

Multivariable Spatial Analysis of Landslide Susceptibility in the Alto Huallaga Basin Using Satellite Data and Modeling in GEE

Meza-Caysahuana Oscar Antonio¹; Cernades-Palomino Diego Alonso²; Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos³

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, N00315080@upn.pe, N00273416@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

Abstract– *In the Peruvian context, landslides represent a persistent threat, especially in the Andean regions where the combination of steep slopes, intense rainfall, and unregulated human activity increases terrain vulnerability. Every year, these events cause severe impacts on infrastructure, communities, and transportation networks, resulting in significant human and economic losses. The Alto Huallaga basin is among the most affected areas due to its geographic conditions and the expansion of extractive activities, which exacerbate landslide risks along critical roads. However, there remains a notable lack of systematized technical information from the government regarding the factors triggering these events. In response, this study proposes a methodology based on multivariable spatial analysis, integrating key variables such as slope, precipitation (CHIRPS), and vegetation cover (NDVI). A JavaScript-based script was implemented on the Google Earth Engine platform to temporally monitor and analyze these variables, enabling a comprehensive assessment of landslide susceptibility. The results provide valuable inputs for civil engineering planning and territorial management in the basin, contributing to a safer and more sustainable approach to geohazard risk reduction.*

Keywords– Alto Huallaga Basin, Google Earth Engine, landslide-prone areas, NDVI, CHIRPS.

Análisis espacial multivariable de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del Alto Huallaga mediante datos satelitales y modelado en GEE

Meza-Caysahuana Oscar Antonio¹; Cernades-Palomino Diego Alonso²; Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos³

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, N00315080@upn.pe, N00273416@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

Resumen— En el contexto peruano, los deslizamientos de tierra representan una amenaza persistente, especialmente en zonas andinas donde la interacción de pendientes pronunciadas, lluvias intensas y actividades humanas desreguladas incrementa la vulnerabilidad del terreno. Anualmente, estos eventos provocan severos impactos sobre infraestructuras, poblaciones y vías de comunicación, generando importantes pérdidas humanas y económicas. La cuenca del Alto Huallaga es una de las más afectadas, debido a sus características geográficas y al crecimiento de actividades extractivas, lo que agrava la exposición al riesgo de deslizamientos. No obstante, persiste una limitada disponibilidad de información técnica sistematizada por parte del Estado sobre los factores desencadenantes. En respuesta, este estudio propone una metodología basada en análisis espacial multivariable, integrando variables como pendiente, precipitación (CHIRPS) y cobertura vegetal (NDVI). Para ello, se implementó un script en JavaScript sobre Google Earth Engine, que permite monitorear y analizar temporalmente dichos factores, facilitando una evaluación integral de la susceptibilidad a derrumbes. Los resultados generados ofrecen insumos relevantes para la planificación y ejecución de obras de ingeniería civil en la cuenca, apoyando una gestión territorial más segura y sostenible ante riesgos geodinámicos.

Palabras clave— Cuenca Alto Huallaga, Google Earth Engine, deslizamientos, NDVI, CHIRPS.

I. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra representan una de las amenazas naturales más recurrentes en cuencas hidrográficas y territorios montañosos, especialmente en zonas donde confluyen alta variabilidad climática y presión antrópica sostenida. Estos procesos geodinámicos comprometen la estabilidad del terreno, generan pérdidas humanas y materiales, y alteran el equilibrio hidrológico de las cuencas, afectando infraestructuras, poblaciones y ecosistemas vulnerables.

La ocurrencia de estos eventos está asociada a factores condicionantes como la pendiente del terreno, las propiedades edáficas y la cobertura vegetal, siendo las precipitaciones intensas el principal detonante. Lluvias acumuladas o persistentes provocan la saturación del suelo, mientras que la baja cohesión del material, el mal drenaje y la deficiente cobertura boscosa elevan la susceptibilidad al deslizamiento. Este escenario de riesgo se agrava en regiones de relieve abrupto donde la ocupación no planificada y el desarrollo vial atraviesan áreas inestables sin criterios de evaluación previa.

En la figura 1 se muestra un caso reciente que evidencia esta problemática ocurrió el 8 de marzo de 2025 en el km 82 de la Carretera Central, en Chinchao (Huánuco), cuando un

derrumbe bloqueó completamente la vía Huánuco–Tingo María tras fuertes lluvias, afectando a cientos de vehículos y pasajeros. Este tipo de eventos es una manifestación directa de los vacíos en el monitoreo preventivo y la falta de integración de información geoespacial en la planificación territorial.

La República

Video impactante muestra el derrumbe de cerro que bloqueó la vía Huánuco-Tingo María y dejó miles de vehículos varados



Pasajeros capturaron el momento exacto cuando el cerro se continúa derrumbando sobre la vía entre Huánuco y Tingo María. Foto: composición LR

Fig. 1 Evento de deslizamiento en la vía Huánuco–Tingo María tras lluvias intensas (marzo 2025).

La cuenca del Alto Huallaga reproduce condiciones similares, con alta predisposición a deslizamientos traslacionales que responden a una combinación de pendientes críticas, lluvias concentradas y deterioro de la cobertura vegetal. Sin embargo, la ausencia de información técnica sistematizada sobre los factores desencadenantes limita la capacidad de respuesta oportuna ante esta amenaza.

Ante este contexto, es urgente aplicar enfoques espaciales multivariables que integren simultáneamente variables biofísicas y antrópicas, a fin de identificar zonas críticas con mayor precisión. Esta aproximación resulta clave para orientar la gestión del riesgo, optimizar el uso del suelo y fomentar un ordenamiento territorial más resiliente frente a escenarios de cambio climático y expansión urbana no planificada.

II. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La importancia de esta investigación radica en la generación de información geoespacial que permite identificar zonas con alta susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del Alto Huallaga. Este enfoque multivariable, basado en datos satelitales, aporta insumos técnicos para la planificación territorial y la gestión preventiva del riesgo frente al cambio climático y el crecimiento urbano no planificado.

III. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Desarrollar un modelo de análisis espacial multivariable en Google Earth Engine, mediante un script en JavaScript, que integre datos de precipitación (CHIRPS), topografía, cobertura vegetal (NDVI-MODIS) y suelo, con el fin de mapear mensualmente zonas con alta susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del Alto Huallaga y apoyar la gestión del riesgo.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Ubicación del Proyecto

La cuenca del río Alto Huallaga, ubicada en la vertiente del Atlántico (UTM 18), abarca Huánuco, San Martín y parte de Pasco, y limita con las cuencas de los ríos Mayo, Pachitea, Mantaro y Rímac. Presenta un relieve accidentado, alta pluviosidad y creciente intervención antrópica, lo que incrementa su susceptibilidad a deslizamientos y la necesidad de una gestión territorial preventiva.

