

ARTÍCULO ORIGINAL

## MAPEO DE INESTABILIDAD DE LADERAS EN CUENCAS DE FUERTE PENDIENTE MEDIANTE EL ENFOQUE DE TALUD INFINITO

MAPPING OF SLOPE INSTABILITY IN STEEPLY SLOPING BASINS USING THE INFINITE SLOPE APPROACH

 Roberto Alfaro Alejo <sup>1</sup>  
 Jose A. Mamani Gomez <sup>2</sup>  
 Isidro A. Pilares Hualpa <sup>3</sup>

Recibido: 28/02/2022  
Aceptado: 14/05/2022

### RESUMEN

Las zonas de fuerte pendiente y con presencia de lluvias son susceptibles a deslizamientos que a su vez pueden provocar otros desastres. El objetivo de esta investigación es determinar el mapa de peligro por deslizamiento mediante métodos determinísticos, como un estudio de caso en la cuenca del río Cuyocuyo, ubicado en la zona nororiental del departamento de Puno, perteneciente a la vertiente amazónica, considerada como zona moderadamente lluviosa y de pendientes abruptas. El mapeo de la inestabilidad del terreno, se realiza considerando los deslizamientos como traslacional superficial, controlado por convergencia del flujo subterráneo, utilizando el modelo de talud infinito. Los datos requeridos para implementar el modelo incluyen topografía, propiedades del suelo y estados hídricos que son altamente variables tanto en el espacio como en el tiempo. El inventario de deslizamientos es utilizado como verificación en los puntos de ocurrencia. Como resultados se ha obtenido para las condiciones de suelo saturado, semisaturado y seco el factor de seguridad está entre las clases inestable a muy inestable, en un 42%, 38% y 18% del área de la cuenca respectivamente; lo que es un indicativo de zona propensa a deslizamientos. La información dada por los mapas de susceptibilidad a deslizamiento, ayuda a las autoridades y técnicos para que adopten estrategias de

<sup>1</sup> Universidad Nacional del Altiplano, Escuela de Ingeniería Agrícola, Puno, Perú. Magíster en Ingeniería Civil mención en Geotecnia. <https://orcid.org/0000-0003-1672-9026>. [ralfaro@unap.edu.pe](mailto:ralfaro@unap.edu.pe).

<sup>2</sup> Universidad Nacional del Altiplano, Escuela de Ingeniería Agrícola, Puno, Perú. Magíster en Manejo y Gestión integral de cuencas hidrográficas. <https://orcid.org/0000-0001-7694-7549>. [jmamani@unap.edu.pe](mailto:jmamani@unap.edu.pe).

<sup>3</sup> Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Escuela de Ingeniería Civil, Juliaca, Perú. Doctor en recursos hídricos, Magíster en ingeniería civil mención en Geotecnia. <https://orcid.org/0000-0003-1428-1563>. [ipilares@unap.edu.pe](mailto:ipilares@unap.edu.pe).



reducción de peligro por deslizamientos existentes y futuros por medio de la prevención, mitigación y evasión.

*Palabras Clave: Inestabilidad, Cuyocuyo, talud infinito, sistema de información geográfica, deslizamiento.*

## ABSTRACT

Areas with a steep slope and with the presence of rain are susceptible to landslides, which in turn can cause other disasters. The objective of this research is to determine the landslide hazard map using deterministic methods, as a case study in the Cuyocuyo river basin, located in the northeast area of the department of Puno, belonging to the Amazon watershed, considered a moderately rainy and steep slope. The mapping of ground instability is carried out considering landslides as surface translational, controlled by convergence of groundwater flow, using the infinite slope model. The data required to implement the model includes topography, soil properties, and water states that are highly variable in both space and time. The landslide inventory is used as verification at the points of occurrence. As results, for the saturated, semi-saturated and dry soil conditions, the safety factor is between the unstable and very unstable classes, at 42%, 38% and 18% of the basin area, respectively; which is indicative of a landslide-prone area. The information provided by landslide susceptibility maps helps authorities and technicians to adopt hazard reduction strategies for existing and future landslides through prevention, mitigation and evasion.

*Keywords: Instability, Cuyocuyo, infinite slope, Geographic Information System, landslide.*

---

## INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra generados por lluvias son fenómenos muy recurrentes en áreas montañosas, que pueden constituir riesgos geológicos al afectar de una forma directa o indirecta a las actividades humanas causando pérdidas humanas y económicas considerables (Palacio Córdoba et al., 2020; Turner, 2018). El criterio de zonificación de peligros y riesgos, es decir, la división del terreno en áreas homogéneas (peligros de deslizamiento) es una herramienta muy útil para la toma de decisiones, tanto en zonas urbanas o rurales. Los deslizamientos y flujos de escombros son una fuente de severos desastres naturales y riesgos de la sociedad en regiones montañosas por todo el mundo (Craig & Augusto Filho, 2020; Dolojan et al., 2021). El marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres (2015-2030) fue diseñado para desarrollar prácticas de reducción del riesgo de desastres y medidas de mitigación con el fin de reducir el número de víctimas, pérdidas económicas directas, daños a infraestructuras críticas y edificios (Dobrescu et al., 2018). El futuro incierto en muchas variables que provocan deslizamientos como la precipitación (Pilares et al., 2018), nos invoca a considerar el cambio climático, ya que éste genera alteraciones que en gran medida provocará mayores desastres naturales (García et al., 2021).

