



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

**IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-2 PARA EL ANÁLISIS DE VARIACIÓN
ESPACIAL DE DESLIZAMIENTOS EN LA CUENCA RÍO JEQUETEPEQUE,
CAJAMARCA**

Línea de investigación:

Procesamiento digital de imágenes y señales

Tesis para optar el grado académico de
Maestra en Tecnología de Información Geográfica

Autora

Vásquez Eneque, Lizz Katherine

Asesor

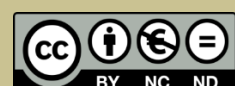
Zúñiga Díaz, Walter Benjamín
ORCID: 0000-0001-6860-7456

Jurado

Zambrano Cabanillas, Abel Walter
Altez Rodríguez, José Félix
Mendoza García, José Tomas

Lima – Perú

2026



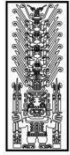
IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-2 PARA EL ANÁLISIS DE VARIACIÓN ESPACIAL DE DESLIZAMIENTOS EN LA CUENCA RÍO JEQUETEPEQUE, CAJAMARCA

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%	9%	4%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.researchgate.net Fuente de Internet	1%
2	publicaciones.eafit.edu.co Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
4	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
6	Jesús Pena Regueiro. "Monitorización de cambios en la lámina libre de agua en humedales mediante teledetección", Universitat Politecnica de Valencia, 2023 Publicación	<1%
7	Rosas Baruren, Miluska Anthuannet. "Cuantificación de la erosión hídrica en el Perú y los costos ambientales asociados.", Pontificia Universidad Católica del Perú - CENTRUM Católica (Perú), 2021 Publicación	<1%
8	Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal	<1%



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-2 PARA EL ANÁLISIS DE VARIACIÓN
ESPACIAL DE DESLIZAMIENTOS EN LA CUENCA RÍO JEQUETEPEQUE,
CAJAMARCA

Línea de investigación:

Procesamiento digital de imágenes y señales

Tesis para optar el grado académico de
Maestra en Tecnología de Información Geográfica

Autora

Vásquez Eneque, Lizz Katherine

Asesor

Zúñiga Díaz, Walter Benjamín

ORCID: 0000-0001-6860-7456

Jurado

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Altez Rodríguez, José Félix

Mendoza García, José Tomas

Lima – Perú

2026

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, quienes siempre han sido mi fuente de inspiración y fortaleza. Agradezco profundamente todo lo que han hecho por mí, y les dedico cada paso alcanzado en este camino. También dedico este trabajo a mis seres queridos, que me han acompañado con su amor y han creído en mí a lo largo de este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, por su amor, apoyo incondicional y por siempre brindarme la confianza necesaria para perseguir mis sueños. Agradezco también a mi asesor, el Mg Walter Benjamín Zúñiga Díaz, por su guía experta, paciencia y dedicación, sin los cuales este trabajo no habría sido posible. Asimismo, a todos mis amigos y colegas por sus palabras de aliento y apoyo durante este proceso, y a las instituciones que facilitaron los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Formulación del problema	5
1.3.1. Problema general	5
1.3.2. Problemas específicos.....	5
1.4. Antecedentes	6
1.4.1. Antecedentes internacionales.....	6
1.4.2. Antecedentes nacionales	13
1.5. Justificación de la investigación	14
1.6. Limitaciones de la investigación.....	15
1.7. Objetivos	16
1.7.1. Objetivo general.....	16
1.7.2. Objetivos específicos	16
1.8. Hipótesis.....	17
1.8.1. Hipótesis general.....	17
1.8.2. Hipótesis específicas.....	17
II. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. Marco conceptual.....	18
2.1.1. Imágenes Satelitales Sentinel – 2.....	18
2.1.2. Análisis de Variación Espacial de Deslizamientos	27
III. MÉTODO.....	32

3.1.	Tipo de investigación	32
3.2.	Población y muestra	32
3.3.	Operacionalización de variables	34
3.4.	Instrumentos.....	34
3.5.	Procedimientos.....	36
3.6.	Análisis de datos	39
3.7.	Consideraciones éticas	40
IV.	RESULTADOS.....	41
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
VI.	CONCLUSIONES	73
VII.	RECOMENDACIONES	75
VIII.	REFERENCIAS.....	77
IX.	ANEXOS	86
	Anexo A: Matriz de Consistencia	86
	Anexo B: Instrumento de recolección de datos.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resolución espacial y espectral de reflectividad en superficie de Sentinel-2 con cuatro bandas con resolución espacial de 10 m.	19
Tabla 2 Comparación de las características de los deslizamientos estudiados.....	24
Tabla 3 Criterios de Selección	33
Tabla 4 Cuadro de análisis de variación espacial	34
Tabla 5 Cuadro de la ficha de observación.....	35
Tabla 6 Cuadro de ficha de registro.....	35
Tabla 7 Cuadro de ficha de estado de afectación.....	36
Tabla 8 Análisis de variación espacial de los deslizamientos.....	55
Tabla 9 Análisis de variación espacial de los deslizamientos.....	57
Tabla 10 Análisis de variación espacial de los deslizamientos.....	58
Tabla 11 Análisis de variación espacial de los deslizamientos.....	60
Tabla 12 Análisis de variación espacial de los deslizamientos.....	61
Tabla 13 Pruebas de normalidad.....	63
Tabla 14 Prueba T – Student.....	64
Tabla 15 Pruebas de normalidad.....	65
Tabla 16 Prueba T – Student.....	65
Tabla 17 Prueba de Wilcoxon.....	66
Tabla 18 Pruebas de normalidad 1	67
Tabla 19 Pruebas de normalidad 2.....	67
Tabla 20 Prueba de Wilcoxon.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cuenca del río Jequetepeque	41
Figura 2 Delimitación del área de estudio	42
Figura 3 Mapa del área de estudio	43
Figura 4 Imagen satelital del área de estudio mediante el sensor SENTINEL-2.....	44
Figura 5 Vista satelital del desplazamiento espacial 2020.....	45
Figura 6 Vista satelital del desplazamiento superficial 2021.....	47
Figura 7 Vista satelital del desplazamiento superficial 2022.....	49
Figura 8 Vista satelital del desplazamiento superficial 2023.....	51
Figura 9 Vista satelital del desplazamiento superficial 2024.....	53
Figura 10 Vista satelital del desplazamiento superficial durante el periodo 2020-2024	54
Figura 11 Vista satelital del desplazamiento superficial 2024.....	55
Figura 12 Vista satelital del desplazamiento superficial 2024.....	56
Figura 13 Vista satelital del desplazamiento superficial 2024.....	58
Figura 14 Vista satelital del desplazamiento superficial 2024.....	59
Figura 15 Vista satelital variación espacial de los deslizamientos	61
Figura 16 Vista satelital del análisis multitemporal.....	62

RESUMEN

Esta investigación analizó la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, Cajamarca, utilizando imágenes satelitales Sentinel-2 del período 2020 a 2024. El estudio se utilizó el procesamiento de imágenes multitemporales con correcciones geométricas y atmosféricas, así como el cálculo de índices espectrales como el NDVI y el NBR para identificar las áreas afectadas por deslizamientos y correlacionarlas con factores geográficos y climáticos. Los resultados revelaron que las áreas más frecuentemente afectadas por deslizamientos correspondían a zonas con pendientes pronunciadas, donde más del 65% de los deslizamientos ocurrieron en terrenos con pendientes superiores al 25%, y áreas con una cobertura vegetal reducida, lo que las hacía más vulnerables a la saturación por lluvias intensas. Además, el 85% de los deslizamientos ocurrieron durante la temporada de lluvias, lo que resalta el papel de las precipitaciones en la activación de estos fenómenos. El estudio concluyó que las imágenes satelitales Sentinel-2 son una herramienta eficaz para monitorear y mapear las áreas afectadas por deslizamientos, y la variabilidad espacial observada refleja la interacción entre factores naturales y humanos. A pesar de algunas limitaciones relacionadas con la resolución temporal y la interferencia de nubes, esta tecnología resultó crucial para la gestión de riesgos geológicos y la planificación de medidas preventivas en la región.

Palabras clave: deslizamientos de tierra, imágenes satelitales, sentinel-2, variación espacial, teledetección.

ABSTRACT

This research analysed the spatial variation of landslides in the Jequetepeque River Basin, Cajamarca, using Sentinel-2 satellite imagery from 2020 to 2024. The study involved the processing of multitemporal satellite images with geometric and atmospheric corrections, as well as the calculation of spectral indices such as NDVI and NBR to identify landslide-affected areas and correlate them with geographical and climatic factors. The results revealed that the areas most frequently affected by landslides were those with steep slopes, where more than 65% of the landslides occurred on terrain with slopes greater than 25%, and areas with reduced vegetation cover, making them more vulnerable to saturation from intense rainfall. Furthermore, 85% of the landslides occurred during the rainy season, highlighting the role of precipitation in triggering these events. The study concluded that Sentinel-2 satellite imagery is an effective tool for monitoring and mapping landslide-affected areas, and the spatial variability observed reflects the interaction between natural and human factors. Despite some limitations regarding temporal resolution and cloud interference, this technology proved crucial for geological risk management and the planning of preventive measures in the region.

Keywords: landslides, satellite images, sentinel-2, spatial variation, remote sensing.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Los deslizamientos de tierra, impulsados por fuerzas naturales y actividades antropogénicas, representan un riesgo geológico significativo al implicar el descenso abrupto de masas de roca y suelo a lo largo de las laderas, cuya frecuencia y gravedad han aumentado debido a la acelerada urbanización, generando importantes daños económicos y desplazamientos poblacionales anuales (Xu et al., 2024). La ocurrencia temporal de deslizamientos de tierra, considerado un problema crítico que limita la determinación cuantitativa de la probabilidad de falla de pendiente o reactivación de deslizamientos en un lapso definido, se reconoce como un paso clave en la evaluación y gestión del peligro y análisis de riesgos asociados (Oliveira et al., 2024). La eficacia y precisión de los modelos de deslizamientos de tierra dependen de la calidad y volumen de los datos, pero las diversas clasificaciones de deslizamientos según mecanismos, escalas y formas matizan la influencia de los factores involucrados, lo que puede oscurecer el impacto de ciertas variables y, aunque las evaluaciones actuales generalizan para la mayoría de los tipos proporcionando una perspectiva general de susceptibilidad, pueden ignorar deslizamientos menos comunes pero críticos, afectando la precisión de los resultados (Wang et al., 2024).

Las lluvias extremas, cada vez más frecuentes e intensas debido al cambio climático, provocan inundaciones repentinas y saturación del suelo que incrementan el riesgo de deslizamientos en regiones montañosas, generando desastres relacionados con el agua que aumentan la vulnerabilidad y exposición de la población, ocasionando pérdidas económicas, sociales y humanas considerables, y cuya tendencia al aumento, según estudios recientes, podría intensificar estos eventos, lo que evidencia la necesidad de estrategias de gestión del riesgo adaptadas a los nuevos escenarios climáticos (Da Silva et al., 2024). De manera

simultánea, la incidencia de deslizamientos e inundaciones puede estar influenciada por transformaciones en el uso del suelo, las cuales impactan la estabilidad de las pendientes al modificar la cohesión proporcionada por las raíces y alterar el comportamiento hidrológico de las laderas (Couto et al., 2024). Las lluvias pueden afectar indirectamente la estabilidad de las laderas al influir en las condiciones del agua en los poros del material que las compone, por lo que es fundamental entender las variaciones en los patrones de precipitaciones que pueden intensificar estos peligros, ya sea generando deslizamientos individuales con efectos localizados o eventos de lluvias extremas a gran escala que provoquen múltiples deslizamientos ampliamente distribuidos en el terreno (Vega et al., 2024). Además de la intensidad de las lluvias en áreas específicas, la ocurrencia de deslizamientos de tierra está condicionada por diversos factores internos, como las fluctuaciones climáticas, la infiltración de agua, la composición geomorfológica de los granos del suelo, la inclinación descendente y las intervenciones infraestructurales no técnicas en zonas montañosas. Las lluvias intensas pueden llevar a una saturación casi completa de los suelos previamente secos o ligeramente húmedos a través del proceso de infiltración de agua (Karmakar et al., 2023).

Las investigaciones sobre la detección y segmentación de deslizamientos con imágenes satelitales se dividen en tres enfoques: centrado en el ser humano, basado en teledetección y en inteligencia artificial, donde el enfoque centrado en el ser humano utiliza el juicio experto sobre imágenes satelitales complementado con estudios de campo para mejorar la confiabilidad (Li et al., 2022). Los métodos para mapear deslizamientos incluyen estudios de campo, imágenes aéreas y satelitales (ópticas, multiespectrales o SAR) y modelos digitales de elevación (DEM), donde los estudios de campo ofrecen información detallada pero son costosos y limitados por accesibilidad, mientras que las imágenes permiten evaluaciones rápidas, aunque su precisión puede verse afectada por nubes, iluminación y resolución, siendo la identificación visual manual el método más comúnmente utilizado (Ma y Wang, 2024). La identificación precisa de

los deslizamientos de tierra es un requisito previo para reducir el riesgo de peligros de deslizamientos de tierra. Los métodos tradicionales de interpretación de deslizamientos de tierra a menudo tienen la desventaja de ser laboriosos y difíciles de usar a gran escala en comparación con los métodos de detección de deslizamientos de tierra basados en aprendizaje profundo desarrollados recientemente (Liu et al., 2023).

En 2014, la Agencia Espacial Europea [ESA] lanzó el programa Copernicus, introduciendo satélites Sentinel para monitoreo terrestre. Dentro de esta constelación, Sentinel-2 incluye los satélites Sentinel-2A, lanzado el 23 de junio de 2015, y Sentinel-2B, en marzo de 2017. Ambos cuentan con sensores multiespectrales (MSI) capaces de registrar 13 bandas espectrales de alta resolución. Su objetivo principal es proporcionar imágenes detalladas para observar la cobertura y uso de la tierra, monitorear cambios climáticos, evaluar daños por desastres y apoyar un monitoreo integral de la superficie terrestre (More et al., 2025).

1.2. Descripción del problema

Cajamarca, al igual que muchas regiones del Perú, presenta zonas altamente vulnerables a deslizamientos de tierra debido a factores como condiciones climáticas, características topográficas, áreas deforestadas y otros elementos asociados. La cuenca del río Jequetepeque abarca un área de 3,956 km² y se localiza en la costa norte del Perú, principalmente en el departamento de Cajamarca, entre las coordenadas UTM 8,440,000 m y 8,240,000 m de norte, y 820,000 m y 940,000 m de este, correspondiente a las zonas 17S y 18S (Autoridad Nacional del Agua, 2015). En ese contexto de riesgos por movimientos de masa, se integran todos los tipos (deslizamientos, flujos, desprendimientos, etc.) en un único análisis. En las evaluaciones locales, se otorga a los equipos técnicos la responsabilidad de determinar la mejor forma de analizar los factores condicionantes, desencadenantes y parámetros de evaluación según el tipo de amenaza considerada. Los escenarios de riesgo actuales generalizan la susceptibilidad territorial para todos los movimientos en masa en un solo mapa, aunque los factores y

parámetros varían según el tipo de movimiento. El "Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales" permite a los equipos técnicos ajustar los descriptores según cada caso, pero se requiere actualizar los escenarios nacionales y regionales debido a los avances en procesamiento computacional y sistemas de información geográfica [SIG] (Alcántara, 2021). En la cuenca del río Jequetepeque, las zonas de riesgo y los deslizamientos de tierra están asociados principalmente a condiciones climáticas extremas, la deforestación y las características topográficas de la región. Las precipitaciones intensas saturan los suelos, aumentando su inestabilidad, mientras que la pérdida de cobertura vegetal reduce la capacidad de retención de agua y protección contra la erosión. Las actividades humanas, como la agricultura intensiva y la falta de gestión sostenible, agravan estos problemas. Localidades como Chepén, Pacanguilla y áreas de la subcuenca San Miguel presentan una alta vulnerabilidad debido a la interacción de estos factores, lo que requiere acciones de conservación y manejo integrado del territorio para mitigar los riesgos (Rodríguez y Castro, 2022).

Se ha demostrado en numerosos estudios la incorporación de las imágenes de Sentinel-2 para el monitoreo continuo y sistemático de áreas forestales a nivel global, con procesamiento de diversas técnicas clasificadoras, siendo predominantes las basadas en métodos estadísticos convencionales e Inteligencia Artificial con obtención de cartografía forestal de alta precisión temática (Puerta et al., 2023). Por ejemplo, el uso de la agricultura de precisión (AP) con el análisis geoespacial y la utilización de imágenes multiespectrales del satélite Sentinel-2 (S2) mejora la gestión agrícola cuanto ellas pueden contribuir para monitorizar el estrés hídrico, la salinidad, las plagas y el nitrógeno, así como la contribuir para la seguridad agroalimentaria al aumentar su eficiencia y reducir costes favoreciendo durante el proceso de fertilización con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (Lugo et al., 2024). En otro ejemplo el análisis multitemporal con imágenes del satélite Sentinel-2, combinando los índices NDVI y NDWI, y

permitió identificar cambios en cultivos y cuerpos de agua en el sureste de México entre 2018 y 2020. Los resultados revelaron un bajo rango radiométrico en 2018 y mayores alteraciones durante la temporada de lluvias de ese año, lo que afectó la calidad de los cultivos y del agua (Pech et al., 2020). Su alta resolución espacial permite detectar y analizar cambios en la superficie terrestre, como desplazamientos causados por deslizamientos de tierra. Además, su capacidad multiespectral facilita el estudio de diferentes tipos de cobertura del suelo, incluida la vegetación y los suelos desnudos, proporcionando información detallada para aplicaciones como la gestión del riesgo (Alayo y Villegas, 2021).

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿De qué manera las imágenes satelitales Sentinel-2 contribuyen al análisis de la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, Cajamarca?

1.3.2. Problemas específicos

- a. ¿Cómo influye la resolución espacial de las imágenes Sentinel-2 en la precisión de la delimitación de las áreas afectadas por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque?
- b. ¿Cuál es el efecto de la frecuencia de captura de las imágenes Sentinel-2 en la detección multitemporal de la extensión de áreas afectadas por deslizamientos entre 2020 y 2024?
- c. ¿De qué manera influye la precisión de monitoreo de las imágenes Sentinel-2 en la identificación de la distribución espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque?

1.4. Antecedentes

1.4.1. Antecedentes internacionales

Li et al. (2022) presentaron un marco de dos fases basado en imágenes satelitales para la detección y segmentación de deslizamientos de tierra en Loess. El objetivo fue desarrollar un sistema automatizado para identificar y delimitar regiones afectadas, mejorando la precisión y eficiencia en comparación con métodos tradicionales. La metodología consistió en una fase inicial de detección mediante el algoritmo Faster-RCNN, que identificó ubicaciones de deslizamientos, seguido de una fase de segmentación con U-Net mejorada mediante bloques de inyección y dilatación para mejorar la precisión en la detección de límites. Se analizaron 150 deslizamientos en el norte de China, con tamaños de deslizamiento entre 20 y 620 m de longitud y anchos de 15 a 210 m. Los resultados mostraron que la segmentación con U-Net mejorada alcanzó un coeficiente de similitud Dice (DSC) de 0.68 y una distancia media de superficie simétrica (ASSD) de 83.4, superando a modelos de referencia como la U-Net convencional (DSC=0.59, ASSD=97.1). Se obtuvo que el marco propuesto es más preciso y eficiente en comparación con otros existentes, y se demuestra que es posible la identificación automática de un deslizamiento de tierra en loess y la delimitación de sus fronteras. Estos resultados para la mitigación de riesgos geológicos son valiosos.

Ma y Wang (2024), tuvieron como objetivo en su artículo científico elaborar un inventario de deslizamientos superficiales inducidos por lluvias extremas en Beijing, China, en julio del 2023. La metodología consistió en la adquisición y el análisis de imágenes de satélite antes y después del evento, la digitalización manual de los deslizamientos de tierra y la integración en un SIG. Se identificaron 15,383 deslizamientos en un área de aproximadamente 3,250 km², con un área total afectada de 19.3 km², lo que representa el 0.59% del territorio estudiado. La densidad promedio fue de 4.7 deslizamientos por km², con un punto máximo de hasta 120 deslizamientos por km². La validación técnica, basada en 403 verificaciones de

campo, mostró que el 83.6% de los deslizamientos fueron correctamente identificados por interpretación remota. Se concluyó que el inventario proporciona un recurso valioso para estudios de susceptibilidad y riesgo de deslizamientos inducidos por lluvias, aunque futuras versiones podrían integrar imágenes de mayor resolución y validación en campo.

Chandra et al. (2023) en su artículo científico tuvieron como objetivo mejorar la detección de deslizamientos de tierra a partir de imágenes satelitales mediante un modelo mejorado de U-Net, utilizando el nuevo conjunto de datos de deslizamientos de Bijie. La metodología incluyó imágenes de satélite de TripleSat con una resolución espacial de 0.8 m y la integración de ResNet-50, ResNet-101, VGG-19 y DenseNet-121 como modelos base para la segmentación. Se evaluó la precisión del modelo a través de métricas cuantitativas como precisión, recall, F1-score, MCC y precisión general (OA). Los resultados demostraron que el modelo U-Net combinado con ResNet-50 obtuvo el mejor desempeño, alcanzando una precisión de 0.98, un F1-score de 0.98 y una precisión general de 1.0. En conclusión, el estudio evidenció la efectividad del modelo mejorado en la detección de deslizamientos, superando estudios previos y destacando su aplicabilidad en la gestión de desastres.

