

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL**



**Influencia de la cobertura forestal en las ocurrencias anuales de deslizamiento de masas en la intercuenca del Alto Huallaga durante el periodo 2003 – 2023”**

**Tesis**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO FORESTAL**

**Presentado por:**

**VILLANUEVA PINEDO, HEYDY**

**Tingo María – Perú**

**2024**



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°091-2024-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 16 de mayo de 2024, a horas 8:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“INFLUENCIA DE LA COBERTURA FORESTAL EN LAS OCURRENCIAS ANUALES DE DESLIZAMIENTO DE MASAS EN LA INTERCUENCA DEL ALTO HUALLAGA DURANTE EL PERIODO 2003 - 2023”**

Presentado por la Bachiller: **VILLANUEVA PINEDO, Heydy** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“BUENO”**.

En consecuencia, la sustentante queda apta para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 19 de agosto de 2024

  
Ing. MSc. **RAUL ARAUJO TORRES**  
**PRESIDENTE**

  
Ing. MSc. **BRAYAN CALDAS DE LA CRUZ**  
**MIEMBRO**

  
Ing. **JORGE BIRINO ALVAREZ MELO**  
**MIEMBRO**



Ing. MSc. **WILFREDO TELLO ZEVALLOS**  
**ASESOR**

  
Ing. MSc. **ALBERTO FRANCO CERNA CUEVA**  
**ASESOR**



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE INVESTIGACIÓN - DGI  
REPOSITORIO INSTITUCIONAL - UNAS  
Correo: [repositorio@unas.edu.pe](mailto:repositorio@unas.edu.pe)



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

## CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 272 - 2024 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

### CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

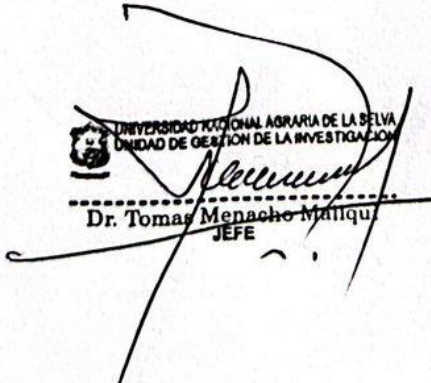
Ingeniería Forestal

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
Influencia de la cobertura forestal en las ocurrencias anuales de deslizamiento de masas en la intercuenca del Alto Huallaga durante el periodo 2003 – 2023"	VILLANUEVA PINEDO, HEYDY	<b>17 %</b> <b>Diecisiete</b>

Tingo María, 09 de setiembre de 2024

  
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN  
Dr. Tomas Menacho Maniqui  
JEFE

C.C. Archivo

# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

## FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



#### **“Influencia de la cobertura forestal en las ocurrencias anuales de deslizamiento de masas en la intercuenca del Alto Huallaga durante el periodo 2003 – 2023”**

**Autor** : Bach. VILLANUEVA PINEDO, Heydy

**Asesores** : M. Sc. TELLO ZEVALLOS, Wilfredo  
M. Sc. CERNA CUEVA, Alberto Franco

**Programa de investigación** : Gestión de bosques y plantaciones forestales

**Línea de investigación** : Control de riesgos, deforestación y cambio climático

**Eje temático** : Movimiento de masa y tierra

**Lugar de ejecución** : Universidad Nacional Agraria de la Selva

**Duración** : Fecha de inicio : Enero – 2023  
Fecha de término : Noviembre – 2023

**Financiamiento** : FEDU : No  
Propio : Si (S/. 6,239.50)  
Otros : No

Tingo María – Perú

2024

VICERRECTORADO DE INVESTIGACION  
OFICINA DE INVESTIGACION



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCION DEL  
TITULO UNIVERSITARIO, INVESTIGACIÓN DOCENTE  
Y TESISISTA

(Resol. N° 113-2019-CU-R-UNAS)

I. Datos Generales de Pregrado

<b>Universidad</b>	:	Universidad Nacional Agraria de la Selva.
<b>Facultad</b>	:	Facultad de Recursos Naturales Renovables.
<b>Título de tesis</b>	:	Influencia de la cobertura forestal en las ocurrencias anuales de deslizamiento de masas en la intercuenca del Alto Huallaga durante el periodo 2003 – 2023.
<b>Autor</b>	:	Villanueva Pinedo, Heydy.
<b>Asesores de tesis</b>	:	M. Sc. Tello Zevallos, Wilfredo. M. Sc. Cerna Cueva, Alberto Franco.
<b>Escuela Profesional</b>	:	Ingeniería Forestal.
<b>Programa de investigación</b>	:	Gestión de bosques y plantaciones forestales.
<b>Línea(s) de investigación</b>	:	Control de riesgos, deforestación y cambio climático.
<b>Eje Temático</b>	:	Movimiento de masa y tierra.
<b>Lugar de ejecución</b>	:	Universidad Nacional Agraria de la Selva.
<b>Duración</b>	:	Inicio : Enero 2023 Término : Noviembre 2023
<b>Financiamiento</b>	:	FEDU : S/0.00 Propio : S/. 6,239.50 Otros : S/.0.00

Tingo María, Perú, octubre 2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'W. Tello'.

Tello Zevallos, Wilfredo  
Asesor

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'A. Franco'.

Cerna Cueva, Alberto Franco  
Asesor

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'H. Villanueva'.

Villanueva Pinedo, Heydy  
Tesisista

## DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se la dedico a Dios en primer lugar, que me dio la fortaleza de no rendirme, iluminar mi camino siempre y permitirme llegar a terminar este mayor anhelo en mi vida.

A mis padres Carmela Pinedo Soto y Antonio Villanueva Ortega por apoyarme siempre, guiar mi camino, enseñarme a nunca rendirme, y que con su gran amor, paciencia y esfuerzo me permitieron cumplir mi meta y más grande sueño, por inculcarme siempre los valores y seguir a pesar de todas las adversidades.

A mi hermano Waldir Jesús, por su amor incondicional y compañía en todo momento, por ser mi fortaleza y estar conmigo siempre, por inspirarme a ser mejor cada día.

En memoria de mi querido perrito Scar, que hoy está en el cielo, gracias por estar en mis momentos más difíciles y enseñarme lo que es el amor incondicional, también a mis gatitos 04 que son mi compañía siempre.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, por guiarme, protegerme y darme la fuerza en todo momento, para poder superar todas las adversidades y dificultades que se presentaron en mi camino.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por mi formación profesional, personal, por todos los conocimientos y valores aprendidos durante todos estos años.

A todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal, por toda su dedicación, por compartir sus conocimientos y experiencias.

Al Ing. M. Sc. Wilfredo Tello Zevallos, así como también al Ing. M. Sc. Alberto Franco Cerna Cueva, asesores de mi tesis, quienes me ofrecieron su valioso asesoramiento y apoyo incondicional siempre.

A todas aquellas personas que de manera directa o indirecta siempre me ofrecieron su apoyo para la culminación de este presente trabajo.

## INDICE DE CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Marco teórico.....	4
2.1.1. Cobertura vegetal en la Cuenca del río Huallaga.....	4
2.1.2. Movimientos de masas en el Perú.....	6
2.1.3. Influencia de la cobertura vegetal en la ocurrencia de deslizamientos .....	9
2.1.4. Definición de términos.....	11
2.2. Estado del arte .....	14
2.2.1. Internacionales .....	14
2.2.2. Nacionales.....	19
2.2.3. Locales .....	20
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
3.1. Lugar de ejecución .....	22
3.2. Tipo de investigación .....	23
3.3. Diseño de la investigación.....	24
3.4. Metodología.....	25
3.4.1. Determinación de la cobertura forestal en la intercuenca del Alto Huallaga el periodo 2003 - 2023 .....	25
3.4.2. Análisis del cambio de la cobertura forestal en la intercuenca .....	26
3.4.3. Evaluación de los cambios en las ocurrencias de deslizamientos bajo cambio de cobertura forestal en la intercuenca del Alto Huallaga el periodo 2003 – 2023	
26	
3.5. Variables.....	28
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	29
4.1. Determinación de la cobertura forestal.....	29
4.1.1. Descarga de NDVI 2003 - 2023.....	29

4.1.2. Procesamiento de imágenes .....	30
4.1.3. Determinación umbrales de clasificación .....	31
4.1.4. Análisis de métricas de rendimiento .....	32
4.2. Análisis de cambios en la cobertura forestal .....	33
4.2.1. Análisis de cambio en la intercuenca .....	33
4.2.2. Análisis de cambio a nivel de provincias de la intercuenca.....	35
4.3. Influencia de la cobertura forestal en los deslizamientos de masas .....	37
4.3.1. Influencia en las ocurrencias y tasa de ocurrencias .....	37
4.3.2. Correlación de las ocurrencias de deslizamientos con la cobertura forestal ...	39
V. CONCLUSIONES .....	42
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	43
VII. REFERENCIAS.....	44

## INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Casos históricos de movimientos en masa que causaron grandes daños en Perú. ....	7
2. Influencia de la vegetación leñosa en la estabilidad de los taludes.....	10
3. Zonas de protección ubicadas en la Intercuenca Alto Huallaga .....	23
4. Valores de NDVI en la interintercuenca Alto Huallaga para el periodo 2003 - 2023 .....	29
5. Métricas de rendimiento de la clasificación de uso de suelo .....	33
6. Pérdida de cobertura vegetal para el periodo 2003 y 2022 en la intercuenca Alto Huallaga a nivel de provincias dentro de la intercuenca.....	37
7. Ocurrencias y tasa de ocurrencias de deslizamientos en la interintercuenca Alto Huallaga para el periodo 2003 - 2023 .....	38

## INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Mapa de cobertura vegetal en la Cuenca del río Huallaga (ANA, 2015b) .....	5
2. Mapa de susceptibilidad de movimiento de masas en Perú (Villacorta et al., 2012).....	6
3. Ubicación de la intercuenca del Alto Huallaga.....	22
4. Flujograma metodológico .....	24
5. Zonas y/o puntos de control .....	28
6. Índice normalizado de vegetación (NDVI) descargado del satélite MODIS para el periodo 2003-2023. Verde oscuro (0.6-0.9) indica bosques, verde claro (0.2-0.6) representa pastizales, y marrón (-0.1-0.2) corresponde a suelo desnudo.....	30
7. Cambio de uso de suelo para la intercuenca del Alto Huallaga 2003 – 2023.....	34
8. Pérdida de cobertura vegetal para el periodo 2003 – 2023 en la intercuenca del Alto Huallaga a nivel de provincias dentro de la intercuenca. A) Provincia de Ambo, B) Provincia de Daniel Alcides Carrión, C) Provincia de Dos de Mayo, D) Provincia de Huacaybamba, E) Provincia de Huamalies, F) Provincia de Huánuco, G) Provincia de Leoncio Prado, H) Provincia de Marañón, I) Provincia de Mariscal Cáceres, J) Provincia de Pachitea, K) Provincia de Pasco, L) Provincia de Pataz, M) Provincia de Tochache. ....	36
9. Ocurrencia de deslizamientos en la intercuenca del Alto Huallaga para el periodo 2003 – 2023 para los diferentes usos de suelo .....	38
10. Numero de deslizamientos en la intercuenca del Alto Huallaga para el periodo 2003 – 2023. A) Correlación de las ocurrencias de deslizamientos con las áreas de bosque, B) Tasas de pérdidas de bosque. ....	40

## RESUMEN

La investigación en la Intercuenca Alto Huallaga del Perú (2003-2023) exploró la influencia de la cobertura forestal en los deslizamientos de masas, utilizando imágenes satelitales MODIS con resolución de 250 metros, procesadas mediante Google Earth Engine. Se realizó un análisis multitemporal del índice NDVI, empleando la mediana para celdas vacías, y una clasificación supervisada para distinguir entre suelos desnudos, pastizales y bosques, usando 37 áreas de control para calibración y validación. Se definieron umbrales de NDVI ( $0.382 \pm 0.00091$  y  $0.643 \pm 0.00081$ ) y se evaluaron métricas de rendimiento como precisión y exactitud. El análisis del cambio en la cobertura forestal comparó imágenes entre 2003 y 2023, utilizando SIG para cuantificar áreas de vegetación. Se detectó una ampliación en áreas de suelo desnudo de 56.2 km<sup>2</sup>, expansión de pastos de 1400.8 km<sup>2</sup> y reducción de la cobertura forestal de 1457.0 km<sup>2</sup>. A nivel de la intercuenca y provincias, se identificaron patrones de cambio y tasas porcentuales de la cobertura vegetal. Para analizar la influencia de la cobertura forestal en deslizamientos, se integraron datos del INDECI en un SIG, correlacionando eventos con diferentes usos de suelo. El coeficiente de correlación de Pearson ( $Rho = -0.64872$ ) mostró una relación inversa entre la pérdida de bosque y la frecuencia de deslizamientos, indicando una mayor incidencia en suelos desnudos y pastizales comparado con bosques. Los resultados subrayan el papel crítico de los bosques en la protección del suelo contra la erosión y en la prevención de deslizamientos.

**Palabras Clave:** Cobertura forestal, deslizamientos, NDVI, conservación de bosques

## ABSTRACT

The research on the Alto Huallaga interbasin in Peru (2003 – 2023) explored the influence of the forest cover on landslides using images from the MODIS satellites with 250 meters of resolution, processed using Google Earth Engine. A multitemporal analysis of the NDVI index was done using the average for empty cells, as well as a supervised classification for distinguishing between bare soil, grasses and forests using thirty seven areas of control for calibration and validation. The thresholds were defined for the the NDVI ( $0.382 \pm 0.00091$  and  $0.643 \pm 0.00081$ ) and the metrics were evaluated for the yield, as well as the precision and exactitude. For the analysis of the change in forest cover the images between [the years] 2003 and 2023 were compared using the SIG to quantify the areas of vegetation. An increase in the areas of bare soil of 56.2 km<sup>2</sup>, an expansion of the grasses of 1400.8 km<sup>2</sup> and a reduction in the forest cover of 1457.0 km<sup>2</sup> were detected. At a level of the interbasin and the provinces, patterns of change and percentage rates of vegetative cover were identified. In order to analyze the influence of the forest cover on landslides, data from the INDECI (acronym in Spanish) was introduced in a SIG, correlating evens with different soil use. The Pearson correlation coefficient ( $Rho = -0.64872$ ) revealed an inverse relationship between the loss of forest and the frequency of landslides, indicating a greater incidence of bare soil and grasses, in comparison to the forests. The results underline the critical role that forests play in protecting soil from erosion and in the prevention of landslides.

**Keywords:** forest cover, landslides, NDVI, forest conservation

## I. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra representan una amenaza significativa para la humanidad, causando a menudo devastadoras consecuencias tanto a nivel individual como comunitario. Su impacto se extiende desde la destrucción de infraestructuras como viviendas, carreteras y puentes, hasta la interrupción de servicios básicos, lo que dificulta el acceso a recursos esenciales como agua y electricidad. En términos económicos, los deslizamientos pueden causar enormes pérdidas financieras, no solo por los daños directos a propiedades y terrenos, sino también por la disminución de la productividad agrícola y comercial en las áreas afectadas; por otra parte, es sabido también que una de las principales causantes de los deslizamientos es la deforestación.

A nivel humano, estos eventos pueden resultar en la pérdida de vidas, lesiones graves y un trauma psicológico significativo para los sobrevivientes, además de desplazar comunidades enteras, generando una cadena de desafíos sociales y de salud. La alteración de ecosistemas y la pérdida de hábitats naturales son también impactos ambientales críticos de los deslizamientos, lo que a su vez puede tener efectos a largo plazo en la biodiversidad y la sostenibilidad ambiental.

Los deslizamientos de tierra se consideran uno de los desastres naturales más peligrosos y recurrentes a nivel mundial. Los factores desencadenantes que provocan los episodios de deslizamientos son numerosos y complejamente interdependientes, y comprenden, pérdida de cobertura forestal, lluvias intensas, terremotos, erosión rápida de arroyos, procesos geomorfológicos y actividades humanas (deforestación de laderas, construcción de carreteras, riego descontrolado, canteras y minas, etc.). Durante el periodo 2001 – 2016, la región Huánuco ha perdido 283 128 ha de bosques (7.5%) y esta región es una de las 6 a nivel nacional en las que ocurre el 85% de la deforestación (MINAM, 2016; SERFOR, 2019). Con respecto a la expansión urbana, de acuerdo con (Espinoza & Fort, 2020), la región Huánuco ha crecido en un 40%. Con respecto a la expansión pecuaria, en la región Huánuco para el periodo 2008 – 2022, la población de ganado vacuno se ha duplicado, la población de ovinos ha aumentado en un 31% y la población de caprinos ha aumentado en un 212%, lo que es un indicador del aumento del uso de la tierra para el pastoreo (GOREH, 2022). Todas las prácticas de uso de suelo mencionadas anteriormente están siendo llevadas a cabo sin ninguna planificación reduciendo la vegetación y disminuyendo así los servicios ecosistémicos necesarios.

