

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL**



**T E S I S**

**ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA, APLICANDO EL MODELO  
RUSLE, EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE, DISTRITO DE LA  
ENCAÑADA, PROVINCIA CAJAMARCA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO FORESTAL**

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

**LUIS HERNAN SILVA HERAS**

ASESORES:

Ing. M. Sc. WALTER RONCAL BRIONES

Ing. M. Sc. JUAN LINARES ZELADA

**Cajamarca - Perú**

**2025**

**CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD**

1. **Investigador:**  
Luis Hernan Silva Heras  
DNI: 48955470  
Escuela Profesional/Unidad UNC: Ingeniería Forestal
2. **Asesor:**  
Ing. M. Sc. Walter Roncal Briones
3. **Facultad de Ciencias Agrarias/ Ingeniería Forestal**
4. **Grado académico o título profesional:**  
 Bachiller       Título profesional       Segunda especialidad  
 Maestro       Doctor
5. **Tipo de Investigación:**  
 Tesis       Trabajo de investigación       Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
6. **Título de Trabajo de Investigación: "ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA APLICANDO EL MODELO RUSLE, EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, PROVINCIA CAJAMARCA".**
7. **Fecha de evaluación:** 30/07/2025
8. **Software antiplagio:**  TURNITIN    URKUND (OURIGINAL) (\*)
9. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 6%
10. **Código Documento:** oid: 3117:477353267
11. **Resultado de la Evaluación de Similitud:** 6%  
 APROBADO       PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 08/08/2025

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 _____ <b>Ing. Mg. Sc. Walter Roncal Briones</b> 26632728

\* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"  
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
Secretaría Académica



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

En la ciudad de Cajamarca, a los doce días del mes de junio del año dos mil veinticinco, se reunieron en el ambiente **2C - 202** de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 122-2025-FCA-UNC, de fecha 07 de febrero del 2025**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA, APLICANDO EL MODELO RUSLE, EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE, DISTRITO DE LA ENCAÑADA, PROVINCIA CAJAMARCA"**, realizada por el Bachiller **LUIS HERNAN SILVA HERAS** para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL**.

A las siete horas y cincuenta minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de dieciséis (16); por tanto, el Bachiller queda expedito para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL**.

A las nueve horas y cinco minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia  
**PRESIDENTE**

Ing. Nehemias Honorio Sangay Martos  
**SECRETARIO**

Ing. Mg. Sc. Luis Dávila Estela  
**VOCAL**

Ing. M. Sc. Walter Ricardo Roncal Briones  
**ASESOR**

Ing. M. Sc. Juan Linares Zelada  
**ASESOR**

**DEDICATORIA**

A mi familia, en especial a mis abuelos y a todos los que me ayudaron en la etapa de mi carrera profesional

## **AGRADECIMIENTO**

Al Ing. M. Sc. Walter Roncal Briones y al Ing. M. Sc. Juan Linares Zelada, por sus valiosos consejos y guía a lo largo del desarrollo de esta investigación. Su apoyo fue clave para superar los desafíos del proceso y alcanzar los objetivos propuestos.

Al Ing. M. Sc. Luis Dávila Estela, por sus acertadas orientaciones y recomendaciones, que contribuyeron significativamente a la culminación del presente trabajo.

Al Ing. Eduardo Daniel Mantilla Cáceres, por su colaboración durante la salida de campo. Su disposición y asistencia fueron determinantes para la realización de observaciones que enriquecieron esta investigación.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>i</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>ii</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	<b>viii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>x</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Descripción del problema .....	2
1.2. Formulación del problema .....	3
1.2. Justificación.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo general .....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Hipótesis .....	4
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
2.1. Antecedentes .....	5
2.2. Bases Teóricas.....	11
2.2.1. Erosión de suelo .....	11
2.2.2. Proceso de la erosión de Suelo.....	12
2.2.4. Factores que influyen en la erosión hídrica .....	15

2.2.5. Formas de erosión .....	17
2.2.6. Cuenca Hidrográfica.....	20
2.2.7. Métodos Para cuantificar la erosión hídrica en una Cuenca .....	20
2.2.8. Factores que componen el modelo RUSLE .....	23
2.2.8.6. Técnicas de conservación de suelos.....	31
2.2.10. Uso del SIG en la Erosión Hídrica.....	33
2.3 Definición de Términos.....	34
a. Cobertura vegetal.....	34
b. Energía cinética de la lluvia.....	34
c. Fisiografía.....	34
d. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) .....	34
e. Pendiente .....	35
f. Red hidrográfica.....	35
g. Relieve .....	35
<b>III. MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>36</b>
3.1. Ubicación de la cuenca del Río Grande .....	36
3.3. Características de la cuenca del Río Grande.....	39
3.4. Equipos y materiales.....	51
3.5. Variables.....	51
3.5.1 Unidad de análisis.....	51
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>64</b>
4.1 Factores que intervienen en la estimación del Modelo RUSLE.....	64
4.1.1 Factor R (Erosividad de la lluvia).....	64
4.1.2 Factor k (Erodabilidad del suelo).....	67

