y_centros/revista-modelos-matematicos/.
- Goetz, J., A. Brenning, H. Petschko, and P. Leopold. 2015. “Evaluating Machine Learning and Statistical Prediction Techniques for Landslide Susceptibility Modeling”. *Computers & Geosciences* 81: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.04.007>.
- Guillera-Aroita, Gurutzeta, and José J. Lahoz-Monfort. 2014. “MaxEnt Is Not a Presence–Absence Method: A Comment on Thibaud”. *Methods in Ecology and Evolution* 5 (11): 1192–97. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12252>.

- Gutiérrez, Alexander, y Alexandra Urrego. 2011. “Los Sistemas de Información Geográfica y los Planes de Ordenamiento Territorial en Colombia”. *Revista de Urbanismo* 16: 1-15.
- Guzzetti, Fausto, Alberto Carrara, Mauro Cardinali, & Paola Reichenbach. 1999. “Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy”. *Geomorphology* 31 (1–4): 181-216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1).
- Haninia, Abdulaziz, Habib Nazarnejad, Saeed Najafi, and Hamid Reza Pourghasemi. 2021. “Landslide Susceptibility Assessment and Mapping Using Statistical and Data Mining Models in Iran”. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-239985/v1>.
- Herrera-Coy, María, Laura Calderón, Iván Herrera, Paul Bravo, Christian Conoscenti, Jorge Delgado, Mario Sánchez, & Tomás Fernández. 2023. “Landslide Susceptibility Analysis on the Vicinity of Bogotá-Villavicencio Road (Eastern Cordillera of the Colombian Andes)”. *Remote Sensing* 15 (15): 3870. <https://doi.org/10.3390/rs15153870>.
- Highland, Lynn, and Peter Bobrowsky. 2008. *The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides*. Reston, VA: U.S. Geological Survey. <https://www.loc.gov/item/2009275285/>.
- Hughes, Stephen, y William Schulz. 2020. *Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra desencadenados por precipitación intensa en Puerto Rico*. Reston, VA: U.S. Geological Survey.
- Ilustre Colegio de Ingenieros Geólogos. 2008. *Riesgos naturales: Guía metodológica para la elaboración de cartografías en España*. Madrid: Ministerio de Vivienda.
- Ilustre Municipalidad de Cuenca. 2022. *Diagnóstico Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca – Actualización 2022*. Cuenca: Municipalidad de Cuenca.
- Javidan, Narges, Ataollah Kavian, Hamid Reza Pourghasemi, Christian Conoscenti, Zeinab Jafarian, & Jesús Rodrigo-Comino. 2021. “Evaluation of Multi-Hazard Map Produced Using MaxEnt Machine Learning Technique”. *Scientific Reports* 11 (1): 6496. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85862-7>.
- Kohavi, Ron. 1995. “A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection”. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1137-43.