B. Factores geomorfológicos de la cuenca

La cuenca del río Alto Huallaga abarca aproximadamente 15998.2 km², con un perímetro de 883 km y un cauce principal de 372.5 km, con un relieve accidentado que condiciona la dinámica hidrológica y los procesos de remoción en masa. Como se observa en la Figura 2, presenta altitudes entre 269 y 5583 m.s.n.m., donde las pendientes pronunciadas, suelos frágiles y precipitaciones intensas incrementan la susceptibilidad a deslizamientos. En este contexto, el análisis topográfico constituye una variable clave en el enfoque multivariable.

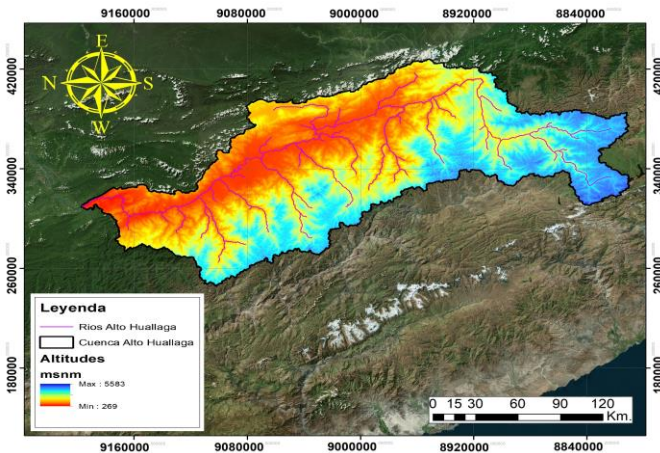


Fig 2. Representación gráfica de altitudes de la cuenca Alto Huallaga.

C. ArcGIS

Es una plataforma de Información Geoespacial (GIS) desarrollada por Esri, utilizada para el procesamiento, análisis y visualización de datos espaciales. En este estudio aplicado a la cuenca del Alto Huallaga, permite integrar capas como pendiente, litología y cobertura vegetal, las cuales son fundamentales para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos. Su capacidad para generar modelos digitales de elevación (MDE), realizar análisis morfométricos y superponer múltiples variables geoespaciales la convierte en una herramienta esencial para el análisis territorial en áreas con alta complejidad topográfica [10].

D. Google Earth Engine (GEE)

Plataforma de procesamiento geoespacial en la nube, diseñada para analizar grandes volúmenes de datos satelitales y ambientales. Utiliza JavaScript y Python para realizar análisis temporales y espaciales a escala regional o global. En estudios sobre la cuenca del Alto Huallaga, GEE integra series de NDVI, datos climáticos como CHIRPS y modelos de elevación, facilitando la identificación de zonas con alta susceptibilidad a deslizamientos. Su infraestructura en la nube permite el acceso a archivos históricos sin requerir recursos locales [11].

E. NVDI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es una métrica espectral calculada a partir de imágenes satelitales para estimar la densidad y salud de la vegetación. Se basa en la reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y el rojo visible (RED), mediante la fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \dots \dots \dots (1)$$

Sus valores varían entre -1 y 1; valores altos indican vegetación densa y sana, mientras que valores cercanos a cero reflejan poca o nula cobertura. Los negativos suelen representar cuerpos de agua, nieve o superficies artificiales [13].

TABLA 1
CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL SEGÚN NDVI

Rango NDVI	Clasificación	Interpretación
-1.00 a -0.25	Agua / Nieve / Nubes	Superficies sin vegetación, cuerpos de agua
-0.25 a 0.00	Suelo desnudo / Superficies artificiales	Zonas urbanas, rocas, suelo expuesto
0.00 a 0.25	Vegetación muy escasa o estresada	Pastos secos, vegetación rala o degradada
0.25 a 0.50	Vegetación moderada	Pastizales, cultivos jóvenes, arbustos
0.50 a 0.75	Vegetación densa	Bosques secundarios, cultivos en buen estado
0.75 a 1.00	Vegetación muy densa y saludable	Bosques húmedos, selvas, vegetación vigorosa

El índice NDVI es una herramienta esencial en teledetección, al permitir cuantificar la cobertura vegetal, analizar temporalmente los ecosistemas y evaluar la respuesta

del paisaje ante fenómenos como el cambio climático, la presión antrópica o la expansión agrícola intensiva [12].

F. CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data)

CHIRPS es un conjunto de datos de precipitación diseñado para el monitoreo climático global, particularmente útil en el análisis de sequías y variaciones ambientales. Ofrece datos diarios, pentadales y mensuales desde 1981, con una resolución de aproximadamente 0.05°, integrando imágenes satelitales infrarrojas (CCD) y registros de estaciones meteorológicas mediante interpolación mejorada.

Su utilidad destaca en regiones con limitada infraestructura meteorológica, como la cuenca del Alto Huallaga, permitiendo evaluar la distribución de lluvias, un factor clave en la detección de zonas con riesgo de deslizamientos. Estos datos pueden ser procesados desde GEE, facilitando su integración en análisis temporoespaciales para modelación climática y estudios de riesgo hidrometeorológico [17].

G. Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético abarca el rango completo de frecuencias y longitudes de onda de la radiación, desde rayos gamma hasta ondas de radio. Estas ondas viajan sin necesidad de un medio físico, lo que permite su uso en observación remota y adquisición de datos satelitales.

Se clasifica en regiones como rayos gamma, rayos X, UV, luz visible, infrarrojo (IR), microondas y ondas de radio. En teledetección aplicada a cuencas como la del Alto Huallaga, se emplean principalmente las bandas visibles, NIR y SWIR, útiles para analizar la cobertura vegetal, cambios en el uso del suelo y riesgos como deslizamientos, mediante la reflectancia diferencial [18].

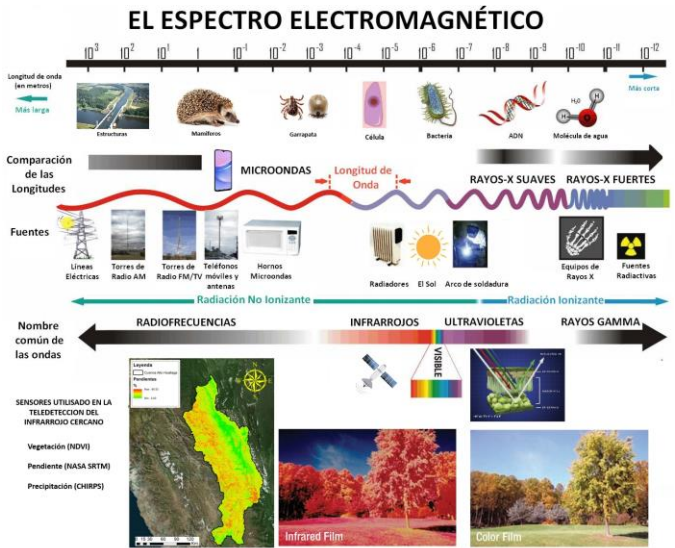


Fig 3. Representación del espectro electromagnético con sus respectivas longitudes de onda y regiones asociadas. Se destacan las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR), ubicadas entre el visible y las microondas, fundamentales en análisis espectral para teledetección de vegetación y monitoreo de superficies terrestres [19].

