

DOI: 10.24850/j-tyca-18-02-09

Artículos

**Análisis geoespacial de la susceptibilidad a
deslizamientos en la cuenca del río Perené a partir de
pendientes, litología, vegetación y precipitación**
**Geospatial analysis of landslide susceptibility in the
Perené river basin based on slope, lithology,
vegetation, and precipitation**

Alexis Renato Briones-Reyes¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8805-6487>

Martin Jozef Araujo-Carmona², ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4546-216X>

Abel Carmona-Arteaga³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2895-9582>

¹Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, N00361489@upn.pe

²Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, N00328443@upn.pe

³Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, abel.carmona@upn.edu.pe

Autor para correspondencia: Alexis Renato Briones Reyes,
N00361489@upn.pe



Resumen

Esta investigación aborda la identificación de zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río Perené, una región de la selva central peruana críticamente afectada por intensas precipitaciones y condiciones topográficas complejas. Utilizando la plataforma Google Earth Engine (GEE), se estructuró un algoritmo de análisis multicriterio automatizado que integró dinámicamente datos climáticos de precipitación del producto CHIRPS v2.0, características de pendientes en grados sexagesimales derivadas de SRTM, la dinámica mensual de la cobertura vegetal mediante el NDVI del sensor MODIS (MOD13Q1) y variables litológicas de INGEMMET para el periodo histórico multianual 2000-2024. Los resultados revelan una marcada estacionalidad en el comportamiento de las laderas: la susceptibilidad se eleva críticamente entre enero y abril debido a la saturación hídrica continua, registrando su pico máximo en el mes de marzo al afectar al 42.1% del territorio de la cuenca. Posteriormente, la inestabilidad disminuye notablemente entre mayo y agosto durante el periodo de estiaje, y reinicia su tendencia ascendente a partir de octubre con el retorno de las precipitaciones. Este enfoque dinámico y temporal constituye una herramienta técnica y metodológica de alto valor para la planificación territorial, el macroanálisis en ingeniería civil y la gestión predictiva del riesgo de desastres naturales.

Palabras clave: deslizamiento de tierra, precipitación, vegetación, petrología, teledetección, cuenca fluvial, reducción del riesgo de desastres, río Perené, Perú.

Abstract

This research addresses the identification of areas with higher susceptibility to landslides in the Perené River basin, a region of the Peruvian central rainforest critically affected by intense rainfall and complex topographic conditions. Using the Google Earth Engine (GEE) platform, an automated multicriteria analysis algorithm was developed to dynamically integrate climatic precipitation data from the CHIRPS v2.0 product, slope characteristics in degrees derived from SRTM, the monthly dynamics of vegetation cover through the NDVI obtained from the MODIS sensor (MOD13Q1), and lithological variables provided by INGEMMET for the multiannual historical period 2000–2024. The results reveal a marked seasonal pattern in slope behavior: susceptibility increases critically between January and April due to continuous water saturation, reaching its maximum peak in March, when 42.1% of the basin territory is affected. Subsequently, instability decreases significantly between May and August during the dry season and begins to rise again from October onward with the return of precipitation. This dynamic and temporal approach constitutes a highly valuable technical and methodological tool for territorial planning, macroanalysis in civil engineering, and predictive disaster risk management.

Keywords: landslides, precipitation, vegetation, petrology, remote sensing, river basins, disaster risk reduction, Perené river, Peru.

Recibido: 31/07/2025

Aceptado: 07/06/2026

Publicado ahead of print: 13/08/2026



1. Introducción

Los deslizamientos de tierra constituyen uno de los principales peligros naturales en zonas montañosas y cuencas hidrográficas, especialmente en regiones con alta variabilidad climática y presión antrópica sobre el medio ambiente. Estos procesos geodinámicos afectan la estabilidad de los suelos, causan pérdidas humanas y materiales, y alteran significativamente la dinámica hidrológica de las cuencas (Moreno et al., 2006). En el ámbito de la ingeniería y la gestión de desastres, la ocurrencia de estos fenómenos está determinada por la interacción de múltiples factores que condicionan la susceptibilidad intrínseca del territorio, entendida como la propensión física de las laderas a fallar debido a sus propiedades geográficas y geológicas (Alcántara-Ayala, 2000).

Entre estas variables destacan la inclinación del terreno, la litología y la cobertura vegetal. Las lluvias intensas o prolongadas actúan como el detonante hidrometeorológico principal, saturando el suelo y reduciendo la tensión efectiva del material. Por su parte, la presencia de vegetación actúa como un factor estabilizador mecánico a través del anclaje radicular. En este contexto, resulta fundamental realizar un análisis espacial integrado de estos factores para identificar y cartografiar los niveles de susceptibilidad dentro de una cuenca, proporcionando información clave para el diseño de estrategias de manejo territorial y mitigación con un enfoque preventivo (Carballo y Carazo, 2012).

La cuenca del río Perené, ubicada en la vertiente oriental de los Andes peruanos, es una región críticamente propensa a movimientos en masa, particularmente a deslizamientos y huaicos. Cabe precisar que el

término "huaico" es una denominación de uso local en el Perú para referirse técnicamente a un flujo de detritos (debris flow), el cual constituye un tipo específico de movimiento en masa caracterizado por el desplazamiento rápido de lodo, agua y fragmentos de roca a lo largo de cauces y laderas (Vargas-Cuervo, 2017). Estos eventos hidrometeorológicos extremos han agravado históricamente la vulnerabilidad de la zona. Por ejemplo, en marzo de 2019, intensas precipitaciones en la provincia de Chanchamayo, región Junín, provocaron deslizamientos y flujos de detritos que ocasionaron pérdidas humanas y bloquearon tramos críticos de la Carretera Central. Asimismo, el desborde e inundación del río Perené afectó gravemente a cerca de 300 viviendas en los sectores de Santa Rosa y La Olada (Andina, 2019). Pocos meses después, en octubre de 2019, un nuevo flujo de detritos impactó el distrito de Perené, dejando un saldo de víctimas mortales, desaparecidos y severos daños estructurales en las redes de transporte y servicios básicos (El Comercio, 2019). La Figura 1 ilustra la magnitud del impacto material de este evento geodinámico en la zona urbana del distrito.



Figura 1. Impacto del huayco de octubre de 2019 en el distrito de Perené. Fuente: El Comercio (2019).

A pesar de la alta recurrencia de movimientos en masa que impactan cíclicamente a la región Junín, existe una evidente escasez de información científica sistematizada sobre la dinámica e interacción de las variables que influyen en la inestabilidad de laderas en esta cuenca. Tradicionalmente, las investigaciones se han limitado a reportes cualitativos de evaluación de daños post-desastre, omitiendo análisis que integren simultáneamente la intensidad climática, las pendientes topográficas, la geología local y la variabilidad de la cobertura vegetal desde una perspectiva temporal continua (INGEMMET, 2020). Ante ello, esta investigación busca resolver dicha brecha mediante un modelo de evaluación espacial y multivariable enfocado en la susceptibilidad a deslizamientos; diagnóstico crucial para comprender cómo las condiciones geomorfológicas y climáticas se potencian recíprocamente,

permitiendo orientar científicamente el ordenamiento territorial y la sostenibilidad de la infraestructura civil frente a la expansión urbana en zonas de ladera.

1.1. Importancia del estudio

La realización de este estudio es fundamental para la estimación y zonificación espacial de las áreas con mayor susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río Perené. Los mapas estacionales resultantes proveen una base científica que permitirá a las entidades gubernamentales y proyectistas de infraestructura civil implementar estrategias eficaces de prevención, mitigar peligros latentes para la población local y orientar la planificación territorial hacia un desarrollo seguro y resiliente. Esto cobra especial relevancia ante los escenarios actuales de cambio climático, caracterizados por el incremento en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones extremas, en coexistencia con una expansión urbana descontrolada sobre laderas inestables.

1.2. Objetivo de la investigación

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la susceptibilidad espaciotemporal a deslizamientos en la cuenca del río Perené mediante un análisis espacial integrado multivariable, analizando su comportamiento y fluctuación mensual en el periodo 2000-2024. Para cumplir este propósito, se utiliza como herramienta de procesamiento la plataforma Google Earth Engine (GEE) mediante un algoritmo automatizado en JavaScript, el cual permite integrar dinámicamente: productos de precipitación provenientes de datos mallados satelitales, la

clasificación geomorfológica de pendientes del terreno, el estado de la cobertura vegetal cuantificado a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), y las características litológicas y de suelo de la región.

1.3. Marco Teórico

1.3.1. Ubicación del Proyecto

La cuenca del río Perené se localiza en la vertiente del Atlántico, específicamente en la región central de la República del Perú, abarcando una extensión territorial que se distribuye principalmente entre los departamentos de Junín y Pasco, con una mínima porción en el departamento de Huánuco. Geográficamente, el área se inscribe dentro de la Zona 18 Sur del sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM). Los límites hidrográficos de la cuenca comprenden: por el norte, la cuenca del río Mantaro; por el este, la cuenca del río Ene; por el oeste, las cuencas de los ríos Pachitea y Tambo; y por el sur, la cuenca del río Satipo (Sánchez Trigo, 2001).

Con el propósito de proveer una adecuada referencia cartográfica y espacial del área evaluada, la Figura 2 expone el croquis de localización de la cuenca del río Perené en el contexto del mapa nacional del Perú, delimitando sus principales unidades político-administrativas.

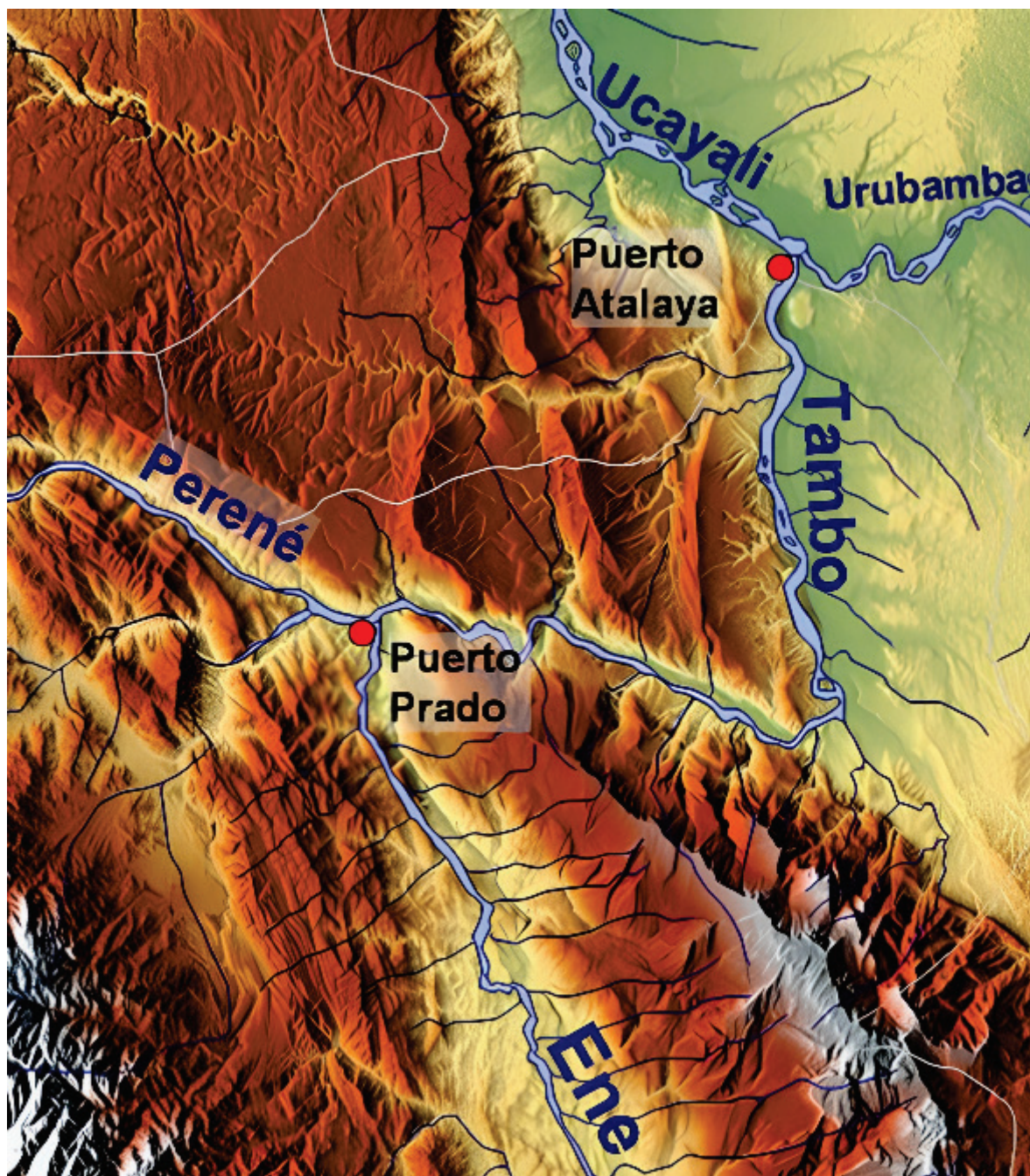


Figura 2. Croquis de localización de la cuenca del río Perené en el contexto territorial del Perú. Fuente: Roar Johansen (2016).