- Liu, Ying, Liangjun Zhao, Anming Bao, Junli Li, and Xiaobing Yan. 2022. “Chinese High Resolution Satellite Data and GIS-Based Assessment of Landslide Susceptibility along Highway G30 in Guozigou Valley Using Logistic Regression and MaxEnt Model”. *Remote Sensing* 14 (15): 3620. <https://doi.org/10.3390/rs14153620>.
- Lopez, Javier, & Hrishikesh Vinod. 2008. “Maximum Entropy Bootstrap for Time Series: The Meboot R Package”. *Journal of Statistical Software* 25 (6): 1–19.
- Martínez, Diego, Tathiana Borja, Nadin Medellín, and Pedro Cueva. 2017. “Cómo Funciona el Bono de Desarrollo Humano”. *Inter-American Development Bank*. <http://www.iadb.org>.
- Maturana, Alberto. 2011. “Evaluación de riesgos y gestión de desastres: 10 preguntas para la década actual”. *Revista Médica Clínica Las Condes* 22 (4): 413–20.
- Munich Re. 2022. *NatCat Stats 2022 Factsheet*. Munich: Munich Re. https://www.munichre.com/content/dam/munichre/mrwebsitespressreleases/natcat_stats_2022_factsheet.pdf/_jcr_content/renditions/original./natcat_stats_2022_factsheet.pdf.
- Naciones Unidas. 2017. *Los principios rectores sobre la extrema pobreza y los derechos humanos*. Geneva: United Nations.
- Napoli, Mariano Di, Mariagiulia Corona, Luigi Guerriero, Pietro Miele, Massimo Ramondini, Chester Sellers, & Diego Di Martire. 2022. “Landslide Susceptibility Assessment in Expansion Areas of the Rapidly Growing City of Cuenca (Ecuador)”. *Rendiconti Online Società Geologica Italiana* 56: 50-4. <https://doi.org/10.3301/ROL.2022.07>.
- Napoli, Mariano Di, Pietro Miele, Luigi Guerriero, Mariagiulia Annibali Corona, Domenico Calcaterra, Massimo Ramondini, Chester Sellers, and Diego Di Martire. 2023. “Multitemporal Relative Landslide Exposure and Risk Analysis for the Sustainable Development of Rapidly Growing Cities”. *Landslides* 20 (8): 1677–93. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02065-z>.
- Pavón, Fernando, Daniel Andrade, Benjamin Bernard, and Diana Contreras. 2019. “Impacto socioeconómico por lahares y caída de ceniza ante la erupción del volcán Cayambe en la actividad florícola en Cayambe y Pedro Moncayo”. *Revista Cartografía* 98: 144-60. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i98.144>.

- Pavón, Fernando, y Diana Contreras. 2021. "Zonificación de la Amenaza por Dispersión y Caída de Ceniza del Volcán Guagua Pichincha, Ecuador". *Investigaciones Geográficas* 105: 1-18. <https://doi.org/10.14350/rig.60315>.
- Pawar, Samraat, Michelle Koo, Chris Kelley, M. Ahmed, Sujoy Chaudhuri, & Sahotra Sarkar. 2007. "Conservation Assessment and Prioritization of Areas in Northeast India: Priorities for Amphibians and Reptiles". *Biological Conservation* 136 (3): 346-61. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.12.012>.
- Phillips, Sharon, Viney Aneja, Daiwen Kang, y S. Pal Arya. 2006. "Modelling and Analysis of the Atmospheric Nitrogen Deposition in North Carolina". *International Journal of Global Environmental Issues* 6 (2-3): 231-52. <https://doi.org/10.1504/IJGENVI.2006.010156>.
- Phillips, Steven J. 2005. "A Brief Tutorial on MaxEnt". *Ecological Modelling*. <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>.
- Pizarro, Roberto. 2001. *La vulnerabilidad social y sus desafíos: Una mirada desde América Latina*. Santiago: CEPAL
- Prasad, Narasimha. 2017. "Landslides: Causes & Mitigation". *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/317328970>.
- Rahman, Ghani, Atta Rahman, Alam Bacha, Shakeel Mahmood, Muhammad Farhan, Ul Moazzam, & Byung Gul Lee. 2020. "Assessment of Landslide Susceptibility Using Weight of Evidence and Frequency Ratio Model in Shahpur Valley Prediction Rate Curve". *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-167>.
- Reichenbach, Paola, Mauro Rossi, Bruce D. Malamud, Monika Mihir, & Fausto Guzzetti. 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>.
- Riley, Shaw J., Stephen D. DeGloria, & Robert Elliot. 1999. "A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity". *Intermountain Journal of Sciences* 5 (1-4): 23-27.
- Ríos, Scarlet. 2015. "La Gestión de Riesgos de Desastres y el Uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG): Algunas Consideraciones". *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4742.5122>.
- Rivera, Carlos, Katherine Funes, José Merino, y Alicia Beltrán. 2021. "Guía para el Modelo de distribución de especies por máxima entropía: Estudio de caso de la