Los cambios en el uso/cobertura de la tierra ahora representan procesos generalizados y acelerados, considerados como uno de los problemas ambientales más importantes de interés mundial y reconocidos como un impulsor clave del cambio global a través de sus interacciones con el clima, los procesos de los ecosistemas, la biodiversidad y las actividades humanas. La *pérdida de cobertura forestal* de un ecosistema frecuentemente está asociada con la mayor incidencia de desastres naturales y uno de los más comunes es el deslizamiento de masas. En la Cuenca del río Huallaga, durante el periodo 2003 – 2023 se han registrado 412 emergencias relacionadas al deslizamiento de masas, con un crecimiento anual promedio del 18%, dejando un total de 67 fallecidos, 48 desaparecidos, 112 heridos, 5285 damnificados, 1378 viviendas destruidas, 3394 viviendas afectadas, 858 hectáreas de cultivo destruidas y 241 hectáreas de cultivos afectadas (INDECI, 2020).

En base a lo descrito anteriormente se plantea la siguiente interrogante ¿Cuál es la influencia de la cobertura forestal en las ocurrencias anuales de deslizamientos de masas en la intercuenca Alto Huallaga durante el periodo 2003 – 2023?

A partir de la interrogante anterior se plantea la siguiente hipótesis:

La cobertura forestal influye significativamente en la reducción de las ocurrencias anuales de deslizamiento de masas en la intercuenca Alto Huallaga durante el periodo 2003 – 2023

La justificación para este estudio radica en la necesidad urgente de comprender la relación entre la pérdida de cobertura forestal y la creciente frecuencia y severidad de los deslizamientos de tierra. Esta investigación busca llenar un vacío en el conocimiento existente, estableciendo una correlación clara entre la disminución de la vegetación y el aumento en la incidencia de deslizamientos, un fenómeno crítico que afecta tanto a la estabilidad ambiental como a la seguridad humana. La comprensión de esta relación es vital para la formulación de políticas y estrategias de manejo del territorio que puedan mitigar eficazmente los impactos de estos desastres naturales.

Los resultados de este estudio podrían servir como una herramienta esencial para los planificadores urbanos, ingenieros forestales, y responsables de la toma de decisiones en la gestión de riesgos de desastres. Para ingenieros forestales, ya que ilustra el papel crítico de la cobertura forestal en mitigar deslizamientos de masas, ofreciendo datos valiosos para la conservación y gestión sostenible de bosques. Resalta la importancia de la reforestación y la restauración ecológica en áreas propensas a deslizamientos, contribuyendo a la planificación

del uso del suelo, el desarrollo de políticas de gestión de riesgo de desastres, y la innovación en técnicas de monitoreo ambiental. Asimismo, proporcionaría información valiosa para las comunidades locales y los agricultores, quienes son los más afectados por estos eventos, permitiéndoles adaptar sus prácticas y mejorar su resiliencia. El alcance de este estudio trasciende el ámbito académico, ofreciendo beneficios tangibles para una amplia gama de sectores y comunidades, particularmente en regiones propensas a deslizamientos de tierra como la cuenca del Alto Huallaga.

### **Objetivo general**

- Evaluar la influencia de la cobertura forestal en las ocurrencias anuales de deslizamiento de masas en la intercuenca Alto Huallaga durante el periodo 2003 – 2023

### **Objetivos específicos**

- Determinar la cobertura forestal en la intercuenca del Alto Huallaga durante el periodo 2003 – 2023
- Analizar los cambios de cobertura forestal en la intercuenca del Alto Huallaga durante el periodo 2003 – 2023
- Evaluar los cambios en las ocurrencias de deslizamientos bajo cambio de cobertura forestal en la intercuenca del Alto Huallaga durante el periodo 2003 – 2023

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Marco teórico

#### 2.1.1. Cobertura vegetal en la Cuenca del río Huallaga

La vegetación de la cuenca del río Huallaga se caracteriza por ser frondosa, característica de la selva en su parte baja y de la sierra en su parte alta. El 85% de la cobertura vegetal que compone la cuenca del río Huallaga es bosque húmedo, el 9% es pajonal y tan solo un 1% de cobertura vegetal corresponde a agricultura. En porcentajes muy pequeños también se encuentran matorrales arbustivos, aguajales y glaciares. Tal y como se observa en las imágenes de satélite, su conformación ha sufrido apenas cambios y se corresponde a la información contenida en el shapefile de cobertura vegetal proporcionado por (MINAM, 2015). En el estudio hidrológico realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015b), durante los recorridos de campo se han verificado las diferentes tipologías de cobertura vegetal presentes en la cuenca, y se ha prestado especial atención a las zonas de agricultura ya que son las más propicias a sufrir modificaciones. Se han realizado pequeñas modificaciones en algunas zonas que se han observado son agrícolas y no estaban incluidas en la cobertura vegetal como zona de agricultura. Estos cambios corresponden a la parte alta de la cuenca, aguas arriba de Huánuco y en la zona de Santa María del Valle y Churubamba.

Los usos actuales del suelo se dividen en la cuenca Huallaga en zonas húmedas, área agrícola, área de pradera/ arbustos, nevados y cuerpos de agua. En este sentido las zonas húmedas constituyen el área mayoritaria de la cuenca (más del 60% del total de la superficie de la cuenca), dichas zonas se encuentran en la actualidad sin explotación por tratarse de áreas con condiciones insalubres. A mucha distancia le sigue la zona con explotación agrícola (alrededor del 20%) y las áreas de pradera y arbustos (alrededor del 15%) que no cuentan con usos productivos significativos (ANA, 2015b). La representación de la cobertura vegetal en la Cuenca del río Huallaga se muestra en la **Figura 1**.

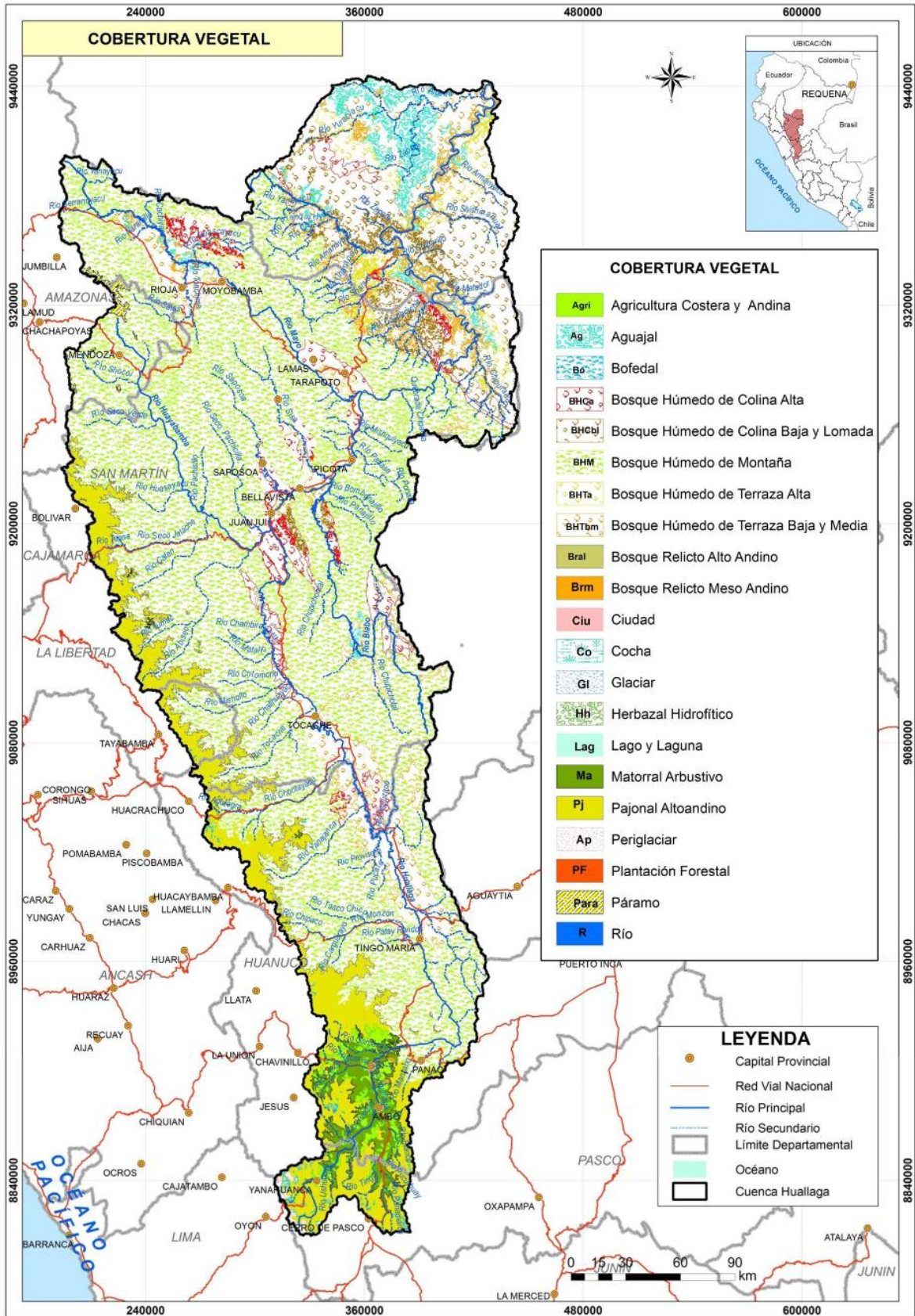
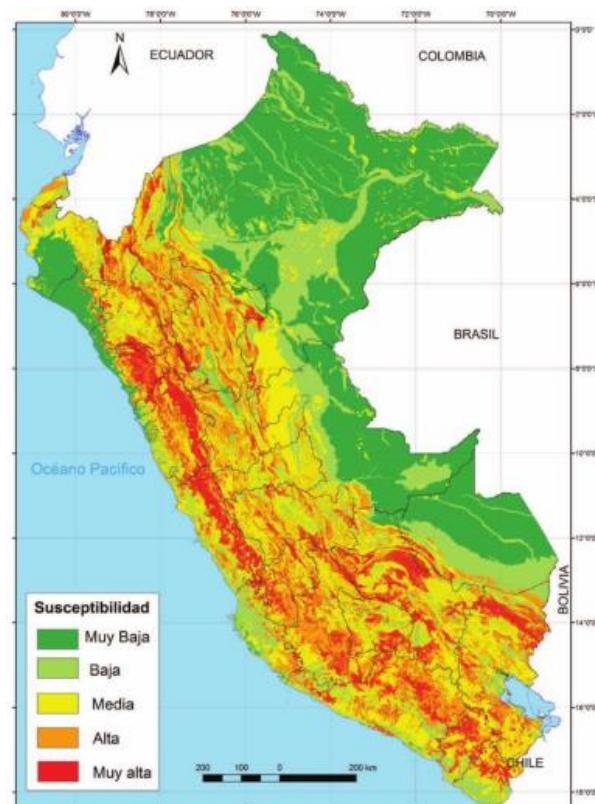


Figura 1. Mapa de cobertura vegetal en la Cuenca del río Huallaga (ANA, 2015b)

### 2.1.2. Movimientos de masas en el Perú

El (INGEMMET, 2022) desarrolló un mapa de susceptibilidad por movimiento en masa en Perú, como se muestra en la **Figura 2**, con el fin de establecer un modelo que permita identificar las zonas propensas a los eventos de movimientos de masas, contribuyendo con ello a la gestión de riesgo. Además, se identificó aquellas zonas con alta probabilidad de presencia de movimiento de masa, la cual está centrada en la zona andina afectando a las regiones de: Cajamarca, La Libertad, Ancash, Lima, Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Cusco, Puno, Arequipa, Moquegua y Tacna, Junín, Pasco, Huánuco, San Martín y otras (Ordoñez Gálvez, 2019).

El Perú a lo largo de su historia no ha sido ajeno a la ocurrencia de movimientos en masa de diferentes magnitudes, que involucraron diferentes volúmenes de suelos movilizados, pero en todos los casos causaron grandes daños y pérdidas socioeconómicas. Estos eventos han ocurrido en la mayoría de los departamentos, condicionados por la presencia de una zona montañosa, conformada por rocas de diferentes tipos, grados de alteración y fracturamiento, asociados al clima y a la tectónica a la cual han sido y siguen siendo sometidos.



**Figura 2.** Mapa de susceptibilidad de movimiento de masas en Perú (Villacorta et al., 2012)

Los movimientos en masa son principalmente de movimiento rápido a extremadamente rápido y catastróficos, como flujos de detritos, movimientos complejos, deslizamiento de suelos y roca. Se presenta en la siguiente **Tabla 1.** un breve listado de los eventos que causaron grandes daños en el Perú (Vilchez, 2013)

**Tabla 1.** Casos históricos de movimientos en masa que causaron grandes daños en Perú.

Lugar - Año	Fallecidos   Áreas afectadas (Ha)	Hechos
Huánuco/Ambo/Ambo - 2010	30 Fall. 1273 ha	Debido a las constantes lluvias que se presentan en la zona, aumento el caudal de la quebrada Ishanca, deslizando a su vez gran cantidad de lodo y piedras, el cual sepulto viviendas del sector: 26 de noviembre, el Porvenir, 23 de agosto y Juan Velasco Alvarado, jurisdicción del distrito y provincia de Ambo. región Huánuco.
Huánuco/Huánuco/Chinchao - 2010	5 Fall. 866 ha	Debido a las constantes lluvias que se presentan en la zona, se produjo el deslizamiento de ambos cerros que rodean el caserío de Cancejos, ubicado a 45 km carretera Huánuco a Tingo María, jurisdicción del distrito de Chinchao, provincia de Huánuco.
San Martín/Tocache/Tocache - 2009	4 Fall 1623 ha	Ocurridos a causa del desborde del río Huallaga a consecuencia de las precipitaciones pluviales que se vienen dando en la zona.
Pasco/Daniel Alcides Carrión/Yanahuanca - 2009	4 Fall 1737 ha	En la localidad de Yanahuanca por las torrenciales lluvias se han deslizado tierras, lodo y agua siendo colapsados 88 viviendas, 36 viviendas inundadas a punto de colapsar, 132 casas inundadas con lodo y agua, 300 personas damnificadas, 8 heridos de gravedad, 12 heridos leves, 4 personas desaparecidas y 1 mujer fallecida.
Huánuco/Pachitea/Chaglla - 2016	3 Fall 321 ha	Con fecha 13 de abril se produjo un deslizamiento masas del cerro Santa Ana sobre el río Tambo, ubicado en el centro poblado Puca Playa, jurisdicción del distrito de Chaglla - Pachitea. producto de este evento se formó una ola de gran de altura, que arrasó con un grupo de personas que se desplazaban por un camino de herradura al otro lado del río. afectando a la vida y salud.

Huánuco/Leoncio Prado/Mariano Damaso Beraun - 2004	2 Fall 122 ha	Según información del CPDC-Tingo María reporte 002-04DECI-MPLP-TM a horas 5:00 am se produjo un huayco en el Caserío de Puente Durand jurisdicción del distrito de Mariano Damaso Beraun- Las palmas- provincia de Leoncio Prado.
Huánuco/Huánuco/Chinchao - 2004	2 Fall 37 ha	El hecho ocurrió el lunes 05 del mes enero a horas 5:00 am, el huayco arrasó una vivienda y afectó 2 viviendas que estaban ubicadas en el trayecto del huayco
San Martín/Tocache/Polvora - 2011	2 Fall 91 ha	Ocurridos a causa del deslizamiento de un cerro a consecuencia de las precipitaciones pluviales que se dio en la zona, la emergencia se produjo a las 07:30 am. del día 01/03/2011.
Pasco/Daniel Alcides Carrión/Yanahuanca - 2009	1 Fall 22 ha	Las intensas lluvias que se precipito en las zonas altas de la localidad genero un aluvión de grandes proporciones con la activación de la quebrada Chaquipa sector Angash ocasionando daños humanos, materiales y económicos.
Huánuco/Pachitea/Chaglla - 2012	1 Fall 16 ha	El día 02 de febrero del 2012 a causa de un huayco producido en la localidad de Miraflores - CP Pampamarca - distrito de Chaglla colapso la vivienda de material rustico (calamina, madera)

Los procesos de movimientos en masa reconocidos en la Cuenca del río Huallaga están tipificados en cinco grandes grupos: deslizamientos (tipos rotacional y traslacional), caídas (caída de rocas y derrumbes), flujos (flujos de detritos o huaicos), movimientos complejos y reptaciones de suelos. Se han identificado en la cuenca, a partir de datos e inventarios de INGEMMET, 3754 ocurrencias, de las cuales las más frecuentes son los deslizamientos, con 1962 ocurrencias, siendo los más frecuentes los deslizamientos rotacionales (1742); le siguen los flujos (723), que incluyen flujos de lodo o huaycos, flujos de detritos y avalanchas de rocas y detritos. Siguen en orden descendente las caídas (641), que incluyen avalanchas, derrumbes y caídas de rocas; otros peligros (294) que incluyen, erosión fluvial y también inundaciones fluviales. Por último, se ha contabilizado, 72 movimientos complejos, 60 fenómenos de reptación y 2 vuelcos (INGEMMET, 2022).