4.1.3 Factor LS (Longitud y pendiente).....	69
4.1.4 Factor C (Cobertura vegetal) .....	73
4.1.5 Factor P (Prácticas de conservación del suelo).....	78
4.2 Estimación de las tasas de erosión hídrica en la cuenca del Río Grande.....	80
<b>V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>85</b>
<b>VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>86</b>
<b>VII. ANEXOS .....</b>	<b>96</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Clasificación del Factor R (anual) .....	24
<b>Tabla 2.</b> Valores del factor LS en función de la pendiente .....	28
<b>Tabla 3.</b> Factor de prácticas de conservación (P).....	31
<b>Tabla 4.</b> Quebradas y río principal pertenecientes a la cuenca del río Grande .....	39
<b>Tabla 5.</b> Número total de Lagunas en la cuenca del Río Grande .....	41
<b>Tabla 6.</b> Identificación del clima en la cuenca del Río Grande.....	42
<b>Tabla 7.</b> Tipos de suelos en la cuenca Río Grande.....	42
<b>Tabla 8.</b> Identificación formaciones geológicas en la cuenca del Río Grande .....	43
<b>Tabla 9.</b> Identificación de unidades geomorfológicas en la cuenca del Río Grande.....	44
<b>Tabla 10.</b> Unidades fisiográficas en la cuenca del Río Grande.....	46
<b>Tabla 11.</b> Zonas de vida en la cuenca del Río Grande .....	47
<b>Tabla 12.</b> Tipos de cobertura vegetal y usos actuales de la cuenca río Grande .....	48
<b>Tabla 13.</b> Estaciones meteorológicas pluviométricas consultadas .....	55
<b>Tabla 14.</b> Clasificación de Índice Modificado de Fournier .....	57
<b>Tabla 15.</b> Información vectorial de suelos (FAO).....	57
<b>Tabla 16.</b> Factor C, según tipo y cobertura de uso del suelo de la cuenca del río Grande .....	60
<b>Tabla 17.</b> Rangos de pérdida de Suelo.....	63
<b>Tabla 18.</b> Determinación del Factor R con datos de precipitación anual del SENAMHI (2013– 2023).....	64
<b>Tabla 19.</b> Datos interpolados con la herramienta Spline .....	65
<b>Tabla 20.</b> Factor K calculado .....	67
<b>Tabla 21.</b> Área total del Factor LS .....	70
<b>Tabla 22.</b> Clasificación del factor C... ..	75

<b>Tabla 23.</b> Pérdida de suelo por erosión hídrica .....	79
---	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Componentes de la erosión .....	12
<b>Figura 2.</b> La erosión del suelo por efectos de las lluvias .....	13
<b>Figura 3.</b> Proceso de la erosión hídrica .....	15
<b>Figura 4.</b> Proceso de erosión por salpicadura .....	18
<b>Figura 7.</b> Ubicación de la zona de estudio .....	36
<b>Figura 8.</b> Ubicación de las estaciones meteorológicas .....	37
<b>Figura 9.</b> Agricultura andina en la cuenca del Río Grande.....	48
<b>Figura 10.</b> Bofedal en la cuenca del Río Grande .....	49
<b>Figura 11.</b> Lagunas en la cuenca del Río Grande.....	49
<b>Figura 12.</b> Matorral arbustivo en la cuenca Río Grande – caserío Yerba buena .....	50
<b>Figura 13.</b> Pajonales en la cuenca río Grande - caserío las lagunas de Combayo .....	50
<b>Figura 14.</b> Procemiento para delimitar la cuenca rio Grande .....	53
<b>Figura 15.</b> Procedimiento para calcular el Factor .....	56
<b>Figura 16.</b> Procedimiento para calcular el Factor .....	58
<b>Figura 17.</b> Procedimiento para calcular el Factor LS.....	59
<b>Figura 18.</b> Procedimiento para calcular el Factor C.....	60
<b>Figura 19.</b> Procedimiento para calcular el Factor P.....	62
<b>Figura 21.</b> Mapa del Factor de Erosividad aplicando Índice modificado de Fournier.....	65
<b>Figura 22.</b> Mapa del Factor K de la cuenca rio Grande.....	68
<b>Figura 23.</b> Rangos de valores de Factor LS .....	71
<b>Figura 24.</b> Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.....	73
<b>Figura 26.</b> Factor C de la cuenca del Río Grande .....	76
<b>Figura 27.</b> Factor P en la cuenca del Río Grande.....	79
<b>Figura 28.</b> Pérdida de suelo por erosión hídrica.....	82