- ‘Lora Nuca Amarilla’ Amazona Auropalliata en El Salvador”. *Revista Minerva* 4 (1): 1–15. <https://minerva.sic.ues.edu.sv>.
- Rodríguez, Manuel. 2006. “La Conformación de los ‘Desastres Naturales’: Construcción Social del Riesgo y Variabilidad Climática en Tijuana, BC”. *Frontera Norte* 18 (36): 37–62.
- Rojas, Octavio, and Carolina Martínez. 2011. “Riesgos naturales: Evolución y modelos conceptuales”. *Revista Universitaria de Geografía* 20 (2): 45–62.
- Różycka, Milena, Piotr Migoń, & Aleksandra Michniewicz. 2017. “Topographic Wetness Index and Terrain Ruggedness Index in Geomorphic Characterisation of Landslide Terrains, on Examples from the Sudetes, SW Poland”. *Zeitschrift für Geomorphologie* 61 (Suppl. 2): 61–80. https://doi.org/10.1127/zfg_suppl/2016/0328.
- Sarriá, Francisco. 2014. *Sistemas de información geográfica*. Murcia: Universidad de Murcia.
- Schuster, Robert L., & Lynn M. Highland. 2007. “The Third Hans Cloos Lecture: Urban Landslides: Socioeconomic Impacts and Overview of Mitigative Strategies”. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66 (1): 1–27. <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0083-4>.
- Secretaría de Gestión de Riesgos. 2017. *Análisis de Amenaza ante Movimientos en Masa*. Código: SGR-DAR-MM01. Quito: SGR.
- Sellers, Chester, Sandra Buján, & David Miranda. 2021. “MARLI: A Mobile Application for Regional Landslide Inventories in Ecuador”. *Landslides* 18 (12): 3963–77. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01764-9>.
- Skentos, Athanasios. 2018. “Topographic Position Index Based Landform Analysis of Messaria (Ikaria Island, Greece)”. *Acta Geobalcanica* 4 (1): 7–15. <https://doi.org/10.18509/agb.2018.01>.
- Sørensen, R., U. Zinko, and J. Seibert. 2006. “On the Calculation of the Topographic Wetness Index: Evaluation of Different Methods Based on Field Observations”. *Hydrology and Earth System Sciences* 10 (1): 101–12. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>.
- Tatard, Lucile, S. Villacorta, y P. Metzger. 2012. *Análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa en Lima Metropolitana: Un desafío metodológico*. Lima: INGEMMET.

- UNIR. 2024. “Vulnerabilidad Social”. *UNIR Revista*. <https://www.unir.net/ciencias-sociales/revista/vulnerabilidad-social/>.
- Varnes, David J. 1978. “Slope Movement Types and Processes”. In *Landslides: Analysis and Control*, edited by Robert L. Schuster and Raymond J. Krizek, 11–33. Washington, DC: National Academy of Sciences.
- Vieira, J., L. Ortiz, y S. Ramirez. 2009. *Introducción a la minería de datos*. Rio de Janeiro: E-Papers.
- Wang, Shun, Wei Wu, Jing Wang, Zhenyu Yin, Deshan Cui, & Wei Xiang. 2018. “Residual-State Creep of Clastic Soil in a Reactivated Slow-Moving Landslide in the Three Gorges Reservoir Region, China”. *Landslides* 15 (12): 2413–22. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1043-8>.
- Wu, Yiwen, Subhasis Giri, and Zeyuan Qiu. 2016. “Understanding the Spatial Distribution of Hydrologic Sensitive Areas in the Landscape Using Soil Topographic Index Approach”. *International Soil and Water Conservation Research* 4 (4): 278-83. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.10.002>.
- Young, Nick, Lane Carter, & Paul Evangelista. n.d. *A MaxEnt Model v3.3.3e Tutorial*. Fort Collins, CO: Colorado State University.