Los sistemas de información geográfica (SIG) tienen que convertirse en una poderosa herramienta para análisis efectivo y predicción asociada con el estudio de riesgos geológicos. Esto no es únicamente porque el SIG tiene una excelente capacidad de procesamiento de datos espaciales, sino también porque la recolección, manipulación y análisis de los datos ambientales sobre deslizamientos y riesgos de flujos de escombros pueden ser realizados

mucho más eficientemente (Carrara et al., 1999). Uno de los resultados de la zonificación de peligro de un área es un mapa de peligro (es decir, mapa de peligro de deslizamiento).

Para la evaluación de susceptibilidad de amenaza a deslizamientos, las técnicas de análisis varían generalmente en enfoque heurístico, enfoque estadístico o probabilístico y enfoque determinístico (Corominas et al., 2014). El *enfoque heurístico* se basa en información de la literatura y estudios de campo para asignar peso a los factores causales y sus clases de factores (geología, geomorfología y otros) (Van Westen et al., 2000). En el *enfoque estadístico* se utilizan técnicas estadísticas bivariadas y multivariadas para analizar la amenaza de deslizamiento, lo que permite determinar la correlación entre el factor de deslizamiento y la ocurrencia de deslizamientos (Gorsevski et al., 2000; Wubalem, 2021). Mientras que el *enfoque determinístico* se utiliza para el estudio de una ladera o talud concreto y se basan en modelos de equilibrio límite o en modelos numéricos, por lo que tienen una base física, que puede considerar la hidrología, topografía, propiedades del suelo y vegetación en algunos casos (Crozier, 1986; Duncan et al., 2014; Palacio Cordoba et al., 2020). Requieren de datos de entrada de alta precisión y fiabilidad, lo que son utilizados para obtener de manera precisa el factor de seguridad del talud en estudio (Borga et al., 1998; Craig & Augusto Filho, 2020).

En enero de 1984, un evento de precipitación de alta intensidad afectó la localidad de Cuyocuyo (Alfaro-Alejo et al., 2021). Esta precipitación provocó muchos deslizamientos y flujos de escombros en la zona. La falla de un talud dio como resultado flujo de escombros en la quebrada Jilari (Figura 2). Un moderado tamaño de profundidad 3-6 m de avalancha provocó el flujo de escombros cerca de 1.0 km aguas abajo. El desastre mató a una persona y más de 14 casas fueron dañadas o destruidas, además se bloqueó el puente principal, calles (Alexander, 1992). Durante la intensa precipitación, se desarrolló una alta presión de poros de agua dentro del espacio limitado por las fracturas e intersticios. Similar suceso ocurrió el año 2005, 2012 y otros años, con menores consecuencias.

En un intento para prevenir deslizamientos y consecuentes flujos de escombros, similares a anteriores desastres ocurridos, este estudio se concentra en la determinación del mapa de peligro por deslizamiento mediante métodos determinísticos, como un estudio de caso en la cuenca del río Cuyocuyo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de estudio cubre la cuenca del río Cuyocuyo, se encuentra en la provincia de Sandía, región Puno, Perú (Figura 1), ubicado en 14°28.20' S, 69°32.22' O; su altitud oscila entre 2185 y 5843 msnm a una distancia de no más de 30 km. Recibe una precipitación promedio de 1280 mm anual. Al estar en el flanco amazónico de la cordillera de los Andes da como resultado un aire rico en humedad que transporta nieblas a las laderas que contribuye a precipitaciones altas.

### Métodos

Consiste en el inventario de deslizamientos ocurridos, adopción de un modelo de estabilidad de talud, propiedades del terreno, suelo y lluvia, mapeo de susceptibilidad a deslizamientos, que se detalla a continuación.

## Inventario de deslizamientos

Mediante un recorrido de campo y con ayuda de imágenes satelitales se lograron identificar los diversos tipos deslizamientos en la zona, que principalmente son: deslizamientos de tierra, flujos de escombros en quebradas como Jilari, caída de rocas, reptación, entre otros, mostrados en la figura 1. En la figura 2 se muestra el origen y extensión del área de deslizamiento en la localidad de Cuyocuyo, el sistema de drenaje local, ubicación de caminos y casas.