En el caso de movimientos en masa antiguos, se incluyen deslizamientos o movimientos complejos de grandes dimensiones, reconocibles fundamentalmente por el depósito generado: flujos de detritos de abanicos deluviales, proluviales y aluvionales, así como depósitos de vertiente no diferenciados.

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo o roca que deslizan sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estos planos; la masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido; la velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes proporciones (varios millones de metros cúbicos). Normalmente desencadenados por lluvias, hay que añadir el factor sísmico y el humano, que, al construir obras viales, y desarrollar labores agrícolas y pecuarias altera el estado de equilibrio natural de los taludes. Esto ocurre a lo largo de las principales vías de comunicación (ANA, 2015b).

Los flujos de detritos y lodo tipo huaycos constituyen el proceso evolutivo natural de evacuación de materiales sólidos de la cuenca. Cuando las lluvias estacionales son torrenciales y llegan después de un largo periodo de sequía, encuentran a los suelos en condiciones de estabilidad precaria, Los flujos de agua se van concentrando e incrementan su carga por erosión y caídas sucesivas de material hasta alcanzar tal densidad que permiten transportar bloques rocosos de varias toneladas, con una fuerza destructiva imposible de detener después de que el huayco se formó (ANA, 2015b).

Los derrumbes y caídas de rocas son movimientos de masa de pequeña escala o caída repentina de una porción de suelo o roca por pérdida de la resistencia al esfuerzo cortante, sin presentar un plano de deslizamiento. Factores importantes para su ocurrencia es la fuerte pendiente de las laderas, la erosión por socavamiento de la parte inferior de los taludes u orillas de los ríos y quebradas, produciendo la ruptura de la estabilidad de la pendiente. También es de considerado el grado de alteración y fracturamiento de las rocas y suelos (ANA, 2015b).

Las laderas de fuerte pendiente por su configuración abrupta sobre todo en cotas altas en Yanahuanca, Cerro de Pasco, Ambo, están asociadas a avalanchas y caídas de roca. Los valles de algunos ríos en la cuenca media, que bajan de la Cordillera Oriental a la zona subandina, son especialmente afectadas por flujos de lodos: Abiseo, Matallo, Mishallo y Tocache. Los deslizamientos son los movimientos en masa más frecuentes y abundantes tanto en la Cordillera Oriental como en la Zona Subandina, algunos de ellos asociados a los cortes de laderas para construcción de las vías. En el límite sur con la llanura amazónica, también se dan caídas de rocas y deslizamientos (ANA, 2015b).

### **2.1.3. Influencia de la cobertura vegetal en la ocurrencia de deslizamientos**

La vegetación puede reducir la probabilidad de que se produzca un desprendimiento de tierras mediante la reducción de la presión del agua de los poros del suelo y puede reducir la

posibilidad de erosión del suelo mediante el refuerzo de las propiedades del suelo a través del sistema de raíces. Como se muestra en la **Tabla 2.** otro efecto observado es que la cubierta vegetal estabiliza efectivamente el talud mediante el refuerzo de las raíces; sin embargo, si el talud falla, el peso de las raíces podría en realidad aumentar el tamaño del desprendimiento de tierras. En el caso de desprendimientos poco profundos, desprendimientos de rocas o flujos de escombros, la vegetación también puede reducir la vulnerabilidad de los elementos en riesgo (Estrella & Saalismaa, 2015)

**Tabla 2.** Influencia de la vegetación leñosa en la estabilidad de los taludes

Mecanismos	Influencias en los tipos de desprendimientos	
	Poco profundo, rápido	Profundamente arraigado
<i><b>Mecanismos hidrológicos</b></i>		
Intercepción de las precipitaciones y de la nieve por las copas de los árboles, lo que favorece la evaporación y reduce el agua disponible para la infiltración	B	B
Los sistemas radiculares extraen agua del suelo con fines fisiológicos (a través de la transpiración), lo que provoca una disminución de los niveles de humedad del suelo	B	B
Las raíces, los tallos y la hojarasca orgánica aumentan la rugosidad de la superficie del suelo y su capacidad de infiltración	MA	MA
El agotamiento de la humedad del suelo puede provocar grietas de desecación, lo que da lugar a una mayor capacidad de infiltración del agua hacia un plano de falla más profundo	MA	MA
<i><b>Mecanismos mecánicos</b></i>		
Las fuertes raíces leñosas individuales anclan el manto inferior del suelo en el sustrato más estable	B	MB
Las raíces fuertes se unen a los planos de debilidad a lo largo de los flancos de los posibles desprendimientos	B	B
Las raíces proporcionan una membrana de refuerzo al manto del suelo, aumentando la resistencia al corte del mismo	B	B
Las raíces de la vegetación leñosa se anclan en estratos firmes, proporcionando apoyo al manto de suelo de la ladera mediante el apuntalamiento y el arqueado	B	MB
El peso de los árboles (sobrecarga) aumenta los componentes de la fuerza normal y descendente	MA/MB	MA/MB
El viento transmite las fuerzas dinámicas al manto del suelo a través del tronco del árbol	A	MA

A = mecanismo adverso a la estabilidad; MA = mecanismo marginalmente adverso; MB = mecanismo marginalmente beneficioso; B = mecanismo beneficioso.

**A (Mecanismo Adverso a la Estabilidad):** Indica aquellos efectos o mecanismos que contribuyen negativamente a la estabilidad de un talud o pendiente. Un mecanismo catalogado

como "A" puede aumentar la probabilidad de desprendimientos o deslizamientos debido a acciones que debilitan las condiciones físicas del suelo o incrementan la fuerza motriz detrás de un movimiento de masa.

**MA (Mecanismo Marginalmente Adverso):** Representa efectos que, en menor medida que los adversos, aún pueden tener una contribución negativa a la estabilidad del talud, pero su impacto es menos pronunciado. Esto podría incluir factores que sutilmente disminuyen la cohesión o aumentan la susceptibilidad a la erosión, pero no necesariamente desencadenan un desprendimiento por sí solos.

**MB (Mecanismo Marginalmente Beneficioso):** Son aquellos efectos que aportan positivamente a la estabilidad de los taludes, pero su influencia es relativamente limitada. Pueden ayudar a prevenir movimientos de masa hasta cierto punto o bajo ciertas condiciones, fortaleciendo la estructura del suelo o mejorando su drenaje, aunque su efectividad puede ser moderada.

**B (Mecanismo Beneficioso):** Refiere a las acciones o procesos que tienen un impacto significativamente positivo en la estabilidad de los taludes. Estos mecanismos contribuyen de manera efectiva a prevenir deslizamientos y otros movimientos de masa mediante el fortalecimiento de las condiciones físicas del suelo, como aumentar su resistencia al corte, mejorar la infiltración del agua, y disminuir la presión del agua subterránea.

En este caso, la vegetación no sólo impide el inicio del proceso de desprendimiento, sino que también actúa como barrera protectora. En esta sección, se discute el papel de la vegetación en el peligro de deslizamiento, la vulnerabilidad de los elementos en riesgo y, finalmente, el riesgo de deslizamiento a través de algunos ejemplos para deslizamientos poco profundos, flujos de escombros y caída de rocas (Thomas et al., 2021).

#### **2.1.4. Definición de términos**

**Algoritmo para generación de mallas:** Un algoritmo de malla es una técnica utilizada en el procesamiento de datos espaciales que permite dividir una imagen o un conjunto de datos en una cuadrícula de celdas o mallas para su análisis y procesamiento. Este método es particularmente útil para la clasificación supervisada, donde cada celda puede ser asignada a una clase específica basada en sus características Chang, (2008).

**Alud:** Desprendimiento repentino y violento de nieve o hielo, a menudo mezclado con rocas y sedimentos, desde un frente glaciar o pendiente. Se mueve rápidamente cuesta abajo (INDECI, 2010).

**Aluvi3n:** Movimiento r1pido y violento de agua mezclada con sedimentos y rocas grandes, a menudo provocado por la ruptura de diques o precipitaciones intensas en 1reas elevadas (INDECI, 2010).

**Amenaza:** Peligro inminente de origen natural o humano, generalmente anunciado por predicciones (INDECI, 2010).

**Bosque:** Extensi3n de terreno densamente poblado de 1rboles y arbustos que forman un ecosistema complejo, proporcionando h1bitat a diversas especies y regulando el clima y los ciclos del agua (Food and Agriculture Organization, 2010).

**Bosque primario:** Bosque natural que no ha sido significativamente alterado por actividades humanas y que mantiene sus condiciones ecol3gicas originales (Food and Agriculture Organization, 2010).

**Bosque secundario:** Bosque que se ha regenerado despu3s de una perturbaci3n significativa como deforestaci3n o incendios, pero que no ha alcanzado a1n la complejidad y biodiversidad del bosque primario (Food and Agriculture Organization, 2010).

**Cobertura Forestal:** La cobertura forestal se refiere a la extensi3n de tierra cubierta por bosques. Es un indicador clave del estado de los ecosistemas forestales y juega un papel crucial en el equilibrio ecol3gico, influenciando en el ciclo del agua, la calidad del aire y la biodiversidad ((Shu et al., 2019).

**Cuenca:** 1rea geogr1fica delimitada por divisorias de agua, dentro de la cual todas las precipitaciones se escurren hacia una salida com1n, como un r1o, lago o mar (Leopold et al., 1964).

**Derrumbe:** Ca1da s1bita de suelo, rocas o material no consolidado, generalmente en lugares con fuertes pendientes y discontinuidades en el suelo, pero sin un plano de deslizamiento definido (INDECI, 2010).

**Deslizamiento:** Un deslizamiento de tierra es un movimiento de masa que implica un desplazamiento del terreno, generalmente causado por factores como la saturaci3n del suelo

debido a lluvias intensas o la inestabilidad geológica. Puede variar en velocidad y magnitud, desde lentos desplazamientos hasta rápidas avalanchas (INDECI, 2010).

**Desastre:** Interrupción grave en una comunidad, causando pérdidas humanas, materiales o ambientales significativas, que requieren asistencia externa. Los desastres pueden ser naturales o inducidos por el hombre (INDECI, 2010).

**Desprendimientos de Rocas:** Caída rápida de rocas desde pendientes empinadas, a menudo debido a la pérdida de cohesión y la acción de la gravedad (INDECI, 2010).

**Erosión:** Desgaste o pérdida de suelo y rocas causado por elementos como el agua, viento, hielo y cambios de temperatura (INDECI, 2010).

**Google Earth Engine:** Es una plataforma de procesamiento en la nube que permite el análisis de grandes conjuntos de datos geospaciales. Es ampliamente utilizado en estudios ambientales y de cambio climático, ya que facilita el acceso y análisis de datos satelitales y geográficos a gran escala ((Shu et al., 2019).

**Huayco:** Aluvión, generalmente de magnitud ligera a moderada, frecuente en cuencas hidrográficas peruanas durante la temporada de lluvias (INDECI, 2010).

**Hundimiento:** Descenso vertical de suelo o roca por procesos como la disolución de rocas calcáreas o cambios en la napa freática (INDECI, 2010).

**INDECI (Instituto Nacional de Defensa Civil):** El INDECI es una entidad del gobierno peruano encargada de la gestión del riesgo de desastres. Supervisa y coordina actividades relacionadas con la prevención, preparación, respuesta y rehabilitación en casos de desastres naturales o causados por el hombre (INDECI, 2010).

**Intercuenca:** Región que abarca múltiples cuencas hidrográficas, caracterizada por la interacción y el flujo de agua entre estas cuencas, influenciada por factores topográficos y climáticos (National Research Council, 1999).

**Masas:** Grandes cantidades de material terrestre, como suelo, rocas o sedimentos, que se mueven como una unidad durante eventos de movimientos de masas, incluyendo deslizamientos, aluviones y avalanchas (Cruden & Varnes, 1996).

**Métricas de rendimiento:** Las métricas de rendimiento en el contexto de la clasificación de imágenes y datos incluyen precisión, sensibilidad (recall), puntuación F1 y exactitud. Estas métricas se utilizan para evaluar la eficacia de un modelo de clasificación. La precisión se

refiere a la proporción de verdaderos positivos entre todos los casos predichos como positivos. La sensibilidad (recall) es la proporción de verdaderos positivos entre todos los casos que son realmente positivos. La puntuación F1 es la media armónica de la precisión y la sensibilidad. La exactitud es la proporción de predicciones correctas (tanto verdaderos positivos como verdaderos negativos) sobre el total de predicciones.

**MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer):** MODIS es un instrumento clave a bordo de los satélites Terra y Aqua, operados por la NASA. Proporciona datos en distintas bandas espectrales para observaciones globales de la dinámica terrestre, incluyendo cambios en la cobertura forestal, fenómenos atmosféricos y patrones oceánicos ((Shu et al., 2019)

**Movimiento de Masas:** Término general que abarca varios tipos de desplazamientos del terreno, como deslizamientos, avalanchas, aluviones, huaycos, reptación y erosión. Estos fenómenos pueden ser provocados por factores naturales o actividades humanas y varían en su naturaleza y gravedad (INDECI, 2010).

**NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada):** El NDVI es una medida cuantitativa de la vegetación basada en la observación de las diferencias en la reflectancia entre las bandas del rojo visible y el infrarrojo cercano de la luz. Se utiliza para evaluar si el área observada contiene vegetación viva o no y qué tan densa es esa vegetación. El NDVI es ampliamente utilizado en estudios de cambio de uso del suelo, salud de la vegetación y estudios climáticos ((Shu et al., 2019)

**Reptación:** Movimiento lento y casi imperceptible de suelo o material detrítico en una ladera, caracterizado por desplazamientos verticales mínimos (INDECI, 2010).

**Talud:** Superficie inclinada de la Tierra, ya sea natural o creada por el hombre, incluyendo laderas, cortes y terraplenes (INDECI, 2010).

## 2.2. Estado del arte

### 2.2.1. Internacionales

Se realizó una investigación sobre la influencia de la dinámica de la utilización y cobertura del suelo (LULC) en la predisposición a deslizamientos de tierra, considerando tanto las variaciones históricas como las proyecciones futuras de LULC en una zona montañosa. Se creó un inventario meticuloso de deslizamientos ocurridos en 2013 en Val d'Aran, en los Pirineos de España, que evidenció el impacto de LULC en estos eventos. Fue notablemente

mayor la incidencia y densidad de deslizamientos en áreas de pastos y praderas (52% y 2,0 deslizamientos / km<sup>2</sup>) comparado con las zonas forestales y de matorrales (15% y 0,4 deslizamientos / km<sup>2</sup>, y 23% y 1,7 deslizamientos / km<sup>2</sup>, respectivamente). A través del análisis de fotografías aéreas desde 1946 hasta 2013, se constató un crecimiento del 68 y 65% en bosques y matorrales, respectivamente, y una reducción de pastizales y pedregales entre 33 y 52%. El área urbana se expandió en un 532%, en particular de 1990 a 2001. Con la utilización del software TerrSet se estimó la LULC hacia 2097, anticipando un incremento del 57% y 43% en bosques y áreas urbanas, respectivamente, mientras que se espera una disminución del 28, 46 y 78% en matorrales, pastizales y pedregales. Se generaron mapas de susceptibilidad usando modelos heurísticos y deterministas, clasificando la zona en cuatro niveles de susceptibilidad, de muy bajo a alto, y se validaron con los datos de deslizamientos de 2013 con resultados satisfactorios usando las curvas ROC y el método de gráfico de densidad. Estos modelos predicen que la susceptibilidad a deslizamientos se reducirá un 48% en las zonas de alta susceptibilidad, mientras que las de muy bajo riesgo incrementarán en un 95%, y las de riesgo medio y bajo se mantendrán estables. La investigación se enfocó únicamente en los efectos de los cambios de LULC en la susceptibilidad a deslizamientos y no en los impactos futuros del cambio climático o variaciones en las precipitaciones. Sin embargo, los hallazgos son de utilidad para desarrollar estrategias de gestión del terreno que minimicen el peligro de inestabilidad en las pendientes. (Shu et al., 2019)

Los deslizamientos de tierra representan un grave problema económico y de seguridad, causando anualmente daños multimillonarios y un alto número de fatalidades en zonas montañosas globalmente, situaciones que se intensifican con el cambio climático y la creciente ocupación humana de áreas en riesgo. Los bosques cumplen un papel crucial en la estabilización de laderas y prevención de deslizamientos, pero están siendo sustituidos por otros tipos de uso del suelo. En este contexto, el estudio de (Grima et al., 2020) investigó los deslizamientos en los Andes colombianos, identificando la diferencia en la incidencia de estos eventos en áreas forestales y no forestales y evaluando los costos y beneficios de la protección y restauración forestal en tierras agrícolas. Integrando datos económicos con información geográfica de infraestructuras y susceptibilidad a deslizamientos, se descubrió que las áreas no forestadas presentan una probabilidad 581% mayor de sufrir deslizamientos en comparación con las zonas boscosas. Desde el punto de vista económico, los bosques aportan un valor significativo en la prevención de deslizamientos por su rol en la estabilidad de las laderas. Las evaluaciones más conservadoras sugieren que es más rentable económicamente implementar corredores forestales

mediante la conservación o reforestación, incluyendo compensar a los agricultores por sus costos de oportunidad, en comparación con asumir los costos de los daños por deslizamientos. Estas conclusiones resaltan la importancia de las estrategias de conservación forestal como medida económica y de seguridad en regiones propensas a deslizamientos.