Song et al. (2022) en su tesis tuvieron como objetivo analizar la activación y recuperación de deslizamientos de tierra acelerados por terremotos (EALs) en Italia Central utilizando observaciones satelitales de radar. La metodología incluyó el uso de datos InSAR de seis años (2014-2020) provenientes de Sentinel-1 para identificar y cuantificar 819 EALs y comparar su comportamiento con 759 deslizamientos co-sísmicos. Se analizaron 15 factores de condicionamiento de deslizamientos, destacando que los EALs no dependieron de una fuerte sacudida sísmica y que los deslizamientos más grandes fueron más propensos a la aceleración. Los resultados mostraron que los EALs experimentaron una fase de aceleración (2017-2018), una fase de estabilización (2018-2019) y una fase de recuperación (desde 2019), con velocidades de desplazamiento que alcanzaron hasta 23.3 veces su nivel preterremoto. Se

concluyó que los EALs representan un riesgo a largo plazo y requieren monitoreo continuo para la evaluación del peligro de deslizamientos en regiones sísmicamente activas.

Nardini et al. (2024) en su artículo tuvieron como objetivo caracterizar la deformación del terreno en la zona del Lago Sarez, en Tayikistán, mediante la integración de imágenes satelitales SAR e imágenes ópticas. La metodología incluyó el uso de la técnica de radar de apertura sintética interferométrica (InSAR) con el enfoque SqueeSAR y el análisis de imágenes ópticas a través del software COSI-Corr, lo que permitió evaluar la deformación del suelo en una amplia área de estudio. Los resultados indicaron que las principales inestabilidades de la zona se concentran en dos deslizamientos de tierra, uno en la margen derecha (5.34 km²) y otro en la margen izquierda (1.63 km²). Se identificaron tasas máximas de desplazamiento de hasta 447 mm/año para el deslizamiento de la margen derecha y hasta 771 mm/año para el de la margen izquierda. Además, se estimó un volumen de deslizamiento de aproximadamente 1.4×10^9 m³ en la margen derecha, con la posibilidad de una extensión sumergida adicional. En conclusión, el estudio evidenció que la combinación de técnicas InSAR y COSI-Corr proporciona una visión integral y detallada de la dinámica de los deslizamientos en la zona, lo que resulta crucial para la evaluación y mitigación del riesgo geológico en regiones de difícil acceso.

Uwizeyimana et al. (2024) en su trabajo de tesis investigó la interacción entre las variables climáticas (precipitación y temperatura) y la distribución de deslizamientos en la región oriental del Himalaya entre 2013 y 2021. La metodología incluyó la utilización de Google Earth Engine (GEE) para elaborar inventarios de deslizamientos a partir de imágenes satelitales de Sentinel-2 y Landsat-7, junto con datos meteorológicos. Se identificaron 2,163 deslizamientos en 2013, 6,927 en 2017 y 9,601 en 2021, mostrando una tendencia creciente. Se encontró que el 81% de los deslizamientos ocurrieron en áreas con una precipitación anual de entre 800 y 1,600 mm, mientras que la temperatura máxima anual mostró una correlación

positiva con la cantidad de deslizamientos, con la mayoría de ellos ocurriendo en regiones con temperaturas superiores a 15°C. Además, el 72.4% de los deslizamientos se localizaron en altitudes entre 3,000 y 5,000 m, lo que sugiere una relación entre el calentamiento climático y el aumento de inestabilidad en estas áreas. Se concluyó que el aumento de la temperatura es un factor clave en la ocurrencia de deslizamientos, especialmente en regiones de alta elevación, y que el calentamiento global seguirá incrementando el riesgo de estos eventos, por lo que se recomienda mejorar las capacidades de monitoreo y recopilación de datos climáticos para una gestión más efectiva del riesgo de deslizamientos en el futuro.

Liu et al. (2023) en su trabajo de tesis tuvieron como objetivo mejorar la detección de deslizamientos en áreas de loess mediante un modelo de aprendizaje profundo optimizado, denominado LD-YOLO, basado en la arquitectura YOLOv7. La metodología incluyó el uso de imágenes de satélite obtenidas de Google Earth Engine para construir un conjunto de datos de deslizamientos en la ciudad de Baoji, China, que sirvió para entrenar y validar el modelo. Se incorporaron mecanismos de atención eficiente de canal (ECA) y la función de pérdida Focal-EIoU para mejorar la precisión del modelo. Los resultados mostraron que el LD-YOLO superó a modelos previos en la detección de deslizamientos, alcanzando una precisión del 92.05%, un recall del 90.28% y un F1-score de 91.28%. En pruebas específicas, el modelo detectó deslizamientos antiguos con una precisión del 82.75% y un recall del 80%, mientras que en deslizamientos recientes logró una precisión del 94.29% y un recall del 91.67%. Se concluyó que el LD-YOLO representa un avance significativo en la detección de deslizamientos en áreas de loess, mejorando la capacidad de identificación tanto para deslizamientos recientes como antiguos, con potencial para aplicaciones en la gestión de desastres.

Huangfu et al. (2024) en su artículo de investigación desarrollaron un método de detección rápida y automática de deslizamientos co-sísmicos utilizando un modelo de aprendizaje profundo con múltiples características denominado ENVINet5_MF. La

metodología incluyó el uso de imágenes satelitales PlanetScope de eventos sísmicos en Hokkaido, Japón, y Mainling, China, y la integración del índice de ganancia de deslizamientos (LGI) para reducir interferencias de terrenos similares, como carreteras y tierras desnudas. Los resultados mostraron que ENVINet5_MF superó a otros métodos comparativos en precisión y eficiencia, con una precisión global del 98.4% en Hokkaido y del 98.0% en Mainling, y coeficientes kappa de 0.862 y 0.832, respectivamente. Además, logró reducir los errores de omisión y comisión en la detección de deslizamientos, con diferencias de solo 1.001 km² y 0.308 km² respecto a los datos de referencia en ambas áreas. Se concluyó que ENVINet5_MF ofrece una solución eficiente y precisa para la detección de deslizamientos co-sísmicos, con gran aplicabilidad en la gestión de emergencias post-terremoto y en la reducción de riesgos de desastres naturales.

Clark et al. (2024) en artículo de investigación desarrollaron un inventario tridimensional de deslizamientos de tierra utilizando métodos de diferenciación topográfica a partir de imágenes satelitales y UAV, con el fin de mejorar la caracterización del volumen de deslizamientos en eventos sísmicos. La metodología se basó en la comparación de Modelos de Elevación Digital (DEM) pre y post-evento, utilizando imágenes de satélite de WorldView-3 procesadas con el algoritmo SETSM y datos de UAV con reconstrucción mediante Structure from Motion (SfM). Se analizaron aproximadamente 700 deslizamientos causados por el terremoto de Lefkada (Mw 6.5) en 2015, y se determinó que la variación de elevación permitía identificar con mayor precisión áreas fuente en pendientes pronunciadas, distinguiendo deslizamientos profundos de fenómenos superficiales. Los resultados mostraron que los modelos UAV presentaron menor variabilidad que los modelos SETSM, con una incertidumbre promedio de 0.5 m ($\sigma=2.1$ m) frente a 1.7 m ($\sigma=3.5$ m) en SETSM. Además, se encontró que la relación volumen-área se ajustaba mejor cuando solo se consideraban áreas de pérdida de volumen, logrando exponentes de escalamiento de hasta $\gamma=1.4$ para deslizamientos mayores a

10³ m². Se concluyó que el uso de modelos topográficos diferenciales permite una mejor caracterización geométrica de los deslizamientos, reduciendo sesgos asociados a inventarios bidimensionales y proporcionando una herramienta más efectiva para evaluar la movilidad y el impacto de estos eventos en la geomorfología y la gestión de desastres.

Soleimani et al. (2023) en su artículo de investigación tuvieron como objetivo evaluar la viabilidad del uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la inspección y modelado tridimensional de deslizamientos de tierra en la provincia de Ardabil, Irán. La metodología incluyó el uso de drones equipados con cámaras de alta resolución y sensores para capturar imágenes de áreas propensas a deslizamientos, las cuales fueron procesadas mediante software especializado como PIX4Dmapper y Agisoft Photoscan para generar modelos digitales de elevación (DEM) y modelos tridimensionales de la superficie (DSM). Se aplicó modelado numérico utilizando el software Rocscience SLIDE para evaluar la estabilidad de las pendientes y determinar las zonas de mayor riesgo. Los resultados mostraron que la metodología UAV permitió identificar con precisión los mecanismos de deslizamiento, con una resolución centimétrica en la medición de desplazamientos. Se encontró que ciertas áreas presentaban factores de seguridad (FS) inferiores a 1, lo que indica una alta probabilidad de falla, con volúmenes de masa deslizada calculados en varios miles de metros cúbicos. Se concluyó que el uso de UAVs es una herramienta efectiva, rápida y precisa para el monitoreo de deslizamientos, superando limitaciones de métodos tradicionales como imágenes satelitales y levantamientos terrestres, y ofreciendo un enfoque viable para la gestión y mitigación del riesgo de deslizamientos en regiones geológicamente inestables.

Ahmed et al. (2025) en su artículo tuvieron como objetivo evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en la Wilaya de Mila, al noreste de Argelia, utilizando métodos estadísticos basados en SIG. La metodología incluyó la elaboración de un inventario de 429 deslizamientos identificados mediante imágenes satelitales, análisis documental y trabajo de campo. Se

aplicaron cuatro enfoques estadísticos: ratio de frecuencia (FR), valor de información (IV), factor ponderado (Wf) y peso de evidencia (WoE), con 80% de los datos utilizados para entrenamiento y 20% para validación mediante curvas ROC-AUC. Los resultados indicaron que el modelo WoE presentó la mejor precisión con una tasa de éxito de 0.774 y una capacidad predictiva de 0.808, superando a FR (0.767/0.785), IV (0.754/0.782) y Wf (0.749/0.770). Se concluyó que la integración de métodos estadísticos en SIG proporciona mapas confiables de susceptibilidad, facilitando la toma de decisiones en la gestión de riesgos y planificación del uso del suelo en áreas propensas a deslizamientos.

Zhang y Chen (2025) en su artículo de investigación tuvieron como objetivo desarrollar un modelo de análisis espacio-temporal, simulación y alerta temprana de deslizamientos inducidos por lluvia en el suroeste de China, utilizando datos multifuente de precipitación. La metodología incluyó el uso de cuatro productos de precipitación satelital (TRMM 3B42, MSWEP, CMFD y ERA5) junto con datos históricos de deslizamientos (2010-2018) para analizar la relación lluvia-deslizamiento mediante curvas de intensidad-duración efectiva (EID) y modelos de sensibilidad. Se establecieron umbrales de respuesta de deslizamientos a diferentes productos de precipitación y se propuso un método para simular la ocurrencia espacio-temporal de deslizamientos. Los resultados mostraron que el 80% de los deslizamientos ocurrieron durante la temporada de lluvias (abril-julio) y que el modelo basado en CMFD presentó el mejor ajuste ($R^2=0.9529$), con una precisión predictiva del 86.02%, superando a TRMM (60.21%), ERA5 (52.28%) y MSWEP (43.58%). Se concluyó que el uso de modelos de umbral de precipitación y datos satelitales mejora significativamente la capacidad de predicción y alerta temprana de deslizamientos, permitiendo la selección de umbrales específicos según las condiciones meteorológicas regionales.

1.4.2. Antecedentes nacionales

Satriano et al. (2023) en su trabajo de artículo tuvieron como objetivo desarrollar una técnica avanzada de detección y mapeo de deslizamientos mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales ópticas. La metodología se basó en el uso de imágenes obtenidas por el sensor Multispectral Instrument (MSI) a bordo de los satélites Sentinel-2, aplicando la técnica Robust Satellite Techniques (RST) para detectar cambios significativos en la cobertura del suelo. Se analizó un evento de deslizamiento en la ciudad de Pomarico, Italia, ocurrido en enero de 2019, utilizando un conjunto de datos históricos de 82 imágenes Sentinel-2 L1C recopiladas entre diciembre y febrero de 2016-2018. Los resultados indicaron que la técnica permitió identificar con alta fiabilidad el área afectada por el deslizamiento inmediatamente después del evento y en los meses posteriores, logrando una precisión del 98.4% en la detección de cambios en la cobertura del suelo. Se concluyó que la metodología propuesta, implementada en Google Earth Engine, es completamente automática y exportable, lo que la convierte en una herramienta efectiva para la mitigación de riesgos de deslizamientos y la planificación territorial en zonas vulnerables.

Ariza et al. (2021) en su artículo cuyo objetivo fue desarrollar una metodología para detectar deslizamientos en Centroamérica mediante el Índice Diferencial de Suelo Desnudo (sBSI) aplicado a imágenes ópticas. La metodología se basó en el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2 en la plataforma Google Earth Engine (GEE) para identificar cambios abruptos en la cobertura del suelo antes y después de eventos de deslizamiento. Se aplicó el índice dBSI para diferenciar áreas afectadas por deslizamientos, utilizando un umbral calibrado con datos de campo. Los resultados indicaron que el método permitió detectar automáticamente el 62% de los deslizamientos en un evento reciente en Oaxaca, México, aunque con limitaciones en la identificación de deslizamientos pequeños debido a la resolución de las imágenes. La evaluación de precisión mostró un porcentaje de detección del 62.14%, con un

factor de error por omisión del 37.86% y un factor de error por comisión del 47.65%. Se concluyó que la metodología basada en dBSI representa un enfoque prometedor para la detección rápida de deslizamientos en grandes áreas, aunque su precisión podría mejorarse mediante la integración de índices adicionales como NDVI y el uso de imágenes de mayor resolución.

Guerrero et al. (2023) en su artículo tuvieron como objetivo mejorar la predicción de deslizamientos mediante visión por computadora y aprendizaje profundo, utilizando redes neuronales convolucionales (CNN) para generar un mapa de susceptibilidad en la carretera Aloag-Santo Domingo, Ecuador. El inventario oficial de deslizamientos fue la base de un conjunto de datos de imágenes creado para la elaboración de esta metodología. De este inventario, se extrajo la corona de deslizamientos no registrados localizados en las coordenadas de la lista en la que se trabajó. Se verificó e hipotetizó la probabilidad de ocurrencia mediante perfiles temporales visuales y a través de periódicos. Se usaron 19 variables condicionantes, representadas por imágenes RTP de 5×5 píxeles en la corona del deslizamiento. La precisión promedio del modelo CNN fue de 97.48%, confirmando su eficiencia en la predicción del riesgo. Los resultados fueron visualizados en un mapa de susceptibilidad, producido en el SIG, que presentó áreas altamente vulnerables a lo largo de BR-116. Es posible concluir que la metodología CNN supera los enfoques tradicionales y presenta un instrumento viable para la gestión del riesgo de deslizamiento en lugares susceptibles.

1.5. Justificación de la investigación

La investigación es fundamental debido a la alta vulnerabilidad de esta región (Cajamarca) a los movimientos de masa, desencadenados por extremos climáticos, topográficos y procesos de la deforestación que disminuyen la estabilidad del suelo. En este aspecto, el enfoque propuesto, utilizando las imágenes satelitales Sentinel-2 como base de datos visuales para el estudio de la dinámica del terreno en el tiempo, es presentado como

herramienta clave para la detección, monitoreo y análisis de la evolución de los fenómenos en cuestión. Asimismo, permite una importante caracterización de las zonas de riesgo y ayuda a identificar los patrones espaciales en la ocurrencia de movimientos de masa mencionado. La habilidad de las imágenes Sentinel-2 de proporcionar datos multiespectrales con una alta frecuencia y resolución espacial es crucial para detectar cambios en la cobertura del suelo, identificar áreas inestables y establecer correlaciones entre los eventos de deslizamiento y los factores precipitadores, como la saturación del suelo después de lluvias intensas. En la cuenca del río Jequetepeque, la combinación de técnicas de teledetección y análisis geoespacial permite superar las limitaciones de los enfoques tradicionales, que dependen de observaciones puntuales y análisis generalizados de susceptibilidad, brindando así una visión más precisa y dinámica del problema. La integración de dichos datos en modelos de predicción permitiría mejorar la toma de decisión acerca de estrategias de mitigación y adaptación en localidades altamente vulnerables como Chepén y Pacanguilla, y si bien se cuentan con atlas de amenazas actuales, la necesidad de actualizar escenarios de riesgo en el ámbito nacional y regional, sumado a la necesidad de metodologías innovadoras que incorporen los avances en procesamiento computación y SIG, optimizarían la evaluación de condicionantes y disparadores de los movimientos de laderas.

1.6. Limitaciones de la investigación

- Las resoluciones de las imágenes satelitales Sentinel-2 puede limitar la detección de deslizamientos pequeños o con velocidad de movimiento rápida, lo que afecta el análisis detallado en áreas específicas.
- La presencia de nubes o condiciones meteorológicas adversas durante los momentos de captura de imágenes satelitales podría dificultar el acceso a imágenes claras, lo que podría afectar la exactitud de los recursos remotos de monitoreo.

- La falta de series temporales completas o la disponibilidad limitada de imágenes históricas de alta calidad podría reducir el alcance tome análisis a largo plazo de las tendencias de los deslizamientos.
- La validación en campo puede verse restringida por accesibilidad a las zonas afectadas, lo que dificulta la verificación directa de los deslizamientos detectados en las imágenes satelitales.
- Los deslizamientos pueden ocurrir en lapsos de tiempo menores al intervalo de adquisición de imágenes de Sentinel-2, lo que podría omitir eventos de corta duración.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Determinar el impacto del uso de imágenes satelitales Sentinel-2 en la variación espacial por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque.

1.7.2. Objetivos específicos

- a. Evaluar el impacto del uso de imágenes satelitales Sentinel-2 en la distribución del área afectada por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque durante el periodo 2020–2024.
- b. Determinar el impacto del uso de imágenes satelitales Sentinel-2 en las áreas afectadas por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque
- c. Evaluar el impacto del uso de imágenes satelitales Sentinel-2 en las zonas de mayor recurrencia de deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

El uso de imágenes satelitales Sentinel-2 tiene un impacto significativo en la identificación y análisis de la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, al permitir una detección más precisa y sistemática de las zonas afectadas.

1.8.2. Hipótesis específicas

- a. El uso de imágenes satelitales Sentinel-2 influye significativamente en la distribución del área afectada por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, durante el periodo 2020–2024.
- b. El uso de imágenes satelitales Sentinel-2 impacta significativamente en identificar las áreas afectadas por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque.
- c. El uso de análisis temporal de imágenes satelitales Sentinel-2 impacta significativamente en la identificación de zonas con mayor recurrencia de deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco conceptual

2.1.1. *Imágenes Satelitales Sentinel – 2*

Las imágenes satelitales Sentinel-2 forman parte del proyecto Sentinel, impulsado por la Agencia Espacial Europea (ESA) dentro del programa Copernicus. Este proyecto integra una constelación de satélites especializados en diferentes áreas de observación terrestre y marítima. Sentinel-1 está orientado a monitorear la superficie terrestre y los océanos, mientras que Sentinel-2, compuesto por un par de satélites, se enfoca en proporcionar imágenes de alta resolución del entorno terrestre. Por su parte, Sentinel-3 se dedica a la inspección del océano global, Sentinel-4 se centra en el análisis de la calidad del aire, y Sentinel-5 amplía este enfoque, mejorando la observación atmosférica. Estos satélites ofrecen la capacidad de obtener información detallada y precisa, lo cual resulta fundamental para investigaciones ecológicas, gestión ambiental y planificación territorial (Pech et al., 2020).

También, los autores Puerta et al. (2023) destacan que en el monitoreo terrestre y la teledetección, las imágenes satelitales Sentinel-2 han jugado un papel protagónico desde que se lanzó en 2015. Esto se ha logrado a través de un sistema constituido por dos satélites idénticos en operación conjunta desde 2017, cuyo instrumento multiespectral MSI es capaz de recolectar información en 13 bandas espectrales con resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 metros. Dado que las imágenes Sentinel-2 (S-2) son de acceso libre y, por lo tanto, no es posible establecer un intervalo específico, su resultado manifiesta un alto nivel de exactitud en el mapeo de la vegetación, cubierta y tipo, especialmente a una resolución de decenas de resolución. Además, la distribución de imágenes S-2 a través del portal Copernicus desde 2018 con correcciones atmosféricas pre-aplicadas, significa una simplificación de los procesos de

análisis. Por lo tanto, Sentinel-2 no sólo permite avisar de forma más precisa sino que también simplifica el acceso y el recurso de datos por investigadores y administradores territoriales.

2.1.1.1. Resolución Espacial. La resolución espacial se refiere al nivel de detalle que se puede discernir en una imagen o en un conjunto de datos geoespaciales. Dicho concepto es esencial para abordar la cobertura de vegetación, ya que influye en la capacidad de ver características y patrones precisos, presentes en el terreno. Por ejemplo, en cuanto a las misiones Sentinel 2^a y 2B, algunas bandas multiespectrales se caracterizan por tener una resolución de 10 metros, lo que promueve un mayor nivel de detalles en la identificación de cambios en la vegetación y su involucramiento en la respuesta a las variaciones estacionales. A fin de demostrar una calidad coherente, las bandas multiespectrales de menor resolución se disminuyen a 10 metros, para mantener el tamaño de los píxels entre todos los conjuntos de datos (Anaya et al., 2023).