Figura 1  
*Ubicación del distrito de Cuyocuyo*

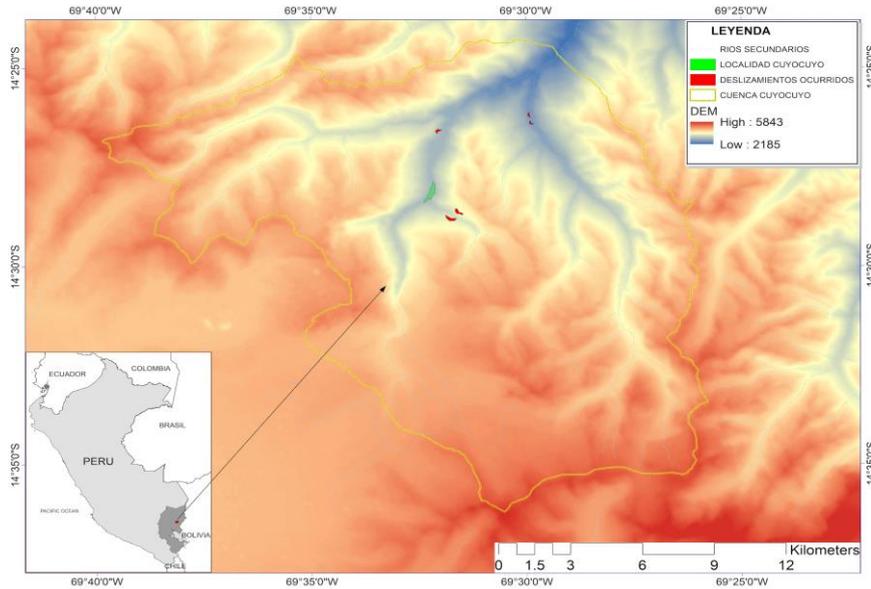


Figura 2  
*Zona de inestabilidad de taludes e iniciación de flujo de escombros hacia la localidad de Cuyocuyo.*



### Modelo de estabilidad de taludes

La metodología basada en SIG para deslizamientos usa la fórmula del factor de seguridad (FS) para el bien conocido modelo de estabilidad “talud infinito” (relación de fuerzas estabilizantes a desestabilizantes), sobre un plano de falla paralelo a la superficie de terreno con efectos de bordes descartados. El modelo de talud infinito, fue presentado por diversos autores (Dolojan et al., 2021; Ferrer-Boix & an Lim, 2016; Fuchs et al., 2014), el factor de seguridad viene expresado por la ecuación (1).

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{c' + (\sigma_n - u) \tan \phi'}{W \sin \alpha} \quad (1)$$

Donde:  $c'$  = cohesión efectiva;  $\sigma_n - u$  = esfuerzo normal efectivo;  $W$  = peso del suelo debido a la gravedad

El método de talud infinito, desarrollado por Skempton & DeLory (1957), considera que la profundidad de falla es mucho menor que la extensión total del talud y que el equilibrio entre las fuerzas resistentes y de deslizamiento se da en una sola dovela de talud. El cálculo de FS en el método de talud infinito se realiza mediante la ecuación 2, según lo propuesto por Craig & Augusto Filho (2020).

$$FS = \frac{c' + (\gamma_{nat} \times z \cos^2 i - u) \tan \phi'}{\gamma_{nat} \times z \cdot \sin i \cdot \cos i} \quad (2)$$

Donde: FS = factor de seguridad;  $c'$  = cohesión efectiva;  $\gamma_{nat}$  = peso unitario natural;  $\phi'$ : Ángulo de fricción efectiva;  $z$  = profundidad del plano de falla;  $i$  = ángulo de talud;  $u$  = presión de agua intersticial.

Adoptando rangos apropiados para variables es posible calibrar y agrupar la mayoría de deslizamientos observados dentro de clases de factor de seguridad (FS) presentados en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
Clases de factor de Seguridad de Talud FS.

Valor FS	Estado Previsto	Posible Influencia de Factores no Modelados
FS > 1.50	Estable	Únicamente factores desestabilizantes principales conducen a inestabilidad
1.25 < FS < 1.50	Moderadamente Estable	Factores desestabilizantes moderados conducen a la inestabilidad
1.00 < FS < 1.25	Ligeramente Estable	Factores desestabilizantes menores pueden llevar a la inestabilidad
0.5 < FS < 1.00	Inestable	Factores desestabilizantes no son requeridos para inestabilidad
FS < 0.50	Muy Inestable	Factores estabilizantes pueden ser responsables para estabilidad

Fuente: Adaptado de Ray & de Smedt (2009)