En la investigación llevada a cabo por Vanacker et al., (2021), se abordaron tres cuestiones críticas: (1) la identificación de indicadores de erosión para evaluar la eficacia de la infraestructura natural, (2) la valoración del impacto de la infraestructura natural en la reducción de la erosión tanto local como en áreas adyacentes, y (3) la determinación de las áreas y tipos de estudios requeridos para superar las principales lagunas en el conocimiento actual y la investigación. La infraestructura natural se clasificó en tres categorías: vegetación de protección, prácticas de conservación de suelo y agua, y adaptaciones para gestionar el flujo y transporte de agua. De todos los indicadores físicos, químicos y biológicos que se utilizan para estudiar la erosión del suelo, se destacaron dos por su relevancia: el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en la capa superior del suelo y las tasas de erosión del suelo a nivel de parcela. Los hallazgos indican que, en zonas con vegetación de protección y/o prácticas conservacionistas, los niveles de COS se incrementan entre 1,3 y 2,8 veces comparados con áreas de agricultura convencional. Además, se observó que las tasas de erosión en zonas con infraestructura natural son entre un 38% y un 54% inferiores a las de terrenos agrícolas sin dichas prácticas.

El estudio de Chen et al., (2019) examinó cómo el uso de la tierra y los cambios en la cobertura del suelo pueden influir en la propensión a los deslizamientos de tierra en la región montañosa y montañosa del suroeste de China, una zona que ha experimentado cambios significativos en las últimas décadas a raíz del desarrollo de infraestructuras y un acelerado crecimiento económico. Estos desarrollos pueden intensificar la vulnerabilidad a los deslizamientos de tierra, especialmente debido a la excavación de taludes. La investigación, que se centró en la ciudad de Zhushan en el condado de Xuan'en, tuvo como fin evaluar la influencia del uso del suelo y su cambio en la susceptibilidad a los deslizamientos a nivel regional. Para determinar la distribución espacial de los deslizamientos, se empleó la interpretación visual de fotografías aéreas y de imágenes de teledetección, complementada con trabajos de campo. Se prepararon dos mapas de uso y cobertura del suelo (LUC) con una diferencia temporal de 21 años (1992-2013), usando clasificación de imágenes de redes neuronales para el primero y clasificación de imágenes orientada a objetos para el segundo y tercer mapas. Utilizando el modelo de regresión logística, se seleccionaron seis factores

influyentes como índices de susceptibilidad a los deslizamientos y se empleó un análisis hidrológico para optimizar la segmentación del terreno. Los hallazgos del estudio mostraron que, en el periodo estudiado, hubo una transformación predominante de pastizales y tierras cultivables en terrenos forestales, con un incremento del 34,3%. Además, se observó un aumento del 1,9% en las áreas con actividades de ingeniería humana. Al comparar los mapas de susceptibilidad a deslizamientos de diferentes periodos, se identificó que estas actividades de ingeniería eran el principal factor en el incremento de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la región, lo que subraya la necesidad de un proceso de planificación del uso de la tierra cuidadoso y razonable.

El estudio de Lourembam Chanu & Oinam (2021) se centró en analizar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra utilizando el método del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para desarrollar y evaluar diferentes escenarios basados en varios factores causantes. El AHP es una técnica estructurada que ayuda en la toma de decisiones complejas, y es particularmente útil para comparar elementos que son difíciles de cuantificar. En este caso, se crearon nueve escenarios distintos incorporando variables como la pendiente topográfica (%), elevación, curvatura, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), aspecto, uso de la tierra y cobertura, precipitación y tipo de suelo. Cada escenario fue analizado para comparar la tasa de éxito (cuán bien el modelo podía predecir deslizamientos conocidos) y la tasa de predicción (cuán bien el modelo podría predecir deslizamientos en lugares donde no se conocían previamente). El estudio encontró que el escenario que incluyó todos los ocho factores tuvo una tasa de éxito del 81.61% y una tasa de predicción del 79.88%, lo cual indica un modelo relativamente preciso. Sin embargo, al analizar el impacto de cada factor individualmente, se observó que el uso de la tierra y la cobertura fue el factor más significativo, incrementando la tasa de éxito y de predicción en 7.23% y 6.42% respectivamente cuando se incluyó. Por otro lado, la elevación tuvo el menor impacto individual en el modelo, con un incremento en la tasa de éxito y de predicción de solo 5.67% y 6.68%, respectivamente, al ser excluido.

El resultado clave del estudio fue que incluir más factores en el modelo de susceptibilidad a los deslizamientos de tierra no necesariamente mejora su precisión. Esto sugiere que la selección y el peso adecuado de los factores más influyentes son cruciales para desarrollar un modelo robusto y fiable. Es un hallazgo valioso para los investigadores y planificadores en el campo de la mitigación de desastres, ya que proporciona una base para determinar qué datos son más importantes al evaluar el riesgo de deslizamientos de tierra.

El estudio de Thomas et al., (2021) tiene como objetivo demarcar zonas susceptibles a deslizamientos de tierra utilizando métodos de proceso de jerarquía analítica (AHP) y relación de frecuencia (FR) para encontrar los factores más influyentes y comparar su capacidad de predicción. En el estudio se utilizan diez factores causales (ángulo de la pendiente, elevación, litología, uso del suelo/tipos de cobertura del suelo, índice de humedad de diferencia normalizada, amortiguación de caminos, índice de construcción de diferencia normalizada, índice de proporción de agua, índice de potencia de corriente y suelo). El área de susceptibilidad al deslizamiento se agrupó en cinco clases. Según los mapas de susceptibilidad a deslizamientos elaborados con los métodos AHP y FR, el 11,14% y el 6,57% del área son muy susceptibles a deslizamientos. Finalmente, se trazaron las curvas de características operativas del receptor (ROC) para los mapas de susceptibilidad a deslizamientos preparados con los métodos AHP y FR, y se estimaron los valores del área bajo la curva ROC (AUC) para validar los resultados. Se estimaron valores de AUC de 0,69 y 0,81 para los mapas de zonas susceptibles a deslizamientos preparados con AHP y FR, respectivamente. A partir de los valores AUC, se confirma que el método FR es más eficaz para predecir las zonas susceptibles a deslizamientos de tierra en el distrito de Idukki. Los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos de tierra son útiles para los planificadores del uso de la tierra y los encargados de formular políticas para adoptar medidas de mitigación adecuadas para minimizar los impactos de los deslizamientos de tierra y, por lo tanto, reducir la pérdida de vidas y propiedades.

La investigación de Efiang et al., (2021) tuvo como objetivo modelar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en el estado de Cross River en Nigeria, utilizando un enfoque geoespacial. En este estudio se adoptó el modelo de relación de frecuencia (FR). Al adoptar este enfoque, se desarrolló un mapa de inventario de deslizamientos utilizando 72 ubicaciones de deslizamientos de tierra identificadas durante el trabajo de campo combinado con otras fuentes de datos relevantes. Usando herramientas de análisis de estadísticas geográficas apropiadas dentro de un entorno de información geográfica, las ubicaciones de los deslizamientos de tierra se dividieron aleatoriamente en dos partes en una proporción de 7:3 para los procesos de capacitación y validación, respectivamente. Un total de 12 factores causantes de deslizamientos de tierra, tales como; elevación, pendiente, aspecto, curvatura del perfil, curvatura del plano, índice de posición topográfica, índice de humedad topográfica, índice de potencia de la corriente, uso del suelo/cobertura del suelo, geología, distancia a la masa de agua y distancia a las carreteras principales, fueron seleccionados y utilizados en el

análisis de relaciones espaciales de los factores que influyen en la ocurrencia de deslizamientos de tierra en el área de estudio.

Luego se desarrolló el modelo FR utilizando la muestra de entrenamiento del deslizamiento de tierra para investigar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en el estado de Cross River, que posteriormente se validó. Se descubrió que la distribución de los deslizamientos de tierra en el estado de Cross River en Nigeria estuvo controlada en gran medida por un efecto combinado de factores geoambientales, como una elevación de 250 a 500 m, pendiente de pendiente de 35°, pendientes orientadas en dirección suroeste, grado decreciente. de curvaturas tanto positivas como negativas, valores crecientes del índice de posición topográfica, arenas frágiles, vegetación escasa, especialmente en áreas de asentamiento y superficies desnudas, distancia al cuerpo de agua y carretera principal de 500 m. Se encontró que alrededor del 46% del área mapeada se encontraba en zonas de riesgo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra, que van desde niveles moderados a muy altos. El modelo de susceptibilidad fue validado con un 90,90% de precisión.

Este estudio ha mostrado una investigación exhaustiva de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en el estado de Cross River, que será útil en la planificación del uso de la tierra y las medidas de mitigación contra la vulnerabilidad inducida por deslizamientos de tierra en el área de estudio, incluida la extrapolación de los hallazgos para ofrecer soluciones a otras áreas con condiciones ambientales similares.

### **2.2.2. Nacionales**

En el estudio realizado por Quispe (2018), el propósito fue determinar cómo la erosión del agua afectaba la pérdida de masa en el suelo. La investigación se llevó a cabo en la pendiente de una colina en la comunidad de San Mateo, Lima, situada entre las coordenadas UTM 358 153,502 a 358 159,545 Este y 8 699 926,305 a 8 699 941,252 Norte, a una elevación de 3320 metros sobre el nivel del mar, entre septiembre de 2015 y agosto de 2016. Se establecieron cuatro tratamientos en cuatro bloques, utilizando un total de 16 estacas por parcela para medir la erosión del suelo, específicamente la erosión superficial, en un área de estudio total de 129,96 m<sup>2</sup>. El diseño del estudio fue experimental, de corte longitudinal y de carácter prospectivo, aplicando un diseño completamente al azar y el test de Tukey con un 95% de nivel de confianza para identificar diferencias significativas entre tratamientos. Los hallazgos mostraron que las parcelas con cobertura de pasto nativo (*Festuca amethystina* L.) tuvieron una menor erosión de suelo, con 10,901 toneladas por hectárea al año, en contraste con las parcelas con mulch que

tuvieron 17,18 toneladas por hectárea al año; las de cobertura natural, 28,651 toneladas por hectárea al año; y las de suelo expuesto, 44,85 toneladas por hectárea al año. Este último valor es once veces más alto que el límite de tolerancia de la FAO de 4 toneladas por hectárea al año para suelos poco profundos. La presencia de vegetación se demostró como un mecanismo efectivo para la protección del suelo, reduciendo significativamente la erosión causada por el agua.

La investigación de Paucar Quispe (2016) se centró en evaluar la susceptibilidad al deslizamiento de tierras en la cuenca del río San Fernando, situada en los distritos de Andamarca y Santo Domingo de Acobamba, en las provincias de Concepción y Huancayo, Región Junín, abarcando un rango altitudinal de 1200 a 5400 msnm. Se siguió una metodología propuesta por el Ministerio del Ambiente, que implicó valorar y cuantificar la cobertura vegetal, la inclinación del terreno, la cantidad de lluvia, la fisiografía y la composición litológica del área, asignando un valor numérico a cada factor.

El área examinada mostró una variedad de pendientes desde planas hasta extremadamente inclinadas; cobertura vegetal desde herbazales hasta bosques; fisiografía desde montañas medias a muy empinadas; clases de rocas desde metamórficas a sedimentarias; y un rango de precipitación de 600 a 1400 mm. Los factores que más contribuyeron al riesgo de deslizamientos fueron la inclinación del terreno con un 35%, seguido por la cobertura vegetal con un 30%, la precipitación con un 20%, la litología con un 10% y la fisiografía con un 5%. La investigación permitió identificar 4 centros poblados con una vulnerabilidad muy baja, 11 con vulnerabilidad media, 61 con vulnerabilidad alta y 10 con una vulnerabilidad muy alta al deslizamiento de tierras, concluyendo que el 65.4% del área estudiada presentaba una alta vulnerabilidad a estos eventos.

### **2.2.3. Locales**

En la investigación de Zelaya Moya (2022) se exploró la susceptibilidad a deslizamientos en el distrito de Sillapata, de la provincia de Dos de Mayo, Huánuco, Perú, un área conocida por su preocupante historial de tales eventos. Se seleccionaron doce factores físicos, tanto cualitativos (categóricos) como cuantitativos (continuos), por su relevancia y facilidad de recolección. Estos factores fueron analizados frente a una variable dependiente

binaria, basada en un inventario de campo de 176 puntos (donde el 37,5% correspondía a deslizamientos y el 62,5% a no deslizamientos). La relación entre estas variables se estableció a través de modelos lineales generalizados con función de enlace logit, formando varios modelos predictivos. Mediante el Criterio de Información de Akaike se eligió el modelo más adecuado a los datos de campo. El modelo definitivo, con cinco variables (grado de pendiente, índice de humedad del suelo, índice de vegetación diferencial normalizado, proximidad a cursos de agua y curvatura del perfil del terreno), identificó como umbral óptimo de susceptibilidad el valor de 0,422 (donde 0 es zona estable y 1 es deslizamiento) y demostró una capacidad de discriminación con un AUC ROC del 81,2%. El mapa resultante del modelo mostró una distribución de susceptibilidad con un 33,41% de baja susceptibilidad, un 33,92% de media, un 23,4% de alta y un 9,27% de muy alta en el área de estudio. Las variables NDVI y distancia a ríos tuvieron una correlación negativa con los deslizamientos, mientras que la curvatura del perfil del terreno, el grado de pendiente y el índice de humedad del suelo mostraron una correlación positiva con la ocurrencia de deslizamientos.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

La investigación se realizó en la Intercuenca Alto Huallaga del Perú, como se muestra en la **Figura 3**, la cual abarca las regiones de Huánuco, San Martín, Pasco y una fracción de Loreto, abarcando una extensión de 3 027 600,00 ha.



Figura 3. Ubicación de la intercuenca del Alto Huallaga

Esta cuenca se encuentra en la zona centro del país e involucra regiones de sierra y selva, con una extensión de 3 027 600,00 ha, altitud mínima de 269 msnm que desemboca en el río Marañón, un promedio de 2235,1 msnm y una altura máxima de 5571 msnm ubicada en la ciudad de Pasco, un uso de suelo predominante de bosque permanente (85.96%), y tipo de suelo

de Acrisoles órticos (21.30%) y Litosoles (14.01%), con pendientes mayoritarias de entre 15 a 60 % (50.21%) (ANA, 2015a)

En la cuenca de estudio se pueden encontrar 7 Áreas Naturales Protegidas (ANP) como se muestra en la siguiente **Tabla 3**, estas zonas abarcan 334 879,00 ha de extensión, las categorías incluyen Parques Nacionales, Áreas de Conservación Privadas y Áreas de conservación Regional, las extensiones más grandes de estas zonas de protección son del Parque Nacional Cordillera Azul (82 153,00 ha) y los Bosques de Shunté y Mishollo (191 069,00 ha). En la actualidad, estas zonas de protección se han visto vulneradas tanto en su extensión como en el cuidado, debido a la presión antrópica principalmente.