H. MODIS/006/MOD13Q1

El conjunto de datos MODIS/006/MOD13Q1, generado por el sensor MODIS del satélite Terra (NASA), proporciona registros del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) desde el año 2000. Con resolución espacial de 250 metros y frecuencia temporal de 16 días, permite monitorear continuamente la dinámica de la vegetación.

En este estudio, su aplicación permite identificar zonas con pérdida de cobertura vegetal o estrés ambiental, factores clave en la evaluación de áreas propensas a deslizamientos. Al integrarse con datos de pendiente y precipitación, mejora la precisión en el análisis de riesgo. Este conjunto está disponible gratuitamente a través de plataformas como Google Earth Engine, lo que facilita su uso en estudios ambientales y territoriales de carácter espaciotemporal [20].

I. OpenLandMap Soil Texture Class (USDA System)

El conjunto de datos OpenLandMap Soil Texture Class, basado en el sistema USDA, brinda información geoespacial sobre la textura del suelo a nivel global, considerando proporciones de arena, limo y arcilla en distintos niveles del perfil edáfico. Forma parte de la plataforma OpenLandMap, que integra variables ambientales como suelo, vegetación y uso del territorio, con una resolución espacial de 250 metros [21].

La clasificación del suelo para este producto grillado se ve en la tabla 2.

TABLA 2
CLASIFICACIÓN DE LA LITOGRAFÍA DE SUELO

Símbolo (b)	Clasificación del suelo	Interpretación
1	Cl	(Arcilla)
2	SiCl	(Arcilla Limosa)
3	SaCl	(Arcilla Limosa Arenosa)
4	ClLo	(Limo Arcilloso)
5	SiClLo	(Limo Arcilloso Liger)
6	Lo	(Limo)
7	SaLo	(Limo Arenoso)
8	SiLo	(Limo Arenoso)
9	SaLo	(Limo Arenoso)
10	Si	(Limo)
11	LoSa	(Franco Arenoso)
12	Sáb	(Arena)

Este mapeo textural se obtiene mediante interpolación estadística a partir de datos de campo, utilizando el paquete soiltexture en R y el triángulo textural del sistema USDA. La información se presenta en seis profundidades estándar (0, 10, 30, 60, 100 y 200 cm), siendo una herramienta útil para caracterizar suelos en estudios a escala regional y global [22].

La Tabla 2 muestra una clasificación edáfica del sistema USDA, que permite identificar tipos de suelo como arcilloso, limoso o arenoso según su composición textural. Esta tipología es esencial para interpretar propiedades físicas del suelo como retención de agua, aireación y fertilidad, factores que influyen en el rendimiento agrícola, la gestión de cuencas y la modelación ecológica [23].

J. NASA SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Digital Elevation Model (DEM) 30m

El DEM SRTM de 30 m fue generado por la NASA durante la misión Endeavour en febrero de 2000, mediante radar interferométrico (InSAR). Proporciona datos topográficos con una resolución de ~30 m por píxel y cubre el 80 % de la superficie terrestre entre 60°N y 56°S, excluyendo zonas polares por limitaciones técnicas y orbitales [24].

Este producto es esencial en estudios de geomorfología, riesgo natural, hidrología, agricultura de precisión y planificación territorial. Su precisión es mayor en áreas planas y disminuye en regiones montañosas o boscosas por interferencias del terreno y la vegetación [25].

Gracias a su acceso libre y cobertura casi global, se integra fácilmente en plataformas como USGS Earth Explorer y GEE, siendo ampliamente utilizado en investigaciones geoespaciales y monitoreo ambiental regional y global.

V. METODOLOGÍA

Se implementó un modelo de análisis espacial multivariable en GEE mediante un script en JavaScript, integrando variables de precipitación (CHIRPS), cobertura vegetal (MODIS/006/MOD13Q1), textura del suelo (OpenLandMap-USA) y pendiente (SRTM). El análisis se aplicó a la cuenca del Alto Huallaga durante el periodo 2000–2024, permitiendo identificar patrones espaciotemporales asociados a variaciones climáticas y cambios en la cobertura.

El procedimiento incluyó: delimitación de la cuenca (UTM), carga de capas en GEE, normalización de variables (0–100 %), ponderación según incidencia (pendiente 40 %, precipitación 30 %, NDVI 15 %, litología 15 %) y cálculo del índice de riesgo mensual mediante fórmula multivariable. Los resultados se exportaron en GeoTIFF para su análisis espacial en SIG. El flujo completo del procedimiento se muestra en la Figura 4.

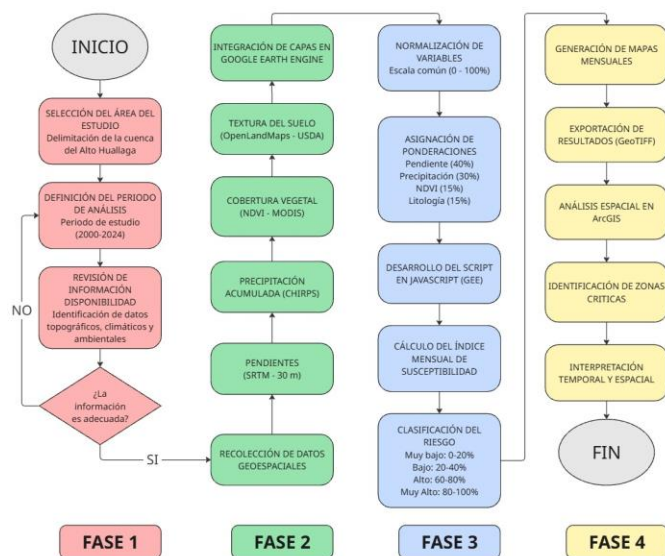


Fig. 4 Diagrama de flujo de la secuencia de pasos que realizar el código de java script para obtener las zonas de riesgo dentro del Alto Huallaga.

FASE 1

A. Delimitación de la cuenca y preparación de datos

En esta fase se delimitó la cuenca del Alto Huallaga y se definieron sus límites espaciales como base del análisis. Asimismo, se identificaron las fuentes de información geoespacial necesarias y se estableció el periodo de estudio, asegurando la compatibilidad espacial y temporal de las variables empleadas.

FASE 2

B. Recolección e integración de variables geoespaciales

Se recopilaron e integraron las variables del análisis multivariable: pendiente (SRTM), precipitación acumulada (CHIRPS), cobertura vegetal (NDVI-MODIS) y textura del suelo (OpenLandMap-USA). Todas las capas fueron procesadas en Google Earth Engine y delimitadas al área de estudio con resolución espacial homogénea.