### Propiedades del terreno, suelo y lluvia

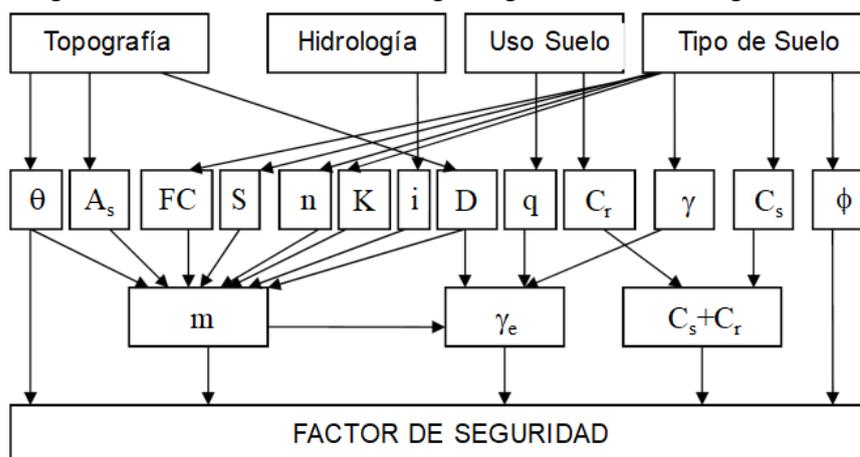
Los datos topográficos de la cuenca se obtuvieron del modelo de elevación digital SRTM, con una resolución de 30m, asimismo se tuvo una derivada de la interpolación del mapa topográfico 1: 25,000 con una equidistancia de 50 m de la zona, se representan como un modelo de elevación digital. Las propiedades del suelo fueron incrustadas en un mapa de distribución del suelo y los datos de lluvia se representan con las condiciones de saturado, semisaturado y seco.

### Mapeo de susceptibilidad a deslizamiento

El diagrama de flujo que se muestra en la figura 3 es desarrollado para calcular el mapa de factor de seguridad para diferentes escenarios. Este diagrama de flujo nos da una idea acerca del desarrollo del modelo para análisis de datos y mapa del factor de seguridad. Los datos son almacenados en una base de datos SIG en proyección UTM.

**Figura 3**

Diagrama mostrando la metodología seguida en la investigación.



Fuente: Adaptado de Acharya et al. (2006)

El índice de humedad para condición completamente seca es 0, condición media saturada es 0.5 y condición completamente saturada es 1.

El factor de seguridad para los diferentes escenarios es calculado usando las ecuaciones correspondientes en el álgebra de mapas del Model Builder de ArcGIS 10.x, según ecuación (5).

$$FS = \{C + [\cos I * \cos I [F[A-B] + B(G-F)] * \tan D]\} / \{\sin I * \cos I [F - [A-B] + G * B]\} \quad (5)$$

Donde: A = Espesor de la capa de suelo (m); B = Espesor de la capa de suelo saturado (m); C = Cohesión del suelo (kN/m<sup>2</sup>); D = Ángulo de fricción interna efectiva del suelo (°); E = Peso Unitario seco del suelo (kN/m<sup>3</sup>), F = Peso Unitario húmedo del suelo (kN/m<sup>3</sup>); G = Peso Unitario del suelo saturado (kN/m<sup>3</sup>); H = Peso Unitario del agua.

Se evalúan en cada celda de la cuadrícula utilizando las entradas distribuidas espacialmente. A continuación, se asigna a la celda un único valor de factor de seguridad, que representa la condición de estabilidad del talud.

Luego de producir mapas para tres escenarios diferentes, esto es, condición suelo saturado, semisaturado y seco, para clasificar estos escenarios con las especificaciones mostradas en la Tabla 1.

## RESULTADOS

### Características geológicas del área de estudio

#### *Fisiografía*

El distrito de Cuyocuyo tiene un relieve que fue modelado por un conjunto de agentes geodinámicos externos a lo largo del tiempo geológico, está constituido por las siguientes unidades geomorfológicas:

- (1) Flanco Andino: Compuesta por rocas volcánicas y sedimentarias que están fuertemente disectadas y alteradas, muy deleznable por la presencia de rocas lutáceas con pendientes fuertes.
- (2) Colinas Disectadas: Donde las quebradas disectan las colinas. Una expresión morfológica importante son las cárcavas con anchos variables, debidos al agua de escorrentía superficial proveniente de los manantiales y lluvias.

#### *Litología*

El distrito de Cuyocuyo, Sandia presenta unidades litológicas de origen principalmente volcánico y sedimentario cuyas edades van desde el paleozoico hasta el cuaternario reciente, la secuencia litológica del área pertenece a la formación Sandia y Ananea (Gomez, 2012; PREDES, 2008).

- (a) Afloramientos Rocosos: En estratos de rocas volcánicas, areniscas y lutitas fuertemente fracturadas, con pliegues ligeros constituyendo geoformas escarpadas (calizas) y zonas de derrumbes en las lutitas y areniscas.
- (b) Depósitos Superficiales: Agrupa formaciones de detritos recientes, constituidas por materiales inconsolidados producidos por meteorización y erosión de terrenos pre existentes y la posterior acumulación de sedimentos, estos depósitos superficiales están constituidos por: 1.- Depósitos Aluviales, 2.- Depósitos Fluviales, 3.- Depósitos Proluviales, 4.- Depósitos Coluviales 5.- Flujos de barro.