1.3.2. Factores geomorfológicos de la cuenca

Desde el punto de vista morfométrico, la cuenca del río Perené posee una superficie aproximada de 18 351.61 km², un perímetro de 909.51 km y una longitud de cauce principal cercana a 338.33 km. El río Perené se forma por la confluencia de los ríos Chanchamayo y Paucartambo, recorriendo aproximadamente 165 km hasta unirse con el río Ene y dar origen al río Tambo. Posteriormente, este se conecta con el río Urubamba para formar el río Ucayali, uno de los principales afluentes del Amazonas (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2016).

El comportamiento hidrológico y la ocurrencia de procesos erosivos y movimientos en masa están condicionados por el relieve accidentado de la cuenca (Sánchez Trigo, 2001). Como se muestra en la Figura 3, la altitud varía entre 302 m y 5 614 m s.n.m., influyendo directamente en el clima, la cobertura vegetal y la dinámica de las laderas.

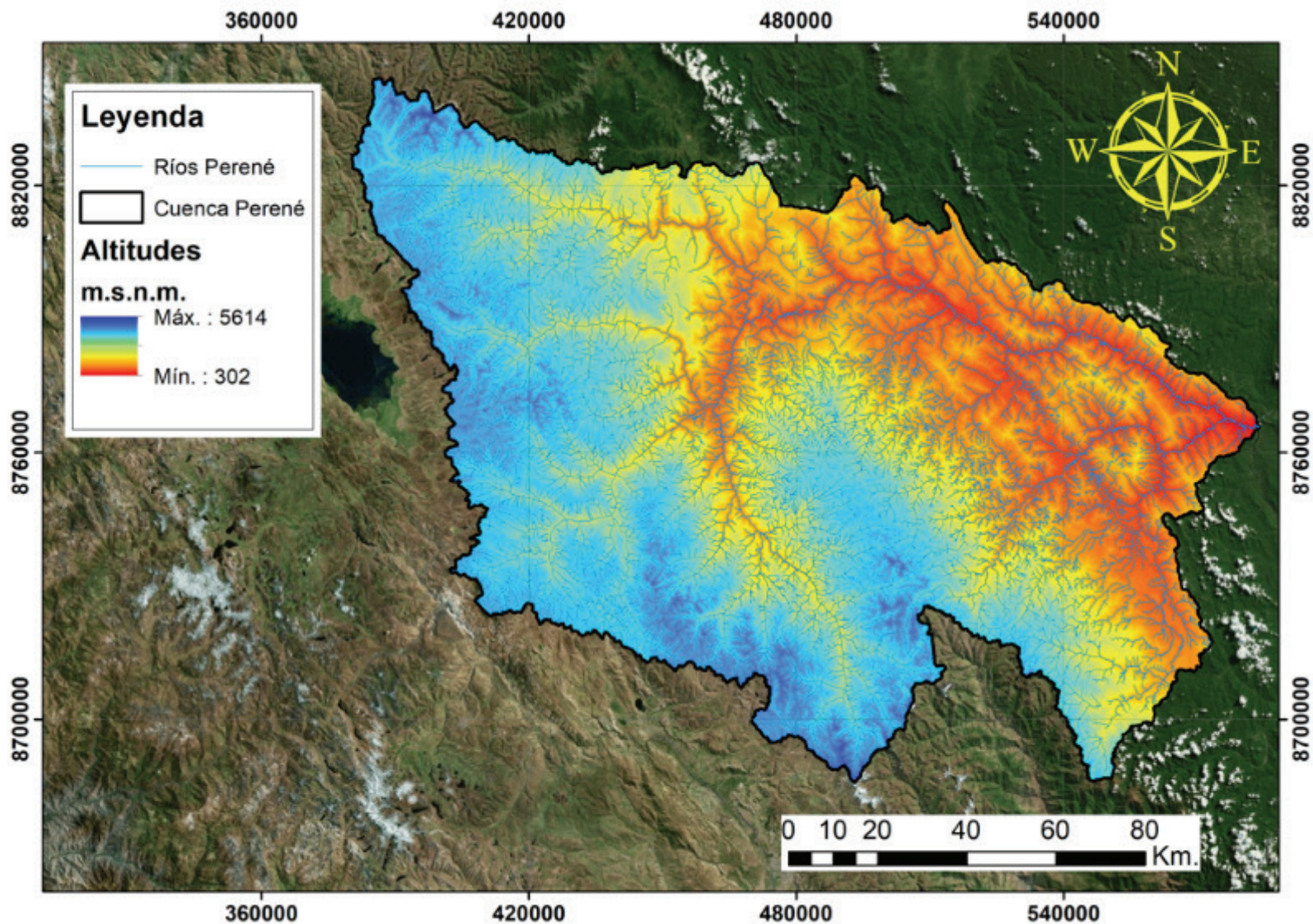


Figura 3. Distribución espacial de las altitudes de la cuenca del río Perené.

1.3.3. ArcGIS

Es una plataforma SIG que permite capturar, visualizar y analizar datos geospaciales en 2D y 3D. Es útil para planificación urbana, gestión

ambiental y monitoreo, integrando datos de satélites, drones y sensores para análisis territoriales y modelos digitales del terreno (Esri, 2024).

1.3.4. Determinación del NDVI para la evaluación de la cobertura vegetal

Es un índice que mide la salud y densidad de la vegetación a partir de imágenes satelitales. Se calcula utilizando la ecuación 1 que emplea la radiación reflejada en las bandas del rojo (RED) y el infrarrojo cercano (NIR) (Rouse, Haas, Schell y Deering, 1974):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

Los valores del NDVI varían entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable; valores próximos a 0 reflejan poca o ninguna vegetación; y valores negativos corresponden a superficies como agua, nieve o áreas artificiales (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013).

La Tabla 1 presenta una clasificación estándar basada en rangos de NDVI para identificar tipos de cobertura vegetal:

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

Fuente: Elaboración propia, adaptado de FAO (2013) y NASA Earth Observatory (2019).

Este índice es fundamental en estudios de monitoreo ambiental, agricultura de precisión y evaluación de la cobertura vegetal ante el cambio climático (Huete et al., 2002).

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

Este conjunto de datos proporciona información diaria, decadal y mensual de precipitación global desde 1981, combinando imágenes satelitales y datos de estaciones meteorológicas con una resolución aproximada de 0.05° (~5 km por píxel). Su cobertura lo hace útil para estudios hidrológicos y de riesgos naturales, especialmente en cuencas con escasa instrumentación (Funk et al., 2015). Además, puede procesarse en Google Earth Engine (GEE), facilitando su análisis geoespacial (Google Earth Engine, 2024).

1.3.6. El espectro electromagnético

El espectro electromagnético abarca las longitudes de onda de la radiación, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio, propagándose sin necesidad de un medio físico (NASA, 2021). En teledetección destacan el espectro visible, el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), debido a la diferente respuesta de las coberturas terrestres en estas bandas (NOAA, 2020). La Figura 4 presenta su clasificación según longitud de onda y frecuencia.

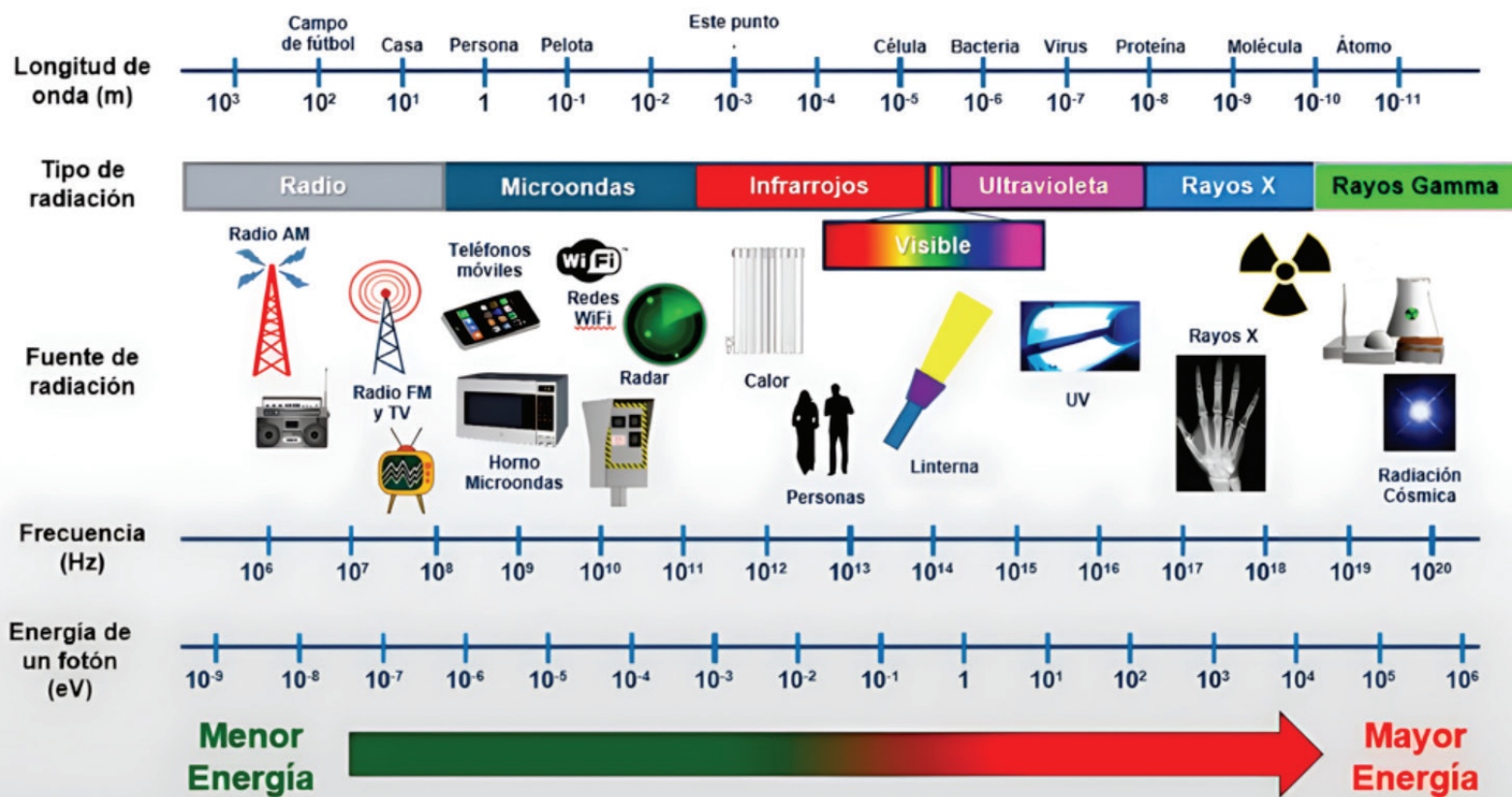


Figura 4. Representación esquemática del espectro electromagnético.

Fuente: Galache (2023).

1.3.7. MODIS/006/MOD13Q1

Este conjunto de datos, del satélite MODIS de la NASA desde 2000, proporciona el índice NDVI con resolución de 250 m y frecuencia de 16 días. Permite monitorear la vegetación global para estudios climáticos, agrícolas y ambientales, y está disponible gratis en plataformas como Google Earth Engine (NASA LP DAAC, 2023).

1.3.8. OpenLandMap Soil Texture Class (USDA System)

Esta información geoespacial procede de la base global SoilGrids250m, la cual emplea aprendizaje automático para mapear propiedades edáficas según las proporciones de arena, limo y arcilla a distintas profundidades, siguiendo la clasificación del USDA (U.S. Department of Agriculture, 2017). El producto, integrado en la plataforma OpenLandMap con una resolución de 250 metros (Hengl, 2018), mapea variables globales mediante algoritmos estadísticos (Hengl et al., 2017). La textura del suelo es estimada por interpolación con el paquete *soiltexture* de R, basándose en el triángulo textural del USDA (U.S. Department of Agriculture, 2017). En la Tabla 2 se presenta la clasificación estándar utilizada para identificar los tipos de textura a partir de estos datos de OpenLandMap:

Tabla 2. Clasificación de la litografía del 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 Ligero)
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)

Fuente: Elaboración propia, adaptado de U.S. Department of Agriculture (2017) y Hengl et al. (2018).