Tabla 1

Resolución espacial y espectral de reflectividad en superficie de Sentinel-2 con cuatro bandas con resolución espacial de 10 m.

Banda	Nombre	Bandas espectrales (nanómetros)	Resolución espacial
B1	Violeta	443	60m
B2	Azul	490	10m
B3	Verde	560	10m
B4	Rojo	665	10m
B5	Límite rojo 1	705	20m
B6	Límite rojo 2	740	20m
B7	Límite rojo 3	783	20m
B8	NIR	842	10m
B8A	NIR banda estrecha	865	20m
B9	Vapor de agua	940	60m
B11	SWIR 1	1610	20m
B12	SWIR 2	2190	20m

Nota: Resolución espacial y espectral (2023). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8782856>

2.1.1.2. Resolución de las imágenes. De acuerdo a Chucos y Vega (2022) señala que a resolución de las imágenes satelitales se refiere a las características que determinan el nivel de detalle y calidad de los datos capturados por los sensores en órbita. Este concepto se clasifica en las siguientes modalidades:

– Resolución espacial: Define el tamaño mínimo del objeto distinguible en una imagen, generalmente medido en metros sobre el terreno. Depende de factores como la altura y ángulo del sensor, velocidad de escaneo y características ópticas. Por ejemplo, las imágenes del Landsat TM poseen una resolución espacial de 30x30 m en la mayoría de sus bandas.

– Resolución espectral: Indica la cantidad y amplitud de las bandas electromagnéticas captadas. Sensores más avanzados, como los hiperespectrales, pueden distinguir hasta 256 bandas estrechas, permitiendo identificar objetos según su comportamiento espectral.

– Resolución radiométrica: Representa la cantidad de niveles digitales que se usan para expresar los datos. Un mayor número de niveles proporciona mayor detalle en la representación de la radiación recibida.

– Resolución temporal: Se refiere a la frecuencia con que el satélite pasa por el mismo punto terrestre. Por ejemplo, el Landsat 4 redujo su ciclo de repetición a 15 días, facilitando un monitoreo más frecuente.

2.1.1.3. Identificación de áreas afectadas por deslizamientos. Conforme a Villalón et al. (2023) la identificación de áreas afectadas por deslizamientos se centra en evaluar las zonas más propensas a experimentar estos fenómenos, clasificándolas según su nivel de susceptibilidad. Este análisis, basado en factores como la inclinación del terreno, la composición litológica y la influencia de procesos antrópicos, permite determinar categorías que van desde una muy baja susceptibilidad hasta una muy alta. A través de herramientas de

SIG, se generan mapas temáticos que integran variables como la pendiente, la estabilidad de las rocas y la presencia de fracturamientos, facilitando así una representación visual y comprensible del riesgo en cada región.

Asimismo, menciona que los deslizamientos pueden variar en frecuencia e intensidad según la categoría de susceptibilidad. Las zonas de muy baja y baja susceptibilidad resultan con pocas probabilidades de deslizamientos de importancia, lo que revela pendientes bajas con rocas estables. En cambio, las áreas de alta y muy alta susceptibilidad destacadas se caracterizan por pendientes fuertes, erosión activa y un nivel alto de disturbios humanos, tales como construcción de carreteras u operaciones de agricultura. Este enfoque conduce a una toma de decisiones más informada y una planificación de gestión más relevante para áreas vulnerables a la montaña y las costas.

2.1.1.4. Detección de variaciones topográficas en la cuenca. Por otro lado, según Ross y García (2022) la implementación de tecnologías avanzadas tales como vehículos aéreos no tripulados ha revolucionado la recopilación de datos geoespaciales. Es decir, la adquisición de información detallada de terrenos complejos y remotos en tiempos reducidos, eficacia y economía ha sido recientemente puesta al alcance de los ingenieros y técnicos. Igualmente, el dron no solo reduce el tiempo de levantamiento topográfico, sino también el riesgo personal y el equipo al ingresar a zonas con acceso limitado. Asimismo, el dron también permite el análisis estadístico de datos tales como la pendiente, profundidad y superficie de corte respecto al área. Por lo tanto, el desarrollo y la consolidación de obras civiles son planificados y ejecutados de manera más eficiente.

2.1.1.5. Resolución Temporal. La resolución temporal pertenece a la frecuencia en la que un sensor satelital toma un registro diferencial de imágenes en una misma área dentro de la superficie terrestre. La resolución temporal es un concepto clave para el manejo de datos espaciales, ya que se describe así la capacidad de observar cambios y eventos en función del

tiempo. La frecuencia en la adquisición de las imágenes tomadas diferencia depende no solo en las características de movimiento sobre la órbita del satélite sino también sobre las capacidades del sensor incluyendo el ángulo de observación y ángulo de apertura. Satélites con una alta resolución temporal muestran un registro de eventos dinámicos tales como variaciones climáticas, crecimiento urbano o desastres naturales permitiendo así la toma de decisiones informadas en disciplinas como gestión ambiental, agricultura y planificación territorial (Castaño et al., 1996).

2.1.1.6. Adquisición de imágenes. La adquisición de imágenes satelitales se refiere a los métodos y configuraciones en los que un satélite captura datos sobre las superficies terrestres. En la instrumentación SAR, en el caso de Sentinel-1, se utilizan cuatro métodos principales para la recopilación de información: StripMap, Interferometric Wide Swath, Extra-Wide Swath y Wave. Si bien cada uno de estos métodos tiene las características que se mencionan que se utilizan conforme a los requerimientos de resolución y área del lugar (Gobierno de España, 2018).

El modo SM puede ofrecer una resolución muy alta y cobertura continua, mientras que IW combina una franja de observación muy ancha junto con una resolución moderada, lo que permite una amplia gama de aplicaciones interferométricas. También, el modo EW maximiza la cobertura a expensas de la resolución, y el WV, del que se espera que se incline hacia cuerpos de agua, ofrezca enjagadas muy pequeñas para análisis de patrones de olas. En todos estos modos, la tecnología SAR mantiene la coherencia de amplitud y fase, lo que permite una resolución geométrica y radiométrica avanzada, un requisito previo vital para realizar análisis espaciales hace años (Gobierno de España, 2018)

2.1.1.7. Cobertura terrestre. Según Kadiogullari et al. (2017) define el terreno cubierto como el análisis de cobertura terrestre que se enfoca en las transiciones de las clases de cobertura dependiendo de la altitud y la proximidad a asentamientos humanos. Tal enfoque

proporciona una visión acumulativa de los rasgos y procesos de dinámica temporal y espacial de los recursos forestales cuando se examinan, a la vez, por su composición y configuraciones. Los cambios se identificaron mediante el análisis de los mapas forestales históricos, cuyas edades variaron desde 1971 hasta 2013, y los mapas cruzados de elevación, distancia desde los asentamientos y clases de cobertura distintas. En resumen, el enfoque utilizó herramientas de GIS para identificar cómo cambian los factores topográficos y la proximidad desde asentamientos humanos y cómo los tipos de cubierta cambian con el tiempo, proporcionando marcadores claros de los cambios que los paisajes forestales y terrestres experimentaron en varias décadas. Por lo tanto, el enfoque permite profundizar en cómo los factores relacionales del terreno, la proximidad de las poblaciones humanas y la dinámica de los recursos naturales se interrelacionan.

2.1.1.8. Identificación de eventos recientes de deslizamientos. De acuerdo a Alcántara (2021) los deslizamientos representan fenómenos complejos y diversos en términos de magnitud y frecuencia, que causan daños significativos en las áreas afectadas. En el ámbito nacional, han sido abordados desde diversas perspectivas, y la información recopilada por el Gobierno Regional de Cajamarca, INGEMMET y otras entidades técnico-científicas respalda esta afirmación. Hechos recientes como el deslizamiento de La Púcara en 1999, el de Cajabamba en 2019 y los deslizamientos en Tablón Colorado en 2019 y 2021 muestran una diversidad de causas y efectos.

Factores condicionantes, como las características topográficas y geológicas, y elementos desencadenantes, como los movimientos sísmicos o la sobresaturación del terreno, muestran la naturaleza de los procesos considerados, y como tales, no deben comenzarse a considerarse en un enfoque único. Por lo tanto, en concordancia con Alcántara, propongo el fortalecimiento de la interacción entre los SIG y las bases de datos nacionales; sistemas de información geográfica y riesgos de desastres SIGRID; SINPAD, en este caso, para identificar

y monitorear fenómenos peligrosos con mayor precisión y adaptarse a cada caso en particular (Alcántara, 2021).

Tabla 2

Comparación de las características de los deslizamientos estudiados.

Zona	Características generales	Factores condicionantes	Factores desencadenantes	Área afectada (m ²)	Volumen estimado (m ³)
La Púcara (07/11/1999)	- Estado: inactivo - Estilo: múltiple - Distribución: avanzando - Velocidad: rápido	- Pendiente: 51° - Litología: Fm. Pulluycana Ks-p (Calizas, lutitas) - Geoforma: Relieve montañoso estructural	- Principal: Fallamiento progresivo - Secundario: lluvias intensas	1.13×10 ⁶	4.7×10 ⁶
Cajabamba (26/05/2019)	- Estado: suspendido - Estilo: único - Distribución: regresivo - Velocidad: lento	- Pendiente: 6° - Litología: Fm. Cajabamba Nm- cj (Lutitas, limolitas) - Geoforma: Relieve colinado fluvio erosional	- Principal: movimiento sísmico - Secundario: lluvias intensas	34.2×10 ⁶	182.9×10 ⁶
Tablón Colorado (1999 – presente)	- Estado: activo - Estilo: único - Distribución: regresivo - Velocidad: moderada	- Pendiente: 17° - 23° - Litología: Fm. Tamborapa Qp- ta (Conglomerados) - Geoforma: Ladera erosionable	- Principal: sobresaturación por regadíos - Secundario: lluvias intensas	0.2×10 ⁶ 0.03×10 ⁶ 39×10 ⁶ Total: 0.92×10 ⁶	4.9×10 ⁶ Total: 9.9×10 ⁶

Nota: Comparación de las características (2021)

2.1.1.9. Datos Satelitales. El uso de data satelital involucra la unión de tecnologías avanzadas en la captura y estudio de información geoespacial, lo que permite a los participantes comprender de manera más situacional y precisa eventos terrestres y

atmosféricos. En este caso, los datos requeridos se adquieren de equipos especializados que miden las variables requeridas (Cossío, 2021).

la validez de los instrumentos utilizados generalmente depende de la opinión de jueces expertos, y la confiabilidad se basa en pruebas estadísticas, como el método de Kuder Richardson-20, que arroja valores de las variables estudiadas. Posteriormente, la gestión de la información se basa en cómo el sistema funciona y las pruebas relacionadas con datos satelitales incluyen software como SPSS que implican análisis univariante y pruebas de hipótesis no paramétricas, y Rho de Spearman se usa comúnmente para examinar correlaciones significancia estadística determinada. Este enfoque metodológico asegura resultados válidos y aceptables en investigaciones relacionadas con aprendizaje con tecnologías satelitales (Cossío, 2021).

2.1.1.10. Generación de mapas de clasificación para áreas afectadas. De acuerdo con Tenorio et al. (2017) la generación de los mapas de clasificación para las áreas afectadas requiere de un enfoque metodológico que combine criterios jerárquicos y técnicas de análisis espacial. Este proceso sintetiza métodos heurísticos y de análisis multicriterio para priorizar la geología, pendiente, edafología, densidad de drenaje, y uso de suelos, entre otros. Esta jerarquización de variables, definida en base a estudios previos en la región, permite constituir un marco sistemático de valoración y catalogación para clasificar a las áreas en función de su vulnerabilidad a fenómenos naturales o impactos humanos posibles. Por otro lado, las fuentes cartográficas, conformadas por mapas temáticos y topográficos de diferentes escalas, así como métodos de interpolación y técnicas como el análisis Kriging para aumentar la exactitud en la representación de isolíneas y geoformas. Este enfoque fue el utilizado y permitió la caracterización de sectores clave para el diseño de estrategias de mitigación y planificación territorial.

2.1.1.11. Integración de datos satelitales SIG. Guillen et al. (2015) el procesamiento digital de imágenes satelitales es la primera y, tal vez, una de las etapas más cruciales en la integración de datos satelitales en un Sistema de Información Geográfica. En esta etapa, las imágenes que han sido adquiridas por el satélite se procesan y refinan digitalmente usando tecnología informática para depurar y extraer datos útiles. Por ejemplo, las imágenes se corrigen en términos radiométricos y geométricos para eliminar interferencias atmosféricas y distorsiones instrumentales. Otras técnicas incluyen realce de contraste, que mejora la percepción humana de los detalles en las imágenes, Análisis de Componentes Principales que se usa para reducir la dimensionalidad de la imagen de modo que los atributos particulares sean claros. También se utilizan índices como NDVI, que evalúa la cobertura vegetal basándose en la información espectral en dos o tres bandas.

También afirma que los procesos anteriores buscan optimizar la calidad de las imágenes satelitales y están diseñados para prepararlas para ser utilizadas en un SIG. Una vez que las imágenes son procesadas, pueden interpretarse con otros datos geoespaciales formando capas temáticas, mapas de uso de suelo y modelos geográficos que pueden ser utilizados para un análisis más profundo. Por lo tanto, el procesamiento digital y la integración en un SIG están relacionados en concepto, pero distinto en etapas, lo que significa que uno se aplica para optimizar las imágenes y la otra para integrar las disponibles en el contexto de la investigación geoespacial.

2.1.1.12. Precisión en la delimitación de áreas de deslizamiento. El deslizamiento de laderas describe el movimiento descendente y externo de suelos, rocas y plantas sujetas a la acción gravitacional, superando la resistencia intrínseca de los materiales. Factores intrínsecos, como la geología y la pendiente, y factores externos, como lluvias intensas o actividades humanas, determinan la susceptibilidad del terreno a deslizarse. Este concepto,

carente de una dimensión temporal, permite identificar zonas potencialmente inestables, contribuyendo a la planificación y prevención de riesgos (Santamaría et al., 2021).

En este marco, se revela como una herramienta importante la elaboración de mapas de susceptibilidad. Estos se crearon por primera vez a fines de la década de 1970 por el USGS en California. Los mapas de susceptibilidad son zonales compuestos como la evaluación parámetros geológicos y deslizamientos históricos. El trabajo sobre ellos se realiza a través de la recopilación de inventarios existentes, una evaluación cualitativa o cuantitativa de las características del terreno y la producción de capas con información geológica, geomorfológica y geomorfológica. Los mapas de susceptibilidad son una representación útil para la gestión preventiva de los impactos de los futuros deslizamientos.

2.1.2. Análisis de Variación Espacial de Deslizamientos

Los eventos naturales influidos por la actividad del hombre tienen un impacto importante en las áreas afectadas. En el caso de la cuenca del río Combeima, los deslizamientos son más probables que ocurran en laderas bajas o moderadamente empinadas, es decir, por debajo de los 1500 m sobre el nivel del mar. La distribución de la frecuencia de los deslizamientos también refleja la influencia de la pendiente y los tipos de formaciones geológicas en el terreno en la presencia o ausencia de deslizamientos. Más importante aún, las herramientas geoespaciales han permitido a Villamil et al. identificar y registrar 366 eventos de deslizamientos a lo largo de 16 años. Estos datos ofrecen un marco sólido para interpretar los patrones espaciales y temporales de los deslizamientos. Como resultado, es crítico integrar los datos geoespaciales con las observaciones de campo para comprender completamente la distribución y los factores de desencadenamiento de los deslizamientos (Villamil et al., 2018).

2.1.2.1. Caracterización de los Deslizamientos. La caracterización de deslizamientos de acuerdo Quispe et al. (2021) es primordial para el tratamiento y evaluación

de los riesgos geológicos en áreas propensas a derrumbes. Se refiere a desplazamientos de masa que contienen voladura de materiales no consolidados, rocas u otros materiales de la corteza terrestre y son relativamente comunes debido a la multitud de factores naturales y otros de origen humano que interactúan entre sí.

Por lo tanto, en contraposición a los deslizamientos rotacionales y traslacionales, que también se caracterizan por movimientos de tierra más rápidos y profundos, en los deslizamientos superficiales, incluso lentos y poco profundos, las masas de tierra siguen planos de fallas bien definidos (Quispe et al., 2021).

Dado este contexto, el análisis de estos procesos ayuda a elaborar mapas de susceptibilidad. Además de la necesidad de implementar, los mapas son herramientas clave para la prevención y planificación. Utilizando un sistema de información geográfica, es posible evaluar múltiples variables para modelar la probabilidad espacial de cada uno de los tipos de deslizamientos. Como resultado, es claramente una contribución al daño potencial mitigador y al procedimiento de toma de decisiones vulnerable (Quispe et al., 2021).

2.1.2.2. Distribución Espacial de los Deslizamientos. La distribución espacial de los deslizamientos se aborda mediante el uso de modelos de propensión a Procesos de Remoción en Masa. Básicamente, se basa en analizar factores causales individuales, pero también cuantificar su influencia acumulativa a nivel de pixel. Finalmente, cada factor contribuye a un índice global que refleja el nivel de susceptibilidad de un píxel. Con el fin de estandarizar y comparar diferentes contribuciones, los valores de factores se normalizan en cambios temáticos taquigráficos bajo un rango uniforme de 0 a 1. Como resultado, la visualización gráfica siempre es comparable y coherente para almacenar los datos y, en última instancia, proporcionar un número potencialmente ilimitado de capas de factores, que forman un modelo final mucho más consolidado. Además de los factores, también se analizan factores causales empleadas para el procesamiento como la erosión potencial categorizada en 5 escalas

de aportación de muy inferior a muy alto. Si el cálculo inicial usa otras variables como contribuyentes potenciales graves al modelo, esto podría contar con un número significativamente mayor de capas, que todavía serían visibles al mismo tiempo. (Romero y Vázquez, 2019)

2.1.2.3. Ubicación geográfica. La ubicación geográfica, es entendida como la posición específica de un lugar en el plano terrestre, constituye un aspecto fundamental para el análisis y gestión territorial. Esta posición se determina mediante coordenadas espaciales que, cuando son empleadas en conjunto con sistemas de referencia precisos, permiten un mapeo exacto y confiable del espacio. El sistema de coordenadas UTM fundado en el elipsoide WGS 84 es un estándar ampliamente utilizado, ya que proporciona una representación uniforme de cualquier punto del globo y facilita la integración de datos obtenidos desde diversas fuentes, como imágenes fotogramétricas o registros de estaciones de rastreo permanente (Plasencia, 2021).

2.1.2.4. Factores Condicionantes y Desencadenantes. Los factores condicionantes son elementos inherentes al entorno que determinan la predisposición del área a eventos como desplazamientos de masa terrestres. Entre estos, los factores geológicos incluyen la composición litológica de las rocas, que afecta su dureza y resistencia; la disposición estratigráfica, que influye en la estabilidad según la inclinación y el espesor de los estratos; y el comportamiento geodinámico del suelo, que abarca características como cohesión y deformabilidad. Asimismo, los factores geomorfológicos, tales como pendientes pronunciadas, proximidad a fallas y geometría de taludes, configuran las condiciones físicas que predisponen un área al riesgo de deslizamientos y otros fenómenos naturales (Moreno, 2023).

Por su parte, los factores desencadenantes son aquellos eventos o condiciones externas que provocan el inicio de movimientos en masa. Estos incluyen fenómenos naturales como lluvias intensas, que saturan los suelos y debilitan sus propiedades mecánicas; sismos, que

inducen vibraciones y deformaciones en las laderas; y variaciones de temperatura que afectan la cohesión del terreno. Además, actividades humanas como deforestación, excavaciones inadecuadas, sobrecargas de materiales en zonas inestables y un manejo eficiente del agua agravan la vulnerabilidad, desencadenando procesos erosivos y fallas estructurales en el terreno (Moreno, 2023).

2.1.2.5. Pendiente del terreno en la ocurrencia de deslizamientos. La pendiente del terreno, un parámetro geomorfológico obtenido a partir de un modelo digital de elevación, representa la inclinación del terreno respecto a una línea horizontal. Este valor se expresa en grados, radianes o como un porcentaje, y describe la máxima variación del relieve en relación con el vector tangente a la superficie. En términos geométricos, la pendiente indica el ángulo de declive respecto a la horizontal y dicho vector, proporcionando información crucial sobre la forma y la inclinación de las laderas. Este parámetro es fundamental en estudios de susceptibilidad a deslizamientos, ya que las áreas con pendientes más pronunciadas tienden a presentar mayores riesgos de inestabilidad. Así, la pendiente no solo refleja la configuración del terreno, sino que también permite analizar la propensión de una zona a eventos de deslizamiento, contribuyendo significativamente a la evaluación y gestión de riesgos naturales (Osorio, 2019)

2.1.2.6. Precipitación acumulada. De acuerdo con Tapia (2022) la precipitación, generada debido a la caída de gotas líquidas o fragmentos de hielo disuelto, resulta de procesos de condensación en atmósferas húmedas. Su origen está relacionado con el ascenso del aire cálido que, al enfriarse, no puede retener toda la humedad, generando la condensación necesaria para formar gotas de lluvia. Estas gotas, cuyo diámetro varía entre 0.7 y 5 milímetros, descienden debido a su peso y alcanzan velocidades entre 4 y 8 m/s, influenciadas por su tamaño y la acción del viento. Las formas más comunes de precipitación incluyen la lluvia por convección, producida por masas de aire cálido que ascienden, la lluvia

orográfica, provocada por el encuentro del aire con barreras montañosas, y la lluvia frontal, resultado del choque de corrientes de aire cálido y frío.