#### *Uso de la Tierra*

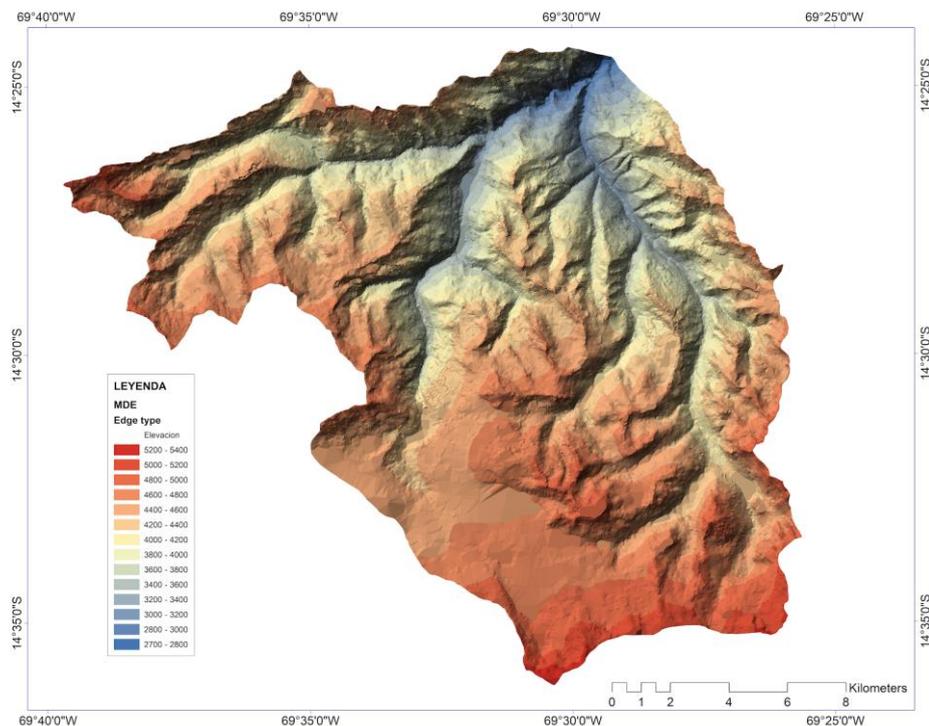
La información de uso de la tierra ha sido obtenida a través de fotografías aéreas, imágenes satelitales y recorrido de campo, procesado convenientemente. La estructura del uso de la tierra es ampliamente variable sobre el terreno. La mayoría de las cárcavas, especialmente cárcavas de quebrada, y áreas de fuerte pendiente están cubiertas por tipos de uso de tierra anti-erosión: árboles, andenes y pastizales naturales, pero algunas partes del área no están perturbados, caracterizados por un desfavorable ordenamiento de parcelas y caminos vecinales. Tales defectos causan diferentes formas de flujo superficial,

provocando que tasas de erosión y potenciales fallas de estabilidad de terreno ocurran, especialmente en la época de lluvias.

#### *Modelo Digital de Elevación (MDE)*

La cuadrícula MDE, usada como un dato de relieve, ha sido de una resolución de 30 m. obtenido por interpolación de las curvas de nivel desde un mapa topográfico por medio del ArcToolbox de ArcGIS (Figura 4). La aplicación de un MDE con alta resolución implica también usar datos fiables del suelo y el inventario de deslizamientos (Fuchs et al., 2014).

**Figura 4**  
*Modelo Digital de Elevación cuenca Cuyocuyo.*



#### *Propiedades del Suelo*

La capa de información de suelo, almacenado en un formato vector, ha sido digitalizado obtenido de cartografía y también de la inspección en campo. La mayor parte de la cuenca está conformada por materiales aluviales con predominio de la fracción gruesa empacada en proporciones variables de finos clasificado en el sistema SUCS como GM-GC siendo estos suelos inestables y de baja densificación por los eventos morfodinámicos, asumiéndose un espesor del suelo constante.

#### *Inventario de deslizamientos*

La zona está constituida por material rocoso que se ha fracturado y triturado, que genera grandes depósitos de materiales, que se deslizan debido a la infiltración de las lluvias, que satura los suelos, que desequilibran los taludes y activan los movimientos de masa de suelo y desprendimiento de rocas. El inventario de deslizamientos en la cuenca está basado en trabajos anteriores, imágenes de satélite y trabajos de campo, desde el año 2005 al 2019, siendo el deslizamiento más importante, por el peligro a poblaciones la de la quebrada Jilari,