FASE 3

C. Normalización, ponderación y modelamiento multivariable

Las variables integradas fueron normalizadas en una escala común (0–100 %) y ponderadas según su incidencia en la susceptibilidad a deslizamientos: pendiente (40 %), precipitación (30 %), cobertura vegetal (15 %) y textura del suelo (15 %). Con estas ponderaciones, se desarrolló un script en JavaScript en Google Earth Engine para el cálculo del índice mensual de susceptibilidad.

FASE 4

D. Clasificación del riesgo, exportación y análisis espacial

Los resultados del modelo fueron clasificados en cinco rangos de susceptibilidad y expresados en porcentajes. Los mapas mensuales generados se exportaron en formato GeoTIFF y se analizaron en ArcGIS, permitiendo identificar patrones espaciales y zonas críticas de riesgo, así como sustentar las conclusiones del estudio.

VI. RESULTADOS

Se realizó una reclasificación del índice NDVI con el fin de identificar zonas de mayor susceptibilidad ante precipitaciones intensas. Bajo el principio de que una mayor densidad de cobertura vegetal contribuye a la estabilidad del suelo, se consideró que las áreas con altos valores de NDVI presentan baja vulnerabilidad a deslizamientos, mientras que aquellas con escasa vegetación (valores bajos de NDVI) son potencialmente inestables y, por tanto, presentan mayor riesgo geodinámico. Esta variable fue integrada como uno de los factores ponderados en el modelo espacial de riesgo, en combinación con la precipitación acumulada, la pendiente y la textura del suelo. Esta clasificación se ve en la tabla 3.

TABLA 3
CLASIFICACIÓN DE RIESGO SEGÚN NDVI

Rango de NDVI	Clasificación del riesgo	Nivel de riesgo	Porcentaje de riesgo
$b < 0$	Agua, nieve, nubes o suelo desnudo	Riesgo máximo	100%
$b < 0.1$	Vegetación muy escasa	Riesgo alto	80%
$b < 0.2$	Vegetación escasa	Riesgo medio-alto	60%
$b < 0.3$	Vegetación moderada	Riesgo moderado	40%
$b < 0.5$	Vegetación abundante	Riesgo bajo	20%
$b \geq 0.5$	Vegetación densa	Riesgo mínimo	0%

Asimismo, se asignaron ponderaciones entre 0 % y 100 % a las unidades texturales del suelo, basándose en la clasificación edáfica proporcionada por el conjunto de datos OpenLandMap Soil Texture Class (USDA System). Esta evaluación permitió estimar el nivel de susceptibilidad según la composición granulométrica del perfil edáfico, considerando que texturas más finas, como las arcillosas, presentan mayor riesgo de inestabilidad frente a eventos pluviométricos intensos. Esto se puede ver en la tabla 4.

TABLA 4
CLASIFICACIÓN SEGÚN TIPO DE SUELO (LITOGRAFIA)

Símbolo (b)	Clasificación del suelo	Tipo general	Riesgo asignado (%)
1	Cl	(Arcilla)	90
2	SiCl	(Arcilla Limosa)	85
3	SaCl	(Arcilla Limosa Arenosa)	85
4	ClLo	(Limo Arcilloso)	75
5	SiClLo	(Limo Arcilloso Ligero)	70
6	Lo	(Limo)	50
7	SaLo	(Limo Arenoso)	40
8	SiLo	(Limo Arenoso)	35
9	SaLo	(Limo Arenoso)	35
10	Si	(Limo)	30
11	LoSa	(Franco Arenoso)	15
12	Sáb	(Arena)	10

El mapa de pendientes de la cuenca del río Alto Huallaga (figura 5) fue generado a partir del modelo digital de elevación SRTM (USGS/SRTMGL1_003) usando GEE. Representa pendientes desde 0 % en zonas planas hasta 60.53 % en áreas con mayor inclinación, utilizando una escala cromática que facilita su lectura espacial.

La cuenca, situada entre las regiones altoandinas y amazónicas de la vertiente atlántica, presenta un relieve abrupto. Las pendientes más marcadas se ubican en zonas medias y altas, donde la actividad geotectónica ha modelado una topografía escarpada. Estas condiciones aumentan la susceptibilidad a deslizamientos, erosión y escorrentía durante lluvias intensas.

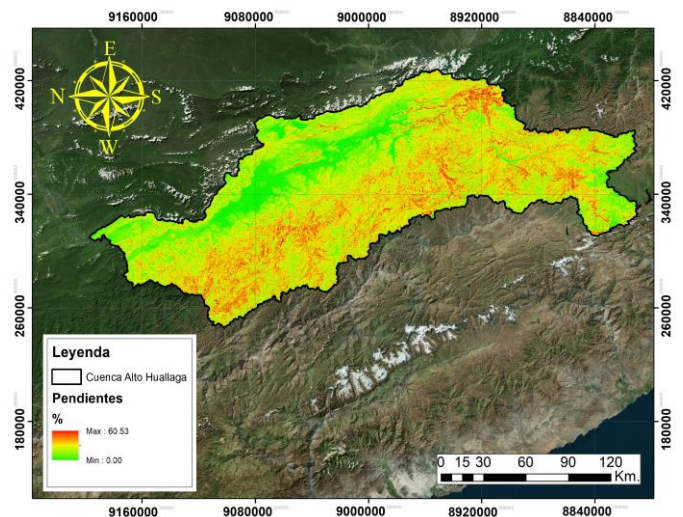


Fig 5. Representación gráfica de las pendientes dentro de la cuenca Alto Huallaga.

Se emplearon datos de precipitación CHIRPS con resolución de 10 km, analizando las lluvias diarias máximas mensuales entre 2000 y 2024. Los valores se normalizaron entre 0 % (mínimo) y 100 % (máximo). Mediante un script en JavaScript en GEE, se integraron las variables para estimar mensualmente zonas con alta probabilidad de deslizamientos, asignando pesos a cada factor: pendiente (40 %), precipitación (30 %), NDVI (15 %) y litología (15 %).

Las ponderaciones se definieron según criterios técnicos basados en la influencia relativa de cada variable en los deslizamientos, destacando la pendiente y la precipitación como factores principales. No obstante, estos valores son referenciales y pueden ajustarse según condiciones locales o futuras calibraciones con datos de campo.

La figura 6 muestra la ejecución del código y cómo realiza el análisis multitemporal, generando mapas descargables en formato GeoTIFF directamente a Google Drive.

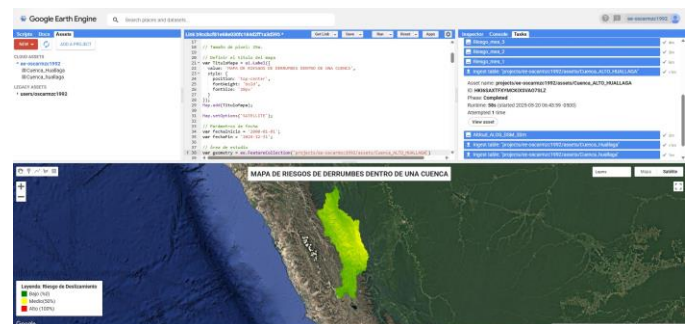


Fig 6. Implementación del script en GEE para la generación mensual de mapas de riesgo por deslizamientos, integrando datos satelitales de MODIS y CHIRPS.