En Perú, la medición de la precipitación se realiza mayoritariamente con pluviómetros Hellmann, que permiten recolectar y medir el agua acumulada de forma precisa. Este dispositivo cuenta con un receptor que dirige las gotas hacia un recipiente colector protegido para evitar evaporación, y las lecturas se toman dos veces al día, siguiendo estándares internacionales. Las mediciones así obtenidas son fundamentales para evaluar la distribución y acumulación de las lluvias, lo que resulta clave para la administración de recursos hídricos y el diseño de tácticas de mitigación frente a fenómenos climáticos extremos (Tapia, 2022).

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

La investigación se clasifica como de tipo aplicada, se enfoca en reconocer necesidades, problemas u oportunidades del entorno para luego emplear conocimientos y ofrecer soluciones mediante la aplicación del método científico (Hernández et al., 2014). Ello implica la aplicación de herramientas y metodologías científicas para resolver un problema concreto relacionado con la gestión de riesgos y desastres naturales.

3.1.1. *Diseño*

El diseño de la investigación es no experimental. Esto implica que las variables no son manipuladas de manera deliberada, sino que se observan tal como ocurren en el entorno natural, utilizando datos secundarios como las imágenes satelitales y otros registros existentes. Este tipo de diseño es adecuado para estudios descriptivos y correlacionales en los que se desea analizar patrones y relaciones sin intervenir directamente en las condiciones del fenómeno (Hernández et al., 2014).

3.2. Población y muestra

3.2.1. *Población y muestra*

Hace mención al grupo integral de sujetos, eventos o elementos que comparten características comunes y forman el núcleo del estudio (Vizcaíno et al., 2023). La población estuvo conformada por la cuenca del río Jequetepeque.

Respecto a la muestra, se conceptualiza como un conjunto parcial elegido de individuos, sucesos o elementos tomados de una población integral o conjunto total, con el objetivo de ejecutar una investigación y obtener conclusiones aplicables a dicha población

(Vizcaíno et al., 2023). Para la muestra se consideró un tramo de la cuenca del río Jequetepeque, es una muestra por conveniencia.

3.2.2. *Criterios de Inclusión y Exclusión*

Tabla 3

Criterios de Selección

INCLUSIÓN	EXCLUSIÓN
Cuenca del río Jequetepeque	Zonas fuera de la cuenca del río Jequetepeque
Regiones con imágenes accesibles y de buena resolución temporal y espacial	Áreas con imágenes incompletas, con alta nubosidad o baja resolución
Sectores con reportes históricos de deslizamientos documentados	Áreas sin registros o sin evidencia de deslizamientos
Áreas con cambios topográficos significativos que influyen en la ocurrencia de deslizamientos	Zonas sin variaciones relevantes en la morfología del terreno
Regiones con investigaciones antecedentes sobre deslizamientos o riesgos naturales	Áreas sin estudios o sin antecedentes que permitan un análisis comparativo

Nota: Elaboración propia

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 4

Cuadro de análisis de variación espacial

Imágenes satelitales Sentinel-2 para el análisis de variación espacial de deslizamientos en la cuenca río Jequetepeque, Cajamarca		
VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
Variable independiente: Imágenes satelitales Sentinel-2	Resolución espacial	- Tamaño mínimo de píxel detectable (10 m y 20 m)
	Frecuencia de captura	- Frecuencia de adquisición de imágenes (2020 - 2024) - Comparación multitemporal (2020 - 2024)
	Precisión de monitoreo	- Precisión en la delimitación de áreas afectadas
Variable dependiente: Análisis de variación espacial de deslizamientos	Extensión de áreas afectadas	- Superficie deslizada (ha) - Pérdida de elevación o cota - Volumen estimado afectado por movimiento
	Distribución espacial	- Áreas afectas por deslizamiento - Densidad espacial de ocurrencias - Proximidad a vías o centros poblados
	Factores condicionantes	- Pendiente del terreno (% o °)
		- Orientación (exposición de ladera) - Tipo de cobertura previa (vegetación, suelo desnudo)

Nota: Elaboración propia

3.4. Instrumentos

Técnica: Observación Directa

Instrumento: Ficha de observación

3.4.1. Ficha de recolección de datos

En la investigación, la ficha de recolección de datos funciona como un instrumento para registrar, clasificar y ordenar la información específica de manera estructurada y precisa, con el objetivo de facilitar su análisis posterior.

Tabla 5*Cuadro de la ficha de observación*

Ítem	Descripción / Registro
Pendiente del terreno	___ ° (Grados)
Tipo de suelo	<input type="checkbox"/> Arenoso <input type="checkbox"/> Arcilloso <input type="checkbox"/> Franco <input type="checkbox"/> Roca meteorizada <input type="checkbox"/> Otros: _____
Cobertura vegetal según imágenes Sentinel-2	<input type="checkbox"/> Bosque <input type="checkbox"/> Matorral <input type="checkbox"/> Cultivos <input type="checkbox"/> Expuesto <input type="checkbox"/> Otros: _____
Presencia de grietas o zonas inestables (según análisis satelital y campo)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Evidencia de erosión o pérdida de suelo	<input type="checkbox"/> Leve <input type="checkbox"/> Moderada <input type="checkbox"/> Alta
Historial de deslizamientos en la zona (según reportes y análisis Sentinel-2)	<input type="checkbox"/> Sin antecedentes <input type="checkbox"/> Recientes <input type="checkbox"/> Frecuentes
Uso del suelo	<input type="checkbox"/> Urbano <input type="checkbox"/> Agrícola <input type="checkbox"/> Ganadero <input type="checkbox"/> Minero <input type="checkbox"/> Otros: _____

Nota: Elaboración propia**Tabla 6***Cuadro de ficha de registro*

Factor	Registro
Precipitación acumulada en la zona (últimos 30 días)	_____ mm
Presencia de filtraciones de agua identificadas en imágenes Sentinel-2	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Actividad sísmica reciente en la zona	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Deforestación detectada en imágenes satelitales	<input type="checkbox"/> Leve <input type="checkbox"/> Moderada <input type="checkbox"/> Alta
Infraestructura cercana a zonas de deslizamiento	<input type="checkbox"/> Viviendas <input type="checkbox"/> Carreteras <input type="checkbox"/> Puentes <input type="checkbox"/> Otros: _____

Nota: Elaboración propia

Tabla 7*Cuadro de ficha de estado de afectación*

Elemento	Estado de afectación
Viviendas afectadas	<input type="checkbox"/> Leve <input type="checkbox"/> Parcial <input type="checkbox"/> Destrucción total
Infraestructura vial	<input type="checkbox"/> Sin daño <input type="checkbox"/> Afectada <input type="checkbox"/> Intransitable
Áreas agrícolas impactadas	<input type="checkbox"/> Sin daño <input type="checkbox"/> Pérdidas moderadas <input type="checkbox"/> Pérdidas severas
Sistemas de agua y saneamiento	<input type="checkbox"/> Operativo <input type="checkbox"/> Afectado <input type="checkbox"/> No operativo

Nota: Elaboración propia

3.5. Procedimientos

Delimitación del área de estudio

- Identificar y recopilar información cartográfica de la cuenca del río Jequetepeque.

- Definir coordenadas UTM para la delimitación precisa del área de estudio.

- Utilizar software SIG (ArcGIS o QGIS) para trazar los límites de la cuenca.

- Determinar zonas críticas con historial de deslizamientos, basándose en reportes y estudios previos.

Recopilación de imágenes satelitales Sentinel-2

- Acceder a la plataforma Copernicus Open Access Hub.

- Filtrar y descargar imágenes recientes, priorizando aquellas libres de nubosidad.

- Asegurarse de que las imágenes seleccionadas posean la mayor resolución espacial y temporal disponible (10-20 m).

- Registrar metadatos asociados a las imágenes descargadas (fecha, resolución, bandas espectrales).

Preprocesamiento de imágenes satelitales

- Realizar correcciones geométricas para alinear las imágenes a un sistema de coordenadas preciso.
- Ejecutar correcciones atmosféricas para eliminar distorsiones causadas por la atmósfera (uso de Sen2Cor u otro complemento de ArcGIS).
- Recortar las imágenes satelitales al área de estudio previamente delimitada.
- Validar la calidad radiométrica y geométrica de las imágenes preprocesadas.

Cálculo e interpretación de índices espectrales

- Calcular el NDVI para analizar la salud y extensión vegetal en las zonas de la investigación.
- Calcular el NBR para identificar áreas perturbadas que podrían estar asociadas a procesos de deslizamiento.
- Calcular el NDWI para examinar la humedad del suelo y masas hídricas cercanos, posibles detonantes de deslizamientos.
- Analizar los resultados de los índices para identificar patrones de inestabilidad en el terreno.

Integración y análisis de modelos digitales de elevación (DEM)

- Descargar y procesar modelos digitales de elevación para la cuenca del río Jequetepeque.
- Analizar la pendiente del terreno para identificar zonas susceptibles a deslizamientos.

- Evaluar características geomorfológicas, como orientación de laderas y altitud, relacionadas con la ocurrencia de deslizamientos.

- Integrar el DEM con los índices espectrales calculados en un entorno SIG.

Análisis multitemporal

- Comparar imágenes satelitales de diferentes periodos (2018-2024) para detectar variaciones espaciales y temporales.

- Identificar cambios en la cobertura del suelo y cuerpos de agua asociados a eventos de deslizamientos.

- Aplicar técnicas de clasificación supervisada (p. ej., Máxima Verosimilitud) para categorizar zonas afectadas.

- Implementar algoritmos de aprendizaje profundo (como redes neuronales convolucionales) para optimar la detección automatizada de deslizamientos.

Evaluación de factores condicionantes y desencadenantes

- Analizar precipitaciones acumuladas en la cuenca, utilizando datos meteorológicos históricos y actuales.

- Relacionar la pendiente del terreno con la periodicidad y dimensión de deslizamientos identificados.

- Examinar el cambio en el uso del suelo (deforestación, agricultura, urbanización) que podría aumentar el riesgo de deslizamientos.

- Integrar todos los factores analizados en un sistema de información geográfica (SIG) para una evaluación espacial completa.

Validación de resultados

- Comparar los resultados obtenidos con registros históricos de deslizamientos proporcionados por instituciones locales.
- Realizar validaciones de campo en zonas accesibles para verificar la precisión de los deslizamientos detectados.
- Ajustar los modelos de clasificación y detección en función de los resultados de validación obtenidos.

Generación de mapas temáticos

- Elaborar mapas temáticos que evidencien la distribución espacial de los deslizamientos detectados.
- Generar mapas de variación temporal que muestren cómo se han modificado las áreas afectadas a lo largo del tiempo.
- Elaborar informes técnicos que incluyan interpretaciones geospaciales, estadísticas descriptivas y recomendaciones para la gestión del riesgo.
- Presentar los resultados a instituciones locales para su posible aplicación en estrategias de prevención y mitigación.

3.6. Análisis de datos

El procesamiento de datos empleó teledetección y análisis geoespacial, utilizando imágenes Sentinel-2 preprocesadas en ArcGIS para correcciones geométricas y atmosféricas. Se generó índices espectrales (NDVI, NBR, NDWI) y se integró modelos digitales de elevación (DEM) para evaluar pendientes y geomorfología. El análisis multitemporal, con algoritmos Random Forest y aprendizaje profundo, permitió detectar deslizamientos con precisión. Finalmente, los datos fueron integrados en SIG para analizar la distribución de deslizamientos, precipitación, cambios en el uso del suelo y pendiente del terreno.

El procesamiento de datos requiere un análisis estadístico inferencial, adecuado al enfoque explicativo de la investigación, con el objetivo de contrastar los datos cuantitativos de manera rigurosa. Para ello, se aplicó pruebas de normalidad, lo que permitió evaluar la distribución de la data y determinar la técnica de evaluación más apropiada. En función de los descubrimientos, se usó la prueba T-Student para datos paramétricos o la prueba Wilcoxon en el supuesto de que la data no cumpla con una distribución normal, garantizando así la validez de los resultados obtenidos.

3.7. Consideraciones éticas

En esta investigación las consideraciones éticas del estudio se fundamentaron en el respeto a la integridad de los datos y el uso responsable de la información obtenida. Se garantizó el acceso a fuentes confiables y el cumplimiento de principios de transparencia y veracidad en el tratamiento de imágenes satelitales, asegurando que su uso se realice exclusivamente con fines científicos y sin vulnerar derechos de privacidad o propiedad intelectual. Asimismo, se promueve la imparcialidad en el examen y la exégesis de resultados, evitando cualquier sesgo que podría afectar la exactitud de los descubrimientos. Se respetan las normativas éticas de investigación establecidas por las instituciones académicas y científicas correspondientes.

IV. RESULTADOS

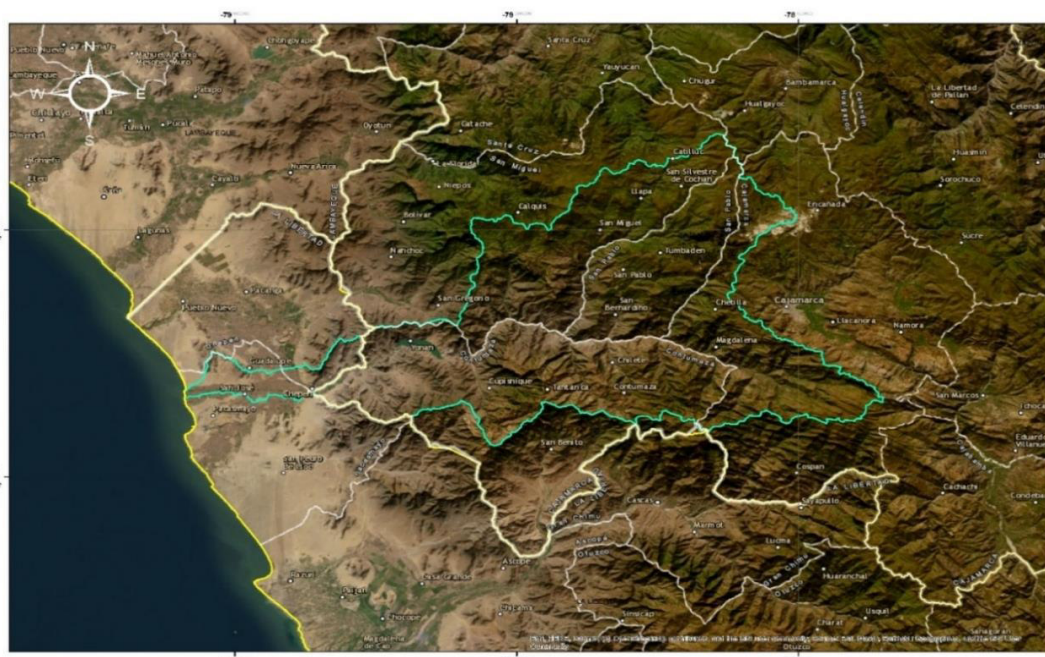
4.1. Área de Estudio

Se reporta que el río Jequetepeque, situado en el departamento de Cajamarca, ha experimentado un aumento en su caudal como resultado de las fuertes lluvias en la zona (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2019).

Este enfoque se centra en el inventario y la cartografía meticulosa de peligros geológicos, abarcando la identificación de ocurrencias de movimientos en masa como derrumbes, deslizamientos, huaycos, reptación de suelos y otros fenómenos complejos, además de zonas impactadas por erosión e inundaciones fluviales y marinas, así como la erosión de laderas y el arenamiento. También se evalúan los centros urbanos y las infraestructuras expuestas a estos peligros geológicos, identificando las áreas críticas (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico [INGEMMET], 2006).

Figura 1

Cuenca del río Jequetepeque

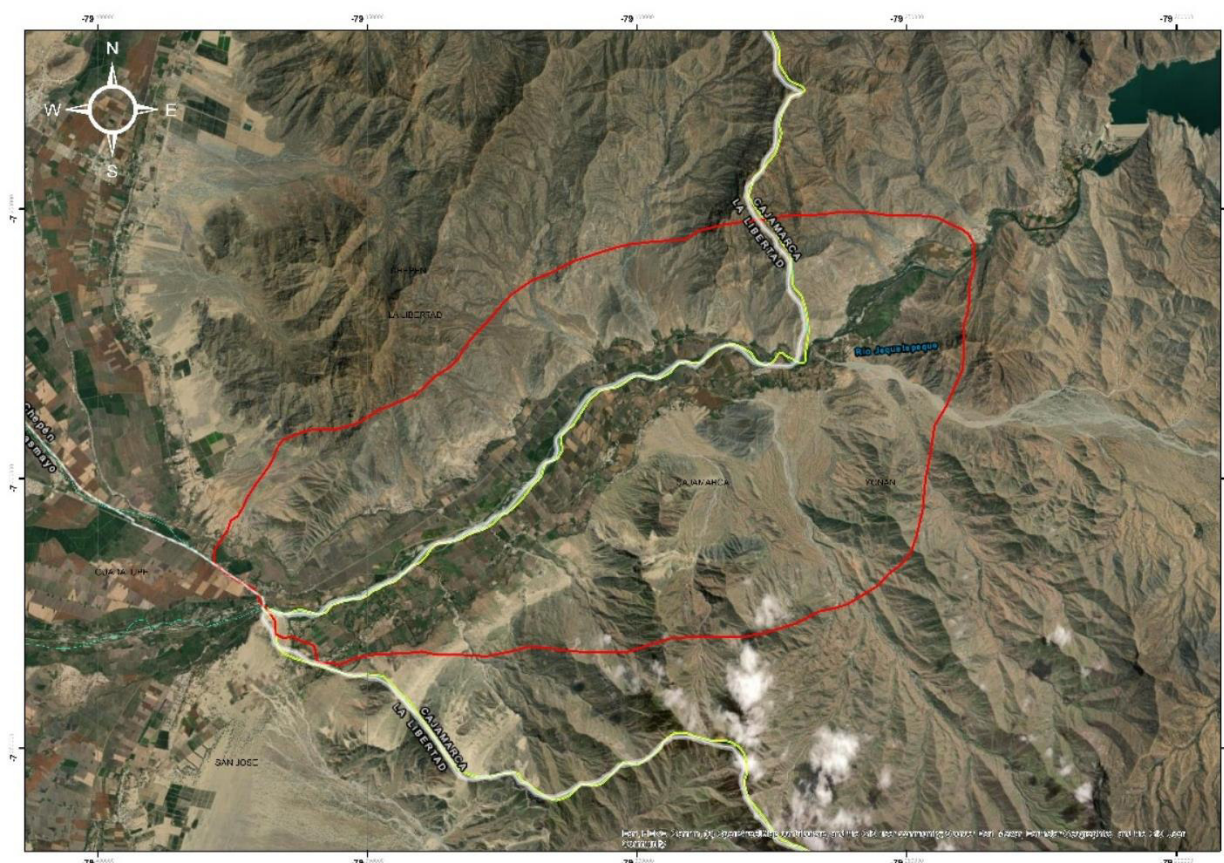


Nota: Tomado de ArcGIS

La cuenca del río Jequetepeque se extiende entre las regiones de La Libertad y Cajamarca, con un área total de 1205.95 km²; el área de estudio se focaliza en los distritos de Yonán y Chepén, conocida como la zona El Huabal, zonas recurrentemente afectadas por deslizamientos inducidos por precipitaciones intensas. El área de estudio es de 252 009 m².