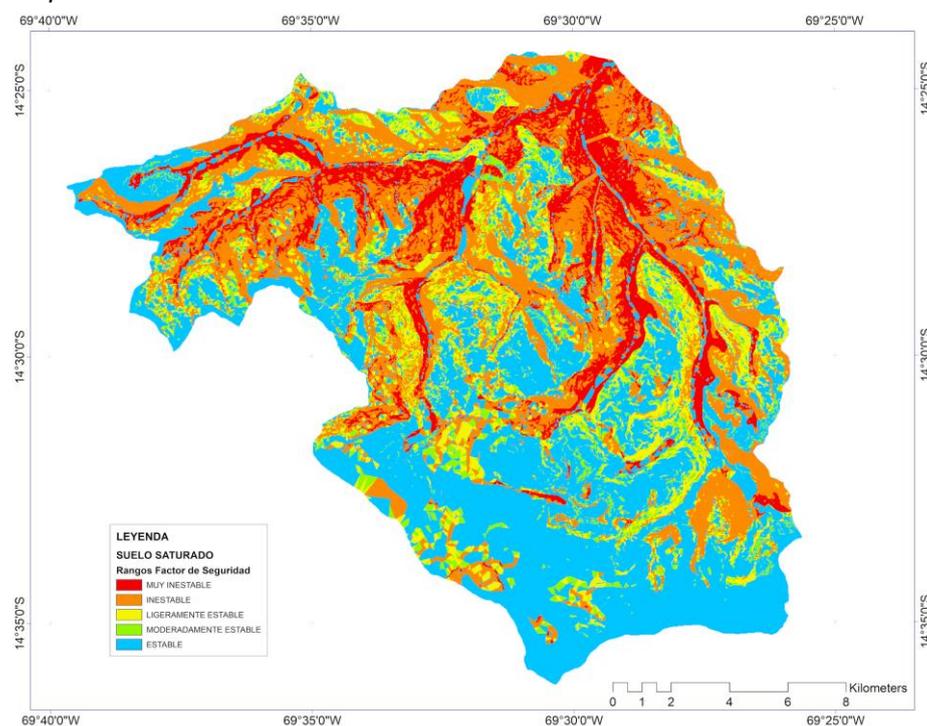
ubicado arriba de la localidad de Cuyocuyo. La erosión fluvial es otro factor desencadenante de los deslizamientos y de la profundización del cauce del valle de los ríos existentes en el distrito. Los diversos tipos de deslizamientos se muestran en la figura 1. Estos eventos se emplearon para la confirmación y evaluación del mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

#### Distribución de posibles deslizamientos

Los resultados del modelamiento de deslizamiento se muestran en la figura 5, donde se confirma la interpretación del fenómeno existente bajo las condiciones de la zona. Como primer resultado se puede ver que, para las condiciones del suelo saturado, semisaturado y seco el factor de seguridad está entre las clases “inestable” a “muy inestable”, en un 42%, 38% y 18% del área de la cuenca respectivamente (Figura 6).

**Figura 5**

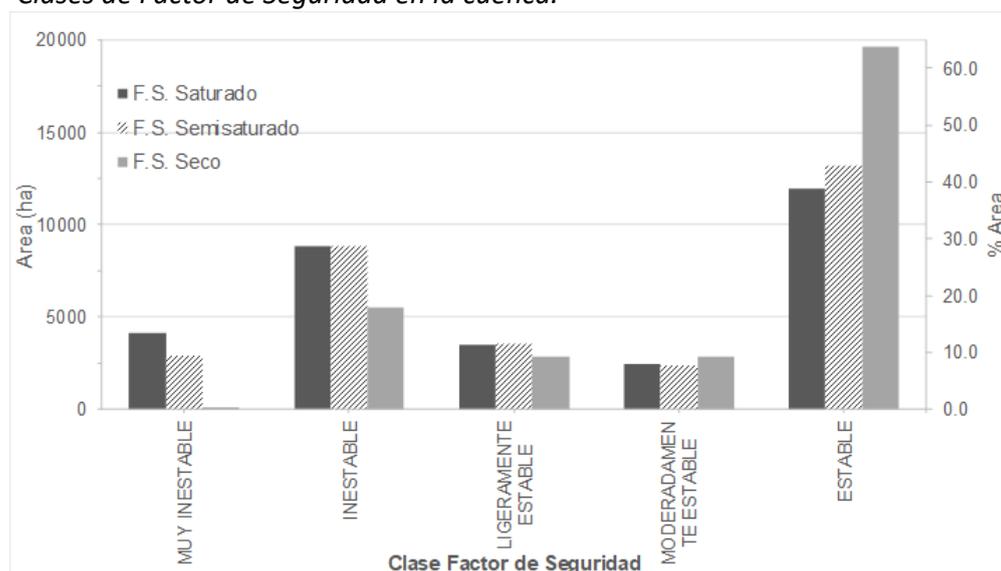
*Mapa de estabilidad en condición saturada.*



La zonificación permite priorizar áreas de mayor riesgo para adoptar medidas de prevención o de mitigación. Sin embargo, su grado de precisión deberá ser validado a partir de análisis más detallados. Su principal ventaja con respecto a otros métodos de análisis es que permite obtener la probabilidad de falla de deslizamiento, que es un indicador óptimo para establecer la estabilidad de taludes en una zona.