El script desarrollado en JavaScript por el Ing. Mg. Sc. Abel Carmona Arteaga fue utilizado como base metodológica para este estudio y se encuentra disponible en [24]. A partir de su implementación, se generaron mapas mensuales que permitieron evaluar la susceptibilidad a deslizamientos durante

el primer cuatrimestre (enero–abril) en la cuenca del Alto Huallaga, integrando variables como precipitación (CHIRPS), cobertura vegetal (NDVI-MODIS), pendiente (SRTM) y textura del suelo (OpenLandMap–USDA). El riesgo fue expresado en porcentajes y clasificado en cinco rangos.

El análisis multitemporal mostró una evolución clara: en enero predominó el riesgo moderado en zonas medias y norte con fuertes pendientes y baja vegetación. En febrero, el riesgo se intensificó en el centro y noreste por lluvias acumuladas y suelos finos.

Marzo representó el punto más crítico, con expansión de áreas vulnerables por saturación del suelo y disminución del NDVI. En abril, se observó una leve reducción del riesgo, asociada a la menor precipitación y mejora de la cobertura vegetal.

Este monitoreo mensual confirma la utilidad del enfoque multivariable para la gestión preventiva y planificación territorial frente a amenazas geodinámicas.

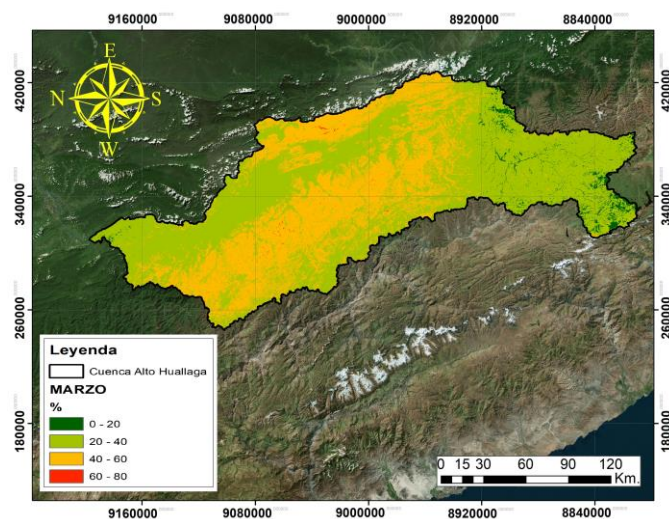


Fig. 9. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de marzo.

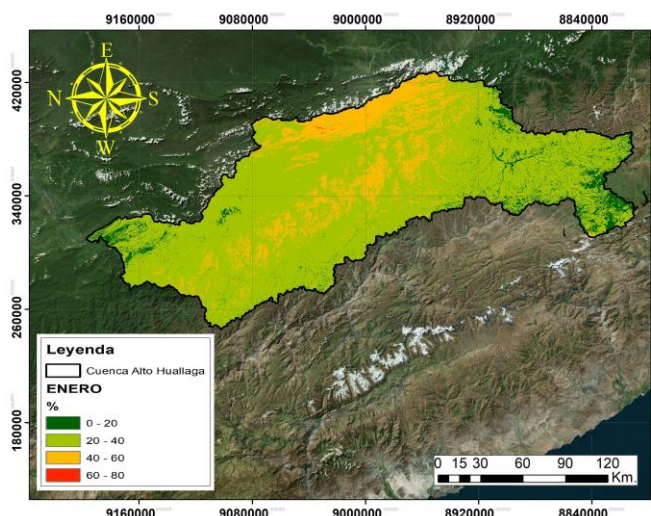


Fig. 7. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de enero.

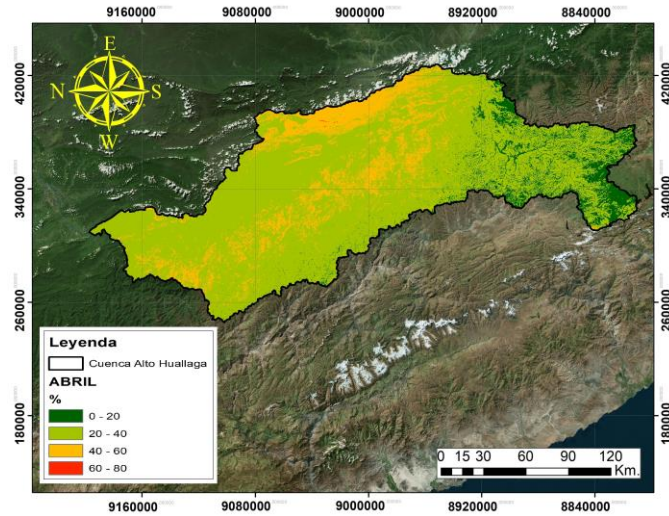


Fig. 10. Distribución espacial del mapa de riesgo en la cuenca del Alto Huallaga correspondiente al mes de abril.

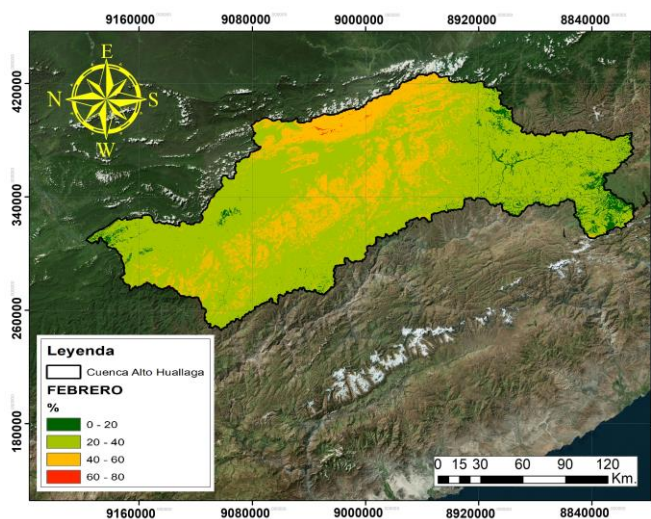


Fig. 8. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de febrero.

Durante el segundo cuatrimestre (mayo–agosto), los mapas generados evidencian una evolución temporal diferenciada en la distribución del riesgo de deslizamientos en la cuenca del Alto Huallaga. En mayo, tras el final del periodo lluvioso, se observa una disminución generalizada del riesgo, especialmente en la zona sur y centro de la cuenca, con valores por debajo del 40 %. Esta tendencia está asociada a la disminución de precipitaciones, mayor estabilidad superficial y recuperación de la cobertura vegetal (NDVI).