La clasificación textural del USDA es fundamental para interpretar propiedades edáficas como la retención de agua, la aireación del suelo y la disponibilidad de nutrientes, aspectos críticos en la agricultura, la modelación de ecosistemas y la gestión de los recursos hídricos (U.S. Department of Agriculture, 2017). Su aplicación es especialmente relevante en prácticas de agricultura de precisión, manejo sostenible de cuencas hidrográficas y estudios sobre el impacto del cambio climático en los suelos (Hengl et al., 2017).

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

El SRTM (año 2000) ofrece datos de altitud mediante radar interferométrico con resolución de 30 metros, cubriendo el 80% de la superficie terrestre (NASA JPL, 2013). Es ampliamente utilizado en geología, infraestructura y gestión de riesgos, mostrando mayor precisión en zonas planas y limitaciones en relieves complejos o con vegetación densa (Farr et al., 2007). Su acceso libre desde plataformas oficiales ha masificado su uso en investigaciones, planificación territorial y gestión pública global (NASA JPL, 2013).

2. Metodología

Se desarrolló un algoritmo automatizado en JavaScript dentro de Google Earth Engine (GEE) para integrar variables físicas y climáticas, evaluando la susceptibilidad espaciotemporal a deslizamientos en la cuenca del río Perené (periodo 2000-2024). A diferencia de enfoques estáticos tradicionales, este modelo unificó factores estáticos y dinámicos mediante un remuestreo espacial por vecino más cercano, estandarizando las capas raster a una resolución de 30 metros. El procesamiento incluyó la pendiente del terreno derivada del MDE SRTM de la NASA, la litología de la Carta Geológica Nacional del INGEMMET, y variables dinámicas mensuales como el NDVI del sensor MODIS y la precipitación acumulada del producto climático CHIRPS v2.0.

Posteriormente, las variables fueron normalizadas en una escala común de 1 a 5 según su influencia en la inestabilidad de laderas. Finalmente, el algoritmo aplicó mensualmente un modelo de Combinación

Lineal Ponderada (WLC) para generar el Índice de Susceptibilidad (IS), integrando la pendiente, litología, cobertura vegetal y precipitación mediante coeficientes de ponderación regionales: $IS = (0.35 \times P) + (0.25 \times L) + (0.15 \times NDVI) + (0.25 \times PP)$. Los valores resultantes fueron clasificados en cuatro niveles de peligro (Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto) mediante el método estadístico de Rupturas Naturales de Jenks.

Finalmente, la Figura 5 presenta el flujograma metodológico del proceso seguido, desde la recopilación de datos hasta la exportación de la cartografía mensual y las matrices estadísticas del estudio.

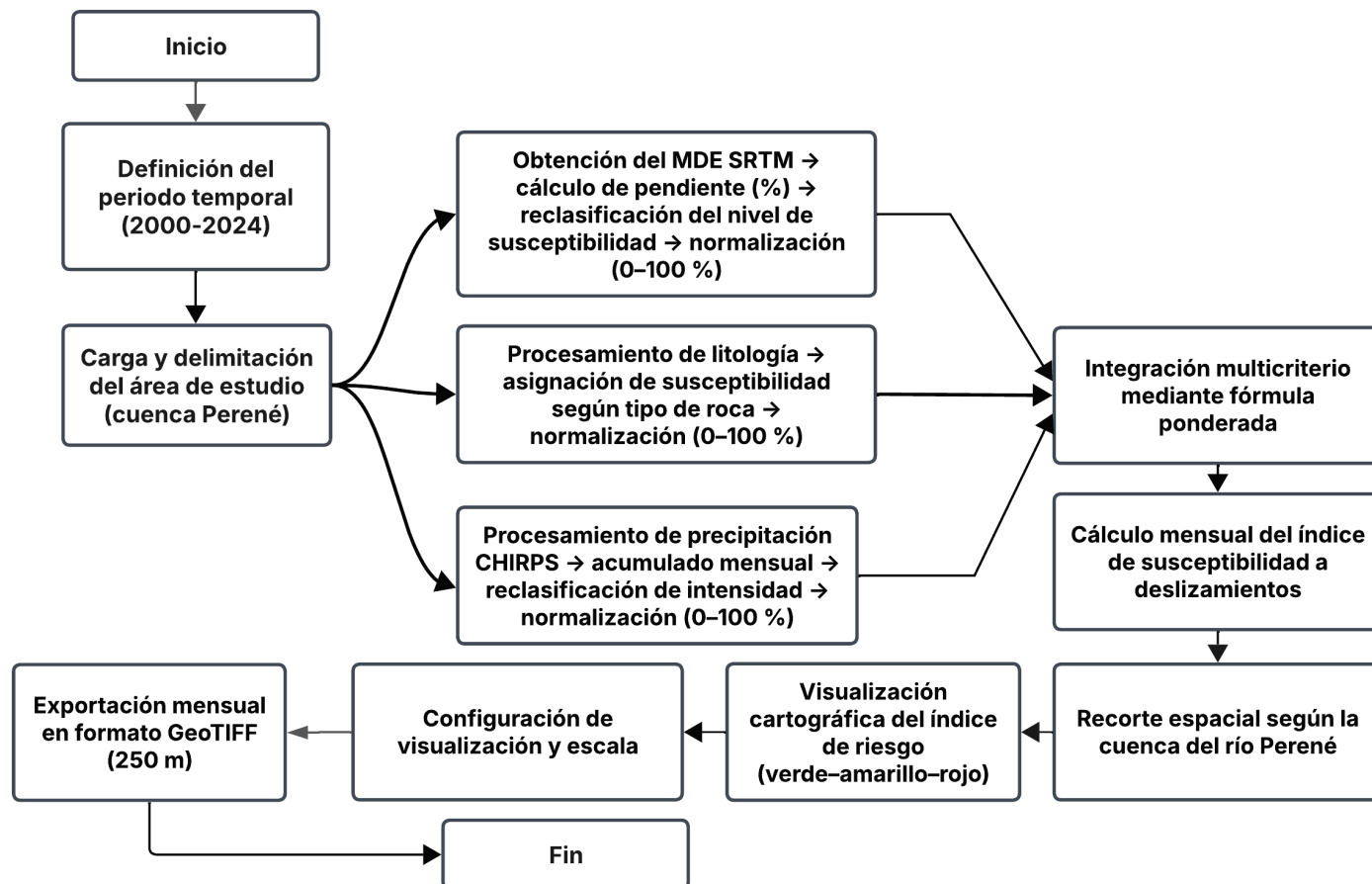


Figura 5. Diagrama de flujo que representa la secuencia de procesos ejecutados por el código JavaScript para identificar las zonas de riesgo en la cuenca del río Perené.

3. Resultados

El mapa de pendientes de la cuenca del río Perené (Figura 6) se elaboró a partir del Modelo Digital de Elevación SRTM de Google Earth Engine (USGS/SRTMGL1_003). Este producto refleja inclinaciones entre 0° y 86.34°, evidenciando un relieve sumamente accidentado y laderas abruptas debido a que la cuenca se sitúa en la transición orográfica entre

la cordillera de los Andes y la llanura amazónica. Esta topografía, producto de la intensa actividad tectónica y el levantamiento andino (Kalliola et al., 1993), incrementa intrínsecamente la susceptibilidad física del terreno ante deslizamientos y procesos de escorrentía superficial fuerte durante episodios de precipitaciones intensas.

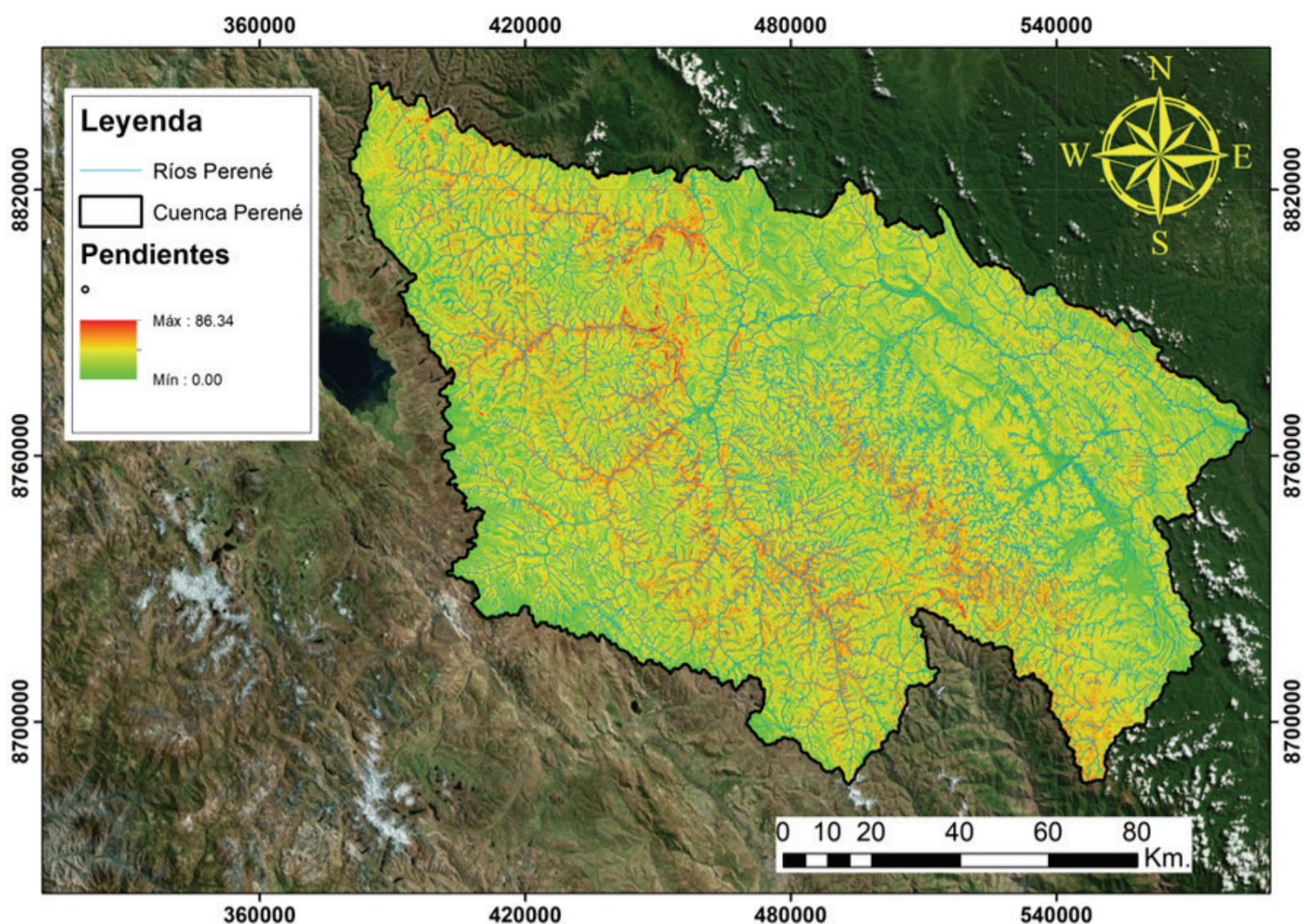


Figura 6. Visualización de las pendientes del terreno en la cuenca del río Perené.

El procesamiento e integración de las variables espaciotemporales se centralizó en la nube mediante Google Earth Engine (GEE). En la Figura 7 se visualiza este entorno de programación durante la ejecución del algoritmo desarrollado para el análisis multivariado de la cuenca (periodo 2000-2024), plataforma que permitió compilar datos, calcular índices y exportar directamente a Google Drive los mapas mensuales resultantes en formato GeoTIFF.