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
<b>Anexo 1.</b> Precipitación mensual y anual de la estación Augusto Weberbauer.....	96
<b>Anexo 2.</b> Precipitación mensual y anual de la Estación Granja Porcón .....	96
<b>Anexo 3.</b> Precipitación mensual y anual de la Estación Celendín.....	97
<b>Anexo 4.</b> Precipitación mensual y anual de la Estación Encañada.....	97
<b>Anexo 5.</b> Clasificación del factor C de la cuenca del Río Grande.....	98
<b>Anexo 6.</b> Mapa Hidrográfico de la cuenca del Río Grande .....	99
<b>Anexo 7.</b> Mapa de Suelos de la cuenca del Río Grande.....	100
<b>Anexo 8.</b> Mapa Geológico de la cuenca del Río Grande .....	101
<b>Anexo 9.</b> Mapa Geomorfológico de la cuenca del Río Grande .....	102
<b>Anexo 10.</b> Mapa Fisiográfico de la cuenca río del Río Grande.....	103
<b>Anexo 11.</b> Zonas de vida de la cuenca río Grande.....	104
<b>Anexo 12.</b> Cobertura y uso actual de la cuenca río Grande .....	105
<b>Anexo 13.</b> Parte alta de la cuenca del Río Grande.....	106
<b>Anexo 14.</b> Parte media de la cuenca – El Milagro de Combayo .....	106
<b>Anexo 15.</b> Parte baja de la cuenca del Río Grande – Sector Cashapampa.....	107
<b>Anexo 16.</b> Vista panorámica del Río grande, zona de Combayo .....	107
<b>Anexo 17.</b> Zonas con erosión severa en la parte baja de la cuenca del Río Grande.....	108
<b>Anexo 18.</b> Zonas con alto grado de erosión - Caserío Maraypata .....	108
<b>Anexo 19.</b> Suelos con erosión moderada en el caserío de Quinuapampa .....	109
<b>Anexo 20.</b> Erosión leve en el caserío Yerbabuena Alta.....	109
<b>Anexo 21.</b> Barreras vivas de <i>Polylepis</i> sp. en el caserío de Yerba buena chica .....	110

## RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo estimar el grado de erosión hídrica en la cuenca del río Grande, ubicada en el distrito de La Encañada, Cajamarca, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) y el uso de datos geoespaciales. Para ello, se analizaron los factores que influyen en la erosión: la erosividad de la lluvia (factor R), la erodabilidad del suelo (factor K), la longitud y pendiente del terreno (factor LS), la cobertura vegetal (factor C) y las prácticas de conservación del suelo (factor P). La metodología se desarrolló en tres etapas: (1) recopilación y análisis preliminar de datos e imágenes satelitales, (2) verificación en campo para validar la precisión de los insumos, y (3) procesamiento de la información mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar las tasas de erosión y generar los respectivos mapas temáticos. Los resultados indican que la pérdida de suelo leve predomina con un 87.58 % (10,002 ha), registrando entre 0 a 5 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>. Le sigue la pérdida moderada con 11.06 % (1,263 ha) y tasas de 5 a 10 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, y la alta con 1.3 % (148 ha), entre 10 a 20 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>. Finalmente, las pérdidas muy alta y severa representan solo el 0.05 % (6 ha) y 0.01 % (1 ha), con valores entre 20 a 40 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>.

**Palabras claves:** Cuenca, Erosión hídrica, Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada, Factores de erosión.