**Tabla 3.** Áreas Naturales Protegidas en la Intercuenca del Alto Huallaga

Categoría	Nombre	Dispositivo legal	Área dentro de la intercuenca	Área total (ha)
Parque Nacional	Tingo María	LEY N° 15574	4,777.00	4,777.00
Parque Nacional	Río Abiseo	D.S. N° 064-1983-AG	274,520.00	305,858.55
Parque Nacional	Cordillera Azul	D.S. N° 031-2001-AG	1,353.00	398,181.69
Área de conservación Privada	San Marcos	R.M. N° 133-2011-MINAM	985.99	985.99
Área de conservación Privada	Unchog	R.M. N° 240-2020-MINAM	885.28	885.28
Área de conservación Regional	Bosque Montano de Carpish	D.S. N° 014-2019-MINAM	50,559.21	50,559.21
Área de conservación Regional	Bosques de Shunté y Mishollo	D.S. N° 016-2018-MINAM	191,405.53	191,062.55

Fuente: Elaboración propia y SERNANP (2023)

### 3.2. Tipo de investigación

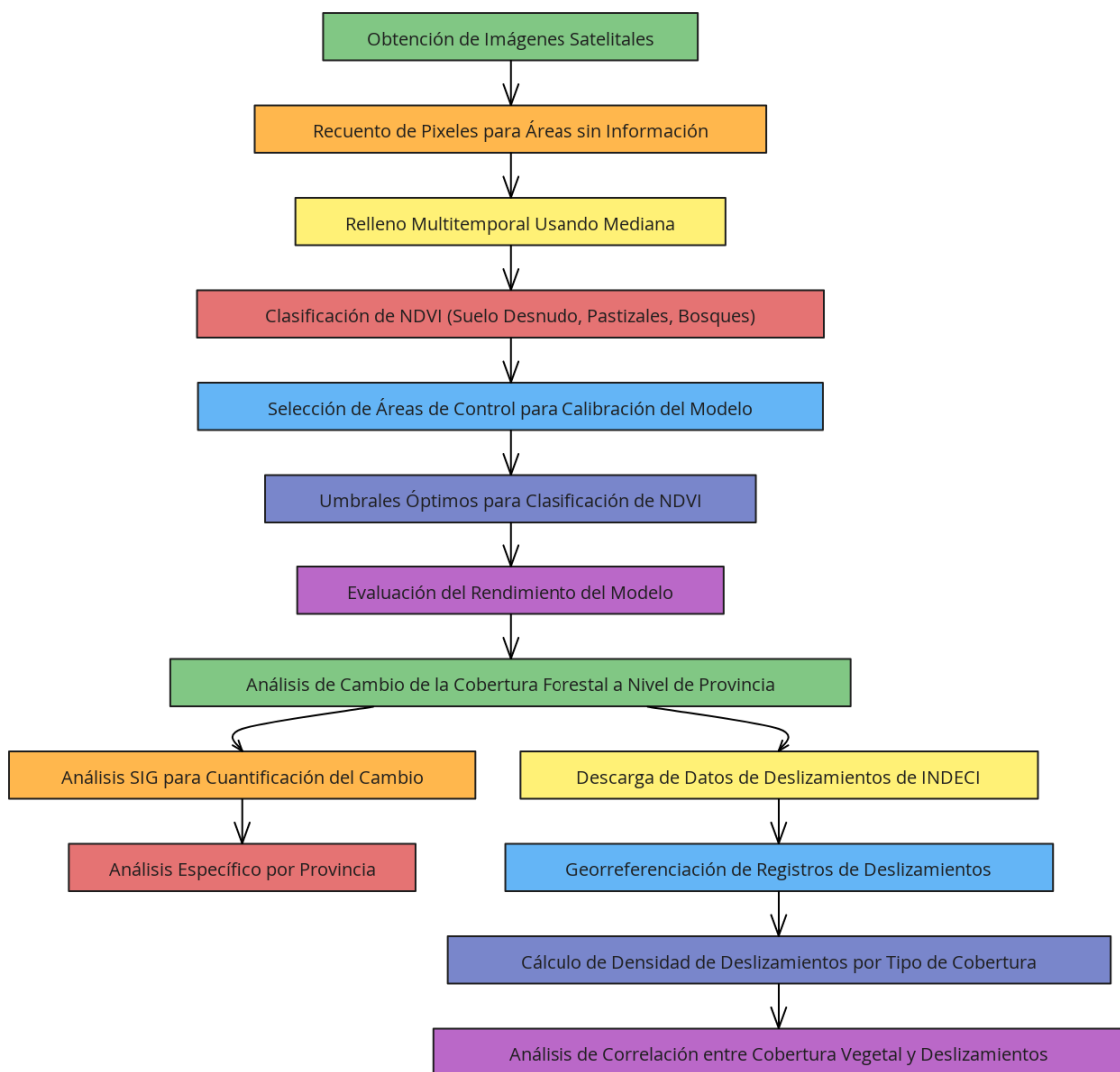
La presente tesis es una investigación básica, ya que está orientada a producir nuevos conocimientos (Hernández - Sampieri et al., 2006) sobre la influencia de la cobertura forestal en las ocurrencias anuales de deslizamientos de masas, porque se centra en entender cómo un factor ambiental (la cobertura forestal) influye en un fenómeno natural (deslizamientos de masas). Es de tipo básica porque busca conocer cuantitativamente las ocurrencias de deslizamiento de masas en las zonas en donde se produjo reducción de cobertura forestal, al margen de las aplicaciones, el conocimiento de este servicio es importante.

De acuerdo con (Hernández - Sampieri et al., 2006) la investigación cuantitativa “*usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías*”, en esta tesis se recolectarán datos de diferentes fuentes (INDECI, GEOCATMIN – INGEMMET, SENAMHI,

ANA, MINAM, SENTINEL, FAO, MIDAGRI, SERFOR) para probar la hipótesis de que la cobertura forestal influye significativamente en las ocurrencias anuales de deslizamiento de masas en la región Huallaga durante el periodo 2003 – 2023, con base a las medición de las ocurrencias anuales de deslizamientos de masas (deslizamientos y huaycos) y pruebas estadísticas.

### 3.3. Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación es no experimental de corte longitudinal. Es no experimental porque no se manipularon las variables, sino que se observaron y analizaron tal y como se encuentran los datos recogidos y el corte es longitudinal porque se analizaron varios años, específicamente el durante el periodo 2003 – 2023 (Hernández - Sampieri et al., 2006).



**Figura 4.** Flujograma metodológico

### 3.4. Metodología

#### 3.4.1. Determinación de la cobertura forestal en la intercuenca del Alto Huallaga el periodo 2003 - 2023

La metodología empleada para el análisis de la vegetación en la cuenca en estudio, se realizó utilizando imágenes satelitales del sensor MODIS con una resolución de 250 metros, abarcó el periodo de 2003 a 2023. La adquisición de datos se automatizó mediante código en Google Earth Engine, lo cual permitió la descarga de imágenes ya corregidas atmosféricamente y recortadas específicamente para la cuenca con un buffer de 500 metros alrededor de la misma.

Para la identificación de áreas sin información se realizó un recuento de píxeles. Las imágenes obtenidas por año incorporaron un procedimiento de completamiento multitemporal en el código de Google Earth Engine, utilizando la mediana como estadística de relleno para las celdas vacías. Esta técnica permitió la visualización de los patrones temporales de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la identificación de huecos de información en la serie temporal anual.

Posteriormente, se ejecutó el completamiento multitemporal, esta vez extendiéndose a todo el periodo de 20 años, manteniendo el uso de la mediana como estadística para el llenado de huecos. Una vez completadas las imágenes de NDVI, se procedió a una clasificación supervisada. Para ello, se identificaron y diferenciaron áreas correspondientes a suelos desnudos, pastizales y bosques en el intervalo de tiempo estudiado. Los bosques protegidos se categorizaron como áreas de bosque, las zonas urbanas como suelos desnudos y las áreas conocidas por prácticas agrícolas como pastos.

Para la clasificación se seleccionaron 37 áreas de control, lo que permitió la calibración y validación del modelo. El uso de 37 áreas de control en la intercuenca Alto Huallaga es razonable porque permite capturar la diversidad ecológica y topográfica de la región, asegurando una representación adecuada de las diferentes clases de cobertura vegetal. Según Congalton y Green (2008), se recomienda utilizar entre 30 y 50 áreas de control para lograr un equilibrio entre precisión y eficiencia en la clasificación supervisada. Este rango es considerado suficiente para asegurar una cobertura representativa y una validación robusta del modelo, garantizando resultados confiables en la clasificación de imágenes satelitales y el análisis de NDVI.

Con el apoyo de un algoritmo de malla, se buscaron los umbrales óptimos para la clasificación de NDVI, utilizando la precisión como función de costo. Finalmente, se evaluaron

las métricas de rendimiento del modelo, incluyendo precisión, sensibilidad (recall), puntuación F1 y exactitud, asegurando la robustez de los resultados obtenidos. Las 37 zonas de control se muestran en la Figura 5.

### **3.4.2. Análisis del cambio de la cobertura forestal en la intercuenca**

La metodología empleada para el análisis de cambio en la cobertura vegetal de la intercuenca del Alto Huallaga y sus provincias correspondientes, comprendió un periodo de estudio del año 2003 al 2022. Inicialmente, se delimitaron las áreas de interés en las imágenes ya clasificadas, definiendo con precisión la extensión de la intercuenca y las divisiones político-administrativas a nivel de provincias.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis temporal donde se compararon las imágenes clasificadas correspondientes al inicio y al final del periodo establecido. Este paso fue crucial para identificar las diferencias significativas que pudieran indicar cambios en la cobertura vegetal. Para cada intervalo de tiempo, se cuantificó la extensión de las categorías de cobertura vegetal utilizando herramientas de análisis en sistemas de información geográfica (SIG), lo que permitió establecer con exactitud las áreas de pérdida o ganancia de vegetación.

La metodología incluyó un análisis detallado a nivel de provincias, replicando la cuantificación de cambios para cada una de ellas. Esto facilitó la identificación de patrones específicos de cambio en la cobertura vegetal que podrían estar asociados con factores locales, como pueden ser la expansión urbana y agrícola. Se realizó un cálculo de las tasas de cambio porcentual para la cobertura vegetal de la intercuenca en su conjunto y para cada provincia de manera individual. La fórmula aplicada implicó la resta de la extensión del área de cobertura vegetal al inicio del periodo de la correspondiente al final, dividida por el área inicial, multiplicando el resultado por cien para obtener un porcentaje.

Este procedimiento metodológico posibilitó la generación de una serie de datos cuantitativos que reflejaron la dinámica de la cobertura vegetal en la región estudiada, sirviendo como base para la interpretación y análisis en etapas subsecuentes del estudio.

### **3.4.3. Evaluación de los cambios en las ocurrencias de deslizamientos bajo cambio de cobertura forestal en la intercuenca del Alto Huallaga el periodo 2003 – 2023**

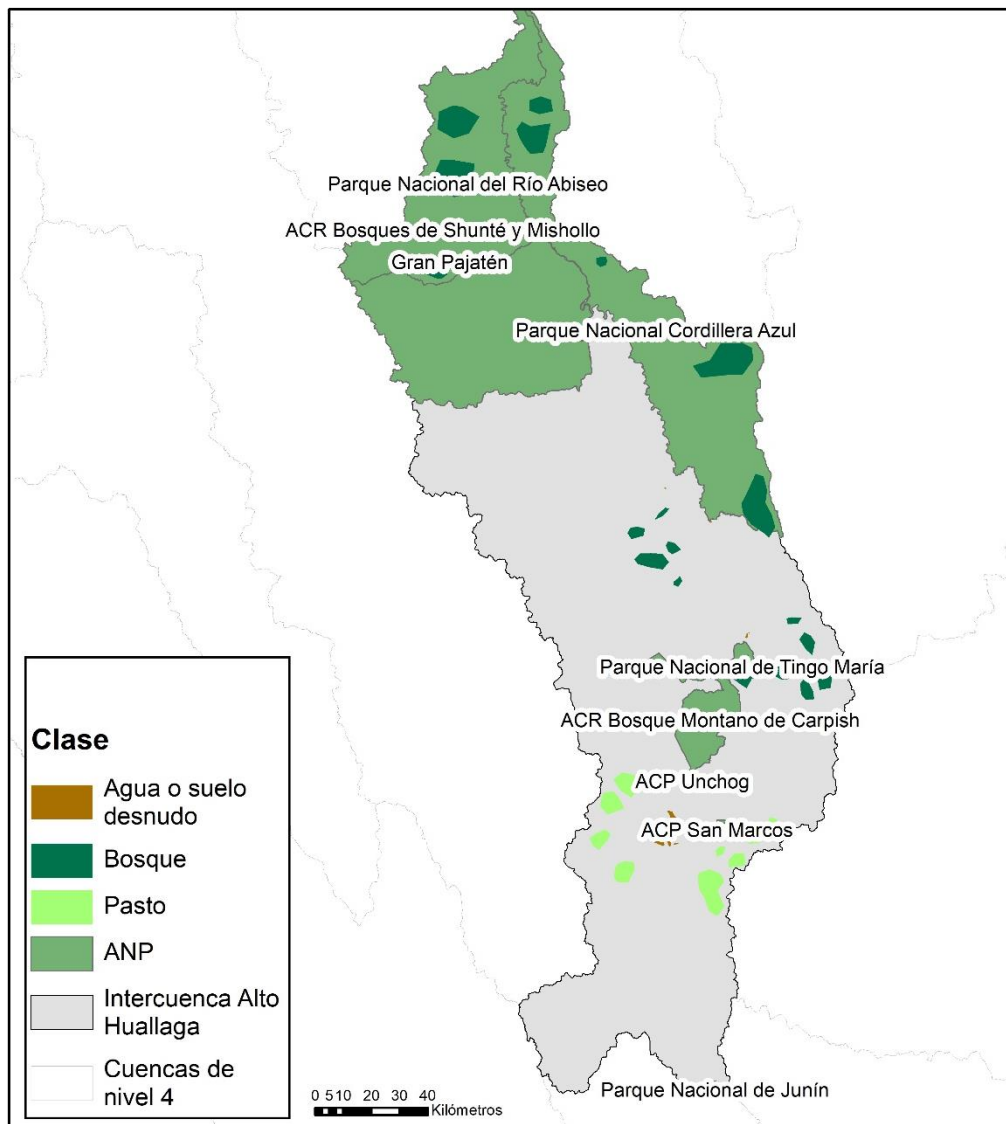
Para determinar la influencia de la cobertura forestal en la ocurrencia de deslizamientos, la metodología empleada comenzó con la adquisición de registros de deslizamientos de masa del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) para el periodo comprendido entre 2003 y 2023. A continuación, se implementó un proceso de georreferenciación de dichos registros para su integración en un sistema de información geográfica (SIG). Se utilizó la capa de cobertura vegetal ya clasificada para superponer los puntos de deslizamientos y correlacionarlos con los distintos tipos de uso de suelo. El análisis espacial incluyó la digitalización de eventos en zonas de suelo desnudo, pastizales y bosques para identificar patrones de ocurrencia. Se realizaron cálculos de densidad de deslizamientos por tipo de cobertura utilizando herramientas SIG especializadas, y se aplicaron técnicas estadísticas para determinar la relación entre la frecuencia de deslizamientos y la cobertura del suelo. Se estimaron las tasas de ocurrencia de deslizamientos ajustando por el área de cada tipo de uso del suelo.

Para comprender la correlación entre la cobertura vegetal y los deslizamientos, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson, examinando la relación entre la extensión de las áreas de bosque y las tasas de pérdida de bosque con la frecuencia de eventos. Se aseguró de controlar variables confusas potenciales mediante la revisión de factores como patrones de uso de suelo y prácticas agrícolas. La metodología concluyó con la interpretación de las correlaciones obtenidas para inferir la influencia de la cobertura vegetal en la estabilidad de las laderas y en la ocurrencia de deslizamientos.