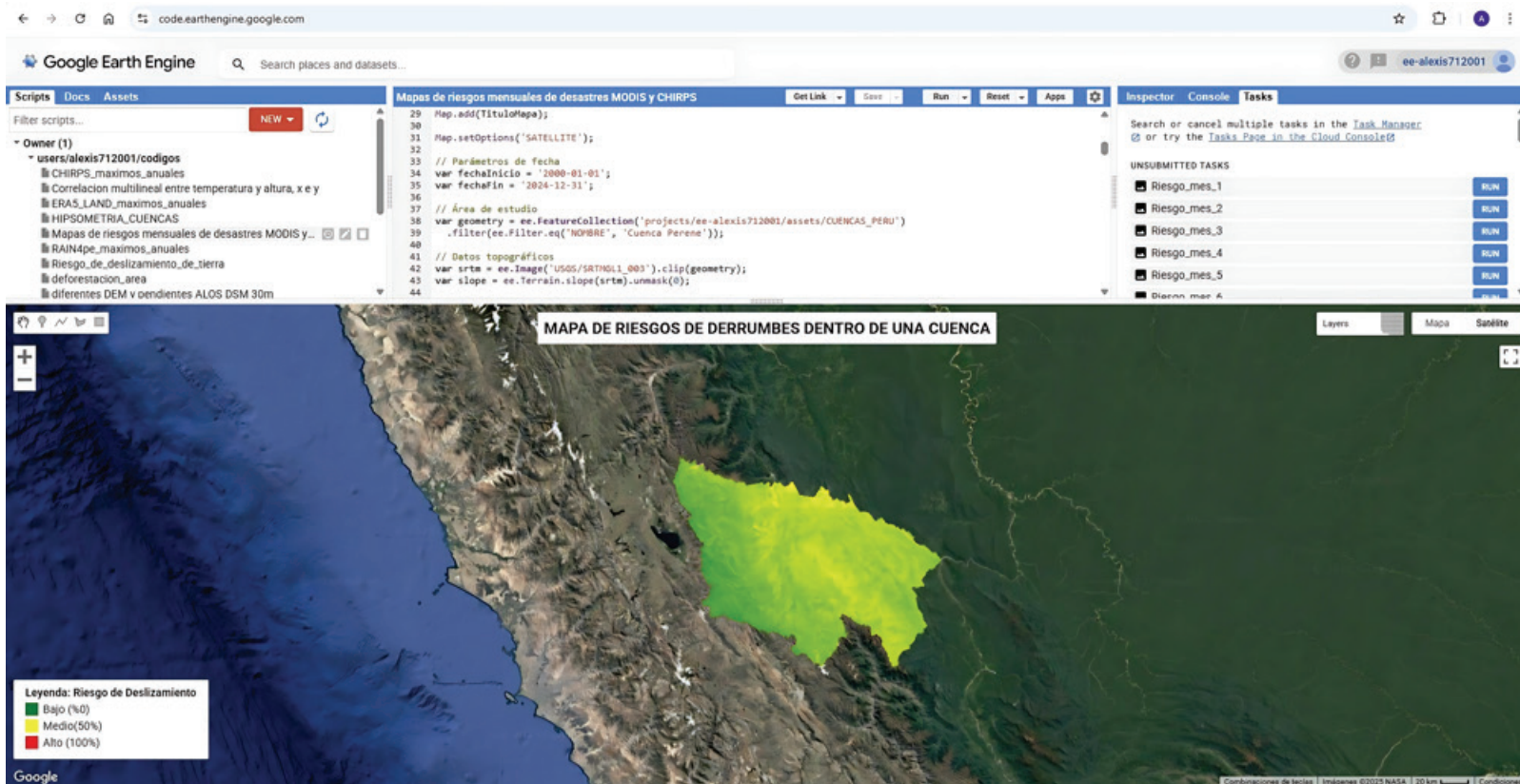


Figura 7. Ejecución del algoritmo en Google Earth Engine para la generación de mapas de susceptibilidad utilizando variables hidrogeomorfológicas.

El código en JavaScript desarrollado por el Ing. Mg.Sc. Abel Carmona Arteaga (2025) está disponible en el siguiente enlace <https://code.earthengine.google.com/fa475d07600379fafc070a202cc745ec> y en el archivo complementario anexo.

Los mapas mensuales representan el Índice de Susceptibilidad (IS) en una escala adimensional de 0 a 100. Para dotar al estudio de un análisis cuantitativo riguroso que complemente la distribución espacial, estos valores continuos se asociaron a cuatro niveles discretos de peligro mediante los umbrales del algoritmo de Rupturas Naturales de Jenks. Así, el rango de 0 a 20 define una Susceptibilidad Baja; de 20 a 40, Moderada; de 40 a 60, Alta; y los valores superiores a 60 (hasta 100) consolidan la categoría Muy Alta. Con el fin de cuantificar las variaciones estacionales a nivel superficial, la Tabla 3 resume los porcentajes de área de la cuenca afectados por cada nivel de peligro mes a mes.

Tabla 3. Porcentaje de área de la cuenca del Perené afectada según el nivel de susceptibilidad histórico multianual (2000-2024).

Mes	Susceptibilidad Baja (%) (Rango 0 - 20)	Susceptibilidad Moderada (%) (Rango 20 - 40)	Susceptibilidad Alta (%) (Rango 40 - 60)	Susceptibilidad Muy Alta (%) (Rangos > 60)
Enero	35.2	41.5	18.3	5.0
Febrero	28.4	38.6	24.5	8.5
Marzo	22.1	35.8	30.2	11.9
Abril	40.5	39.2	16.1	4.2
Mayo	65.3	25.4	8.1	1.2
Junio	78.6	17.2	3.8	0.4
Julio	82.1	15.1	2.5	0.3
Agosto	80.5	16.4	2.8	0.3
Septiembre	75.2	19.3	4.6	0.9
Octubre	62.4	28.1	7.5	2.0
Noviembre	48.7	34.5	12.8	4.0
Diciembre	38.4	38.1	17.5	6.0

Fuente: Elaboración propia, basada en el procesamiento estadístico y reducción espacial de datos CHIRPS v2.0 y MOD13Q1 en Google Earth Engine (2000-2024).

Las figuras 8, 9, 10 y 11 exhiben la distribución espacial del promedio mensual histórico de la susceptibilidad a deslizamientos para el primer cuatrimestre del año. En enero (Figura 8), la cuenca presenta principalmente una susceptibilidad moderada en su sector oriental, impulsada por el inicio de la temporada de precipitaciones y la saturación inicial del perfil del suelo. Durante febrero (Figura 9), las áreas de

susceptibilidad alta se expanden hacia las zonas medias y de mayor elevación debido a la persistencia pluvial. Para marzo (Figura 10), mes que concentra los mayores acumulados hídricos, el nivel de susceptibilidad alta y muy alta alcanza su máxima extensión territorial (42.1% del área total) como respuesta a la pérdida de resistencia al cortante en los suelos saturados. Finalmente, en abril (Figura 11), se observa una regresión progresiva hacia niveles moderados y bajos en respuesta al inicio de la transición climática.

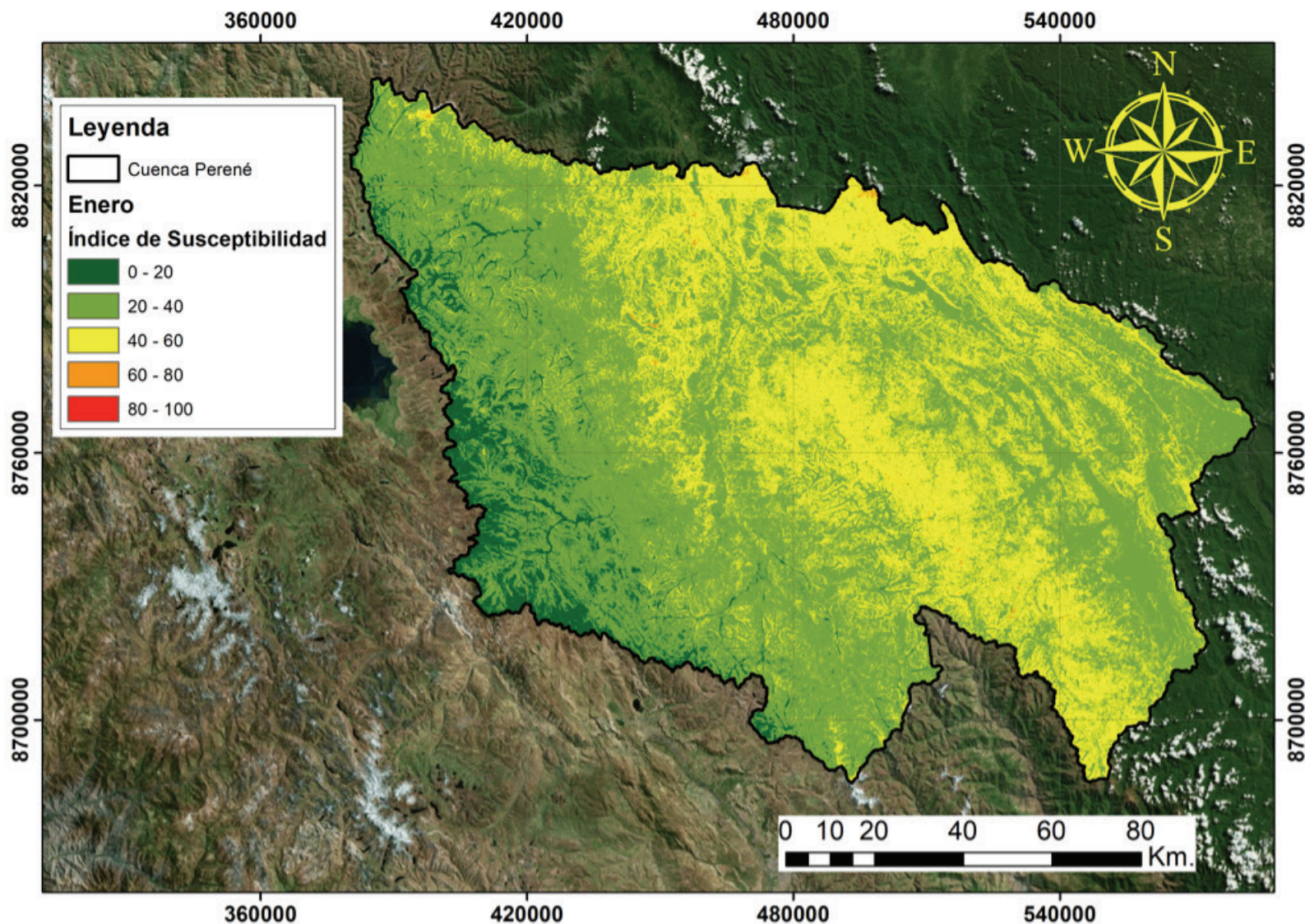


Figura 8. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de enero.

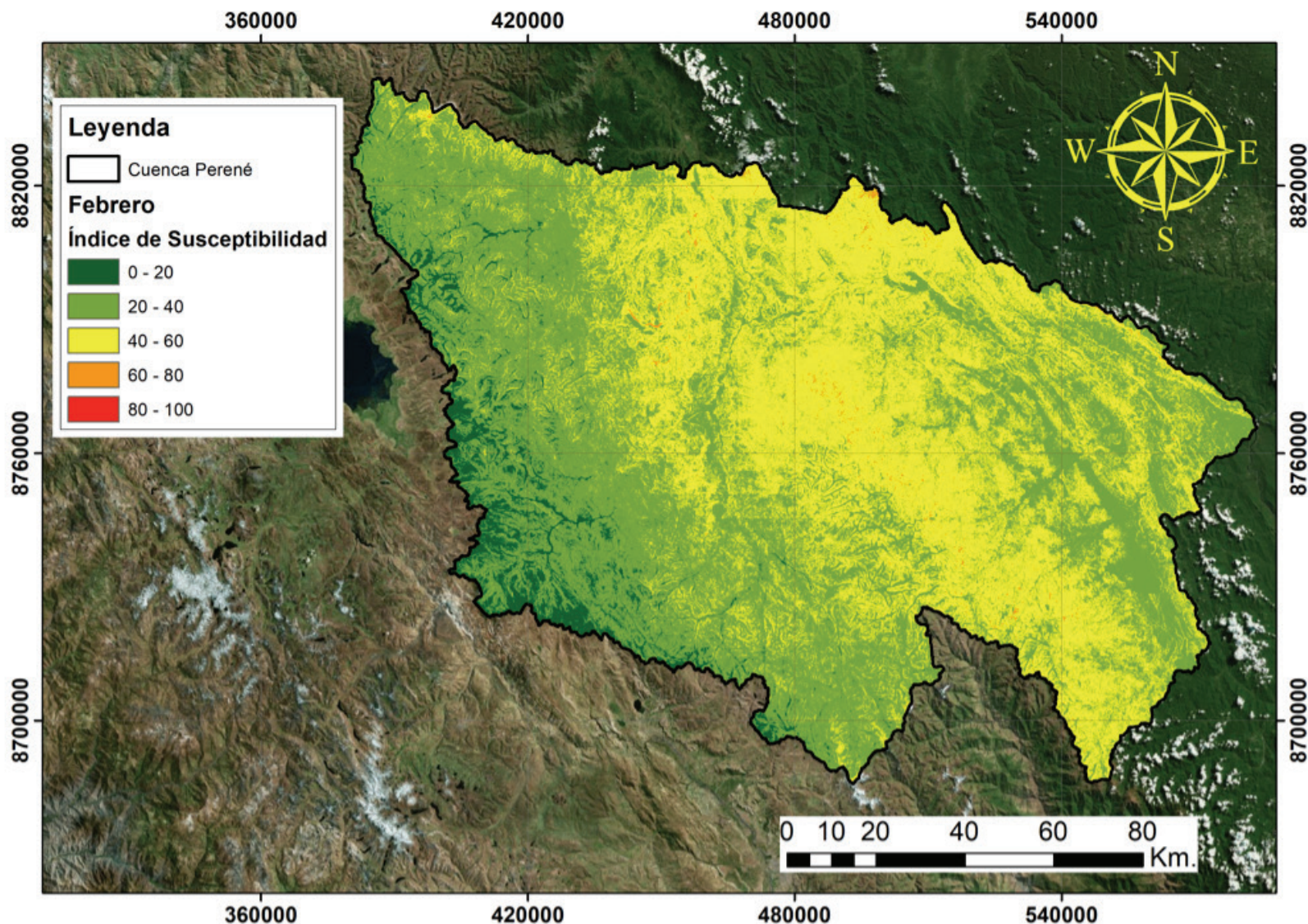


Figura 9. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de febrero.