Estos deslizamientos pueden ser ayudados a su ocurrencia, por otros factores no necesariamente geotécnicos o de lluvias, tal es el caso de la erosión de cauces al pie del talud por socavación de quebradas, tal como la presentada en la quebrada Jilari (Figura 7). Otra fuente de inestabilidad es la presencia de áreas irrigadas como lo indica (Bosco et al., 2018), asimismo las acciones de excavación relacionada a obras viales o similares, también pueden provocar deslizamientos (Turner, 2018).

**Figura 6**  
*Clases de Factor de Seguridad en la cuenca.*



Para la zonificación de peligros por deslizamiento varias herramientas o librerías fueron producidas por muchos investigadores entre las que destacan SINMAP (Pack et al., 2001), SHALSTAB (Dietrich et al., 1998), r.slope.stability (Mergili, 2021), SHIA\_Landslide (Aristizábal et al., 2016) entre otros.

**Figura 7**  
*Deslizamiento en la zona de Jilari, con protección de cauce.*



Los deslizamientos provocados por lluvias en el distrito de Cuyocuyo, si bien se pueden modelar como superficiales con el modelo de talud infinito, en muchos casos también son deslizamientos profundos que requieren una técnica de análisis adecuada para tal fin. En todo caso, a fin de disminuir el peligro de deslizamientos en los diversos puntos identificados es necesario considerar medidas de estabilización o remediación de taludes

como lo refieren Cornforth (2005); Cruden & Varnes (1996); Huang (1983); Suárez Díaz, (2014).

Eventualmente muchos deslizamientos activados por la ocurrencia de lluvias, se convirtieron en detonantes de flujos de escombros, tal es el caso de la quebrada Jilari. Para contrarrestar los flujos de escombros existen acciones específicas (Jakob et al., 2012; Mizuyama, 2008; Okubo et al., 1997; Takahashi, 2014; Xiong et al., 2016).

## CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos mediante el análisis determinístico, se llega a la conclusión que la cuenca para condición de suelo saturado, semisaturado y seco presenta un grado “inestable” a “muy inestable” de peligro de deslizamiento, en un 42%, 32% y 18% del área de la cuenca respectivamente. Los eventos de deslizamientos en la cuenca del Cuyocuyo están fuertemente correlacionados por varios factores, principalmente por la topografía, tipos de suelo y los eventos de precipitación.

El modelo SIG no únicamente evalúa y explica las áreas donde han ocurrido deslizamientos, sino también predice las potenciales áreas de peligro donde pueden ocurrir deslizamientos bajo futuras condiciones de precipitación. La información dada por los mapas de susceptibilidad a deslizamiento ayuda a las autoridades y técnicos a reducir pérdidas causadas por deslizamientos existentes y futuros por medio de la prevención, mitigación y evasión, en el marco de la gestión de riesgos de desastres.

**Roberto Alfaro Alejo**

Conceptualización, Trabajos de campo, redacción de artículo

**Jose A. Mamani Gomez**

Procesado de datos en ArcGIS, redacción de borrador de artículo

**Isidro A. Pilares Hualpa**

Redacción de introducción del artículo,

revisión del artículo

## REFERENCIAS

- Acharya, G., De Smedt, F., & Long, N. T. (2006). Assessing landslide hazard in GIS: a case study from Rasuwa, Nepal. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(1), 99–107. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0025-y>
- Alexander, D. (1992). On the causes of landslides: Human activities, perception, and natural processes. *Environmental Geology and Water Sciences*, 20(3), 165–179. <https://doi.org/10.1007/BF01706160>
- Alfaro-Alejo, R., Paredes-Mamani, R. P., Montenegro-Gambini, J., Belizario-Quispe, G., & Flores-Condori, E. (2021). Geo-hydrological Risk Awareness and Disaster Preparedness in a Mountainous Area of Southern Peru Vulnerable to Disaster. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012125>
- Aristizábal, E., Vélez, J. I., Martínez, H. E., & Jaboyedoff, M. (2016). SHIA\_Landslide: a distributed conceptual and physically based model to forecast the temporal and spatial occurrence of shallow landslides triggered by rainfall in tropical and mountainous basins. *Landslides*, 13(3), 497–517. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0580-7>
- Borga, M., Dalla Fontana, G., Da Ros, D., & Marchi, L. (1998). Shallow landslide hazard assessment