**Tabla 4.** Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson

Rango de valores de $ r_{xy} $	Interpretación
$0.00 \leq  r_{xy}  < 0.10$	Correlación nula
$0.10 \leq  r_{xy}  < 0.30$	Correlación débil
$0.30 \leq  r_{xy}  < 0.50$	Correlación moderada
$0.50 \leq  r_{xy}  \leq 1.00$	Correlación fuerte

Fuente: (Lalinde et al., 2018)



**Figura 5.** Zonas y/o puntos de control

### 3.5. Variables

#### Variable dependiente

Número de deslizamientos: (Número de deslizamientos y huaycos por año)

#### Variable independiente

Cobertura forestal: (variación hectáreas por año)

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Determinación de la cobertura forestal

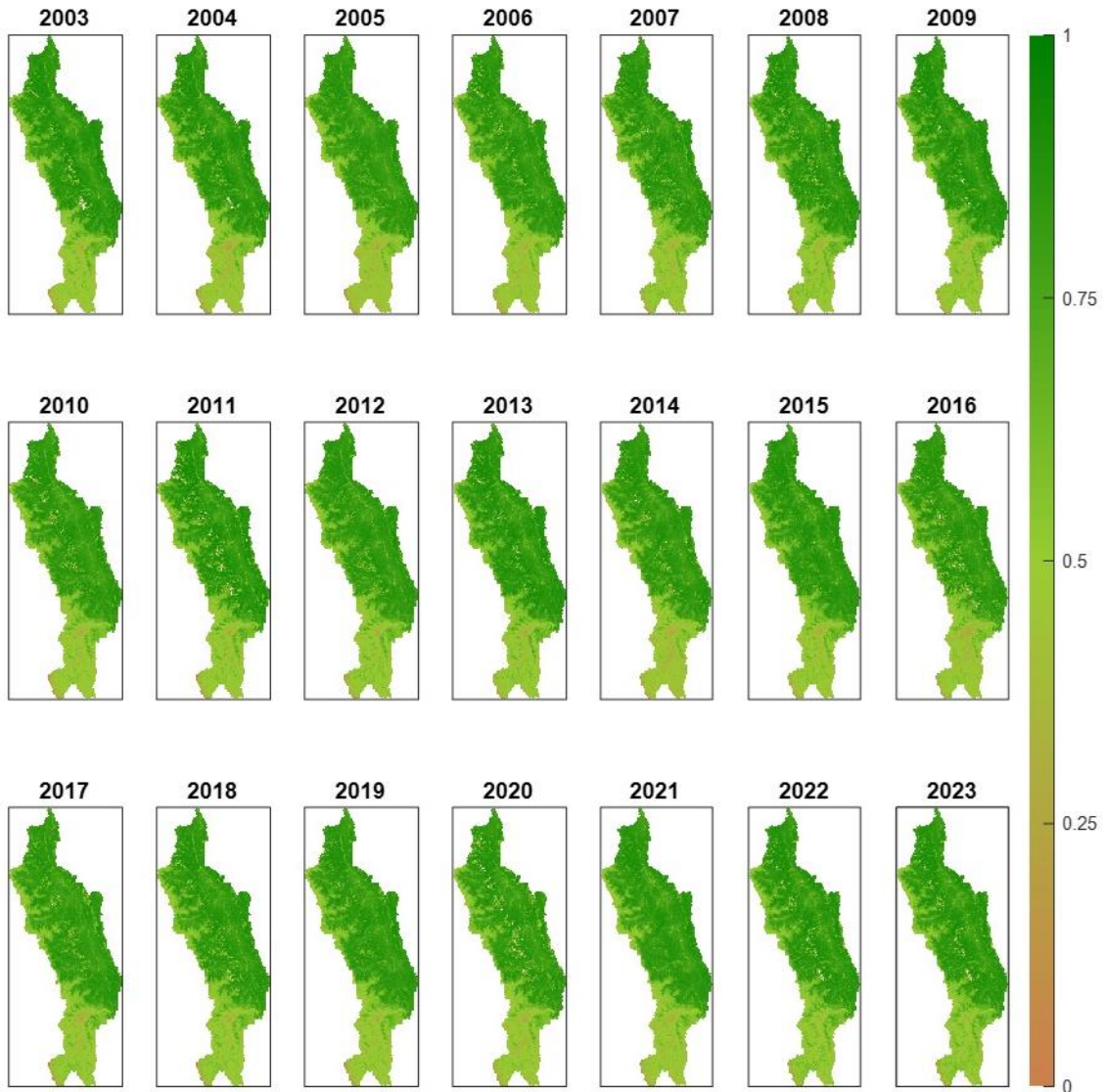
#### 4.1.1. Descarga de NDVI 2003 - 2023

Los resultados indican fluctuaciones en la cobertura vegetal de la intercuenca del Alto Huallaga entre los años 2003 y 2023, como se refleja en los valores promedio de NDVI. El NDVI es un indicador comúnmente utilizado para evaluar la presencia y calidad de la vegetación en estudios ambientales y de teledetección (Liu et al. 2020). Valores de NDVI más altos sugieren una densa cobertura vegetal, mientras que valores más bajos pueden indicar vegetación escasa o suelo desnudo como menciona Cheng et al. (2022).

La **Tabla 5** muestra un valor promedio general de NDVI de 0.719 con un pequeño error estándar ( $\pm 0.00044$ ), lo que es indicativo de una intercuenca con una cobertura vegetal densa, consistente con la predominancia de ecosistemas forestales.

**Tabla 5.** Valores de NDVI en la intercuenca del Alto Huallaga para el periodo 2003 - 2023

Año	NDVI				Área sin información (ha)
	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	
2003	0,7300	0,1590	-0,06	1,00	5 790,0
2004	0,7190	0,1660	-0,06	1,00	3 380,0
2005	0,7060	0,1620	-0,07	1,00	10,0
2006	0,7110	0,1610	-0,07	1,00	2 540,0
2007	0,7170	0,1570	-0,08	1,00	1 080,0
2008	0,7270	0,1570	-0,08	1,00	4 830,0
2009	0,7350	0,1560	-0,07	1,00	3 130,0
2010	0,7150	0,1550	-0,08	1,00	2 490,0
2011	0,7220	0,1640	-0,45	1,00	13 380,0
2012	0,7210	0,1490	-0,07	1,00	390,0
2013	0,7320	0,1570	-0,08	1,00	2 430,0
2014	0,7040	0,1690	-0,08	1,00	2 640,0
2015	0,7250	0,1560	-0,07	1,00	460,0
2016	0,7050	0,1660	-0,52	1,00	6 430,0
2017	0,7150	0,1510	-0,08	1,00	1 090,0
2018	0,7190	0,1510	-0,07	1,00	2 580,0
2019	0,7190	0,1530	-0,08	1,00	450,0
2020	0,7050	0,1600	-0,07	1,00	8 840,0
2021	0,7180	0,1600	-0,08	0,99	70,0
2022	0,7300	0,1500	-0,08	1,00	4 280,0
2023	0,7150	0,1890	-0,04	1,00	488 390,0



**Figura 6.** Índice normalizado de vegetación (NDVI) descargado del satélite MODIS para el periodo 2003-2023. Verde oscuro (0.6-0.9) indica bosques, verde claro (0.2-0.6) representa pastizales, y marrón (-0.1-0.2) corresponde a suelo desnudo.

#### 4.1.2. Procesamiento de imágenes

Se observó que la implementación de una técnica de imágenes multitemporales para el completado de datos faltantes en series de tiempo de índices de vegetación (NDVI) resultó en una matriz de datos más robusta y continua, como se evidencia en la comparación visual (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con respecto a la Figura 6) entre las imágenes proporcionadas antes y después del proceso de llenado de huecos temporales.

En la imagen pre-procesamiento, se percibían áreas con valores faltantes, caracterizados por la ausencia de coloración, lo que indica huecos en la serie temporal del

NDVI. Posteriormente, tras la aplicación del algoritmo de completado, estas áreas fueron rellenadas, lo que sugiere una reconstrucción efectiva de la información perdida o ausente.

El código utilizado emplea una técnica iterativa para cada año de datos, identificando valores NaN (Not a Number) que representan datos faltantes o corruptos. Para cada punto faltante en el año en cuestión, el algoritmo busca valores válidos en años anteriores y posteriores. El empleo de la mediana de los valores no-NaN adyacentes, o en su defecto el valor anterior o posterior más cercano, permite un enfoque conservador que minimiza la introducción de posibles sesgos en la serie temporal.

Esta metodología es congruente con prácticas establecidas en la literatura científica, donde el uso de imágenes multitemporales para el completado de datos faltantes en series temporales de NDVI es una técnica bien documentada y validada (P.-Y. Chen et al., 2002). La elección de la mediana en lugar del promedio ayuda a mitigar el efecto de valores atípicos que podrían distorsionar el resultado del completado (Agapiou et al., 2011).

Por un lado, el método permite aprovechar la dimensión temporal del conjunto de datos para inferir valores faltantes con un grado de certidumbre razonable. Sin embargo, la dependencia de valores temporales adyacentes puede no ser adecuada en todas las situaciones, especialmente si hay cambios significativos en la vegetación entre los años debido a eventos como deforestación o desastres naturales.

#### **4.1.3. Determinación umbrales de clasificación**

El umbral inferior ( $0.382 \pm 0.00091$ ) identifica áreas con baja reflectancia en el infrarrojo cercano, típicamente asociadas con 'Agua o suelo desnudo'. Los valores de NDVI por debajo de este umbral sugieren una escasa o nula vegetación activa, lo cual es consistente con cuerpos de agua o áreas sin cobertura vegetal significativa. En la literatura, (P.-Y. Chen et al., 2002) discute que superficies de agua generalmente presentan valores de NDVI bajos, a menudo cercanos a cero, y suelos desnudos o con vegetación escasa presentan valores bajos pero positivos, lo cual apoya el umbral inferior establecido en el estudio.

Entre los dos umbrales, el NDVI representa 'Pasto', lo que implica una vegetación moderada. En este rango, los valores de NDVI generalmente reflejan áreas de vegetación herbácea o arbustiva, que tienen un nivel intermedio de reflectancia en el infrarrojo cercano. Este enfoque es respaldado por trabajos como los de (Gu et al., 2007), quienes

reconocen que el pastizal muestra valores de NDVI que no son ni muy bajos ni excesivamente altos debido a su densidad de vegetación y estructura.

Por encima del umbral superior ( $0.643 \pm 0.00081$ ), se clasifica el 'Bosque', lo que indica una alta densidad de vegetación con alta reflectancia en el infrarrojo cercano, típica de áreas forestales densas. Este rango superior es consistente con la literatura sobre zonas de vegetación densa, como la proporcionada por (Song et al., 2017), quienes afirman que los ecosistemas forestales muestran altos valores de NDVI debido a la alta biomasa y la estructura compleja del dosel.

La metodología de optimización de umbrales a través de un algoritmo de búsqueda en malla y la función de costo basada en precisión promedio parece ser una estrategia efectiva para determinar puntos de corte precisos en un contexto ecológico específico. El método asegura que se maximice la precisión de la clasificación general, lo que es crítico en zonas con tanta diversidad ecológica como la intercuenca del Alto Huallaga.

La aplicación de esta metodología y la identificación de umbrales específicos en un estudio como este tiene una importancia significativa para la clasificación precisa de la tierra y pueden ofrecer una base sólida para estudios futuros y para la toma de decisiones en gestión forestal y planificación del uso del suelo en regiones similares.

#### **4.1.4. Análisis de métricas de rendimiento**

Las métricas de rendimiento para la clasificación supervisada de uso del suelo a través de índices de vegetación normalizados (NDVI) muestran variaciones significativas a lo largo de los años, reflejando la sensibilidad de la clasificación al contexto anual y las condiciones ambientales, como muestra la **Tabla 6**. La clasificación supervisada, apoyada por 37 áreas de control, proporciona una base robusta para la evaluación de los umbrales óptimos para distinguir entre suelo desnudo o agua, pastos, y bosques. La precisión para 'Suelo desnudo' varía ampliamente, desde un mínimo de 19.52% en 2023 a un máximo de 100% en 2009, indicando una fluctuación en la capacidad del modelo para identificar correctamente esta clase a lo largo de los años. Los Pastos, con una precisión que fluctúa entre 73.252% y 94.968%, muestran menos variabilidad en comparación con 'Suelo desnudo', lo que sugiere una mayor estabilidad en la detección de esta categoría de cobertura de uso del suelo. Los 'Bosques' muestran la precisión más alta y consistente, que en su mayoría se mantiene por encima del 90%, destacando la efectividad del índice NDVI para identificar coberturas de alta densidad vegetal. Las tendencias en la exactitud promedio siguen un patrón similar, con valores

que varían entre 82.075% en 2023 y 98.045% en 2021, lo que demuestra una clasificación global bastante confiable a lo largo de los años, aunque con algunas excepciones notables. El año 2023 se destaca por su baja exactitud y precisión, lo que podría atribuirse a condiciones anómalas o a cambios en la cobertura del suelo que no se ajustan bien a los umbrales definidos. Estas métricas sugieren que el modelo y la metodología son robustos, pero pueden ser susceptibles a variaciones temporales que podrían estar relacionadas con factores como cambios estacionales, eventos climáticos, actividades humanas o errores en la recopilación de datos de referencia. La optimización de umbrales cada año ayuda a mitigar estos problemas y ajustar la clasificación a las condiciones actuales.

**Tabla 6.** Métricas de rendimiento de la clasificación de uso de suelo

Años	Umbral NDVI		Precisión (%)			Exactitud (%)
	Inferior	Superior	Suelo desnudo	Pastos	Bosques	
2003	0.392	0.655	99.607	90.584	97.557	95.847
2004	0.35	0.613	96.816	93.323	96.968	96.091
2005	0.371	0.634	99.357	94.968	99.026	98.015
2006	0.392	0.613	79.738	87.693	97.669	94.539
2007	0.382	0.655	87.35	83.755	98.385	94.021
2008	0.371	0.634	87.815	88.891	96.729	94.496
2009	0.392	0.655	100	94.117	98.48	97.428
2010	0.371	0.634	97.101	88.862	96.896	94.882
2011	0.382	0.655	86.344	83.969	97.904	93.729
2012	0.392	0.634	98.606	91.449	97.614	96.099
2013	0.382	0.655	88.97	88.497	97.261	94.779
2014	0.371	0.613	91.876	92.037	98.432	96.614
2015	0.392	0.676	97.784	94.212	98.662	97.523
2016	0.371	0.634	94.51	91.321	98.233	96.361
2017	0.361	0.655	88.832	84.595	98.336	94.295
2018	0.382	0.655	92.887	86.034	98.597	95.041
2019	0.382	0.655	97.942	91.094	98.943	96.871
2020	0.413	0.634	63.463	80.217	97.422	91.084
2021	0.382	0.655	99.067	94.396	99.3	98.045
2022	0.35	0.655	88.581	83.795	97.591	93.721
2023	0.434	0.634	19.52	73.252	92.137	82.075

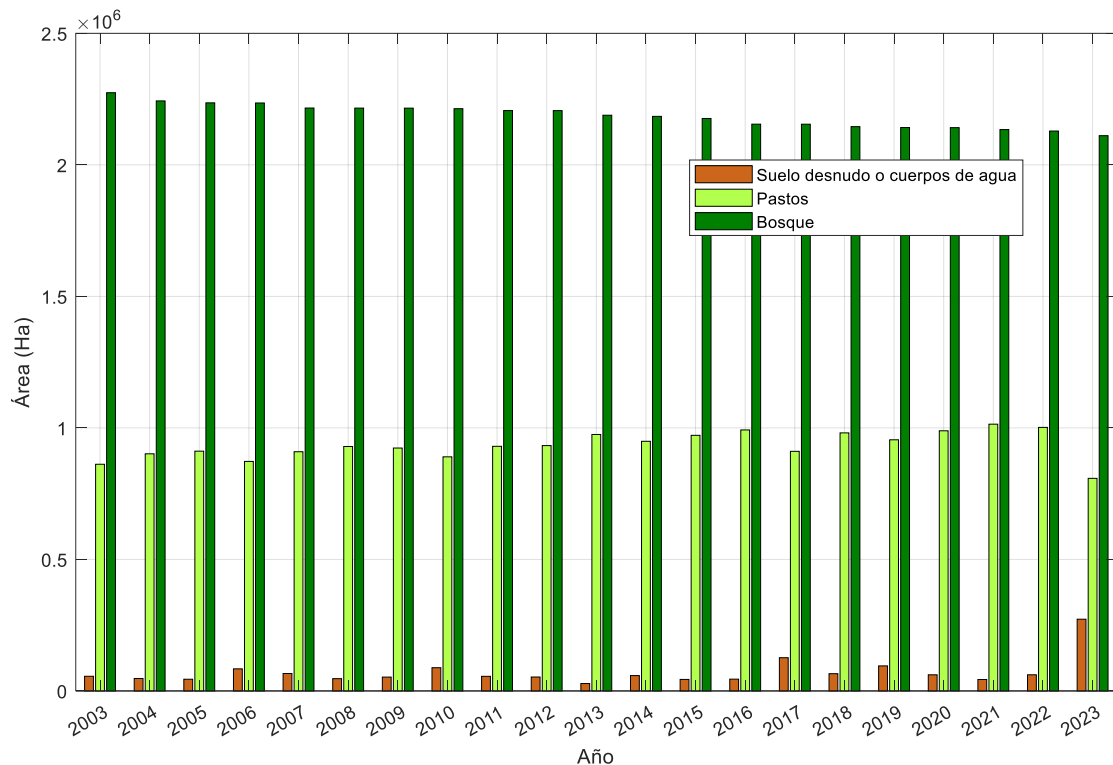
Fuente: Elaboración propia

## 4.2. Análisis de cambios en la cobertura forestal

### 4.2.1. Análisis de cambio en la intercuenca

Como se muestra en la **Figura 7**, en el transcurso del periodo 2003-2023, se desplegó un cambio notable en la configuración del uso del suelo en la intercuenca del Alto Huallaga, situada en la zona central del país. Los datos obtenidos a través de la clasificación

por umbrales del NDVI destacaron una ampliación en las áreas de suelo desnudo en 56.2 km<sup>2</sup>, con una tasa de cambio del 0.48%. Este incremento, además de sugerir posible erosión como postulan autores como (Aslam et al., 2021), podría ser indicativo de expansión urbana, fenómeno respaldado por (Ayalew et al., 2020), quienes argumentan que el suelo desnudo puede ser una representación de la urbanización o de actividades industriales en expansión.



**Figura 7.** Cambio de uso de suelo para la intercuenca del Alto Huallaga 2003 – 2023

Por otro lado, la expansión de pastos en 1400.8 km<sup>2</sup>, con una tasa de cambio del 0.76%, podría reflejar un incremento en las actividades agropecuarias. Según (D. R. Williams et al., 2020), la conversión de áreas forestales y otros tipos de uso del suelo en áreas agrícolas o de pastoreo es una dinámica común en regiones en desarrollo. Este cambio en el uso del suelo puede tener implicancias en la pérdida de biodiversidad y en la alteración de los servicios ecosistémicos.