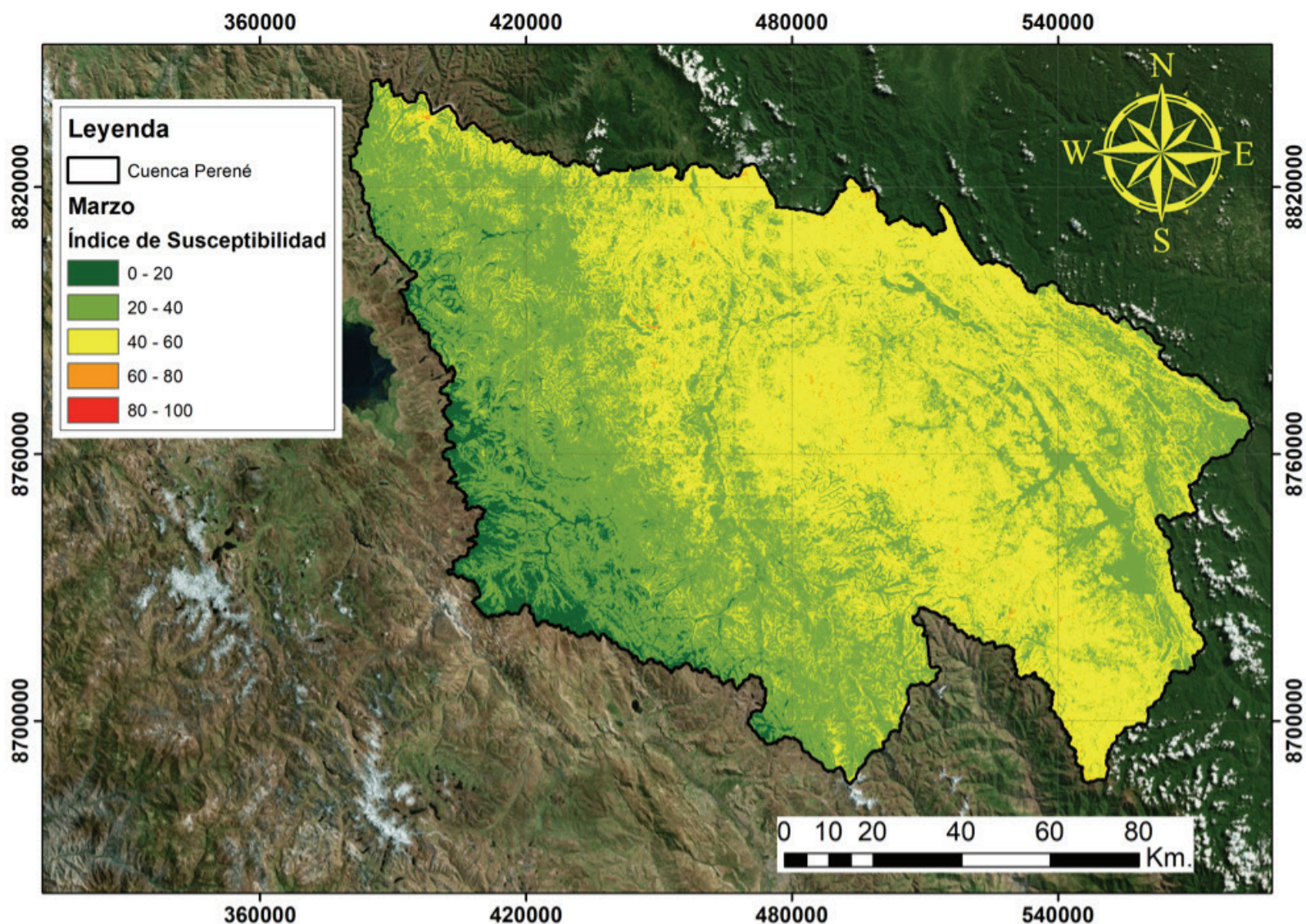


Figura 10. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de marzo.

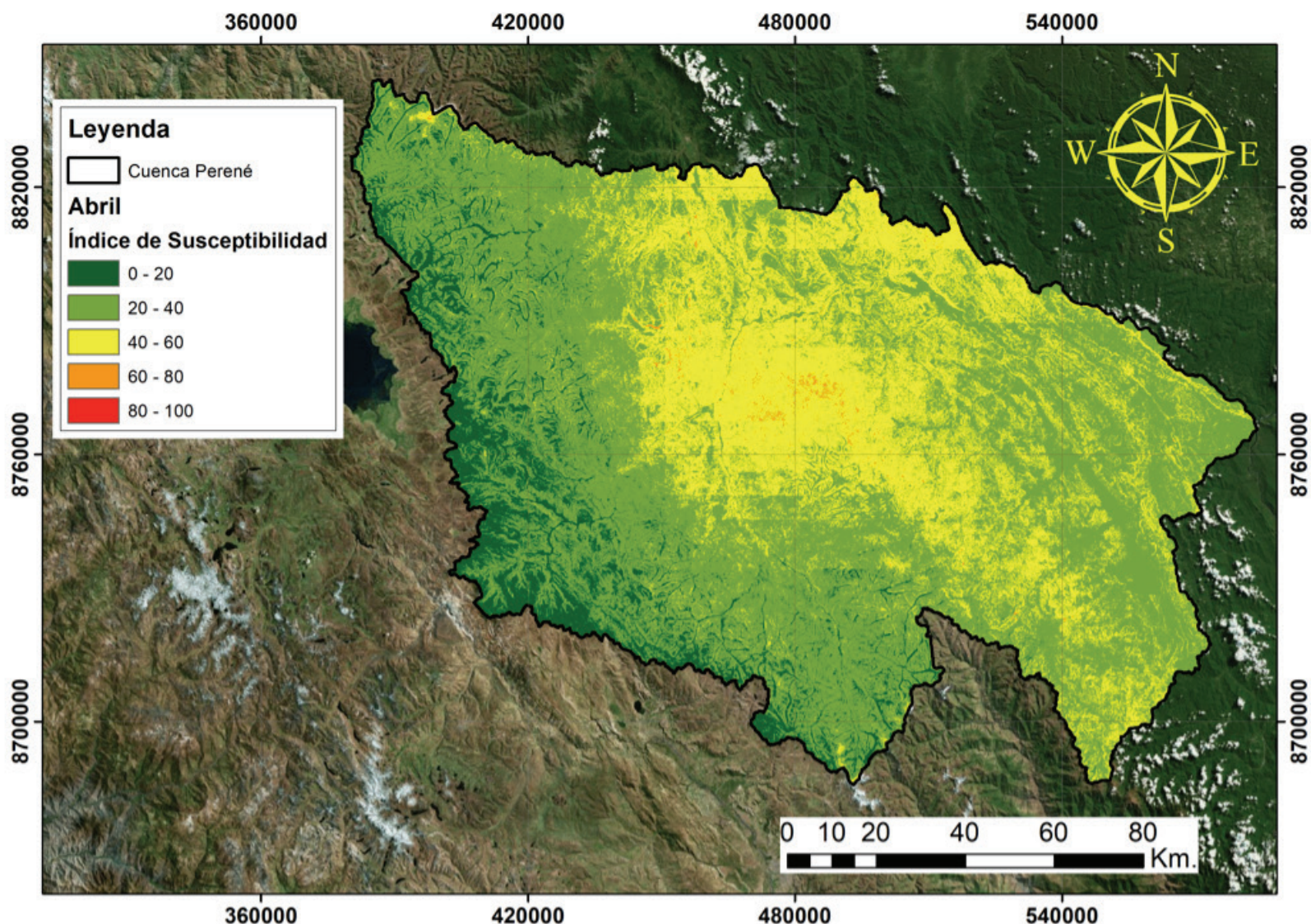


Figura 11. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de abril.

Para el periodo de mayo a agosto (Figuras 12 a 15), se evidencia el comportamiento de las laderas durante la temporada seca de la selva central. En mayo (Figura 12) ocurre una contracción generalizada de las zonas de inestabilidad, permitiendo el drenaje y desaturación de los

estratos. Entre junio (Figura 13) y julio (Figura 14), la cuenca alcanza su máxima estabilidad anual, predominando un nivel de susceptibilidad baja en más del 80% del territorio. Este escenario favorable se debe a la ausencia de la variable detonante (lluvia), quedando el terreno condicionado únicamente por la resistencia de su litología y la protección mecánica de la cobertura vegetal. Dicho patrón de baja propensión se mantiene sostenido a lo largo del mes de agosto (Figura 15).

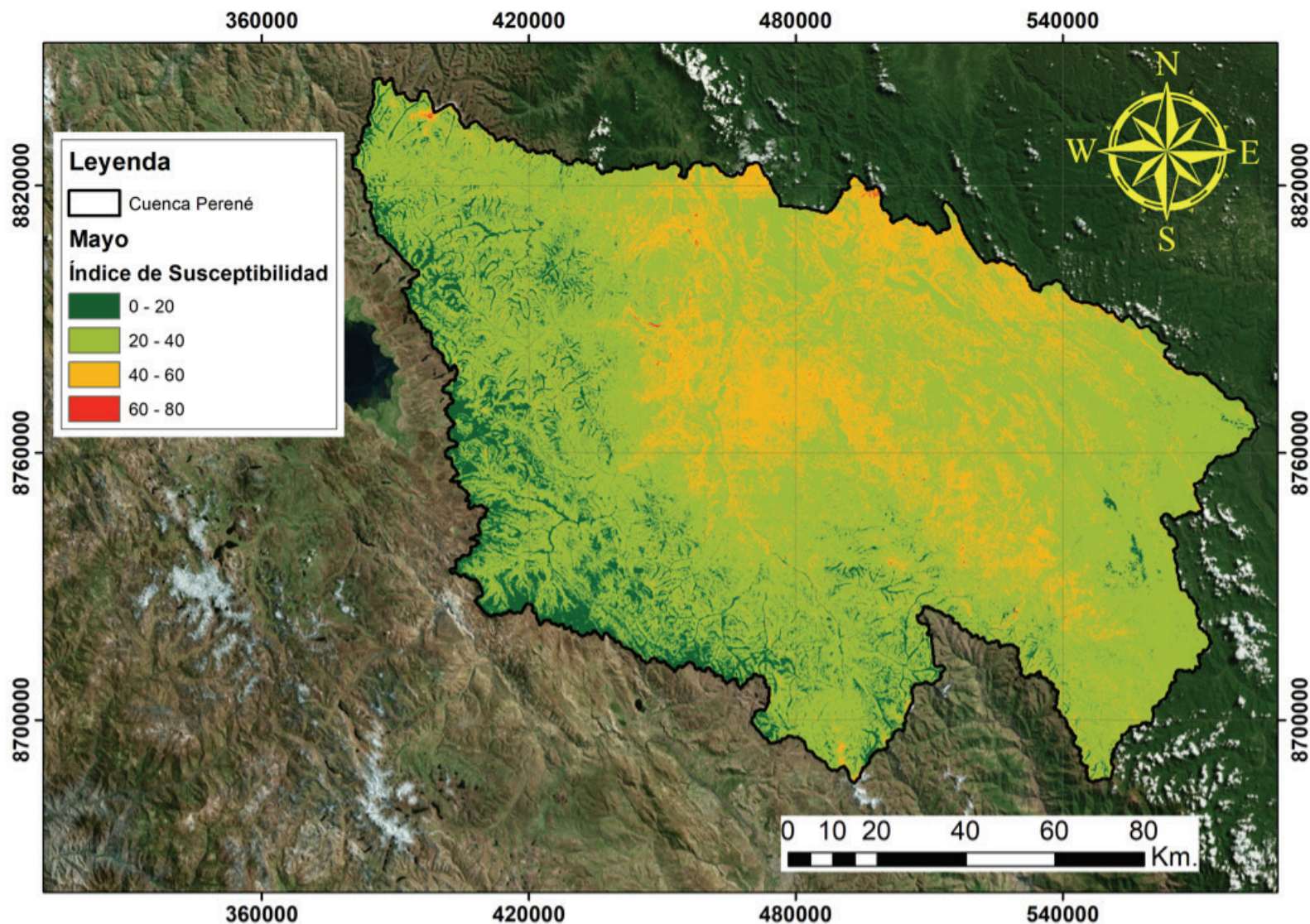


Figura 12. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de mayo.