En junio y julio, el patrón se mantiene con ligeras fluctuaciones, aunque se aprecia una expansión gradual del riesgo moderado (40–60 %) hacia la parte central y norte, impulsada por la pérdida progresiva de humedad edáfica y el debilitamiento del vigor vegetal, lo que reduce la cohesión del suelo. Este comportamiento refleja una fase de transición hidrológica, donde el suelo comienza a secarse, aumentando su fragilidad.

Para agosto, se consolida un repunte de riesgo en sectores del noreste, con áreas que alcanzan niveles superiores al 60 %, producto de la marcada reducción del NDVI y condiciones edáficas desfavorables. Esta situación incrementa la vulnerabilidad ante precipitaciones aisladas, típicas del final de la estación seca.

En este contexto, se seleccionaron los meses de mayo y agosto como representativos de este cuatrimestre por mostrar un mayor contraste estacional y espacial. Esta decisión metodológica permite resaltar con claridad la transición entre escenarios de baja y moderada susceptibilidad, facilitando una interpretación más precisa del comportamiento del riesgo a lo largo del tiempo.

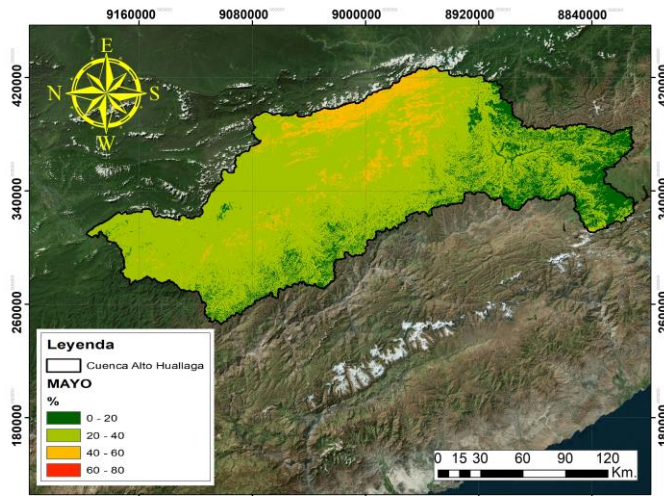


Fig. 11. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de mayo.

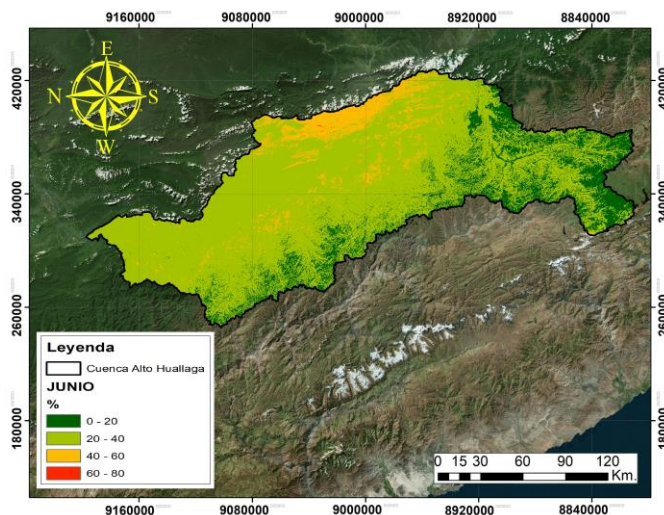


Fig. 12. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de junio.

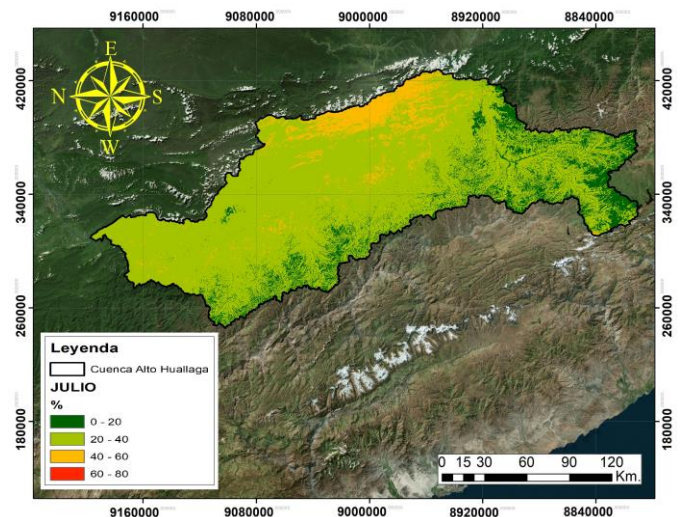


Fig. 13. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de julio.

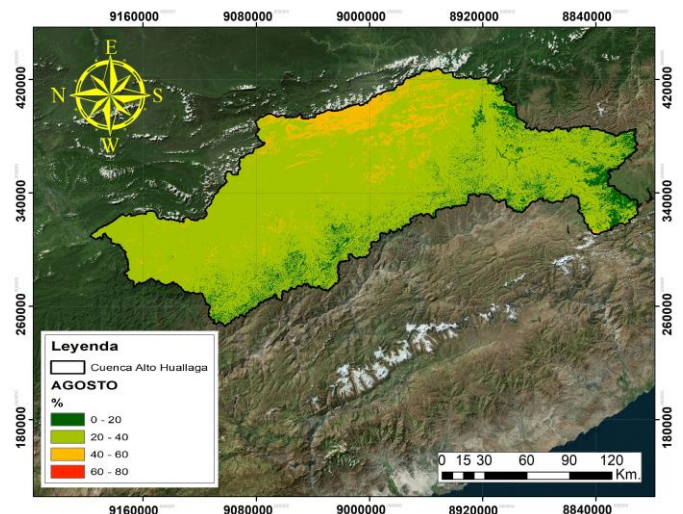


Fig. 14. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de agosto.

Durante el último cuatrimestre del año (setiembre-diciembre), se generaron mapas mensuales de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del Alto Huallaga, aplicando el modelo multivariable previamente establecido. Este periodo es crucial, ya que marca la transición hacia el inicio de la temporada lluviosa, influenciada por un aumento progresivo de la humedad edáfica y una disminución de la cobertura vegetal.

Dentro de este cuatrimestre, se seleccionaron los meses de setiembre y diciembre como puntos de análisis representativos, por evidenciar el contraste más marcado en la dinámica estacional del riesgo. En setiembre, la amenaza se presenta de manera moderada, con mayor distribución en zonas de transición geomorfológica —especialmente laderas medias— donde aún persiste una cobertura vegetal activa que contribuye a estabilizar el terreno.