Figura 2

Delimitación del área de estudio



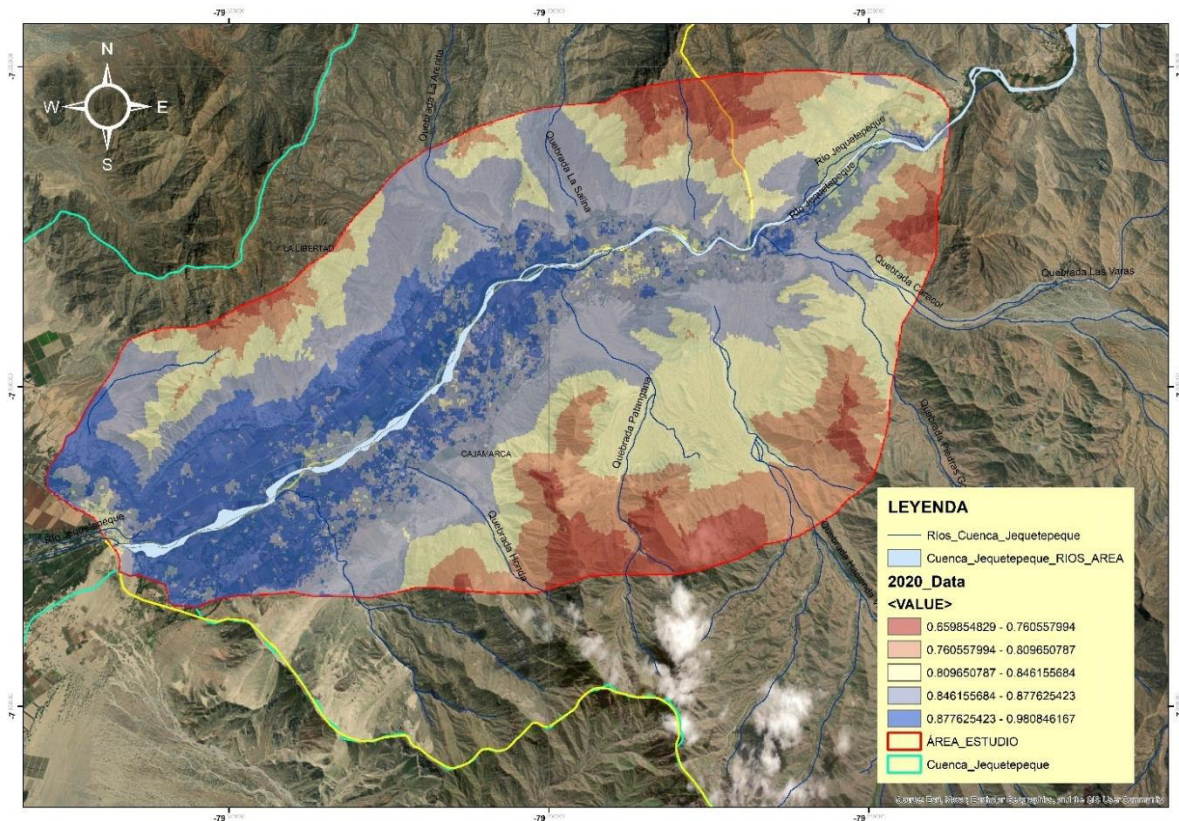
Nota: Tomado de ArcGIS – Imagen satelital SENTINEL-2

El área de estudio abarca un tramo del río Jequetepeque e incluye las quebradas Honda, Caracol, Patangana, La Salina y Arenita, las cuales representan zonas críticas por su alta predisposición a deslizamientos de tierra. La longitud del río es de 12.8 kilómetros se encuentra entre los 160 y los 254 m.s.n.m.

4.2. Análisis Espacial

Figura 5

Vista satelital del desplazamiento espacial 2020



Nota: Tomado de ArcGIS

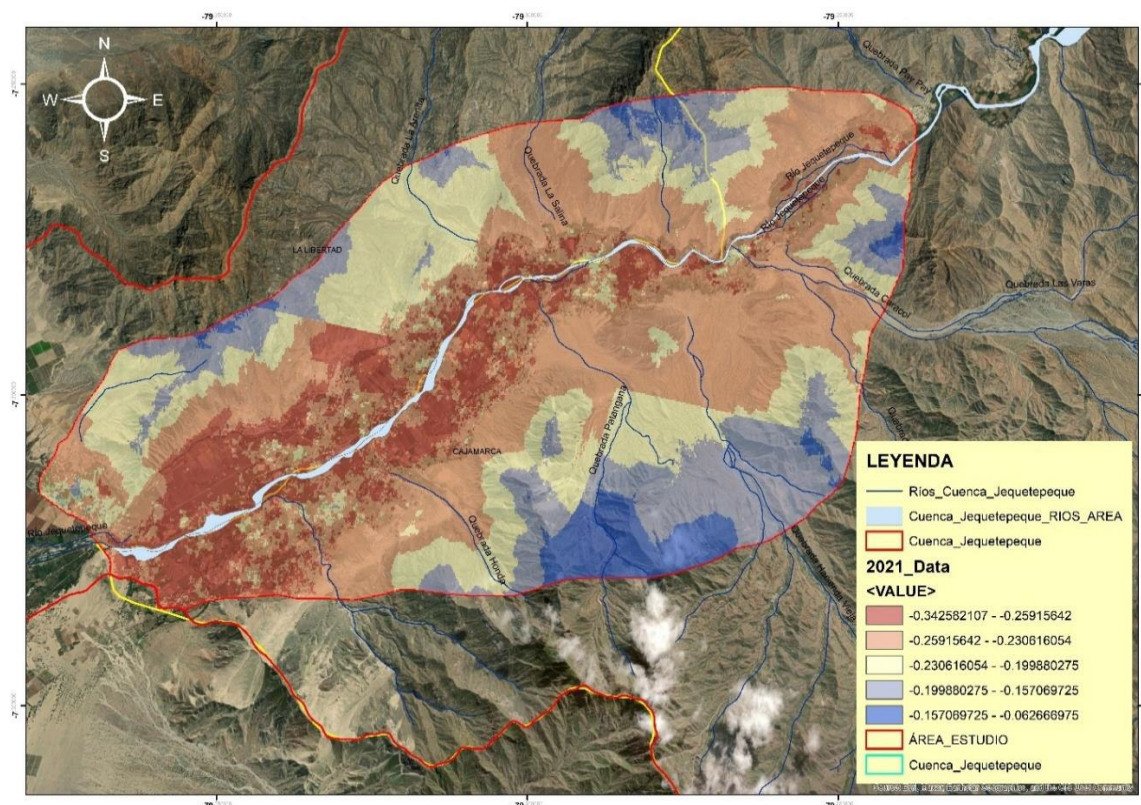
La imagen satelital muestra la cuenca del río Jequetepeque, con énfasis en la zona de El Huabal, sobre la cual se ha aplicado un análisis de desplazamiento superficial correspondiente al año 2020. Los valores expresados en metros representan la magnitud del deslizamiento de tierras, donde se observa una mayor variabilidad espacial al interior del área delimitada en rojo (área de estudio). Las zonas con tonalidades rojas y marrones indican los desplazamientos más elevados, con valores que superan los 0.98 metros, lo que sugiere una mayor inestabilidad del terreno.

En contraste, las zonas azules presentan desplazamientos mínimos (inferiores a 0.76 metros), lo cual indica condiciones más estables en esos sectores. La acumulación de

desplazamientos más intensos se concentra a lo largo de las quebradas principales como la de Pampa Grande y la de Chirimoyo, zonas propensas a movimientos de masa terrestre.

Para la evaluación geoespacial, se trabajó con imágenes satelitales de alta resolución descargadas desde la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem, aplicando criterios de selección relacionados con cobertura orbital, calidad de imagen y condiciones atmosféricas. La fuente principal fue el sensor SENTINEL-2, proveniente de la plataforma S2C, recientemente integrada al sistema satelital. Se delimitaron órbitas relativas dentro del rango 10 a 22, con el objetivo de obtener productos que garanticen continuidad espacial y precisión temporal en la zona de investigación.

El tratamiento de la data fue realizado mediante el procesador estándar de la ESA, que permite generar productos validados bajo la clasificación Collection 1. Se priorizó la disponibilidad inmediata de los datos, lo cual facilitó una descarga rápida y adecuada para fines analíticos. El periodo de observación se centró en el año 2021, empleando imágenes con un nivel de nubosidad menor o igual al 10%, lo que aseguró una interpretación confiable del comportamiento superficial del terreno en las condiciones requeridas.

Figura 6*Vista satelital del desplazamiento superficial 2021*

Nota: Tomado de ArcGIS

La figura representa el análisis de desplazamiento superficial registrado en la cuenca del río Jequetepeque, con foco en la zona de El Huabal, para el año 2021, a partir de imágenes satelitales procesadas. Los valores, expresados en metros, indican el nivel de desplazamiento negativo acumulado, lo que evidencia procesos de deslizamiento o subsidencia del terreno. Las áreas en tonalidades marrones y rojas reflejan los mayores desplazamientos, con valores cercanos a 0.34 metros, lo que señala sectores con una alta susceptibilidad a movimientos de masa, especialmente próximos al cauce principal y a las quebradas activas como Pampa Grande y Chetillano.

En contraste, las zonas con tonalidades azules presentan desplazamientos menos significativos, con valores cercanos a 0.06 metros, lo cual sugiere mayor estabilidad geodinámica. La distribución espacial de estos valores permite identificar patrones de

acumulación de tensiones en el terreno, útiles para establecer zonas críticas y priorizar acciones de monitoreo o mitigación.

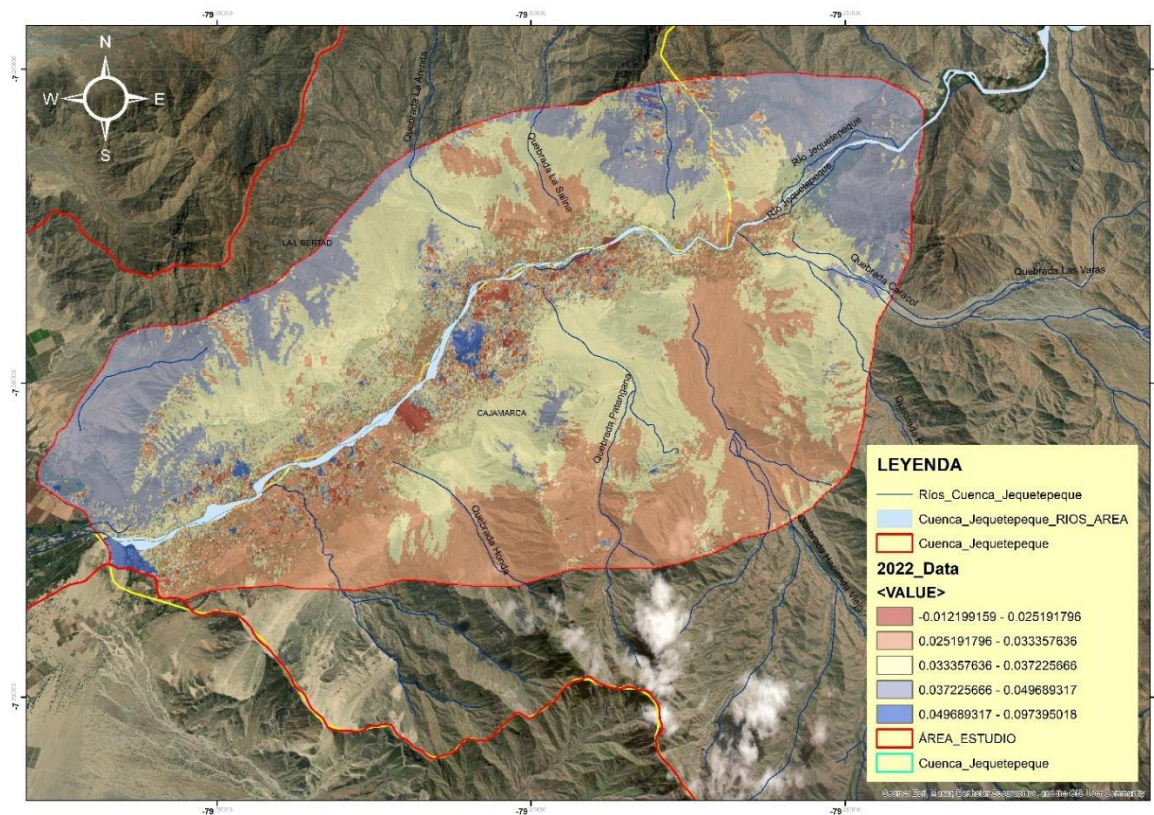
El periodo de observación se centró en el año 2022, utilizando imágenes con un porcentaje de nubosidad menor o igual al 10%, lo que permitió asegurar condiciones adecuadas para una interpretación precisa del comportamiento superficial del terreno. Las imágenes satelitales utilizadas fueron descargadas desde la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem, bajo criterios de selección relacionados con cobertura orbital, calidad espacial y condiciones atmosféricas.

El sensor empleado fue SENTINEL-2, específicamente desde la plataforma S2C, recientemente incorporada al sistema satelital europeo. Se estableció un rango de órbitas relativas entre 10 y 22, con el fin de garantizar continuidad espacial y precisión temporal sobre la zona de estudio.

La manipulación de los datos se efectuó por medio del procesador oficial de la ESA, que genera productos validados conforme a los estándares definidos en la Collection 1. Asimismo, se priorizó la disponibilidad inmediata de los datos, lo cual facilitó su descarga y aprovechamiento eficiente en el desarrollo del análisis geoespacial.

Figura 7

Vista satelital del desplazamiento superficial 2022



Nota: Tomado de ArcGIS

La imagen representa la distribución espacial del desplazamiento de tierras en la cuenca del río Jequetepeque, centrada en la zona de El Huabal, durante el año 2022. Los valores, expresados en metros, indican el movimiento negativo del terreno, asociado a procesos de deslizamiento o subsidencia. Las áreas con tonalidades marrones y rojas reflejan mayores desplazamientos acumulados, que alcanzan hasta 0.097 metros, ubicándose principalmente en las laderas cercanas al cauce del río y en las inmediaciones de quebradas como Pampa Grande, Chetillano y La Soledad.

Por otro lado, las zonas con tonos más claros (amarillo y beige) presentan valores de desplazamiento menores, del orden de 0.012 metros, lo que sugiere una menor inestabilidad superficial en esas áreas. En comparación con años anteriores, la dispersión espacial de los desplazamientos muestra un patrón más concentrado en sectores medios y bajos de la cuenca,

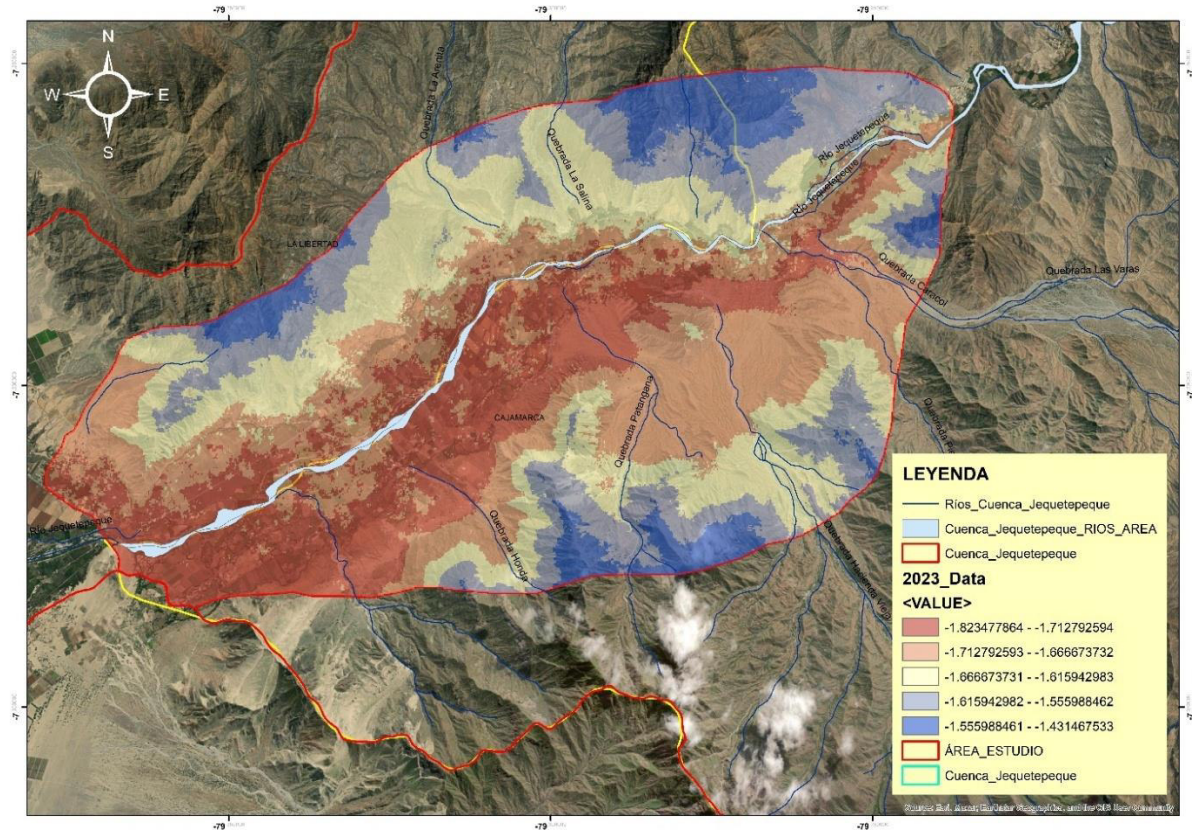
lo cual puede estar relacionado con factores hidrometeorológicos acumulados o intervenciones antrópicas recientes. Este análisis resulta útil para identificar zonas críticas y proponer medidas de mitigación o monitoreo continuo ante riesgos geodinámicos.

El análisis se centró en el año 2023, seleccionando imágenes satelitales con un nivel de nubosidad igual o menor al 10%, lo cual permitió asegurar una interpretación confiable del comportamiento superficial del terreno. Para ello, se trabajó con datos de alta resolución descargados desde la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem, utilizando criterios específicos relacionados con la calidad de imagen, cobertura orbital y condiciones atmosféricas.

La fuente principal de información fue el sensor SENTINEL-2, correspondiente a la plataforma satelital S2C, recientemente incorporada al sistema, y se definió un rango de órbitas relativas de 10 a 22 para garantizar continuidad espacial y precisión temporal en la zona de estudio. El procesamiento se realizó con el procesador estándar proporcionado por la ESA, lo que permitió generar productos validados según los lineamientos de la Collection 1. Además, se priorizó la disponibilidad inmediata de los datos, facilitando una descarga eficiente y útil para el análisis geoespacial requerido.

Figura 8

Vista satelital del desplazamiento superficial 2023



Nota: Tomado de ArcGIS

La imagen muestra el comportamiento del desplazamiento superficial del terreno en la cuenca del río Jequetepeque, con énfasis en la zona de El Huabal, durante el año 2023. Los valores, expresados en metros negativos, reflejan movimientos descendentes del terreno, asociados a procesos de deslizamiento o hundimiento. Las zonas con tonalidades rojas y marrones, que presentan los valores más bajos (hasta -1.82 metros), evidencian sectores de alta inestabilidad geodinámica, ubicados principalmente en las zonas medias y bajas de la cuenca, especialmente cerca del cauce principal y en torno a quebradas como Pampa Grande, La Soledad y Chetillano.

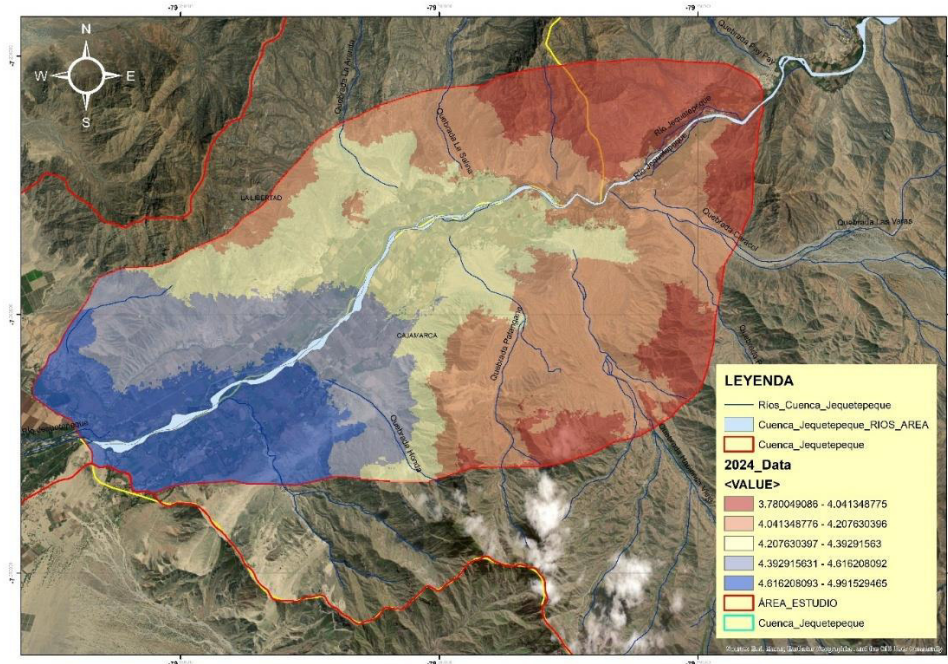
Las áreas representadas con colores azules, con valores menos negativos (alrededor de -1.43 metros), indican un desplazamiento relativamente menor, aunque siguen mostrando signos de afectación.

Para el desarrollo del análisis geoespacial, se utilizaron datos de alta resolución descargados desde la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem, aplicando criterios de selección enfocados en la calidad de imagen, cobertura orbital y condiciones atmosféricas. La fuente principal fue el sensor SENTINEL-2, perteneciente a la plataforma satelital S2C, recientemente incorporada a la constelación, estableciéndose un rango de órbitas relativas de 10 a 22 para asegurar continuidad espacial y precisión temporal en la zona de estudio.

El tratamiento de las imágenes se realizó utilizando el procesador oficial de la ESA, permitiendo la generación de productos validados conforme a los estándares definidos en la Collection 1. Se priorizó además la disponibilidad inmediata de los datos, lo que facilitó una descarga oportuna y adecuada para los fines analíticos del estudio. Finalmente, el análisis se centró en el año 2023, considerando imágenes con un nivel de nubosidad menor o igual al 10%, lo que garantizó una interpretación confiable del comportamiento superficial del terreno.