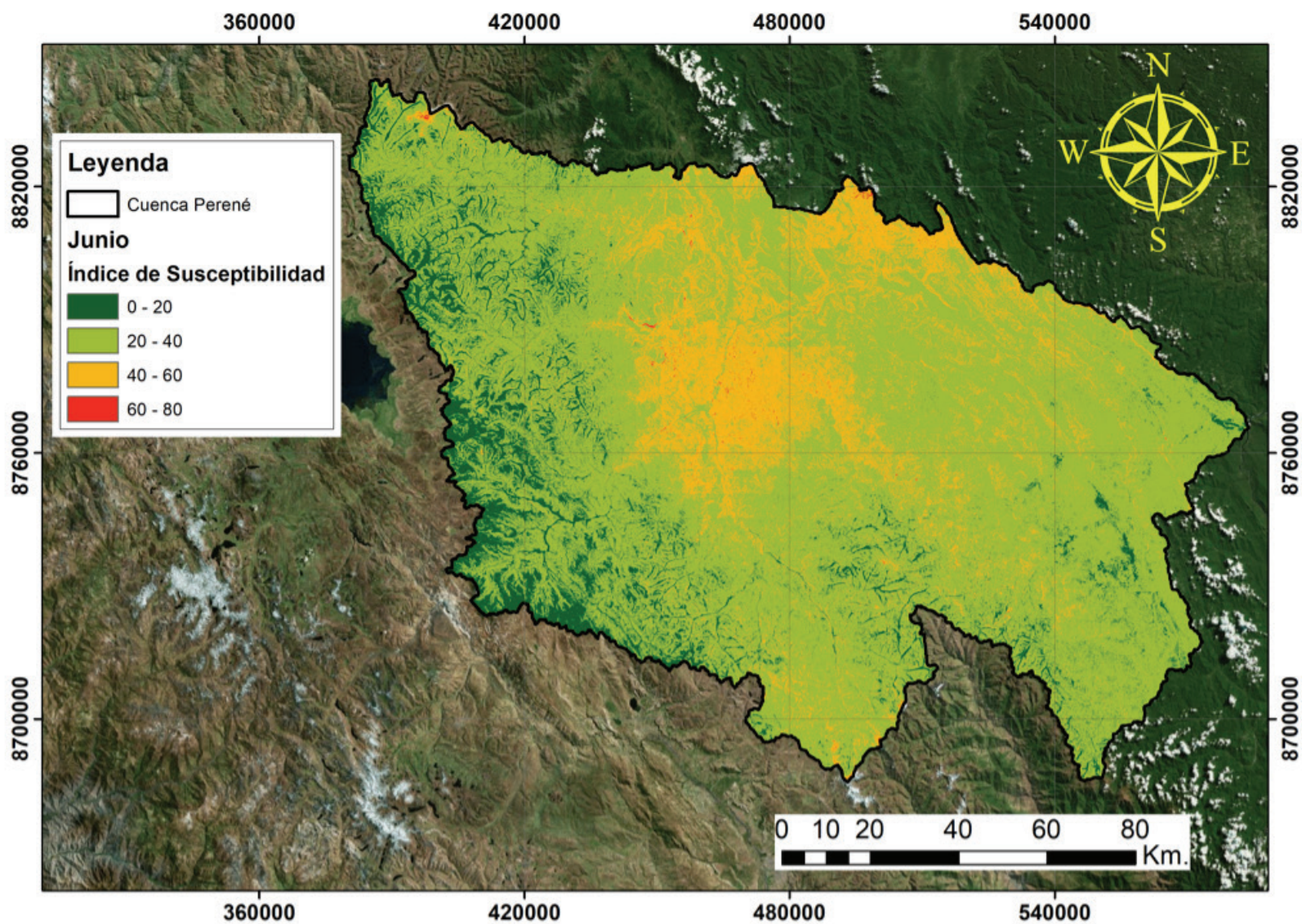


Figura 13. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de junio.

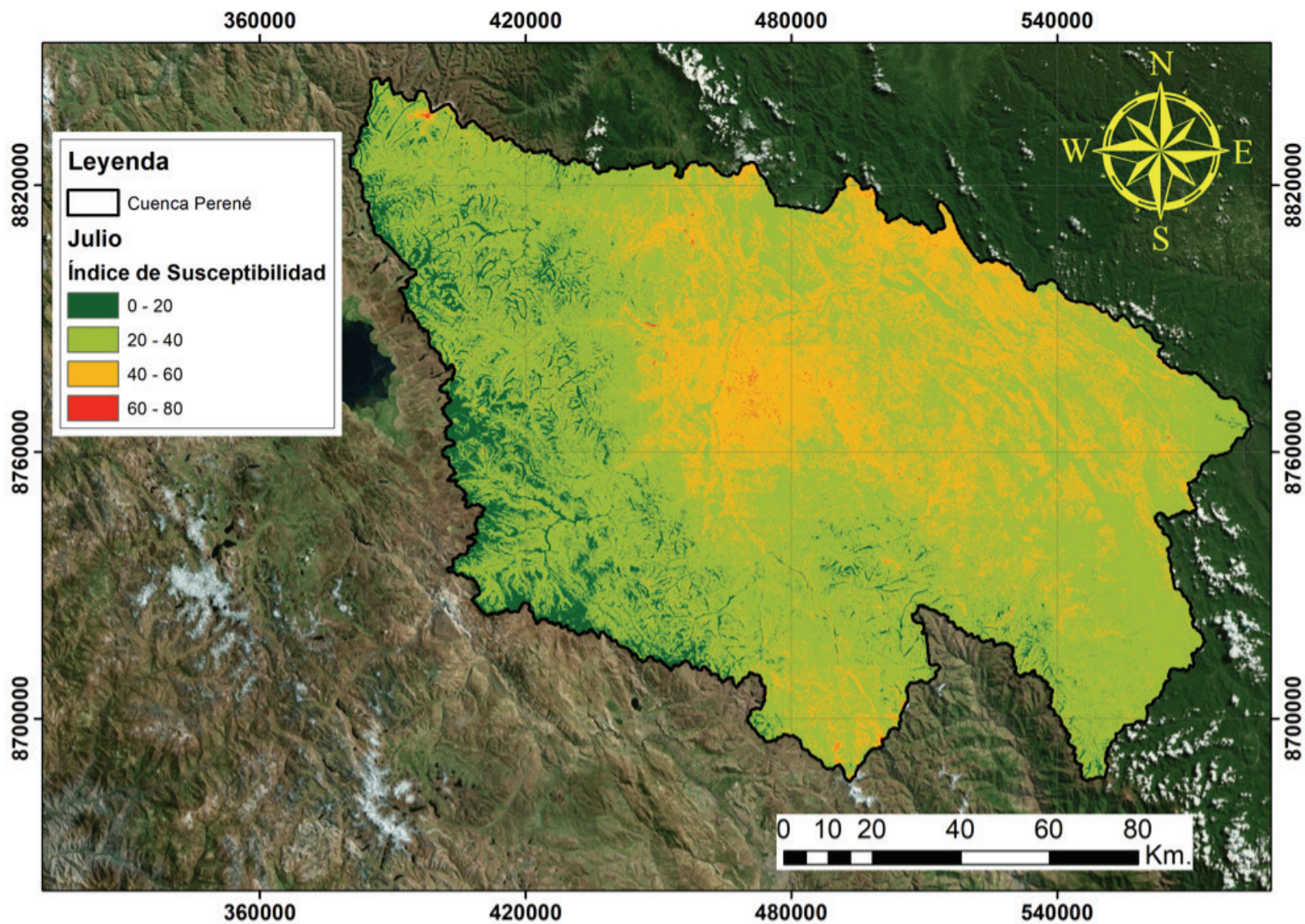


Figura 14. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de julio.

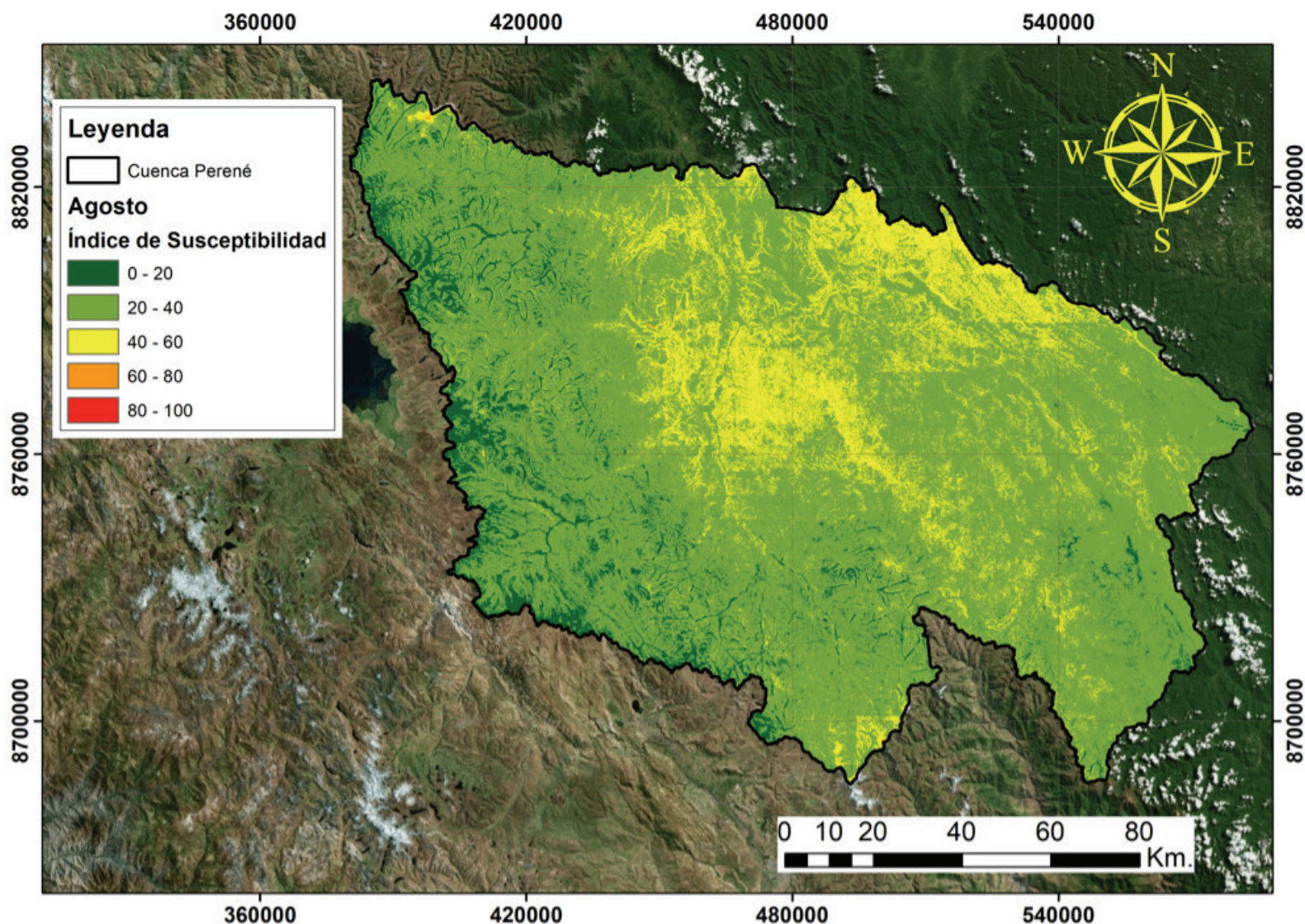


Figura 15. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de agosto.