- using a physically based model and digital elevation data. *Environmental Geology*, 35(2), 81–88.
- Bosco, G., Dalpiaz, M., & Simeoni, L. (2018). Effects of modified irrigation procedures on the stability of cultivated slopes. In *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice* (pp. 483–489). CRC Press.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. *Natural Hazards*, 20(2), 117–135. <https://doi.org/10.1023/A:1008097111310>
- Cornforth, D. (2005). *Landslides in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*. Wiley Publishers.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Craig, A. M. L., & Augusto Filho, O. (2020). *Landslide Susceptibility Mapping of Highway Slopes, Using Stability Analyses and GIS Methods*. <https://doi.org/10.28927/SR.431071>
- Crozier, M. J. (1986). *Landslides: causes, consequences & environment*. Taylor & Francis.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. . Transportation Research Board Special Report.
- Dietrich, W. E., de Asua, R. R., Coyle, J., Orr, B., & Trso, M. (1998). A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in forested lands of Northern California. *Stillwater Ecosystem, Watershed & Riverine Sciences*. Berkeley, CA.
- Dobrescu, C.-F., Calarasu, E.-A., & Huzui-Stoiculescu, A. E. (2018). Integrative analysis used for landslide susceptibility zoning at local scale based on GIS modeling. *Ce/Papers*, 2(2–3), 293–298. <https://doi.org/10.1002/cepa.686>
- Dolojan, N. L. J., Moriguchi, S., Hashimoto, M., & Terada, K. (2021). Mapping method of rainfall-induced landslide hazards by infiltration and slope stability analysis. *Landslides*, 18(6), 2039–2057. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01617-x>
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons, Inc.
- Ferrer-Boix, C., & an Lim, Z. (2016). *Landslide Hazard Analysis Using An Infinite Slope Stability Model Approach (A Case Study–Garibaldi At Squamish Project)*.
- Fuchs, M., Torizin, J., & Kühn, F. (2014). The effect of DEM resolution on the computation of the factor of safety using an infinite slope model. *Geomorphology*, 224, 16–26.
- García, W., Delfín, M., Ledezma, M., & Arévalo, B. (2021). Integrando métodos de evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones en cuencas del Tunari y zona de Alto Cochabamba. *Acta Nova*, 10(1), 61–95.
- Gomez, D. (2012). *Evaluacion tecnica de peligros geologicos en los sectores Jilari - Llamaniyata - Ccatasuyo*. INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1589>
- Gorsevski, P. V, Gessler, P., & Foltz, R. B. (2000). Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS. In: *GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop: Applications for the 21st Century, Denver, Colorado, September 25-27, 2000*.
- Huang, Y. H. (1983). *Stability Analysis of Earth Slopes*. Springer Science.

- Jakob, M., Stein, D., & Ulmi, M. (2012). Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Natural Hazards*, 60(2), 241–261. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0007-2>
- Mergili, M. (2021). *r.slope.stability - The slope stability model. Publications*. <https://www.slopestability.org/publications.php>
- Mizuyama, T. (2008). Structural Countermeasures for Debris Flow Disasters. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 1(2), 38–43.
- Okubo, S., Ikeya, H., Ishikawa, Y., & Yamada, T. (1997). Development of new methods for countermeasures against debris flows. In A. Armanini & M. Michiue (Eds.), *Recent Developments on Debris Flows* (pp. 166–185). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0117768>
- Pack, R. T., Tarboton, D. G., & Goodwin, C. N. (2001). *Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP*.
- Palacio Cordoba, J., Mergili, M., & Aristizábal, E. (2020). Probabilistic landslide susceptibility analysis in tropical mountainous terrain using the physically based r. slope. stability model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(3), 815–829.
- Pilares, I., Montalvo, N., Mejía, A., Guevara-Perez, E., Fano, G., & Alfaro, R. (2018). Evaluation of water availability in the Cabanillas river basin of the Peruvian Altiplano under regionalized climatic scenario. *Ingenieria UC*, 25(2), 307–319.
- PREDES. (2008). *Plan de Reducción de Riesgos distrito de Cuyocuyo, Comité de Defensa Civil de Cuyocuyo*. OXFAM-PREDES.
- Ray, R. L., & de Smedt, F. (2009). Slope stability analysis on a regional scale using GIS: a case study from Dhading, Nepal. *Environmental Geology*, 57(7), 1603–1611. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1435-5>
- Skempton, A. W., & DeLory, F. A. (1957). Stability of natural slopes in London Clay. *Proc. 4th Internal Conference on Soil Mechanics and Foundation Engng., London, 1957*, 2, 378–381.
- Suárez Díaz, J. (2014). *Deslizamientos. Tomo II: Técnicas de Remediación* (Geotecnología (ed.)). Geotecnología SAS. <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-ii-tecnicas-de-remediacion.html>
- Takahashi, T. (2014). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/doi:10.1201/b16647-710.1201/b16647-7>
- Turner, A. K. (2018). Social and environmental impacts of landslides. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3(1), 70. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0175-y>
- Van Westen, C. J., Soeters, R., & Sijmons, K. (2000). Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpago area, Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(1), 51–60. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85026-6](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85026-6)
- Wubalem, A. (2021). Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uatzau catchment area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00170-y>
- Xiong, M., Meng, X., Wang, S., Guo, P., Li, Y., Chen, G., Qing, F., Cui, Z., & Zhao, Y. (2016). Effectiveness of debris flow mitigation strategies in mountainous regions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 40(6), 768–793. <https://doi.org/10.1177/0309133316655304>