Figura 9

Vista satelital del desplazamiento superficial 2024



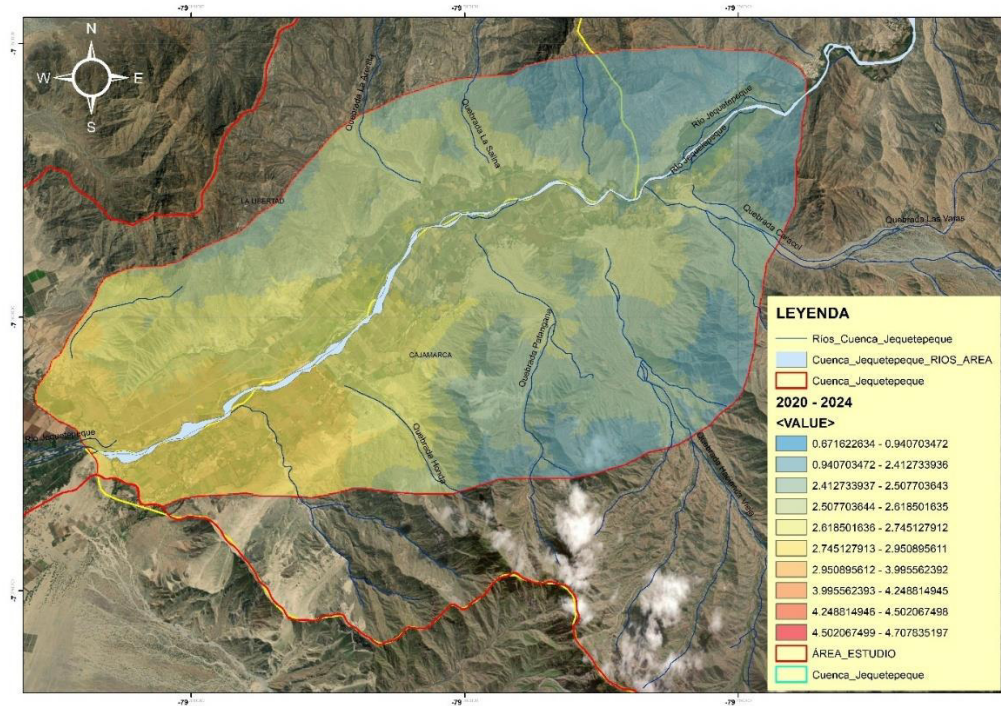
Nota: Tomado de ArcGIS

La imagen presenta el análisis del desplazamiento superficial acumulado en la cuenca del río Jequetepeque, con énfasis en la zona de El Huabal, durante el año 2024. Los valores, expresados en metros positivos, indican movimientos del terreno en dirección ascendente, asociados posiblemente a procesos de acomodación topográfica, restitución superficial o interferencias técnicas en la detección satelital. Las áreas en tonalidades rojas y marrones muestran los valores más altos, con desplazamientos que oscilan entre 3.78 y 4.99 metros, concentrados en las partes altas y medias de la cuenca, especialmente en los alrededores de quebradas como Las Varas, La Soledad y Chirimoyo. En contraste, las zonas en tonalidades azules reflejan valores más bajos (entre 3.78 y 4.07 metros), ubicadas principalmente en los sectores suroeste de la cuenca.

Este patrón espacial sugiere una posible acumulación diferencial de material o variaciones en la deformación del terreno, lo cual requiere verificación en campo para descartar o confirmar fenómenos como levantamientos locales, subsidencias compensadas o errores sistemáticos de captura.

Figura 10

Vista satelital del desplazamiento superficial durante el periodo 2020-2024



Nota: Tomado de ArcGIS

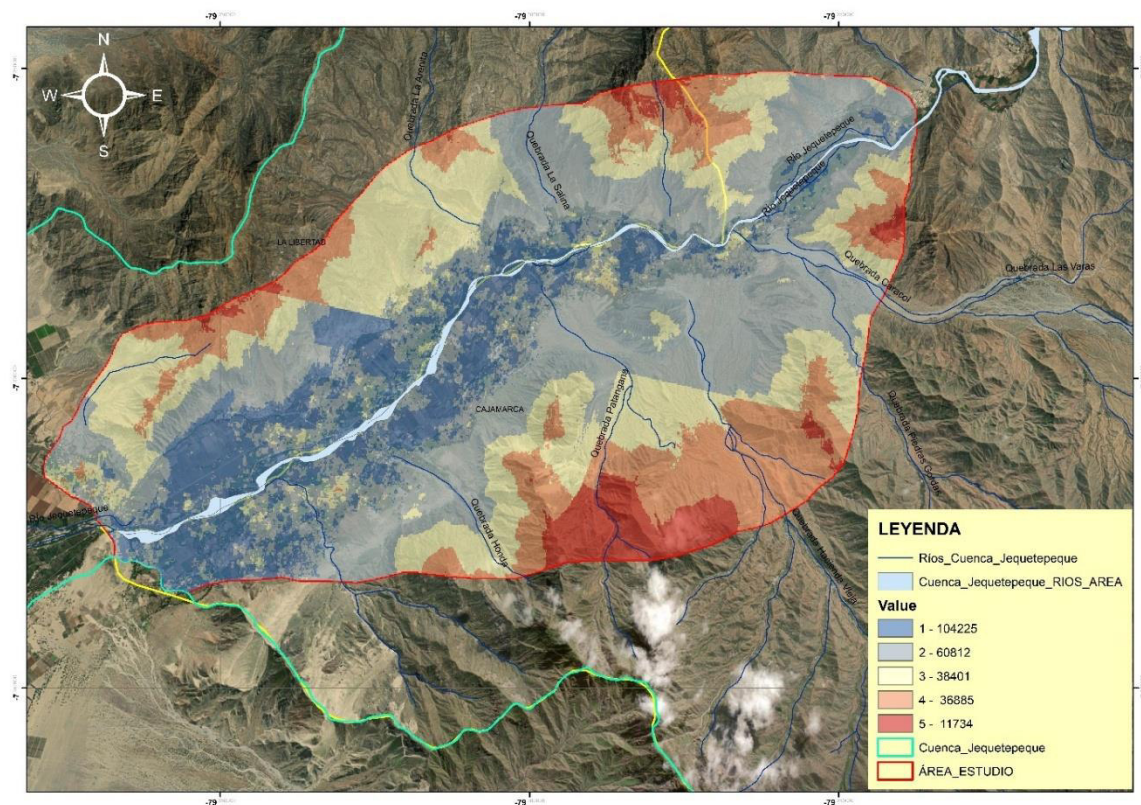
La imagen representa la acumulación de desplazamiento superficial en la cuenca del río Jequetepeque, con foco en la zona de El Huabal, durante el periodo 2020–2024, en base a datos satelitales procesados. Los valores, expresados en metros, reflejan el comportamiento del terreno a lo largo de estos años, permitiendo identificar zonas con mayor o menor desplazamiento. Las zonas en tonalidades rojas y naranjas muestran los valores más elevados de desplazamiento positivo, alcanzando hasta 4.70 metros, lo que podría indicar procesos activos de deslizamiento o acumulación significativa de masa en áreas críticas, como las cercanías de las quebradas Chirimoyo, Pampa Grande y La Soledad. Estas zonas presentan mayor susceptibilidad a eventos geodinámicos recurrentes.

En cambio, las zonas en tonos azules y celestes presentan valores más bajos o negativos, que van desde 0.67 hasta 0.94 metros, indicando áreas con menor deformación o incluso una ligera subsidencia. Estos valores también podrían reflejar zonas más estables o con menor acumulación de agua y carga.

desplazamiento y superficie afectada. Las zonas en tonos marrones (valor 5) concentran los mayores desplazamientos, con un área de 85,550 m², localizadas principalmente en los sectores noreste y sureste de la cuenca. Las zonas azules (valor 4) cubren 63,528 m² y se distribuyen a lo largo del cauce principal, mientras que las áreas intermedias en tonos beige (valor 2) y amarillo (valor 3) abarcan 37,329 m² y 48,452 m² respectivamente. Finalmente, las zonas con menor desplazamiento, en tono claro (valor 1), representan 17,150 m² y se ubican en las partes externas.

Figura 12

Vista satelital del desplazamiento superficial 2024



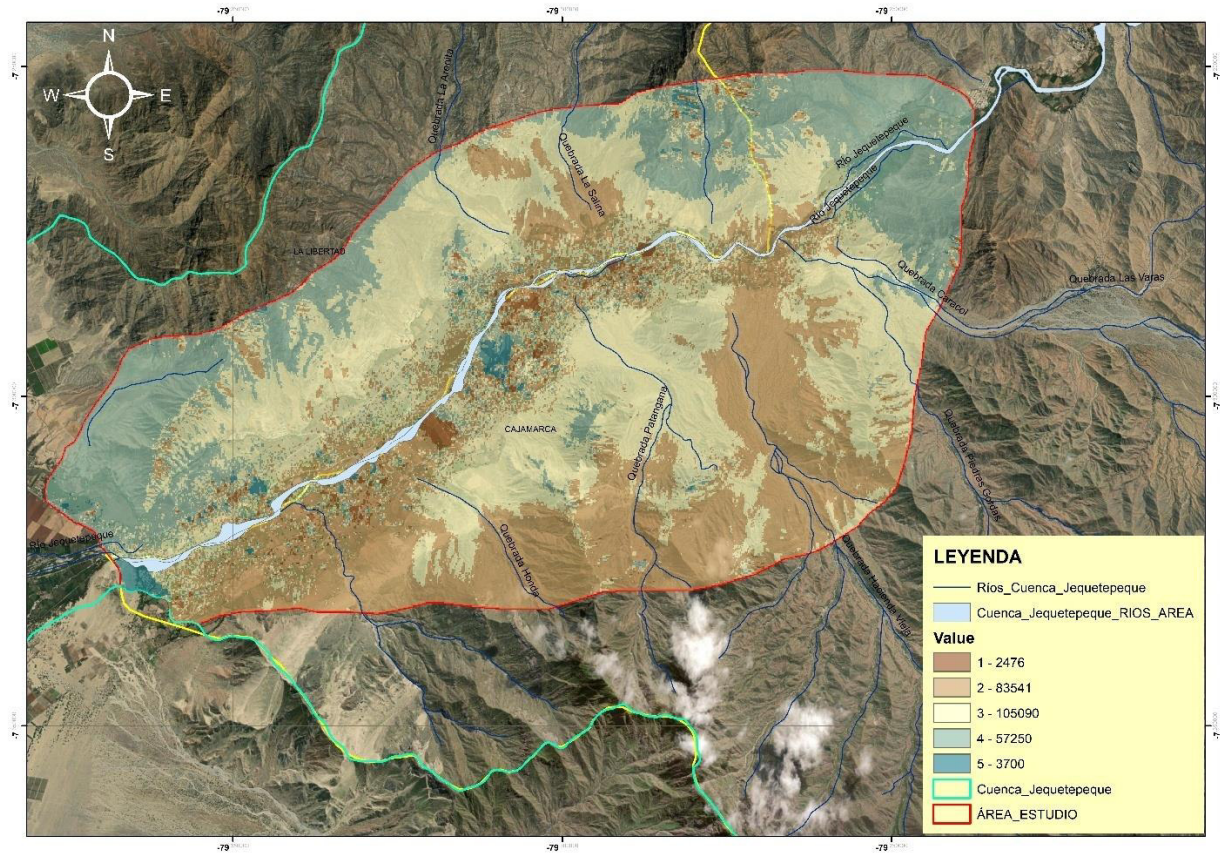
Nota: Tomado de ArcGIS

Tabla 9*Análisis de variación espacial de los deslizamientos*

Value	Count	Área (m²)
5	11,734	11,734
4	36,885	36,885
1	38,401	38,401
3	60,812	60,812
2	104,225	104,225

Nota: Elaboración propia

La figura representa la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, correspondientes a un análisis basado en cinco clases de desplazamiento diferenciadas por coloración y superficie afectada. Las zonas en color azul (valor 2) registran la mayor extensión, con 104,225 m², concentrándose principalmente en el centro-oeste de la cuenca. Le siguen las zonas beige (valor 3) con 60,812 m² y las zonas amarillas (valor 1) con 38,401 m², que se distribuyen en las áreas intermedias y próximas al cauce principal del río. Las zonas anaranjadas (valor 4) cubren 36,885 m² y se localizan en áreas elevadas y de transición. Finalmente, las zonas rojas (valor 5) representan los sectores con menor extensión, 11,734 m², asociadas a zonas de pendiente pronunciada o inestabilidad localizada.

Figura 13*Vista satelital del desplazamiento superficial 2024**Nota:* Tomado de ArcGIS**Tabla 10***Análisis de variación espacial de los deslizamientos*

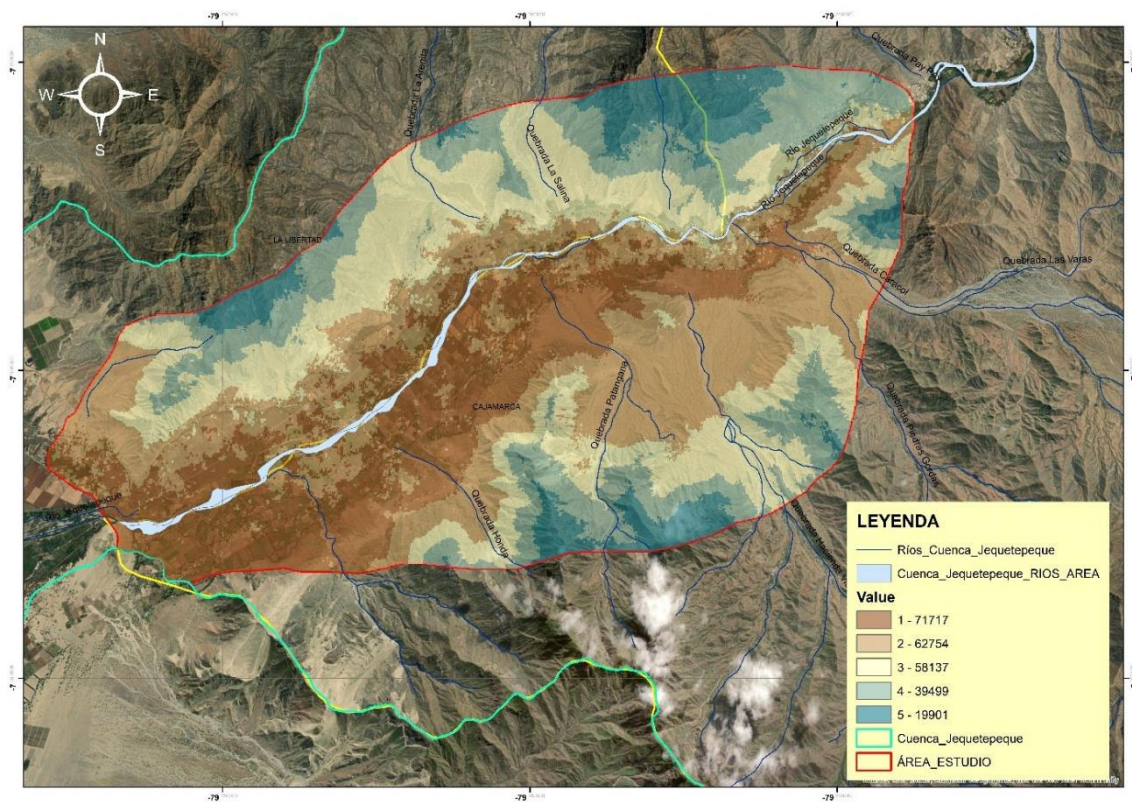
Value	Count	Área (m ²)
1	3,700	3,700
2	83,541	83,541
3	105,090	105,090
4	57,250	57,250
5	2,476	2,476

Nota: Elaboración propia

La figura representa la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, clasificada en cinco rangos diferenciados por colores según el desplazamiento registrado. La mayor extensión corresponde al valor 3, con 105,090 m², identificado en zonas de acumulación media, seguido del valor 2 con 83,541 m², distribuido en amplias áreas del centro y norte de la cuenca. El valor 4, con 57,250 m², representa áreas de desplazamiento moderado, localizadas principalmente hacia el sureste. En menor proporción, el valor 5 y el valor 1 abarcan 3,700 m² y 2,476 m² respectivamente, y se concentran en sectores puntuales, asociados a zonas de transición o laderas con condiciones de menor afectación.

Figura 14

Vista satelital del desplazamiento superficial 2024



Nota: Tomado de ArcGIS

Tabla 11*Análisis de variación espacial de los deslizamientos*

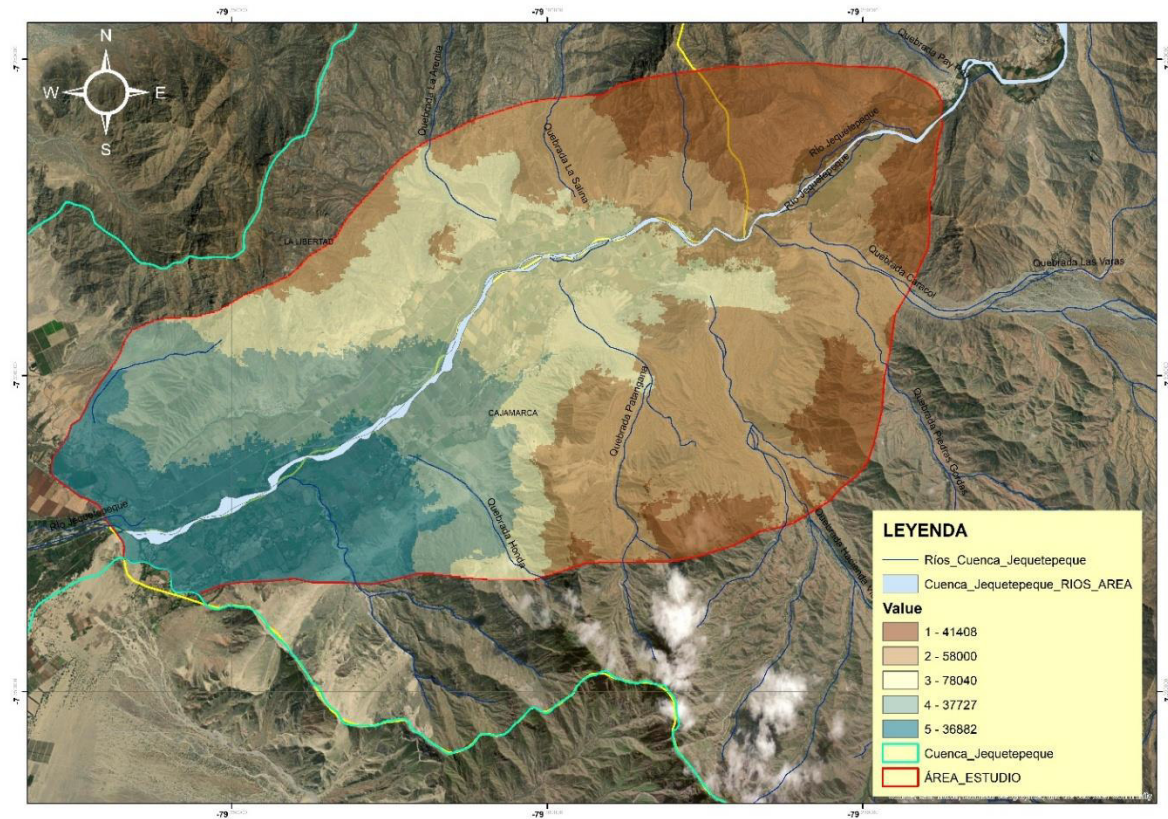
Value	Count	Área (m²)
1	58,137	58,137
2	71,717	71,717
3	62,754	62,754
4	39,499	39,499
5	19,901	19,901

Nota: Elaboración propia

La figura muestra la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, distribuidos en cinco clases diferenciadas por coloración y área afectada. La mayor extensión corresponde al valor 2 con 71,717 m², representado por zonas en tono beige claro, distribuidas principalmente en el sector norte y centro de la cuenca. Le siguen el valor 3 con 62,754 m² y el valor 1 con 58,137 m², ocupando áreas intermedias cercanas al cauce principal del río. El valor 4, con 39,499 m², se localiza en zonas puntuales del sureste, mientras que el valor 5, con 19,901 m², se encuentra en sectores más reducidos y dispersos hacia los extremos de la cuenca.