La contracción de la cobertura forestal en 1457.0 km<sup>2</sup>, representando una tasa de cambio del -0.33%, resalta la presión sobre los ecosistemas forestales. Williams et al. (2020) enfatizan que la deforestación puede influir negativamente en la biodiversidad, los ciclos hidrológicos y el almacenamiento de carbono. Además, esta disminución puede tener un

impacto en las comunidades locales que dependen de los recursos forestales para su subsistencia.

Estos hallazgos enfatizan la necesidad de estrategias de manejo sostenible y políticas de conservación que puedan mitigar los impactos negativos asociados con la alteración del uso del suelo en la intercuenca del Alto Huallaga, contribuyendo a la preservación de la biodiversidad y la sustentabilidad de los recursos naturales.

#### **4.2.2. Análisis de cambio a nivel de provincias de la intercuenca**

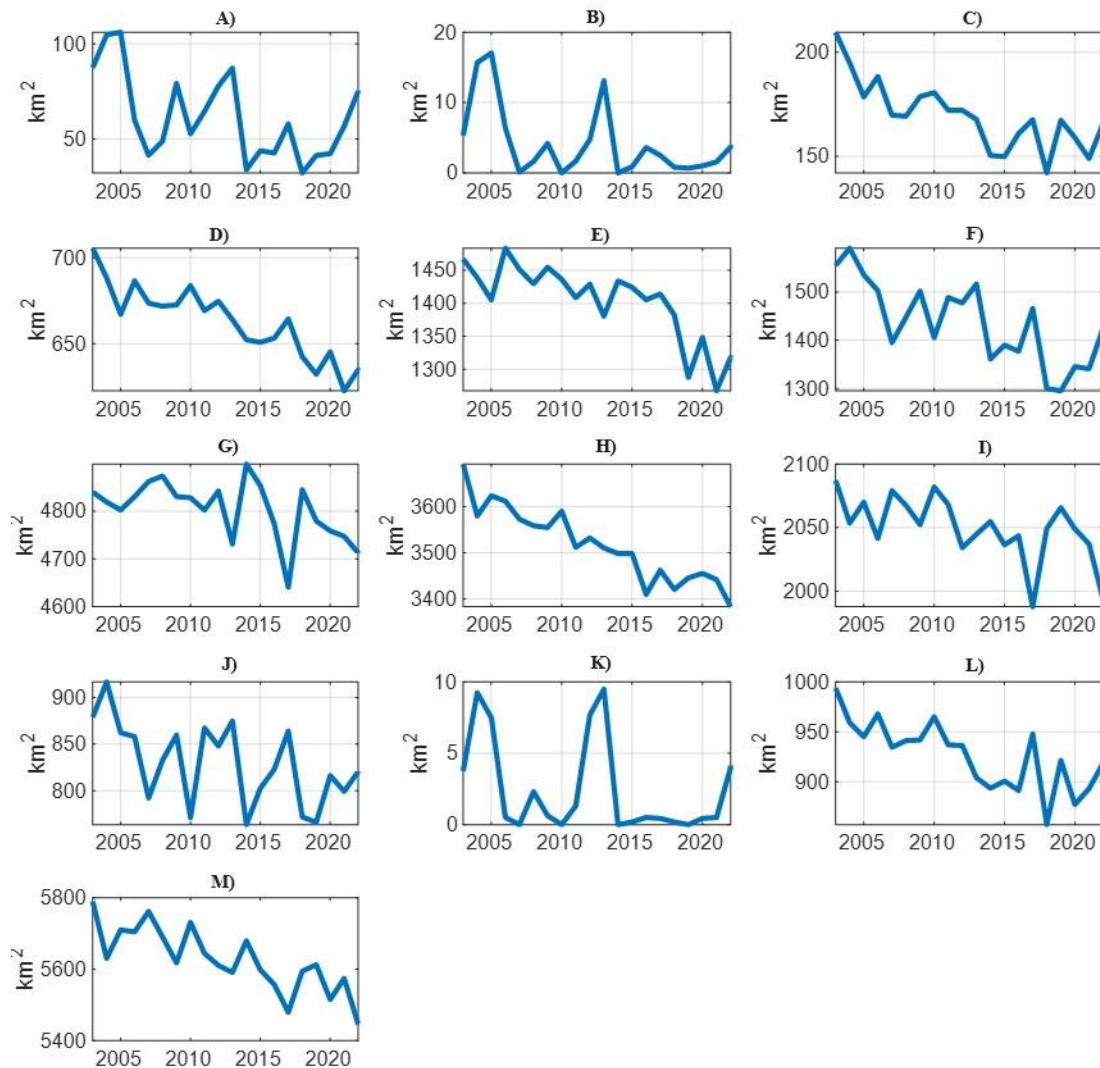
Durante el periodo 2003-2022, en la provincia de *Ambo* se registró una disminución de 1225.0 Ha en la cobertura forestal, correspondiente a una tasa de pérdida del -0.75%. Este índice resaltó una presión significativa sobre los ecosistemas forestales en comparación con otras provincias de la intercuenca. Se identificó que factores como la invasión de tierras para asentamientos y proyectos de reforestación mal gestionados contribuyeron a esta pérdida forestal. En particular, se deforestaron aproximadamente 687 hectáreas en el Centro de Investigación y Capacitación Forestal Bosque Mayuca debido a la invasión de tierras con el objetivo de formar un asentamiento. Según un informe del Monitoring of the Andean Amazon Project (MAAP), esta área mostró un incremento en las cifras de deforestación desde 2017.

Durante el periodo 2003-2023, la provincia de Tocache experimentó una pérdida de 34423.0 Ha de cobertura forestal, equivalente a una tasa de pérdida del -0.31%. Esta cifra, aunque significativa, presenta una discrepancia con los datos proporcionados por la fuente GlobalForestWach (2023), que reporta una pérdida de 38.9 kilohectáreas (kha), o 38900.0 Ha, de bosque primario húmedo en Tocache desde 2002 hasta 2023.

Como muestran la **Figura 8** y la **Tabla 7**, durante el periodo analizado (2003-2022), las provincias de la intercuenca del Alto Huallaga exhibieron diferentes magnitudes y tasas de pérdida de cobertura forestal. Pasco mostró una disminución de -25.0 Ha en la cobertura forestal, aunque su tasa de pérdida fue de 0.32%, la única provincia con una tasa positiva, lo que sugiere un ligero aumento en la cobertura forestal. En contraste, Daniel Alcides Carrión registró la mayor tasa de pérdida con -1.81%, pero con una pérdida de cobertura de 163.0 Ha, la menor pérdida en términos absolutos entre todas las provincias.

Leoncio Prado y Mariscal Cáceres experimentaron pérdidas de 12763.0 Ha y 9350.0 Ha, con tasas de pérdida de -0.13% y -0.23%, respectivamente, lo que indica una

disminución moderada en la cobertura forestal. Tochache, por otro lado, tuvo una de las pérdidas más significativas de 34400.0 Ha, con una tasa de pérdida de -0.31%.



**Figura 8.** Pérdida de cobertura vegetal para el periodo 2003 – 2023 en la intercuenca del Alto Huallaga a nivel de provincias dentro de la intercuenca. A) Provincia de Ambo, B) Provincia de Daniel Alcides Carrión, C) Provincia de Dos de Mayo, D) Provincia de Huacaybamba, E) Provincia de Huamalies, F) Provincia de Huánuco, G) Provincia de Leoncio Prado, H) Provincia de Marañón, I) Provincia de Mariscal Cáceres, J) Provincia de Pachitea, K) Provincia de Pasco, L) Provincia de Pataz, M) Provincia de Tochache.

Las provincias de Pachitea y Pataz mostraron pérdidas de 5825.0 Ha y 7519.0 Ha, con tasas de pérdida de -0.34% y -0.39%, respectivamente. Ambas tasas de pérdida estuvieron entre las más altas registradas, indicando una pérdida relativamente acelerada de cobertura forestal.

Marañón y Huánuco exhibieron pérdidas similares de 30925.0 Ha y 13088.0 Ha, con tasas de pérdida de -0.44% en ambas provincias. Huacaybamba y Huamalíes, con pérdidas de 7 063,0 Ha y 14 919,0 Ha, respectivamente, y tasas de pérdida de -0.53%, compartieron la segunda tasa de pérdida más alta entre todas las provincias.

Ambo, aunque tuvo una de las menores pérdidas absolutas de 1 225,0 Ha, registró una tasa de pérdida de -0.75%, la tercera tasa más alta entre las provincias. Dos de Mayo, con una pérdida de 4394.0 Ha y una tasa de pérdida de -1.17%, tuvo la segunda tasa de pérdida más alta.

**Tabla 7.** Pérdida de cobertura vegetal para el periodo 2003 y 2023 en la intercuenca del Alto Huallaga a nivel de provincias

Provincia	Región	Bosque (ha)		Pérdida (ha)	Tasa de pérdida (%)
		2003	2023		
Ambo	Huánuco	87440.0	74545.05	12898.95	-0.75
Daniel Alcides Carrión	Pasco	531.0	360.42	170.58	-1.81
Dos de Mayo	Huánuco	20963.0	16337.74	4625.26	-1.17
Huacaybamba	Huánuco	70556.0	63122.32	7433.68	-0.53
Huamalíes	Huánuco	146725.0	131020.79	15704.21	-0.53
Huánuco	Huánuco	155525.0	141749.21	13775.79	-0.44
Leoncio Prado	Huánuco	484038.0	470603.26	13434.74	-0.13
Marañón	Huánuco	369219.0	336666.37	32552.63	-0.44
Mariscal Cáceres	San Martín	208719.0	193192.68	15526.32	-0.23
Pachitea	Huánuco	87869.0	81737.42	6131.58	-0.34
Pasco	Pasco	375.0	398.68	23.68	0.32
Pataz	La Libertad	99394.0	91479.26	7914.74	-0.39
Tocache	San Martín	578969.0	542758.47	36210.53	-0.31

Fuente: Elaboración propia

### 4.3. Influencia de la cobertura forestal en los deslizamientos de masas

#### 4.3.1. Influencia en las ocurrencias y tasa de ocurrencias

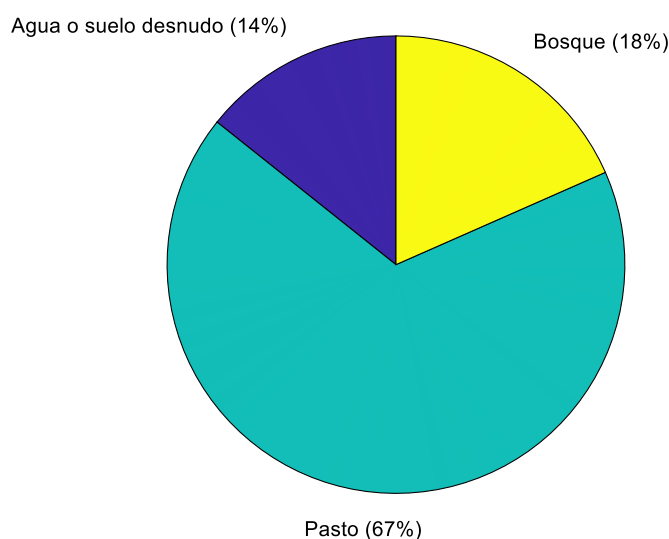
Tal como se muestra en la **Tabla 8** y la **Figura 9**, durante el periodo 2003-2023, la intercuenca del Alto Huallaga registró diferentes frecuencias de deslizamientos asociadas a distintos usos de suelo, revelando patrones de susceptibilidad y resiliencia ambiental. El suelo desnudo mostró 101 ocurrencias de deslizamientos sobre un área promedio de 610.9 km<sup>2</sup>, resultando en una tasa de ocurrencia de 7.9 deslizamientos por año por cada 1000 km<sup>2</sup>. Esta alta tasa puede ser atribuida a la falta de vegetación que normalmente ayuda a estabilizar el suelo y a la presencia de suelos expuestos a erosión eólica e hídrica, lo que incrementa su vulnerabilidad a los deslizamientos (Glade, 2003).

En comparación, los pastos, con un área promedio de 9400.9 km<sup>2</sup>, experimentaron 476 deslizamientos, lo que se traduce en una tasa de 2.4 deslizamientos por año por cada 1000 km<sup>2</sup>. Aunque los pastos suelen tener una cobertura vegetal que puede contribuir a la estabilidad del suelo, prácticas como el sobrepastoreo y la remoción de la vegetación pueden disminuir su efectividad en la prevención de deslizamientos (Van Beek & Van Asch, 2004).

**Tabla 8.** Ocurrencias y tasa de ocurrencias de deslizamientos en la intercuenca del Alto Huallaga para el periodo 2003 - 2023

Uso	Ocurrencias	Frecuencia	Área de uso (km <sup>2</sup> )	Ocurrencias/Área de uso/año <sup>1</sup>
Suelo desnudo	101	14%	610.9	7.9
Pastos	476	67%	9400.9	2.4
Bosques	130	18%	21905.7	0.3

<sup>1</sup> Expresa el número de veces que ocurren deslizamientos al año por cada 1000 km<sup>2</sup> de uso de suelo específico



**Figura 9.** Ocurrencia de deslizamientos en la intercuenca del Alto Huallaga para el periodo 2003 – 2023 para los diferentes usos de suelo

Los bosques, que representan la mayor área de uso de suelo con 21905.7 km<sup>2</sup>, tuvieron la tasa más baja de ocurrencia de deslizamientos con 0.3 eventos por año por cada 1000 km<sup>2</sup>, reflejando 130 ocurrencias en total. La densa cobertura arbórea y la estructura radicular de los bosques son reconocidas por su capacidad para mejorar la estabilidad del suelo y reducir significativamente la incidencia de deslizamientos (Sidle & Ochiai, 2006).

La variación en las tasas de ocurrencia de deslizamientos según el uso de suelo indica una correlación entre la cobertura vegetal y la frecuencia de estos eventos. Los suelos desnudos y los pastizales, con menor cobertura vegetal y raíces menos profundas, presentan tasas de

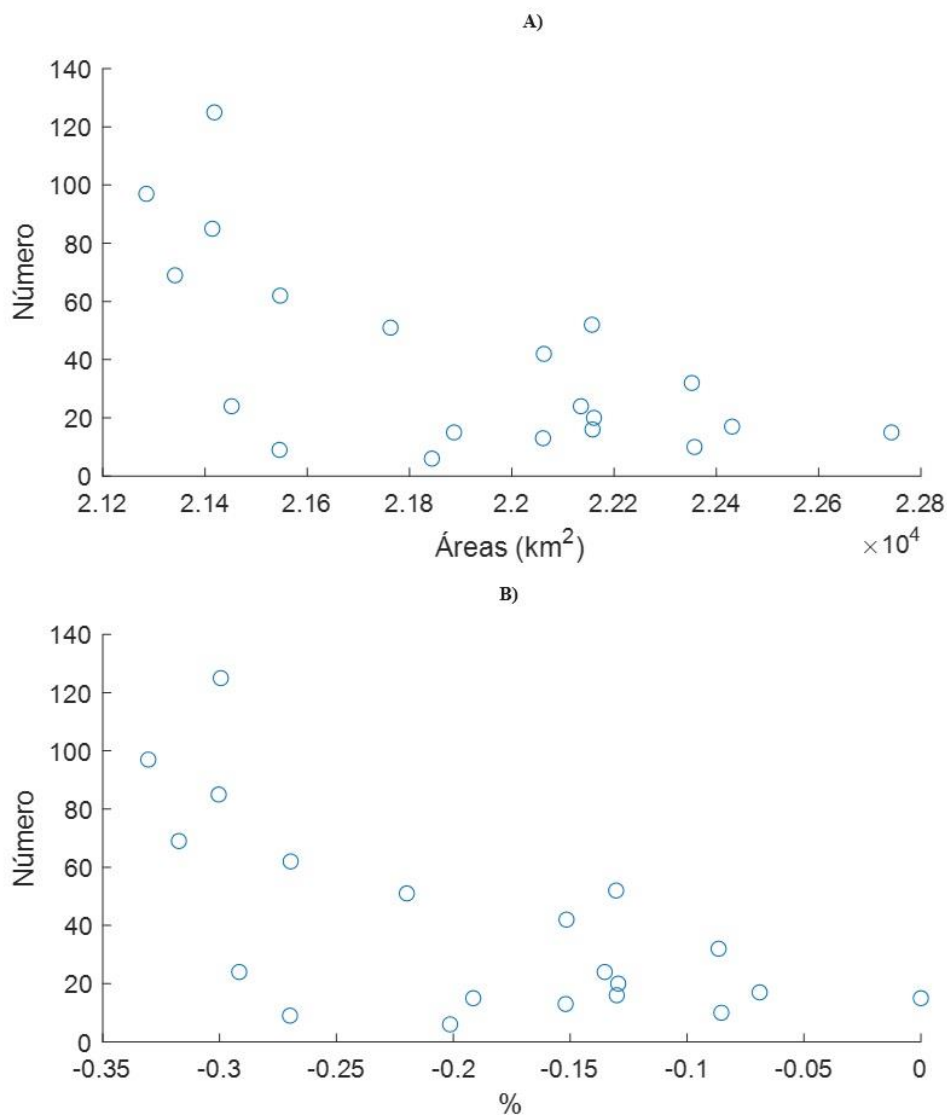
deslizamientos más elevadas en comparación con los bosques. Esto es consistente con la literatura que sugiere que la vegetación juega un papel crítico en la estabilidad de laderas y en la mitigación del riesgo de deslizamientos (Sidle et al., 2006). Los hallazgos subrayan la importancia de la gestión del uso del suelo y la conservación de bosques como medidas preventivas contra los deslizamientos en la intercuenca del Alto Huallaga.