En cambio, para diciembre, se observa una consolidación del riesgo en amplias regiones del centro y norte de la cuenca. Esta expansión responde a la combinación de pendientes

pronunciadas, debilitamiento del NDVI por pérdida de vegetación, y la acumulación de precipitaciones que incrementan la saturación del suelo. Este comportamiento coincide con el reinicio de la estación lluviosa y eleva significativamente la susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

La elección de estos dos meses no solo permite reducir la carga visual del análisis, sino también enfatizar con mayor claridad los cambios críticos en la distribución del riesgo. Ello refuerza el valor del monitoreo multitemporal como una herramienta clave para la planificación territorial, gestión preventiva y toma de decisiones frente a eventos geodinámicos recurrentes.

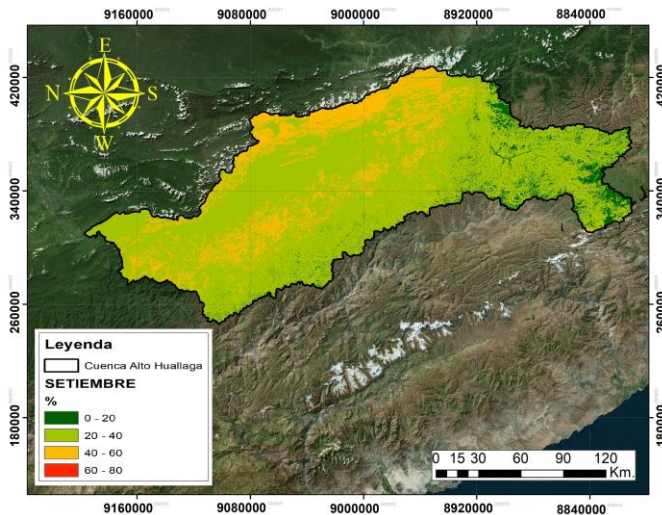


Fig. 15. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de Setiembre.

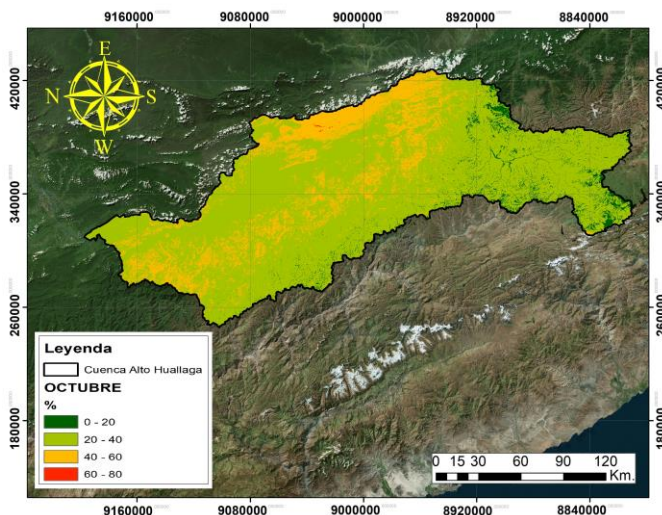


Fig. 16. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de octubre.

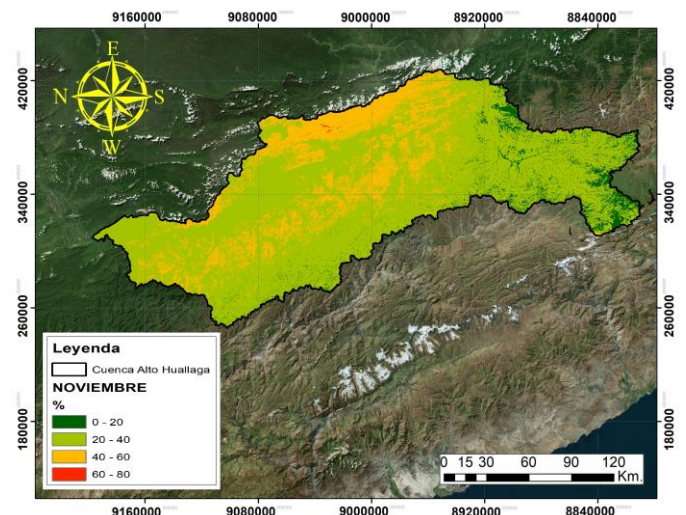


Fig. 17. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de noviembre.

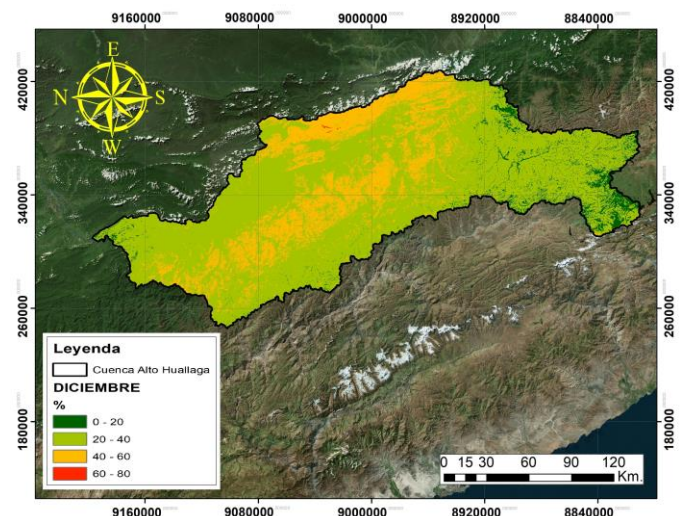


Fig. 18. Representación espacial del mapa de riesgo del mes de diciembre.

VII. LIMITACIONES

El análisis se realizó a escala de cuenca y se basó en productos satelitales de acceso abierto, por lo que los resultados representan una aproximación espacial y no una validación puntual en campo. La resolución de los datos implica que variables como cobertura vegetal, textura y pendiente corresponden a promedios por píxel, generando incertidumbre a nivel local.

Asimismo, la precipitación fue representada mediante CHIRPS sin calibración con estaciones pluviométricas, y no se contó con información de uso del suelo ni mediciones in situ, debido a limitaciones logísticas propias de la escala de estudio.

El modelo no incorpora métricas cuantitativas de validación por la falta de datos de campo, por lo que los resultados deben interpretarse como una aproximación preliminar. Además, no se consideraron escenarios de cambio climático ni expansión urbana, limitándose el análisis a condiciones actuales.

Estas limitaciones pueden ser abordadas en futuras investigaciones mediante la incorporación de datos de campo, estaciones meteorológicas y procesos de validación que permitan mejorar la precisión del modelo.

VIII. CONCLUSIONES

El estudio demostró que la integración de variables geoespaciales mediante Google Earth Engine y ArcGIS — pendiente (SRTM), precipitación (CHIRPS), NDVI y textura del suelo— permite generar mapas mensuales de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del Alto Huallaga, identificando patrones espaciotemporales de riesgo con alta aplicabilidad.