Figura 15

Vista satelital variación espacial de los deslizamientos



Nota: Tomado de ArcGIS

Tabla 12

Análisis de variación espacial de los deslizamientos

Value	Count	Área (m ²)
1	41,408	41,408
2	78,040	78,040
3	58,000	58,000
4	37,727	37,727
5	36,882	36,882

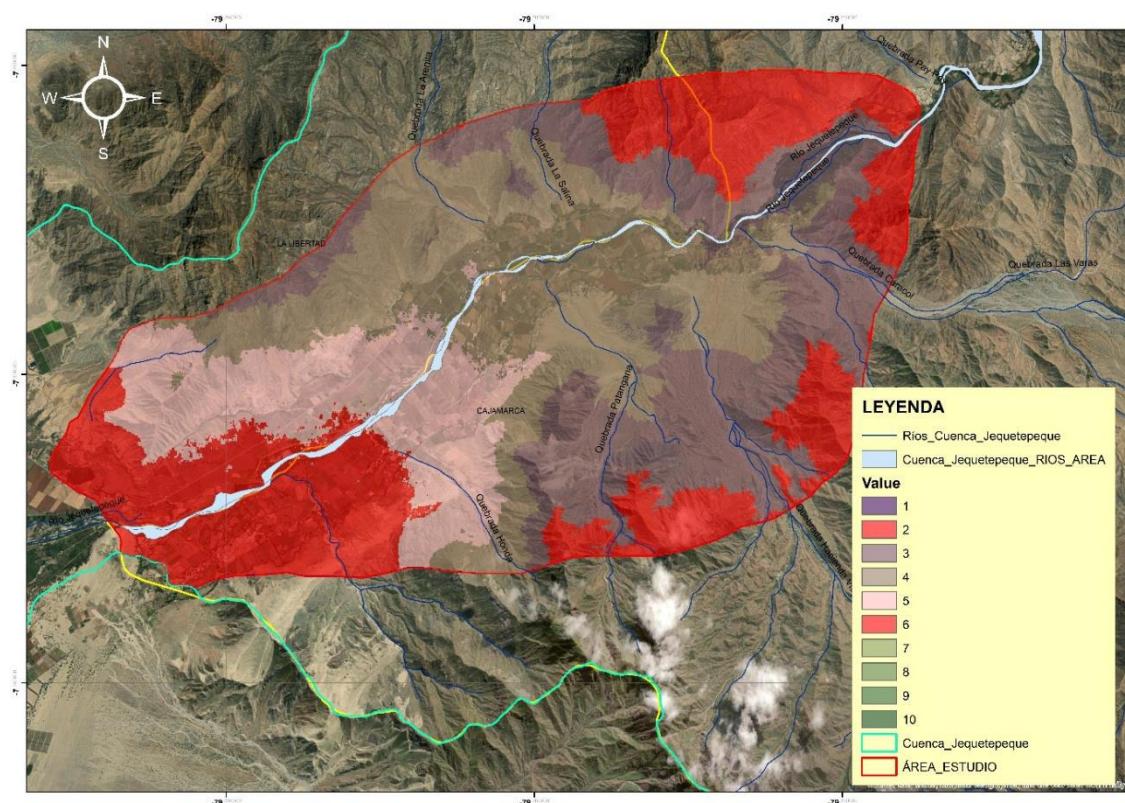
Nota: Elaboración propia

La figura muestra la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, representada mediante cinco clases diferenciadas por color y área afectada. La mayor extensión corresponde al valor 2, con 78,040 m², distribuida principalmente en la parte centro-norte de la cuenca. Le siguen el valor 3, con 58,000 m², y el valor 1, con 41,408 m², localizados en áreas intermedias cercanas al cauce principal. Las zonas con valor 4 abarcan 37,727 m², distribuidas en sectores de transición topográfica, mientras que el valor 5, con 36,882 m², aparece en áreas más localizadas hacia el suroeste.

4.4. Zonas de Mayor Ocurrencia

Figura 16

Vista satelital del análisis multitemporal



Nota: Tomado de ArcGIS

La figura muestra las zonas de mayor ocurrencia de deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, identificadas desde el inicio del análisis multitemporal de imágenes satelitales. Las zonas representadas en color rojo corresponden a los sectores donde se ha registrado un

mayor desplazamiento superficial como resultado de la variación espacial observada. Entre los años 2020 y 2024, estas áreas han mostrado una dinámica continua, con desplazamientos que oscilan entre 0.60 y 4.07 metros, reflejando cambios significativos en la superficie del terreno.

4.5. Contrastación de Hipótesis

4.5.1. Para la hipótesis específica 1

Ha: El uso de imágenes satelitales Sentinel-2 influye significativamente en la distribución del área afectada por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque durante el periodo 2020–2024.

Ho: El uso de imágenes satelitales Sentinel-2 no influye significativamente en la distribución del área afectada por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque durante el periodo 2020–2024.

Tabla 13

Pruebas de normalidad

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
DIS_2020_r1	0.161	5	,200*	0.990	5	0.980
DIS_2021_r2	0.229	5	,200*	0.912	5	0.479

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Para verificar la normalidad de los datos, se realizaron las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk sobre los promedios de las áreas de distribución correspondientes a los años 2020 (DIS_2020_r1) y 2021 (DIS_2021_r2). Debido al tamaño reducido de la muestra ($n = 6$), se considera más apropiado interpretar los resultados en función de la prueba de Shapiro-Wilk, ya que esta es más potente y adecuada para muestras pequeñas. Por tanto, se concluye que las distribuciones de los promedios en ambos periodos se ajustan a una distribución normal, lo que justifica el uso de técnicas estadísticas paramétricas.

Tabla 14*Prueba T – Student*

		Prueba de muestras emparejadas					t	g l	Sig. (bilatera l)
		Diferencias emparejadas			95% de intervalo de confianza de la diferencia				
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	Inferior	Superior			
Pa	DIS_Resol 1 -	1662851310.60	694253.23579	310479.48577	1661989281.35	1663713339.85	5355.753	4	0.000
r 1	DIS_Resol 2								

Se aplicó la prueba de t de Student para muestras emparejadas con el fin de comparar las medias de las áreas de distribución de los años 2020 al 2024 con la resolución R10 (DIS_Resol 1) y del 2020 al 2024 con la resolución R20 (DIS_Resol 2), habiéndose verificado previamente que los datos presentan distribución normal. La hipótesis nula (H_0) establece que no existen diferencias significativas entre los promedios de ambos años, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) plantea que sí existen diferencias. Los resultados muestran una diferencia media de 1,662,851,310.60, con un valor de $t = 5355.753$ y un nivel de significancia bilateral (Sig.) de 0.000, el cual es menor al umbral de $\alpha = 0.05$. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, lo cual indica que existen diferencias significativas entre los promedios comparados. Esta diferencia se atribuye a que las imágenes satelitales con resolución R10 permiten una mayor discriminación de categorías en la distribución de áreas afectadas, lo que conlleva a un análisis más detallado y preciso del fenómeno evaluado, en comparación con las imágenes de resolución R20.

4.5.2. Para la hipótesis específica 2

H_a : El uso de imágenes satelitales Sentinel-2 impacta significativamente en identificar las áreas afectadas por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque.

H_0 : El uso de imágenes satelitales Sentinel-2 impacta significativamente en identificar las áreas afectadas por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque.

Tabla 15*Pruebas de normalidad*

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
I_2020_R1	0.459	2104	0.000	0.073	2104	0.000
I_2021_R1	0.421	2104	0.000	0.166	2104	0.000
I_2022_R1	0.427	2104	0.000	0.088	2104	0.000
I_2023_R1	0.470	2104	0.000	0.041	2104	0.000
I_2024_R1	0.496	2104	0.000	0.066	2104	0.000
I_2020_R2	0.490	2104	0.000	0.008	2104	0.000
I_2021_R2	0.454	2104	0.000	0.084	2104	0.000
I_2022_R2	0.446	2104	0.000	0.096	2104	0.000
I_2023_R2	0.491	2104	0.000	0.007	2104	0.000
I_2024_R2	0.490	2104	0.000	0.008	2104	0.000

Para verificar el supuesto de normalidad en las variables correspondientes a los promedios de las áreas de distribución de los años 2020 al 2024 (rondas R1 y R2), se aplicaron las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk en SPSS. Dado el elevado tamaño muestral ($n = 2104$), se considera más apropiado interpretar los resultados de la prueba Kolmogorov-Smirnov, ya que esta es más robusta para grandes muestras. En todos los casos, los valores de significancia (Sig.) fueron inferiores a 0.05, indicando que se rechaza la hipótesis nula de normalidad para cada una de las variables analizadas.

Tabla 16*Prueba T – Student*

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	(Estadístico)	gl	Sig.	(Estadístico)	gl	Sig.
I_2020_R1	0.459	2104	0	0.073	2104	0
I_2021_R1	0.421	2104	0	0.166	2104	0
I_2022_R1	0.427	2104	0	0.088	2104	0
I_2023_R1	0.47	2104	0	0.041	2104	0
I_2024_R1	0.496	2104	0	0.066	2104	0
I_2020_R2	0.49	2104	0	0.008	2104	0
I_2021_R2	0.454	2104	0	0.084	2104	0
I_2022_R2	0.446	2104	0	0.096	2104	0
I_2023_R2	0.491	2104	0	0.007	2104	0
I_2024_R2	0.49	2104	0	0.008	2104	0

Para evaluar la normalidad de los datos, se aplicaron las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk a los promedios de las áreas de distribución correspondientes a los periodos 2020–2024, tanto en la resolución (R1) como en la resolución (R2). Dado que el tamaño muestral es elevado ($n = 2104$), se considera más adecuada la interpretación basada en la prueba de Kolmogorov – Smirnov, la cual es más robusta en muestras grandes. En todos los casos analizados, los valores de significancia (Sig.) fueron iguales a 0.000, es decir, menores al umbral de 0.05, se requiere emplear pruebas no paramétricas en los análisis estadísticos.

Tabla 17

Prueba de Wilcoxon

Estadísticos de prueba^a					
	I_2020_R2 - I_2020_R1	I_2021_R2 - I_2021_R1	I_2022_R2 - I_2022_R1	I_2023_R2 - I_2023_R1	I_2024_R2 - I_2024_R1
Z	-3,917 ^b	-17,622 ^b	-11,150 ^b	-5,214 ^b	-5,380 ^c
Sig. asintótica(bilateral)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon					
b. Se basa en rangos positivos.					
c. Se basa en rangos negativos.					

Como parte del análisis inferencial, se aplicó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas, con el fin de comparar los promedios de las áreas de distribución entre las rondas R1 y R2 de los años 2020 a 2024. Esta prueba no paramétrica fue seleccionada debido a que las variables no presentan distribución normal, según lo determinado previamente por la prueba de Kolmogorov – Smirnov. En todos los casos analizados, se obtuvieron valores de significancia asintótica bilateral (Sig. = 0.000) menores al nivel crítico de 0.05, lo que indica que se rechaza la hipótesis nula, que planteaba la inexistencia de diferencias significativas entre las rondas. En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa, lo cual se sustenta en el hecho de que la resolución R10 permite una mayor captación de detalles en las imágenes analizadas, facilitando así un procesamiento más preciso. Esta mayor precisión

se traduce en una representación más detallada y completa de las áreas afectadas, evidenciando diferencias significativas frente a resoluciones inferiores.

4.5.3. Para la hipótesis específica 3

Ha: El uso de análisis temporal de imágenes satelitales Sentinel-2 impacta significativamente en la identificación de zonas con mayor recurrencia de deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque.

Ho: El uso de análisis temporal de imágenes satelitales Sentinel-2 no impacta significativamente en la identificación de zonas con mayor recurrencia de deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque.

Tabla 18

Pruebas de normalidad 1

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Z_2020_R1	0.155	15	,200*	0.893	15	0.075
Z_2021_R1	0.164	15	,200*	0.894	15	0.076
Z_2022_R1	0.307	15	0.000	0.754	15	0.001
Z_2023_R1	0.161	15	,200*	0.933	15	0.299
Z_2024_R1	0.225	15	0.040	0.932	15	0.291

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tabla 19

Pruebas de normalidad 2

	Pruebas de normalidad		
	Kolmogorov-Smirnov ^a		Sig.
	Estadístico	gl	
Z_2020_R2	0.260	2	
Z_2021_R2	0.260	2	
Z_2022_R2	0.260	2	
Z_2023_R2	0.260	2	
Z_2024_R2	0.260	2	

a. Corrección de significación de Lilliefors

La tabla de pruebas de normalidad muestra los resultados de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk aplicados a cinco conjuntos de datos (Z_2020_R1 a Z_2024_R1), cada uno con

15 observaciones. Dado que el tamaño muestral es reducido, se prioriza la interpretación según la prueba de Shapiro-Wilk. Los resultados indican que las variables Z_{2020_R1} , Z_{2021_R1} , Z_{2023_R1} y Z_{2024_R1} presentan valores de significancia superiores a 0.05, lo que sugiere que siguen una distribución normal. Sin embargo, la variable Z_{2022_R1} muestra una significancia de 0.001, lo cual implica una distribución no normal. Por tanto, al no cumplirse el supuesto de normalidad en todos los casos, se concluye que el análisis estadístico debe realizarse utilizando pruebas no paramétricas. Además, la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para las variables Z_{2020_R2} a Z_{2024_R2} , cada una con un tamaño de muestra extremadamente reducido ($gl = 2$), lo cual impide una evaluación estadística robusta de la normalidad debido a la insuficiencia de datos. Aunque todos los valores del estadístico son iguales (0.260), no se proporciona el valor de significancia (Sig.), lo que impide determinar formalmente si las distribuciones se ajustan a la normalidad.

Tabla 20

Prueba de Wilcoxon

	Estadísticos de prueba ^a				
	$Z_{2020_R2} - Z_{2020_R1}$	$Z_{2021_R2} - Z_{2021_R1}$	$Z_{2022_R2} - Z_{2022_R1}$	$Z_{2023_R2} - Z_{2023_R1}$	$Z_{2024_R2} - Z_{2024_R1}$
Z	-1,342 ^b	-1,342 ^b	-1,342 ^b	-1,342 ^b	-1,342 ^b
Sig. asintótica(bilateral)	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180
a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon					
b. Se basa en rangos negativos.					

La tabla presenta los resultados de la prueba de rangos con signo de Wilcoxon aplicada a cinco pares de muestras relacionadas ($Z_{R2} - Z_{R1}$ para los años 2020 a 2024). En todos los casos, el valor de significancia asintótica bilateral es 0.180, el cual es mayor que el umbral crítico de 0.05, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones de la fase R1 y R2. En consecuencia, se acepta la hipótesis nula.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados conseguidos al analizar la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque mediante imágenes Sentinel-2 revelan una concentración significativa de eventos en zonas de alta pendiente, áreas deforestadas y sectores con intensa actividad antrópica, ratificando la eficacia del enfoque multitemporal y espectral aplicado para delimitar zonas de susceptibilidad.

Esta evidencia es coherente con los hallazgos de Ma y Wang (2024), quienes identificaron más de 15 mil deslizamientos en Beijing mediante interpretación remota con una precisión del 83.6%, lo que valida el uso de datos satelitales para generar inventarios confiables. Asimismo, el empleo de índices espectrales como NDVI y NDWI permitió detectar alteraciones en la cobertura vegetal y humedad del suelo, factores estrechamente vinculados a la activación de deslizamientos, concordando con Pech et al. (2020) y Satriano et al. (2023), quienes matizaron el potencial de Sentinel-2 para identificar cambios post-evento con más del 98% de precisión.

En línea con Song et al. (2022), se evidenció también que los deslizamientos presentan fases diferenciadas de aceleración y recuperación, asociadas a variaciones climáticas y geodinámicas, lo que exige un monitoreo continuo en contextos de alta vulnerabilidad. Finalmente, al igual que lo planteado por Chandra et al. (2023), la integración de modelos de aprendizaje profundo con Sentinel-2 favorece la detección precisa de áreas inestables, aportando a la planificación territorial y atenuación de las amenazas geológicas en regiones como la cuenca del Jequetepeque, donde la presión socioambiental y la recurrencia de eventos hacen imperativa la puesta en marcha de mecanismos de alerta precoz y políticas de ordenamiento basadas en evidencia satelital.

El análisis de la distribución del área afectada por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque durante el periodo 2020-2024 a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 muestra que las áreas más afectadas corresponden a zonas con pendientes pronunciadas y suelos altamente vulnerables a la saturación por lluvias intensas. Este patrón de distribución se confirma con la observación de Li et al. (2022), quienes sostienen que los deslizamientos tienden a concentrarse en áreas de pendiente elevada y donde las precipitaciones son más frecuentes y severas. Los resultados obtenidos también coinciden con las observaciones realizadas por Nardini et al. (2024), quienes identificaron la misma relación entre la topografía y la vulnerabilidad al deslizamiento en su estudio en Tayikistán.

El uso de imágenes Sentinel-2 permitió no solo identificar áreas afectadas, sino también distinguir alteraciones en la vegetación terrestre, evidenciando que las zonas más afectadas por deslizamientos coinciden con regiones que experimentan cambios en la cobertura vegetal, como la deforestación y la expansión de áreas agrícolas. Además, los resultados muestran que las áreas afectadas en los años más recientes se han expandido hacia zonas de menor altitud, lo que indica una posible modificación en los patrones de vulnerabilidad debido a factores climáticos, geológicos y humanos.

El análisis de las áreas impactadas por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque utilizando imágenes satelitales de Sentinel-2 permitió identificar las zonas de mayor afectación, destacándose áreas de alta vulnerabilidad asociadas a pendientes pronunciadas y características geológicas inestables, como lo han reportado investigaciones previas (Li et al., 2022; Nardini et al., 2024). Las imágenes proporcionaron una visualización detallada de las variaciones en la extensión vegetativa del suelo, identificando no solo los deslizamientos ya ocurridos, sino también las áreas susceptibles a futuros eventos, particularmente en las zonas adyacentes a las subcuencas de Chepén y Pacanguilla, donde la pérdida de vegetación y la alteración del uso del suelo han incrementado la inestabilidad. Además, los índices espectrales obtenidos de las

imágenes, como el NDVI, permitieron evidenciar la reducción de vegetación en las áreas afectadas, lo que refuerza la correlación entre la pérdida de extensión vegetativa y el aumento de deslizamientos, como también sugieren estudios como los de Pech et al. (2020). Los hallazgos también expusieron que la intensidad de los deslizamientos es mayor en las zonas cercanas a las áreas urbanizadas y agrícolas, donde las actividades humanas parecen estar exacerbando la vulnerabilidad del terreno.

Reflexionando sobre estos hallazgos, es evidente que las imágenes de Sentinel-2, ofrecen un instrumento esencial para la vigilancia y manejo de desastres naturales, porque no solo consienten identificar las áreas afectadas, sino también proporcionar datos valiosos con la mira en la planear medidas de prevención y adaptación. Sin embargo, también queda claro que, aunque las imágenes satelitales ofrecen una visión precisa, es crucial integrar esta información con otros datos de campo y modelos predictivos con el fin de incrementar la fiabilidad del reconocimiento de áreas de alto riesgo y para implementar medidas preventivas más efectivas. Este análisis también implica que la planificación territorial debe incorporar de manera más explícita los factores de vulnerabilidad asociados al uso del suelo y las variaciones climáticas, que están influyendo en la recurrencia y expansión de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque.

La evaluación temporal de imágenes Sentinel-2 para identificar las zonas de mayor recurrencia de deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque reveló que las áreas afectadas por deslizamientos no solo son recurrentes, sino que muestran una tendencia a expandirse, particularmente en las subcuencas de Chepén y Pacanguilla. A través de un análisis multitemporal de imágenes obtenidas entre 2020 y 2024, se observó un patrón creciente en la ocurrencia de deslizamientos durante la temporada de lluvias, coincidiendo con estudios previos de Uwizeyimana et al. (2024), quienes señalaron que el cambio climático, especialmente el incremento de las precipitaciones, podría estar incrementando la recurrencia

de estos eventos. Este patrón también se ve reflejado en la comparación de las imágenes de diferentes periodos, que evidencian la persistencia de los deslizamientos en las mismas zonas a lo largo de los años, con algunas áreas mostrando una intensificación de los eventos. La capacidad de Sentinel-2 para ofrecer imágenes de alta definición espacial como temporalmente facilitó la identificación precisa de las zonas recurrentes, permitiendo no solo detectar la recurrencia, sino también estimar la magnitud y frecuencia de los deslizamientos, algo que era más complejo con métodos tradicionales de observación.

Reflexionando sobre estos hallazgos, es claro que el monitoreo continuo de estas zonas es fundamental para la gestión del riesgo, ya que las áreas de recurrencia indican una mayor probabilidad de futuros deslizamientos, lo que requiere una planificación adecuada para la protección de las infraestructuras y las comunidades cercanas. Este análisis temporal también pone de manifiesto la relevancia de utilizar sistemas satelitales para el monitoreo constante de áreas de alto riesgo, especialmente en contextos de cambio climático, donde la recurrencia e impacto de los sucesos naturales como las lluvias pueden alterar los patrones históricos de deslizamientos, haciendo necesario un enfoque más dinámico y adaptativo en la supervisión del riesgo y la organización territorial.

VI. CONCLUSIONES

- 6.1. Se concluye que el análisis de la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, mediante imágenes satelitales Sentinel-2, ha permitido identificar con precisión las zonas afectadas. Este enfoque ha revelado que los deslizamientos están estrechamente vinculados con factores geográficos y climáticos, especialmente con las precipitaciones intensas, que actúan como desencadenantes de estos eventos. La herramienta ha demostrado ser eficaz para la detección y mapeo de áreas afectadas por deslizamientos, proporcionando información crucial que facilita la preparación y aplicación de acciones mitigadoras ante riesgos geológicos.
- 6.2. El análisis temporal de las fotografías satelitales de Sentinel-2 ha mostrado una distribución irregular de los deslizamientos en el periodo 2020-2024, patrón que se asocia principalmente a la temporada de lluvias y a las variaciones en las condiciones del terreno. Sin embargo, la capacidad de Sentinel-2 para capturar eventos a lo largo del tiempo ha permitido realizar un monitoreo continuo y preciso de las áreas afectadas, lo que no solo facilita la identificación de patrones, sino también la preparación ante futuros eventos. Esta capacidad multitemporal se vuelve un instrumento valioso para el análisis dinámico de los deslizamientos en la región.
- 6.3. Asimismo, se concluye que las zonas más recurrentemente afectadas por deslizamientos han sido determinadas mediante la interpretación de fotografías satelitales de alta resolución. Las áreas más vulnerables, debido a su topografía escarpada y la falta de vegetación protectora, han experimentado deslizamientos de manera más frecuente. Esta información acentúa la importancia de adoptar acciones preventivas particulares en esos sectores, tales como la restauración de vegetación y la

mejora de la infraestructura de drenaje, para minimizar la recurrencia de los deslizamientos y mitigar su impacto en las comunidades cercanas.