#### **4.3.2. Correlación de las ocurrencias de deslizamientos con la cobertura forestal**

Los datos presentados en los gráficos de la **Figura 10** muestran correlaciones de Pearson de -0.61342 y -0.64872 para las áreas de bosque y las tasas de pérdida de bosque respectivamente, lo que indica una relación inversa entre ambas variables y la ocurrencia de deslizamientos.

El análisis de la correlación entre la extensión de las áreas de bosque y la frecuencia de deslizamientos revela un valor de Pearson de -0.61342. Este resultado implica que a medida que aumenta la extensión del bosque, tiende a haber una disminución en la ocurrencia de deslizamientos. Estos hallazgos son coherentes con la literatura existente que sugiere que los bosques juegan un papel crítico en la estabilización del suelo y en la prevención de deslizamientos, debido a la capacidad de las raíces de los árboles para consolidar el suelo y su contribución en la reducción de la saturación del agua durante eventos de precipitación (Sidle et al., 2006; Bathurst et al., 2009).

La correlación entre las tasas de pérdida de bosque y la ocurrencia de deslizamientos, con un valor de Pearson de -0.64872, sugiere que un incremento en la pérdida de bosque está asociado a una disminución en la incidencia de deslizamientos. A primera vista, este resultado podría parecer contra intuitivo; sin embargo, puede estar influenciado por factores temporales o espaciales no representados directamente en los datos. Por ejemplo, la pérdida de bosque podría correlacionarse con actividades humanas como la reforestación o con prácticas de gestión del suelo.



**Figura 10.** Numero de deslizamientos en la intercuenca del Alto Huallaga para el periodo 2033 – 2023. A) Correlación de las ocurrencias de deslizamientos con las áreas de bosque, B) Tasas de pérdidas de bosque.

La relación entre las tasas de pérdida de bosque y la ocurrencia de deslizamientos, representada por una correlación de Pearson de  $-0.64872$ , indica que a mayor pérdida de bosque (valores más negativos en la tasa de pérdida), se observa un incremento en la ocurrencia de deslizamientos. Este fenómeno es consistente con lo esperado en la teoría de la estabilidad de laderas y el papel de la vegetación en ella.

Los bosques son reconocidos por su función de protección del suelo contra la erosión hídrica y eólica, la cual se ve comprometida a medida que estos son removidos (Larsen y Parks, 1997; Montgomery, 1994). La pérdida de la cobertura arbórea elimina el soporte físico que las

raíces proveen al suelo, aumentando así su vulnerabilidad a los deslizamientos (Sidle y Ochiai, 2006). Adicionalmente, la deforestación puede llevar a un cambio en el régimen hidrológico, aumentando la rapidez con la que el suelo alcanza un estado de saturación durante las precipitaciones y, por ende, su susceptibilidad a deslizarse (Bradshaw et al., 2007).

El aumento en la frecuencia de deslizamientos asociado a tasas más negativas de pérdida de bosque puede también ser influenciado por la manera en que se lleva a cabo la deforestación. Las prácticas no sostenibles, como la tala rasa o la quema, pueden exacerbar la inestabilidad del suelo y aumentar la probabilidad de deslizamientos (Geist y Lambin, 2002). Asimismo, la deforestación en zonas de pendiente pronunciada o en suelos ya de por sí inestables puede tener un efecto más inmediato y severo en términos de deslizamientos (Dai y Lee, 2002).

Es importante considerar que la relación inversa expresada por el coeficiente de Pearson no implica causalidad *per se*. Podría existir una multitud de factores intervinientes o confusos que estén afectando a ambas variables, como patrones de uso de suelo, prácticas agrícolas, variaciones climáticas, entre otros (Turner et al., 1996). Un análisis más profundo que incluya modelos multivariados podría arrojar luz sobre la naturaleza exacta y la fuerza de estas relaciones.

## V. CONCLUSIONES

Se determinó la cobertura forestal en la intercuenca del Alto Huallaga para el periodo 2003 – 2023 con una exactitud promedio de 94.84%, cuyo umbral es de NDVI de 0.719

Entre 2003 y 2023, la intercuenca del Alto Huallaga experimentó una disminución de cobertura forestal de 1145700.0 ha, lo que representa una pérdida del 6.34%.

La ocurrencia de deslizamiento está fuertemente relacionada con la pérdida de cobertura forestal, con un coeficiente de Pearson de -0.61342.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

Se propone que siguiendo la misma metodología del estudio realizado se haga un monitoreo de la cobertura forestal con imágenes de más resolución, para evaluar cambios más pequeños sobre la cobertura forestal.

Se propone no solo evaluar la pérdida sino también zonificarla para entender los patrones espaciales que siguen estas pérdidas de cobertura forestal, para poder hacer seguimiento de esta.

Se propone no solo evaluar la correlación entre la deforestación o pérdida de cobertura forestal y la ocurrencia anual de deslizamientos, sino también con otras sensibles a la pérdida de cobertura forestal como pueden ser la biodiversidad y respuesta hídrica de la cuenca.

## VII. REFERENCIAS

- Agapiou, A., Hadjimitsis, D. G., Papoutsas, C., Alexakis, D. D., & Papadavid, G. (2011). The Importance of Accounting for Atmospheric Effects in the Application of NDVI and Interpretation of Satellite Imagery Supporting Archaeological Research: The Case Studies of Palaepaphos and Nea Paphos Sites in Cyprus. *Remote Sensing 2011, Vol. 3, Pages 2605-2629*, 3(12), 2605–2629. <https://doi.org/10.3390/RS3122605>
- ANA. (2015a). Evaluación de recursos hídricos en la cuenca de Huallaga. *Autoridad Nacional Del Agua*.
- ANA. (2015b). Evaluación de recursos hídricos en la cuenca de la cuenca Huallaga. In *Autoridad Nacional del Agua*.
- Aslam, B., Maqsoom, A., Salah Alaloul, W., Ali Musarat, M., Jabbar, T., & Zafar, A. (2021). Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: Case of district Chitral, Pakistan. *Ain Shams Engineering Journal, 12(2)*, 1637–1649. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2020.09.015>
- Ayalew, D. A., Deumlich, D., Šarapatka, B., & Doktor, D. (2020). Quantifying the Sensitivity of NDVI-Based C Factor Estimation and Potential Soil Erosion Prediction using Spaceborne Earth Observation Data. *Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 1136, 12(7)*, 1136. <https://doi.org/10.3390/RS12071136>
- Chen, L., Guo, Z., Yin, K., Pkha Shrestha, D., & Jin, S. (2019). The influence of land use and land cover change on landslide susceptibility: A case study in Zhushan Town, Xuan'en County (Hubei, China). *Natural Hazards and Earth System Sciences, 19(10)*, 2207–2228. <https://doi.org/10.5194/NHESS-19-2207-2019>
- Chen, P.-Y., Srinivasan, R., Fedosejevs, G., Delia Báez-González, A., Gong, P., Delia, A., Chenl, P.-Y., Srinivasanl, R., Fedosejevsz, G., Delia Biez-Gonzdez3, A., & Gong4, P. (2002). Assessment of NDVI Composites Using Merged NOAA-14 and NOAA-15 AVHRR Data. *Geographic Information Sciences, 8(1)*, 31–38. <https://doi.org/10.1080/10824000209480571>
- Cheng, Y., Zhang, L., Zhang, Z., Li, X., Wang, H., & Xi, X. (2022). Spatiotemporal Variation and Influence Factors of Vegetation Cover in the Yellow River Basin (1982–2021) Based

- on GIMMS NDVI and MOD13A1. *Water* 2022, Vol. 14, Page 3274, 14(20), 3274. <https://doi.org/10.3390/W14203274>
- Efiong, J., Eni, D. I., Obiefuna, J. N., & Etu, S. J. (2021). Geospatial modelling of landslide susceptibility in Cross River State of Nigeria. *Scientific African*, 14, e01032. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2021.E01032>
- Espinoza, A., & Fort, R. (2020). Mapeo y tipología de la expansión urbana en el Perú. In *Asociación de Desarrolladores Inmobiliarios-ADI Perú*.
- Estrella, M., & Saalismaa, N. (2015). The Role of Ecosystems in Disaster Risk Reduction. In *International Journal of Disaster Risk Reduction* (Vol. 13).
- GOREH. (2022). *Estadística Pecuaria*. Dirección Regional de Agricultura. [http://www.huanucoagrario.gob.pe/estadistica\\_agraria\\_detalle.php?id=12&seccion=38&tipo=3&titulo=ESTADISTICA PECUARIA](http://www.huanucoagrario.gob.pe/estadistica_agraria_detalle.php?id=12&seccion=38&tipo=3&titulo=ESTADISTICA PECUARIA)
- Grima, N., Edwards, D., Edwards, F., Petley, D., & Fisher, B. (2020). Landslides in the Andes: Forests can provide cost-effective landslide regulation services. *Science of The Total Environment*, 745, 141128. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141128>
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., Wardlow, B., Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6). <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
- Hernández - Sampieri, R., Fernández - Collado, C., & Baptista - Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (Cuarta). Mc Graw Hill.
- INGEMMET. (2022). *Sistema de Información Geológico y Catastral Minero - GEOCATMIN*. <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- Lalinde, H., Diego, J., Castro, E., Rangel, C., Gerardo, J., Sierra, T., Andrés, C., Torrado, A., Karina, M., Sierra, C., Milena, S., Pirela, B., & José, V. (2018). *Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?>
- Liu, Z., Wang, H., Li, N., Zhu, J., Pan, Z., & Qin, F. (2020). Spatial and Temporal Characteristics and Driving Forces of Vegetation Changes in the Huaihe River Basin from

- 2003 to 2018. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 2198, 12(6), 2198. <https://doi.org/10.3390/SU12062198>
- Lourembam Chanu, M., & Oinam, B. (2021). Impact study for landslide contributing factors using a multi-criterion approach for landslide susceptibility. *Arabian Journal of Geosciences* 2021 14:18, 14(18), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S12517-021-08264-Z>
- MINAM. (2015). Mapa Nacional de Cobertura Vegetal. In *Memoria descriptiva*.
- MINAM. (2016). *Cobertura y Pérdida de Bosques - Huánuco*. SINIA - Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/cobertura-perdida-bosques-huanuco>
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2019). Movimiento en masa por lluvias intensas en el Perú. In *Repositorio Institucional - SENAMHI*.
- Paucar Quispe, R. E. (2016). *Niveles de Vulnerabilidad a deslizamiento de tierras en la Cuenca del Río San Fernando-región Junín*. Univerisdad Nacional del Centro del Perú.
- Quispe, T. C. (2018). *Influencia de la cobertura vegetal en la erosión hídrica del suelo en la comunidad de San Mateo, Perú*. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- SERFOR. (2019). Plan de prevención y reducción de riesgos de incendios forestales. In *Ministerio de Agricultura y Riego*.
- Shu, H., Hürlimann, M., Molowny-Horas, R., González, M., Pinyol, J., Abancó, C., & Ma, J. (2019). Relation between land cover and landslide susceptibility in Val d’Aran, Pyrenees (Spain): Historical aspects, present situation and forward prediction. *Science of The Total Environment*, 693, 133557. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.07.363>
- Song, W., Mu, X., Ruan, G., Gao, Z., Li, L., & Yan, G. (2017). Estimating fractional vegetation cover and the vegetation index of bare soil and highly dense vegetation with a physically based method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58, 168–176. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2017.01.015>
- Thomas, A. V., Saha, S., Danumah, J. H., Raveendran, S., Prasad, M. K., Ajin, R. S., & Kuriakose, S. L. (2021). Landslide Susceptibility Zonation of Idukki District Using GIS in the Aftermath of 2018 Kerala Floods and Landslides: a Comparison of AHP and Frequency Ratio Methods. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis* 2021 5:2, 5(2), 1–27. <https://doi.org/10.1007/S41651-021-00090-X>

- Van Leeuwen, W. J. D., Orr, B. J., Marsh, S. E., & Herrmann, S. M. (2006). Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment*, *100*(1), 67–81. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2005.10.002>
- Vanacker, V., Molina, A., Rosas-Barturen, M., Bonnesoeur, V., Román-Dañobeytia, F., Ochoa-Tocachi, B., & Buytaert, W. (2021). The effect of natural infrastructure on water erosion mitigation in the Andes. *SOIL Discussions*, 1–23. <https://doi.org/10.5194/SOIL-2021-76>
- Vilchez, M. (2013). Casos históricos de movimientos en masa que causaron grandes daños en Perú. *INGEMMET*, 57–60.
- Villacorta, S., Fidel, L., & Zavala Carrión, B. (2012). Mapa de susceptibilidad por remoción en masa de suelos y rocas. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, *69*(3), 393–399.
- Williams, B. A., Grantham, H. S., Watson, J. E. M., Alvarez, S. J., Simmonds, J. S., Rogéliz, C. A., Da Silva, M., Forero-Medina, G., Etter, A., Nogales, J., Walschburger, T., Hyman, G., & Beyer, H. L. (2020). Minimising the loss of biodiversity and ecosystem services in an intact landscape under risk of rapid agricultural development. *Environmental Research Letters*, *15*(1), 014001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AB5FF7>
- Williams, D. R., Clark, M., Buchanan, G. M., Ficetola, G. F., Rondinini, C., & Tilman, D. (2020). Proactive conservation to prevent habitat losses to agricultural expansion. *Nature Sustainability* *2020 4:4*, *4*(4), 314–322. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00656-5>
- Zelaya Moya, A. K. (2022). *Factores físico para un modelo estadístico de susceptibilidad a deslizamientos de masas en el distrito de Sillapata en el año 2021*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.

## ANEXOS



**Figura 10.** Deslizamiento de tierra en el caserío “Las Vegas”.



**Figura 11.** Plantación cupso, bambú, cañabrava, pasto elefante y shimbilla en el deslizamiento del caserío de “Las Vegas”



**Figura 12.** Casas en peligro de hundimiento por estar cerca al área de deslizamiento de tierras.



**Figura 13.** Implementación de geo mallas de protección en el deslizamiento del caserío de “Las Vegas”.



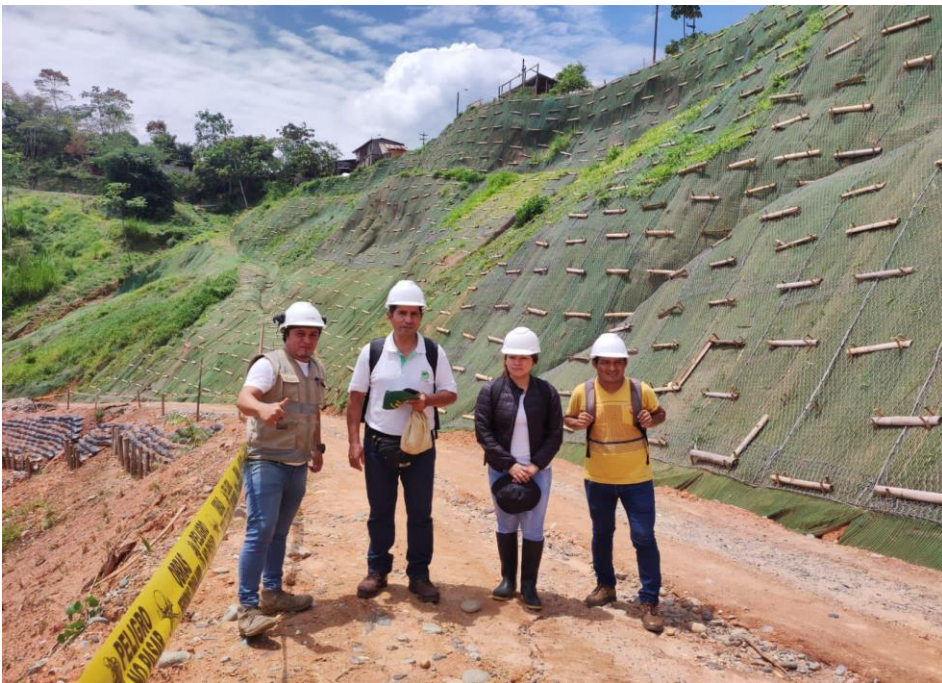
**Figura 14.** Implementación de mallas metálicas para evitar futuros deslizamientos de tierra.



**Figura 15.** Área de deslizamiento en recuperación protegida con geo mallas y pasto.



**Figura 16.** Drenaje de coronación en las geo mallas.



**Figura 17.** Visita de los miembros del jurado al deslizamiento del caserío “Las Vegas”