Las Figuras 16 a 19 ilustran el ciclo de reactivación hidrológica de la susceptibilidad. En septiembre (Figura 16), las laderas conservan un estado mayoritariamente estable. Sin embargo, en octubre (Figura 17) comienzan a registrarse transiciones hacia una susceptibilidad moderada

en las cabeceras de cuenca debido a las primeras lluvias primaverales. En noviembre (Figura 18), el incremento de los eventos pluviales eleva la presión de poros, generando la aparición de niveles altos de susceptibilidad focalizados en el norte y este de la cuenca. Durante diciembre (Figura 19), se consolida el retorno pleno de la temporada húmeda, observándose una expansión marcada de la inestabilidad en zonas altas, lo cual da inicio a un nuevo ciclo anual de peligrosidad geomorfológica.

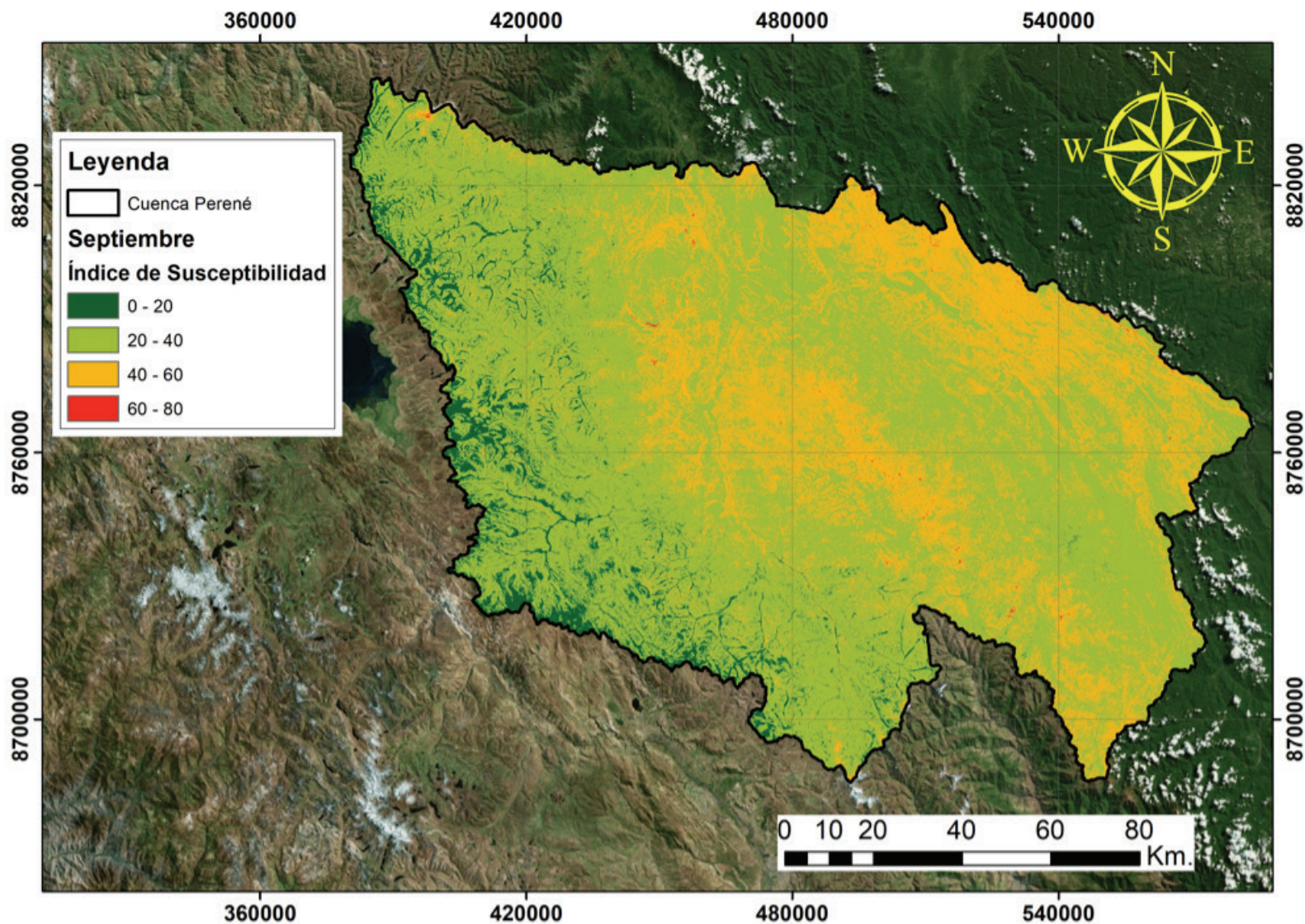


Figura 16. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de septiembre.

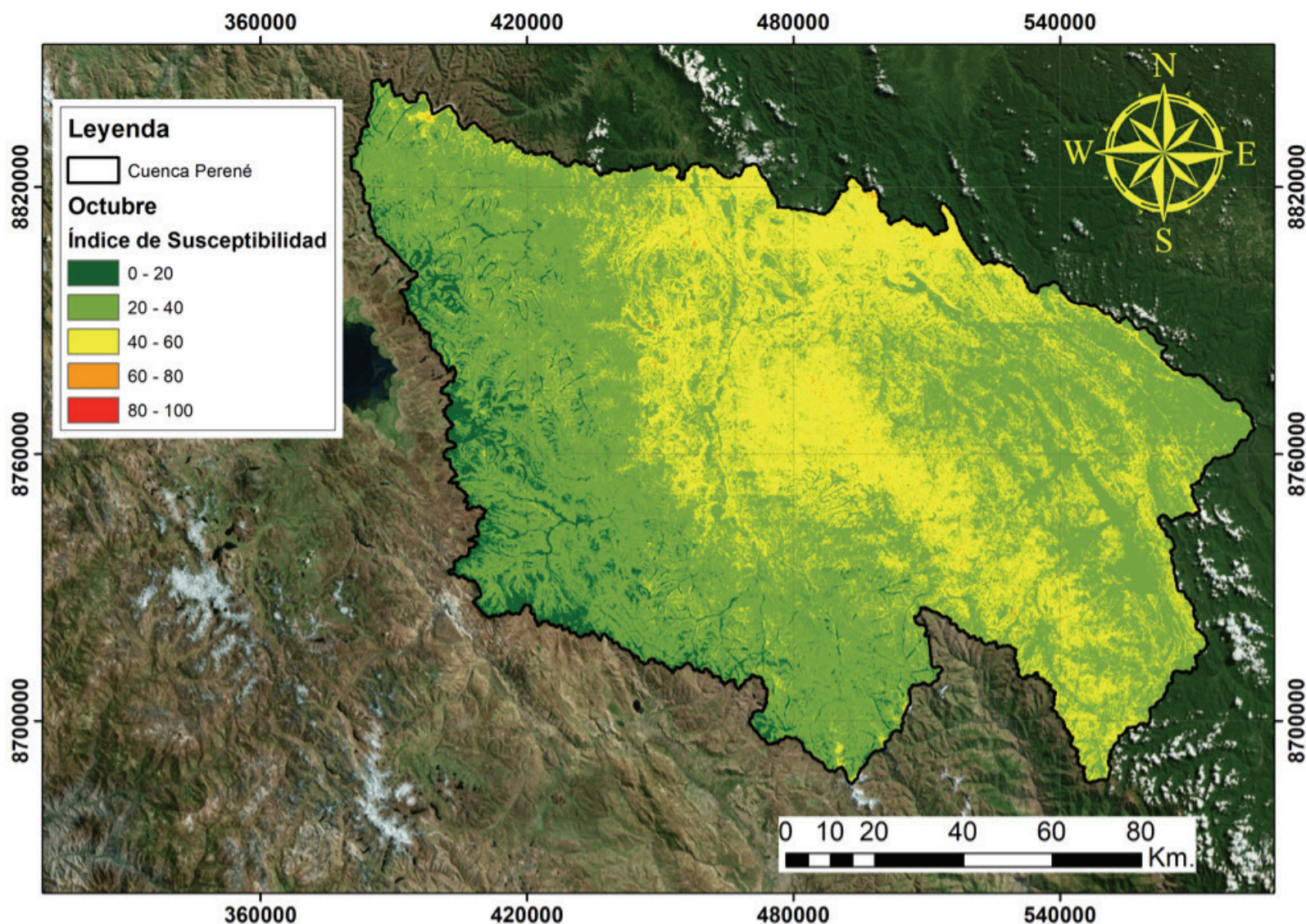


Figura 17. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de octubre.

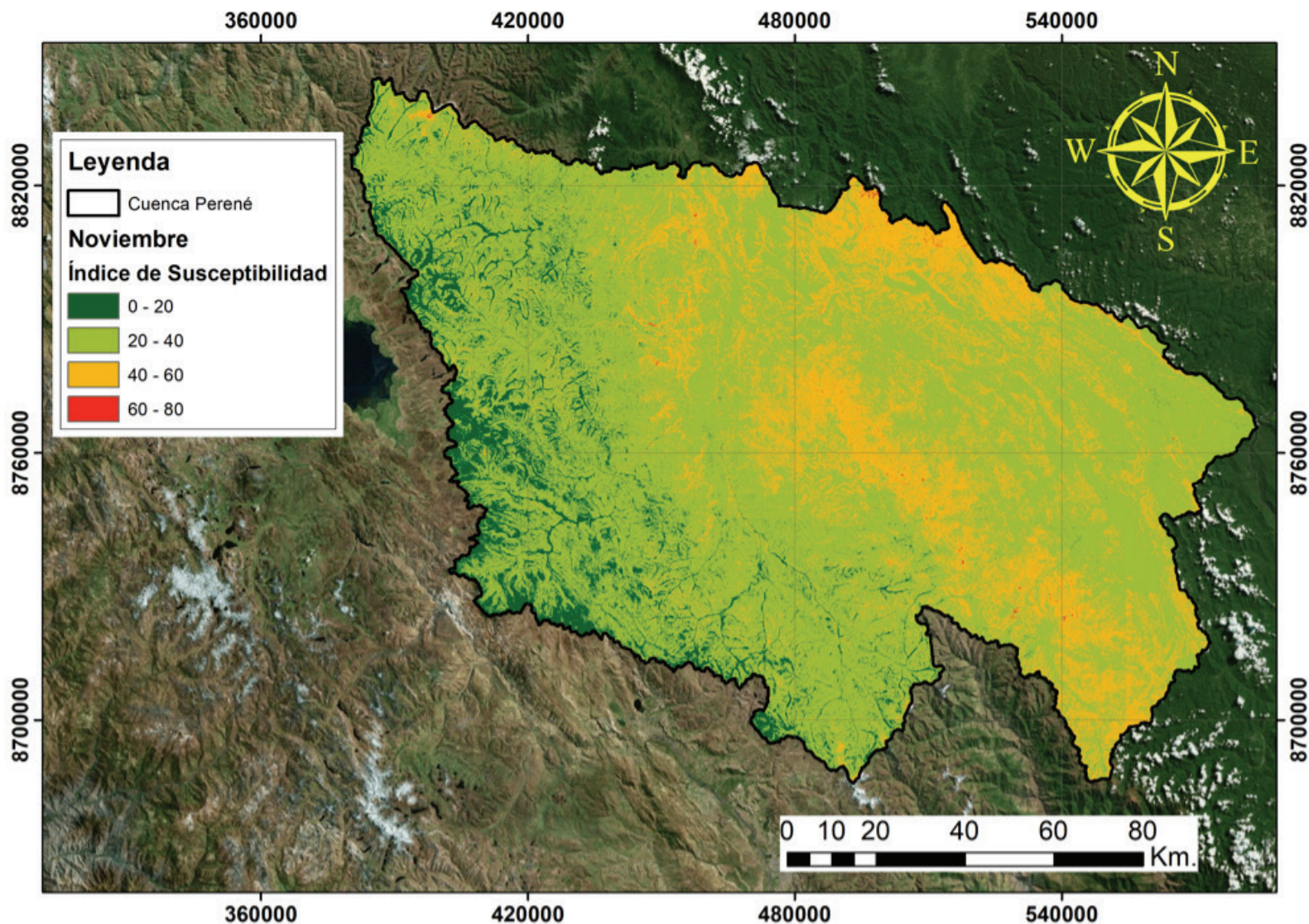


Figura 18. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de noviembre.