- 6.4. Finalmente, aunque las imágenes de Sentinel-2 muestran una alta resolución en el espacio y tiempo, existen limitaciones en la detección de deslizamientos de pequeña escala y aquellos que evolucionan rápidamente. Las condiciones meteorológicas adversas, como la existencia de nubosidad, también pueden perturbar la calidad de las imágenes. Por lo tanto, aunque esta tecnología es altamente valiosa para el monitoreo a gran escala, debe ser complementada con observaciones de campo y otros métodos de validación para optimizar la fiabilidad en la identificación y el monitoreo de deslizamientos a nivel local.

VII. RECOMENDACIONES

- 7.1. Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo basado en imágenes satelitales de alta resolución, como las suministradas por Sentinel-2, para el seguimiento constante de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque. La indagación demostró la efectividad de estas imágenes en la identificación precisa de las áreas afectadas por deslizamientos y sus patrones de distribución espacial. Dado que los deslizamientos pueden generar un efecto relevante en la seguridad de la población y la subestructura, es fundamental que los organismos responsables de la supervisión de los riesgos en la región adopten tecnologías avanzadas de teledetección para anticipar eventos y diseñar estrategias preventivas más eficaces. Además, el uso de estos sistemas contribuirá a la mejora de los medios asequibles para la respuesta ante desastres, mejorando la capacidad de intervención ante posibles emergencias.
- 7.2. En referencia a la evaluación de la colocación del área afectada por deslizamientos en el periodo 2020-2024, se sugiere que se intensifiquen los esfuerzos para integrar los datos satelitales con información climática de alta resolución. Si bien las lluvias intensas se han identificado como un factor desencadenante clave, la inclusión de pronósticos meteorológicos más detallados permitiría mejorar la exactitud en la predicción de movimientos, sobre todo en áreas vulnerables a precipitaciones extremas. Además, se recomienda establecer una base de datos geoespacial que combine tanto los factores meteorológicos como los topográficos, de manera que se pueda identificar con mayor antelación las zonas de alto riesgo y priorizar las acciones preventivas y de mitigación en función de los patrones observados.
- 7.3. Para optimizar la identificación de áreas afectadas por deslizamientos, se recomienda desarrollar una estrategia que utilice la resolución espacial de las imágenes de Sentinel-

2 en combinación con técnicas de evaluación avanzadas, al igual a la utilización de tecnologías como la IA y la automatización del aprendizaje. Si bien los hallazgos obtenidos demostraron una correspondencia entre las características topográficas y la ocurrencia de deslizamientos, la integración de estos métodos podría mejorar significativamente la precisión y la eficiencia en la clasificación de las zonas afectadas. Asimismo, es fundamental capacitar a los equipos técnicos en el manejo de estas herramientas, a fin de asegurar que las imágenes sean interpretadas de manera más efectiva, proporcionando datos más completos para la planificación de medidas preventivas y de respuesta.

- 7.4. Respecto al análisis de las zonas de mayor recurrencia de deslizamientos, se recomienda que las autoridades regionales y locales implementen un sistema de alertas tempranas basado en los patrones de recurrencia temporal identificados en el estudio. Las áreas con alta frecuencia de deslizamientos, especialmente aquellas relacionadas con pendientes pronunciadas y lluvias intensas, deben ser monitoreadas constantemente con imágenes satelitales actualizadas. A través de la automatización de los procesos de análisis multitemporal, se podrá detectar de manera más precisa los cambios en el comportamiento de los deslizamientos, lo que permitirá una respuesta más ágil y eficiente. Además, esta información debería ser accesible en tiempo real para los equipos de respuesta a emergencias y la comunidad, fomentando la conciencia y la preparación ante posibles desastres.

VIII. REFERENCIAS

- Ahmed, S., Fatma, O., Yacine, S., Fatna, M., B., Y., y Mohammed, G. (2025). Statistical-based methods for landslides susceptibility mapping in the Wilaya of Mila (northeast Algeria). *Journal of Earth System Science*, 134(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02469-y>
- Alayo, J., y Villegas, J. (2021). Estimación de desplazamientos ocasionados por deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba, Piura, mediante el análisis de imágenes satelitales en el período 2017-2019. *Revista de Investigación de Física*, 24(3), 1-8. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/fisica/article/view/20805/17399>
- Alcántara, E. (2021). Investigación de deslizamientos de muy grandes dimensiones en el departamento de Cajamarca. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 15, 1-5. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG20-606.pdf>
- Anaya, J., Rodríguez-Burítica, S., y Londoño, M. (2023). Clasificación de cobertura vegetal con resolución espacial de 10 metros en bosques del Caribe colombiano basado en misiones Sentinel 1 y Sentinel 2. *Revista de Teledetección*, 61, 29-41. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8782856>
- Ariza, A., Davila, N., Kemper, H., y Kemper, G. (2021). Landslide detection in central america using the differential bare soil index. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43(B3), 679-2021. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B3-2021/679/2021/isprs-archives-XLIII-B3-2021-679-2021.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Evaluación de recursos hídricos en la cuenca del Rio Jequetepeque*. Ministerio de Agricultura y Riego. [Archivo PDF] https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/erhjequetepeque_2015_superficiales.pdf

- Cargua, C., Espin, R., Valencia, B., Simbaña, M., Araujo, S., Cornejo, C., y Ocampos, A. (2024). Análisis de Susceptibilidad a Deslizamientos empleando el Proceso de Jerarquía Analítica en una carretera amazónica del Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 39(1), 116-136.
<https://www.redalyc.org/journal/4760/476077146008/html/>
- Castaño, S., Ruiz, J., y Vela, A. (1996). La Teledetección sus Bases. *Revista de la Facultad de Educación de Albace*, 183-194.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2282743>
- Chandra, N., Sawant, S., y Vaidya, H. (2023). An Efficient U-Net Model for Improved Landslide Detection from Satellite Images. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 91(1).
https://www.researchgate.net/publication/367457159_An_Efficient_UNet_Model_for_Improved_Landslide_Detection_from_Satellite_Images
- Clark, M., Zekkos, D., y Manousakis, J. (2024). Enabling 3D landslide event statistics using satellite and UAV enabled topographic differencing. *Landslides*.10.
https://www.researchgate.net/publication/386992969_Enabling_3D_landslide_event_statistics_using_satellite_and_UAV-enabled_topographic_differencing
- Cossío, A. (2021). Tecnología Satelital a Cargo de la Agencia Espacial Del Perú y su Impacto en el Control de Riesgos Derivados de las Situaciones de Desastres A Nivel Nacional, 2016-2017. *Revista de Ciencia e Investigación en Defensa*, 19-33.
<file:///C:/Users/inbes/Downloads/7-44-PB.pdf>
- Couto, D., Machado, C., Vieira da Silva, D., Harada, L. M., Muinos, P. d., Moreno, D. L., Domingo, L., Bortolozo, C., Metodiev, D., Andrade, M., Hartley, A., Abreu, R., Lott, F., y Sparrow, S. (2024). Extreme rainfall and landslides as a response to human-

- induced climate change: a case study at Baixada Santista, Brazil, 2020. *Natural Hazards*, 120,10835-10860. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06621-1>
- Da Silva, R. C., Marengo, J. A., y Lemes, M. R. (2024). Analysis of extreme rainfall and landslides in the metropolitan region of the Paraíba do Sul River Valley and North Coast of Sao Paulo, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 3927-3949. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04857-2>
- Gobierno de España. (2018). El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial. *Copernicus*. https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/3_componente_espacio_Copernicus.pdf
- Guerrero, B., García, J., Salvador, J., Mejía, C., Cadena, S., Cepeda, J., Benavent, J., y Mulero, D. (2023). Improving landslide prediction by computer vision and Deep learning. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 31(1), 77-94. <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.3233/ICA-230717>
- Guillen, C., Murugan, V., y Davila, M. (2015). Aplicacion de teledeteccion y SIG para el levantamiento cartográfico de los suelos de la cuenca Solani, India. *Revista Geográfica Venezolana*, 56(2), 185-204.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347743079003.pdf>
- Huangfu, W., Qiu, H., Cui, P., Yang, D., Liu, Y., Tang, B., Liu, Z., y Ullah, M. (2024). Quick and automatic detection of co-seismic landslides with multi-feature deep learning model. *Science China Earth Sciences*, 67, 2311-2325. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11430-023-1306-8>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico [INGEMMET]. (2006). *Zonas críticas por peligros geológicos en la cuenca del río Jequetupeque y Loco de Chaman*. [Informe Técnico

Geología Ambiental] https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-lalibertad/archivos/public/docs/5961_0.pdf

Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI]. (2019) *Boletín Informativo Hidrológico INDECI N° 091*. <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/bolet%c3%8dn-informativo-hidrol%c3%93gico-indeci-n%c2%b0-091-del-25-02-2019.pdf>

Kadiogullari, A., Sönmez, T., Zeki, E., y Karahail, U. (2017). Actualización de cambio de cobertura terrestre mediante análisis basado en la elevación y distancia de los asentamientos: Un estudio de caso de Turquía. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 23(2), 289-313. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182017000200289&lng=es&tlng=es

Karmakar, S., Tiwari, P. N., y Basak, T. (2023). A combined influence of surface temperature and daily rainfall to the historical landslides occurred on 7th September 2007 over sub-Himalayan region, India. *Journal of Earth System Science*, 42(132). <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02054-9>

Li, H., He, Y., Xu, Q., Deng, J., Li, W., y Wei, Y. (2022). Detection and segmentation of loess landslides via satellite images: a two-phase framework. *Landslides*, 19, 673-686. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-021-01789-0>

Liu, Q., Wu, T., Deng, Y., y Liu, Z. (2023). Intelligent identification of landslides in loess areas based on the improved YOLO algorithm: a case study of loess landslides in Baoji City. *Journal of Mountain Science*, 20, 3343-3359. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8128-0>

Lugo, A., Lugo, R., García, J., Zúñiga, D., y Rueda, E. (2024). SENTINEL-2, Herramienta en Seguridad Agroalimentaria y Agricultura de Precisión. *Agroecosistemas tropicales y*

subtropicales, 27(2), 1-19.

<https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/5474>

Ma, H., y Wang, F. (2024). Inventory of shallow landslides triggered by extreme precipitation in July 2023 in Beijing, China. *Scientific Data*, 11(1083), 1-13.

<https://doi.org/10.1038/s41597-024-03901-0>

More, N., Kanthe, A., Gangane, J., Padiya, P., y Sumithra, T. (2025). A Complete Study of Remote Sensing-Sentinel-2 Satellite Data for Land Use / Land Cover (LULC) Analysis . *Panamerican Mathematical Journal*, 35(1s), 231-249.

<https://internationalpubs.com/index.php/pmj/article/view/2311/1419>

Moreno, P. (2023). *Deslizamiento - flujo de detritos y su incidencia en los medios de vida de la población de la microcuenca Aynamayo - distrito de Vitoc - Chanchamayo Junín, 2021*. [Tesis de maestría, Universidad Continental]. Repositorio de la Universidad

Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12940>

Nardini, O., Confuorto, P., Intrieri, E., Montalti, R., Montanaro, R., Montanaro, T., Poggi, F., y Raspini, F. (2024). Integration of satellite SAR and optical acquisitions for the characterization of the Lake Sarez landslides in Tajikistan. *Landslides*, 21, 1385-1401.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-024-02214-y#citeas>

Oliveira, S., Zêzere, J., Garcia, R., Pereira, S., Vaz, T., y Melo, R. (2024). Landslide susceptibility assessment using different rainfall event-based landslide inventories: advantages and limitations. *Natural Hazards*, 120, 9361-9399.

<https://doi.org/10.1007/s11069-024-06691-1>

Osorio, L. (2019). *Zonificación de la Susceptibilidad del Terreno a los Deslizamientos. Caso de Estudio: Nariño - Colombia*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia].

Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia.

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69829/1030564924.2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pech, F., Sánchez, J., Sánchez, H., y Magaña, J. (2020). Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2. *Lámpsakos*, 24, 48-59.

<https://www.redalyc.org/journal/6139/613966750004/613966750004.pdf>

Plasencia, J. (2021). Colocación de coordenadas geodésicas UTM WGS 84 con ERP y levantamiento fotogramétrico con RPA para fines de habilitación urbana. *Revista Científica Tecno Humanismo*, 1(11), 61-85.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8179029>

Puerta, R., Iannacone, J., y Reátegui, M. (2023). Una revisión del uso de imágenes Sentinel-2 para el monitoreo de la cobertura boscosa a nivel global. *Ingeniería y Competitividad*, 25(3), 1-14. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i3.12708>

Quispe, R., Enríquez, N., Herrera, C., y Hinojosa, R. (2021). Susceptibilidad a Deslizamiento de Ladera mediante el Sistema de Información Geográfica. *Scientific Research Journal CIDI*, 1(2), 162-174. <https://srjournalcidi.org/index.php/ojs/article/view/62>

Rodríguez, D., y Castro, R. (2022). Valoración de la cuenca Jequetepeque para proponer mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos en Perú. *Región y Sociedad*, 34, 1-26. <https://doi.org/10.22198/rys2022/34/1655>

Romero, W., y Vázquez, R. (2019). Estudio de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Caso de estudio: Zona centro del Estado de Guerrero, México, mediante herramientas geotecnológicas. *Revista Cartográfica*, 24, 48-59.

<https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/article/view/147/1650>

- Ross, C., y García, J. (2022). Cuantificación de Volúmenes de Explanaciones con el uso de Drones. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada YACHASUN*, 6(11), 119-131. <https://www.redalyc.org/journal/6858/685872167008/685872167008.pdf>
- Santamaría, T., Samudio, M., y Sáez, D. (2021). Determinación de áreas susceptibles a deslizamientos en el corregimiento de Cerro Punta, provincia de Chiriquí, Panamá. *Revista de Iniciación Científica*, 7(5). <https://portal.amelica.org/ameli/journal/338/3382483004/3382483004.pdf>
- Satriano, V., Ciancia, E., Filizzola, C., Genzano, N., Lacava, T., y Tramutoli, V. (2023). Landslides Detection and Mapping with an Advanced Multi-Temporal Satellite Optical Technique. *Remote Sens*, 15(3), 1-13. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/3/683>
- Soleimani, T., Nouri, T., y Negahdar, A. (2023). Feasibility of using UAV in surveying and 3D modeling of landslides (case study of Ardabil province). *Earth Science Informatics*, 17(142), 1-18. https://www.researchgate.net/publication/375831614_Feasibility_of_using_UAV_in_surveying_and_3D_modeling_of_landslides_case_study_of_Ardabil_province
- Song, C., Yu, C., Li, Z., Utili, S., Frattini, P., Crosta, G., y Peng, J. (2022). Triggering and recovery of earthquake accelerated landslides in Central Italy revealed by satellite radar observations. *Nature Communications*, 13(7278), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35035-5>
- Tapia, A. (2022). *Tendencia de la precipitación y temperatura debido al cambio climático observados en dos estaciones meteorológicas de la región de Arequipa 1965-2020*. [Tesis de grado, Universidad Continental]. Repositorio de la Universidad Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12304>
- Tenorio, J., Gonzáles, R., Gómez, M. y Velasco, J. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de

- Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*, 92, 1-16.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n92/2448-7279-igeo-92-00011.pdf>
- Uwizeyimana, D., Liu, W., Huang, Y., Habumugisha, J., Zhou, Y., y Yang, Z. (2024). Spatial distribution characteristics of climate-induced landslides in the Eastern Himalayas. *Journal of Mountain Science*, 21(1), 1-17.
https://www.researchgate.net/publication/384661310_Spatial_distribution_characteristics_of_climate-induced_landslides_in_the_Eastern_Himalayas
- Vega, J., Barco, J., y Hidalgo, C. (2024). Space-time analysis of the relationship between landslides occurrence, rainfall variability and ENSO in the Tropical Andean Mountain region in Colombia. *Landslides*, 21,1293-1314. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02225-9>
- Villalón, L., Rosabal, Y., Beyris, A., y Calderón, E. (2023). Susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la zona costera y cuencas hidrográficas de la Sierra Maestra. *Minero y Geología*, 39(4), 220-234. <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v39n4/1993-8012-mg-39-04-220.pdf>
- Villamil, J., Pérez, U., y Ortiz, N. (2018). Distribución espacial y temporal de deslizamientos (1999-2015) en la cuenca del río Combeima, Colombia. *Revista Geográfica Venezolana*, 59(2), 346-365.
<https://www.redalyc.org/journal/3477/347760473008/html/>
- Vizcaíno, P., Cedeño, R., y Maldonado, I. (2023). Metodología de la investigación científica: guía práctica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 9723-9762.
<https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/7658>
- Wang, Y., Zhou, C., Cao, Y., Raj Meena, S., Feng, Y., y Wang, Y. (2024). Utilizing deep learning approach to develop landslide susceptibility mapping considering landslide

types. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(430).

<https://doi.org/10.1007/s10064-024-03889-2>

Xu, S., Song, Y., Lu, P., Mu, G., y Yang, K. W. (2024). An optimized non-landslide sampling method for Landslide susceptibility evaluation using machine learning models. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07021-1>

Zhang, R., y Chen, S. (2025). Spatiotemporal analysis, simulation, and early warning of landslides based on landslide sensitivity and multisource precipitation products in Southwestern China. *Landslides*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-024-02437-z>

IX. ANEXOS

Anexo A: Matriz de Consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Diseño metodológico
¿Cómo se presenta la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, Cajamarca mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel-2?	Determinar la variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, Cajamarca mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel-2.	La variación espacial de los deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, Cajamarca, presenta patrones cuantificables mediante el análisis de imágenes satelitales Sentinel-2.	Variable independiente Imágenes satelitales Sentinel - 2	Población: Cuenca del Marañón Muestra: Cuenca del río Jequetepeque Técnica y tipo de muestreo: Por conveniencia
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente	Técnica de recolección de datos: Observación directa
¿Cómo se presenta la distribución del área afectada por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque durante el periodo 2020–2024, mediante imágenes satelitales Sentinel-2?	Analizar la distribución del área afectada por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque durante el periodo 2020–2024, mediante imágenes satelitales Sentinel-2.	La distribución del área afectada por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, durante el periodo 2020–2024, muestra diferencias espaciales significativas que pueden ser identificadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2.	Análisis de variación espacial de deslizamientos	Instrumento de recolección: Ficha de Observación
¿Cómo se presentan las áreas afectadas por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, utilizando imágenes satelitales de Sentinel-2?	Analizar las áreas afectadas por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, utilizando imágenes satelitales de Sentinel-2.	Las imágenes satelitales Sentinel-2 permiten delimitar con precisión las zonas impactadas por deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque, proporcionando información espacial confiable sobre su extensión.		
¿Cuáles son las zonas de mayor recurrencia de deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque según el análisis temporal de imágenes Sentinel-2?	Identificar las zonas de mayor recurrencia de deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque a partir del análisis temporal de imágenes Sentinel-2.	Las zonas de mayor recurrencia de deslizamientos en la cuenca del río Jequetepeque muestra áreas significativas a partir del análisis temporal de imágenes satelitales Sentinel-2.		

Anexo B: Instrumento de recolección de datos

Sector / Zona	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4
Coordenadas UTM (Zona - Este - Norte)	17S - 857000 - 8460000	17S - 861500 - 8455000	18S - 920000 - 8448000	18S - 927000 - 8437000
Pendiente del terreno (°)	28	25	32	17
Orientación de ladera	Oeste	Sureste	Noreste	Sur
Tipo de suelo	Franco	Arcilloso	Roca meteorizada	Arcilloso
Cobertura vegetal (Sentinel-2)	Cultivo	Matorral	Suelo expuesto	Cultivo
Clasificación NDVI	Media (0.2–0.5)	Media (0.2–0.5)	Baja (<0.2)	Media (0.2–0.5)
Presencia de grietas / zonas inestables	Sí	Sí	Sí	Sí
Evidencia de erosión	Moderada	Alta	Alta	Moderada
Historial de deslizamientos	Reciente	Frecuente	Frecuente	Frecuente
Uso del suelo	Agrícola	Ganadero	Agrícola	Agrícola
Proximidad a infraestructura	Vías y viviendas	Vías	Canales	Viviendas
Superficie deslizada (ha)	1.12	1.5	2.35	0.92
Densidad de deslizamientos (eventos/km ²)	4.6	6.1	7.8	3.9
Fecha imagen Sentinel-2	04/03/2023	17/02/2023	11/03/2023	28/02/2023
Evento precipitante	Lluvias intensas	Lluvias intensas	Lluvias intensas	Riego excesivo