Los resultados evidenciaron niveles críticos en el primer cuatrimestre, especialmente en febrero y marzo, una disminución progresiva hasta agosto y un repunte en diciembre asociado al reinicio del periodo lluvioso y a la reducción del NDVI. Este enfoque permite anticipar eventos como el deslizamiento del 8 de marzo de 2025 en la carretera Huánuco–Tingo María (Fig. 1) [6] y es adaptable a otros escenarios de riesgo natural, constituyendo una herramienta útil para la gestión territorial.

REFERENCIAS

- [1] C. Funk, P. Peterson, M. Landsfeld, et al., "The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes," *Sci Data*, vol. 2, no. 150066, 2015, doi: 10.1038/sdata.2015.66.
- [2] J. Muñoz et al., "ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications," *Earth System Science Data*, vol. 13, no. 9, pp. E4349–E4383, 2021, 2021, doi: 10.5194/essd-13-4349-2021.
- [3] C. A. Fernández-Palomino et al., "A novel high-resolution gridded precipitation dataset for Peruvian and Ecuadorian watersheds – development and hydrological evaluation," *Journal of Hydrometeorology*, vol. 23, no. 3, pp. 309–336, 2022, doi: 10.1175/jhm-d-20-0285.1.
- [4] H. Llauca, "Datos hidrometeorológicos cuadrículados del Perú," Hllauca, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://hllauca.github.io/posts/2023-06-04-quarto-blogs/> (Accedido el: 20 de mayo de 2024).
- [5] J. Gutiérrez Lozano, V. Vargas Tristán, M. Romero Rodríguez, J. M. Plácido de la Cruz, M. J. Aguirre Bortoni y H. T. Silva Espinoza, "Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México," *Investigaciones Geográficas*, vol. 76, pp. 20–33, may. 2011. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112011000300003&lng=es&tlng=es
- [6] Salinas Tipiani, C. (2025, marzo 9). Derrumbe de cerro bloquea la vía entre Huánuco y Tingo María. "La República". <https://larepublica.pe/sociedad/2025/03/09/derrumbe-de-cerro-bloquea-la-via-entre-huanuco-y-tingo-maria-miles-de-vehiculos-varados-en-la-carretera-589581>
- [7] Abel Carmona Arteaga, "Código en Google Earth Engine Extracción de lluvias máximas anuales con CHIRPS" 2024. [En línea]. Disponible en: <https://code.earthengine.google.com/527aee73358d6c8393ef99336be19fa3>
- [8] Abel Carmona Arteaga, "Código en Google Earth Engine Extracción de lluvias máximas anuales con ERA5-Land" 2024. [En línea]. Disponible en: <https://code.earthengine.google.com/ad971e75c496750691f93be5a7174f7b>
- [9] Abel Carmona Arteaga, "Código en Google Earth Engine Extracción de lluvias máximas anuales con RAIN4PE" 2024. [En línea]. Disponible en: <https://code.earthengine.google.com/b64630c08a4a8f4ae1539176fbafca4>
- [10] Esri, "ArcGIS: solución integral para análisis geoespacial y gestión SIG empresarial," Esri España, [en línea]. Disponible: <https://www.esri.es/es-es/arcgis/plataforma-geoespacial/plataforma-geoespacial>
- [11] Google Developers, "Introducción a Google Earth Engine," 2025. [En línea]. Disponible en: <https://developers.google.com/earth-engine>
- [12] A. Ghorbanzadeh, B. Blaschke, T. G. Tiede, and T. W. Ghawana, "A review of remotely sensed variables for the assessment of landslide susceptibility," *Frontiers in Remote Sensing*, vol. 3, p. 856903, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsen.2022.856903/full>
- [13] B. Köeck, A. Brenning, A. Petschko, and M. Dusik, "Assessment of landslide susceptibility in data-scarce regions using open access remote sensing data and machine learning," "Remote Sensing", vol. 13, no. 14, p. 2869, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/15/2869>
- [14] J. E. Dornbach and G. E. McKain, "The utility of ERTS-1 data for applications in land use classification," NASA Johnson Space Center, Houston, Texas, NASA Technical Memorandum 19740022624, 1973. [En línea]. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022624/downloads/19740022624.pdf>
- [15] X. Huete et al., "Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices," *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, núm. 1–2, pp. 195–213, 2002. [En línea]. Disponible en: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>
- [16] Funk, C., Peterson, P., & Verdin, J. (2023). Central and South America. In J. Hill (Ed.), *Climate Risk and Early Warning Systems* (pp. 1689–1816). Cambridge University Press. https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/A9FC9F29685A35A7BF8C6D832E7B2A2A/9781009325837c12_1689-1816.pdf/central-and-south-america.pdf
- [17] Google Earth Engine, "CHIRPS: Estimaciones de precipitación del Climate Hazards Group mediante datos infrarrojos y estaciones," Catálogo de Datos de Google Earth Engine, 2024. [En línea]. Disponible en: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY
- [18] Butcher, G. (2023). *Tour of the electromagnetic spectrum* (3rd ed.). National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/08/tour-of-the-ems-tagged-v7-0.pdf>
- [19] Física UDC. (2015, 27 noviembre). Espectro electromagnético [Imagen]. Física UDC. <https://fisicaudc.wordpress.com/2015/11/27/espectro-electromagnetico/>
- [20] NASA LP DAAC. (2023). MOD13Q1 versión 6 – Índices de vegetación MODIS/Terra, compuesto de 16 días, grilla global de 250 m. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>
- [21] Flynn, T., & Kostecki, R. (2024). Spatial downscaling of global soil texture classes into 30 m images at the province scale. *Geomatica*, 76, 100028. <https://doi.org/10.1016/j.geomat.2024.100028>
- [22] Feng, L., Khalil, U., Aslam, B., Ghaffar, B., Tariq, A., Jamil, A., Farhan, M., Aslam, M., & Soufan, W. (2024). Evaluation of soil texture classification from orthodox interpolation and machine learning techniques. *Environmental Research*, 246, 118075. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935123028797>
- [23] Khan, A. A., Mahmood, S. A., Tariq, A., Muhammad, S., Lu, L., Soufan, W., ... & Amin, M. (2024). Mapping and prediction of soil salinity using Sentinel-2 imagery and machine learning models in coastal arid region of Pakistan. *Science of the Total Environment*, 925, 171183. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724047326>
- [24] NASA Jet Propulsion Laboratory. (n.d.). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). NASA Science. Recuperado el 7 de junio de 2025, de <https://science.jpl.nasa.gov/projects/srtm/>
- [25] Zhong, J., Li, Q., Zhang, J., Luo, P., & Zhu, W. (2024). Risk assessment of geological landslide hazards using D-InSAR and remote sensing. *Remote Sensing*, 16(2), 345. <https://doi.org/10.3390/rs16020345>
- [26] Abel Carmona Arteaga, "Código en Google Earth Engine Mapa de Riesgos de Derrumbes dentro de una Cuenca" 2025. [En línea]. Disponible en: <https://code.earthengine.google.com/b9ccbcf81e68e030fc184d2ff1a3d595>