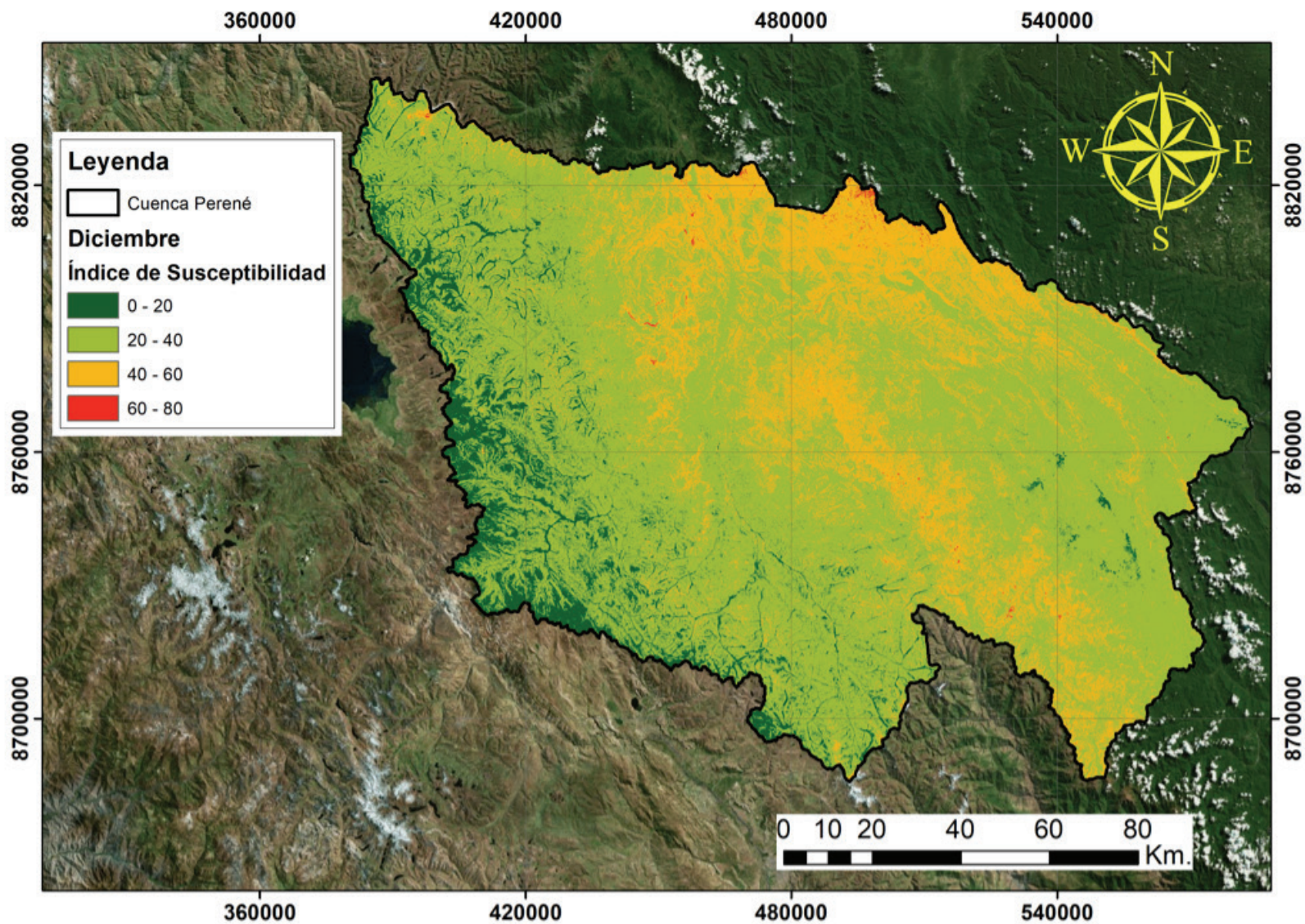


Figura 19. Distribución espacial de la susceptibilidad estacional a deslizamientos en la cuenca del río Perené correspondiente al mes de diciembre.

4. Discusión

Los resultados demuestran una fuerte dependencia espaciotemporal de la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río Perené, gobernada por el ciclo estacional de las precipitaciones. Al respecto, Luque Poma et al. (2020), en su evaluación de peligros geológicos para Junín, establecieron que si bien estos movimientos están condicionados por pendientes abruptas, son detonados casi exclusivamente durante el primer trimestre del año. Ello coincide con nuestros hallazgos, donde el pico máximo de inestabilidad ocurre en marzo (42.1% del área), validando la integración de CHIRPS como variable dinámica detonante en el análisis multicriterio. Asimismo, la alta concentración de zonas propensas en sectores elevados concuerda con Santini et al. (2015), quienes destacan que la transición subandina de la cuenca alta del Ucayali presenta estratos tectónicamente activos que vuelven a las laderas frágiles ante la denudación y erosión masiva. A diferencia de metodologías estáticas tradicionales basadas solo en topografía (como la pendiente máxima de 86.34° aquí registrada), este modelo aporta valor dinámico al incorporar la fluctuación mensual del NDVI. Esta integración demostró que las áreas con deforestación o pérdida estacional de vigor vegetal sufren una transición acelerada hacia susceptibilidades altas al iniciar las lluvias en noviembre y diciembre. Finalmente, el uso de Google Earth Engine se alinea con las tendencias de la ingeniería geomática; como señalan Gorelick et al. (2017), el procesamiento en la nube permite el análisis retrospectivo de décadas de información satelital sin hardware local. En la cuenca, esto permitió evaluar el comportamiento histórico de 24 años (2000-2024), proporcionando un patrón estacional confiable para mitigar desastres.

5. Conclusiones

Se concluye que la susceptibilidad espaciotemporal a deslizamientos en la cuenca del río Perené presenta una marcada estacionalidad en la estabilidad de sus laderas, la cual pudo ser modelada de forma dinámica para un periodo histórico multianual de 24 años (2000-2024) mediante la integración eficaz de variables hidrogeomorfológicas multiescala a través de un algoritmo automatizado en JavaScript dentro de Google Earth Engine (GEE). El análisis multitemporal desarrollado permitió identificar que el periodo crítico de mayor propensión geomorfológica se concentra de manera definida entre los meses de enero y abril. El pico máximo de peligro ocurre durante el mes de marzo, llegando a afectar al 42.1% del territorio total de la cuenca debido a la drástica pérdida de resistencia al esfuerzo cortante en los materiales, ocasionada por la saturación hídrica continua que genera el factor detonante hidrometeorológico derivado de CHIRPS.

Si bien este análisis geoespacial a nivel macro de cuenca proporciona una línea base regional idónea para la planificación y la gestión del territorio, se establece que para el diseño de obras civiles de estabilización específicas a escala de detalle es indispensable complementar este enfoque con estudios geotécnicos locales de campo. La integración de los mapas mensuales generados en formato GeoTIFF dentro de entornos SIG permite optimizar la identificación de zonas prioritarias, las cuales deberán ser evaluadas mediante perforaciones diamantinas, calicatas y ensayos normalizados de mecánica de suelos con el fin de asegurar el éxito de las acciones preventivas y mitigar los desastres de origen natural en la selva central.

6. Agradecimientos

Los autores expresan su más sincero agradecimiento al Mg. Abel Carmona Arteaga, asesor de la presente investigación y docente del curso de Hidrología, por su constante orientación, dedicación y valiosos conocimientos compartidos durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia, observaciones y asesoramiento académico fueron fundamentales para fortalecer el enfoque metodológico y contribuir al logro de los objetivos de la investigación.

Asimismo, se agradece a la Universidad Privada del Norte por brindar los espacios e instalaciones dentro del campus que facilitaron el desarrollo de las actividades académicas y de investigación necesarias para la ejecución de este estudio. El respaldo institucional proporcionado favoreció un ambiente adecuado para el análisis, la discusión y la elaboración de la presente investigación.

Finalmente, los autores reconocen el compromiso de todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de este trabajo, haciendo posible la culminación satisfactoria de esta investigación.

7. Financiamiento

La presente investigación no recibió financiamiento de la institución educativa, organismos públicos, instituciones privadas ni agencias de financiamiento.

8. Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses, financiero, personal, profesional o de cualquier otra índole, que pueda haber influido en el desarrollo, los resultados o la publicación de la presente investigación.

9. Declaración de uso de IA

Los autores declaran que no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial para la elaboración, redacción, análisis o interpretación de los resultados de la presente investigación.

10. Referencias

- Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, (41), 7–25. <https://doi.org/10.14350/rig.59101>
- ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Evaluación de recursos hídricos en la cuenca de Ene - Perené*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/52>
- Arteaga, A. C. (2025). *Mapas de riesgo de derrumbes dentro de una cuenca* (v1.0) [Software]. Google Earth Engine. <https://code.earthengine.google.com/fa475d07600379fafc070a202cc745ec>

- Carballo, D. A. C., & Carazo, R. E. (2012). Sistemas de alerta temprana para monitoreo de deslizamientos. *Revista Intersedes*, 13(26), 110-128. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5051938>
- El Comercio. (2019, 27 de octubre). Junín: autoridades gestionan apoyo a damnificados de huayco que dejó al menos un muerto en Perené. *El Comercio*. <https://elcomercio.pe/peru/junin-autoridades-gestionan-apoyo-a-damnificados-de-huayco-que-dejo-al-menos-un-muerto-en-perene-noticia/>
- Empresa Peruana de Servicios Editoriales S. A. – Editora Perú. (2019, 28 de marzo). Junín: dos muertos y dos desaparecidos por huaicos y deslizamientos. *Andina*. <https://andina.pe/agencia/noticia-junin-dos-muertos-y-dos-desaparecidos-huaicos-y-deslizamientos-746908.aspx>
- Esri. (2024). *ArcGIS Pro* (Versión 3.3) [Software]. Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.es/es-es/arcgis/plataforma-geoespacial/plataforma-geoespacial>
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). *Use of NDVI for monitoring vegetation*. FAO Land & Water. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dcadd248-cccb-43ad-9e3c-7aa0cf2bb577/content>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), 1-33. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The Climate Hazards InfraRed Precipitation with Stations— A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 1-21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Galache, K. (2023, 26 de enero). *El espectro electromagnético. Los efectos de la radiación no ionizante y cómo prevenirlos*. Avance y Perspectiva. <https://ayp.cinvestav.mx/el-espectro-electromagnetico-los-efectos-de-la-radiacion-no-ionizante-y-como-prevenirlos/>
- Google Earth Engine. (2024a). *CHIRPS: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* [Conjunto de datos]. Google Developers. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY
- Google Earth Engine. (2024b). *Google Earth Engine – Platform Overview*. Google Developers. <https://developers.google.com/earth-engine>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hengl, T. (2018). *Soil texture classes (USDA system) for 6 soil depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m (Version v02)* [Conjunto de datos]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1475451>

- Hengl, T., de Jesus, J. M., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B., Ribeiro, E., Samuel-Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J. G., Walsh, M. G., & Ruiperez Gonzalez, M. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 12(2), 1-40. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Johansen, R. (2016). *Map of the relief of the landscape around Tambo River, Peru* [Mapa]. Maps-for-Free. <https://maps-for-free.com/>
- Luque Poma, G., Rosado Seminario, M., Pari Pinto, W., Peña Laureano, F., & Huamán Nieto, M. (2020). *Peligro geológico en la región Junín (Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 72)*. INGEMMET, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2545>
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals, R. L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, (5), 59-69. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n5/n5a05.pdf>
- NASA Earth Observatory. (2019). *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. NASA Science. https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php

- NASA JPL, National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory. (2013). *NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Version 3.0 Global 1 arc second* [Conjunto de datos]. NASA Earth Science Data Systems (ESDS). <https://doi.org/10.5067/MEASURES/SRTM/SRTMGL1.003>
- NASA LP DAAC, Land Processes Distributed Active Archive Center. (2023). *MOD13Q1 Version 6 – MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006* [Conjunto de datos]. USGS. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>
- NASA, National Aeronautics and Space Administration. (2021). *Electromagnetic spectrum*. NASA Science. https://science.nasa.gov/ems/01_intro
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2020). *What is remote sensing?* National Ocean Service. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/remotesensing.html>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*, 351, 309–317. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>
- Sánchez Trigo, M. C. (2001). *Influencia del relieve en la hidrología y erosión de una cuenca de montaña* [Tesis de doctorado, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional Helvia. <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/211/13079268.pdf>

Santini, W., Guyot, J. L., Lavado, W., Antonelli, C., Fraizy, P., Julien, F., & Martinez, J. M. (2015). Sediment budget in the Ucayali River basin, an Andean tributary of the Amazon River. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 367, 320-325. <https://doi.org/10.5194/piahs-367-320-2015>

USDA, United States Department of Agriculture. (2017). *Soil Survey Manual* (Handbook No. 18). Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-survey-manual>