## ABSTRACT

This study aims to estimate the degree of water erosion in the Río Grande watershed, located in the district of La Encañada, Cajamarca, through the application of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and the use of geospatial data. The factors influencing erosion were analyzed: rainfall erosivity (R factor), soil erodibility (K factor), slope length and steepness (LS factor), vegetation cover (C factor), and soil conservation practices (P factor). The methodology was developed in three stages: (1) collection and preliminary analysis of data and satellite imagery, (2) field verification to validate the accuracy of inputs, and (3) data processing using Geographic Information System (GIS) tools to estimate erosion rates and generate thematic maps. The results indicate that 87.58% of the area (10,002 ha) presents slight erosion, 11.06% (1,263 ha) shows moderate erosion, and only 1.3% (148 ha) exhibits high levels of soil degradation. Areas with very high and severe erosion are minimal, covering 0.05% (6 ha) and 0.01% (1 ha), respectively.

**Keywords:** Basin, Water erosion, Revised Universal Soil Loss Equation, Erosion factors.

## I. INTRODUCCIÓN

La erosión ha aumentado de manera significativa a nivel mundial, lo que ha provocado daños irreversibles, como el deterioro y la pérdida de biodiversidad, impactos negativos en la agricultura, en los cuerpos de agua dulce y, en términos generales, en la humanidad (López, 2012). Según Alvarado et al. (2007), este problema se considera uno de los más graves en el ámbito ambiental, afectando aproximadamente al 80% de la superficie terrestre.

En el Perú, las zonas altoandinas enfrentan un serio desafío ambiental que compromete la seguridad hídrica y alimentaria. Estas áreas, clave para el suministro de servicios ecosistémicos y agua a las ciudades costeras, son altamente vulnerables a la erosión de suelos. Uno de los factores más impactantes es la precipitación, que genera acumulación de sedimentos, obstruye cauces, reduce la calidad del agua y limita la regulación de embalses (SENAMHI, 2017). En la zona de estudio, predominan laderas inclinadas y hay escasez de áreas planas, lo que facilita el escurrimiento. Las lluvias son estacionales, intensas entre diciembre y marzo, con precipitaciones de 250 a 1000 mm (Taboada, 2011).

Este estudio se enfoca en analizar y estimar la erosión hídrica en la cuenca del río Grande, ubicada en la provincia y región de Cajamarca, durante el periodo 2013–2023, con el fin de identificar las áreas más vulnerables a la erosión y facilitar la toma de decisiones para el manejo sostenible del territorio, promoviendo la protección ambiental y el desarrollo socioeconómico. Para ello, se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), complementada con técnicas de teledetección y el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

### **1.1. Descripción del problema**

La erosión hídrica es uno de los principales problemas ambientales a nivel global, provocada por factores naturales y actividades humanas como el mal uso del suelo, la deforestación y prácticas agrícolas inadecuadas. Sus efectos impactan la producción de alimentos y deterioran la calidad del agua al reducir la capacidad de embalses y contaminar cuerpos hídricos con sedimentos (FAO, 2017).

En el Perú, más del 15 % del territorio ha sido afectado por procesos de degradación del suelo, comprometiendo la calidad de vida del 11 % de la población, especialmente en regiones del sur. De continuar esta tendencia, se estima que hacia el año 2100, aproximadamente el 64 % del país podría presentar algún grado de degradación (MINAM, 2013). Actualmente, se reporta una superficie erosionada de 127 945 790 hectáreas, de las cuales el 6,4 % presenta un grado severo de afectación. La región más impactada es la Sierra, con un 4,2 %, en contraste con la Selva, que muestra solo un 0,2 % (INEI, 2014).

En este contexto, la región Cajamarca presenta condiciones que la hacen altamente susceptible a la degradación del suelo, debido a su topografía accidentada, suelos frágiles y cobertura vegetal vulnerable. La erosión se manifiesta principalmente en laderas, donde las pendientes pronunciadas y la falta de medidas de conservación intensifican el problema; en cárcavas formadas por escurrimientos concentrados; y en márgenes de valle, donde la pérdida de vegetación y la dinámica fluvial contribuyen a la inestabilidad y pérdida de suelos fértiles (Nuñez, 2019).

La erosión hídrica no es un fenómeno reciente; ha estado presente desde tiempos antiguos, intensificándose en el presente y proyectándose como una amenaza para el futuro. Su persistencia ha impulsado la necesidad de encontrar metodologías efectivas para su cuantificación y monitoreo.

La ciencia ha desarrollado diversas aproximaciones, tanto empíricas como geoespaciales, con el objetivo de estimar la pérdida de suelo. Sin embargo, la aplicación de estas metodologías no siempre es universal, ya que dependen de la escala del estudio, la disponibilidad de datos, las condiciones climáticas y edafológicas, así como de los recursos técnicos y humanos disponibles. En este marco, el modelo RUSLE ha cobrado relevancia como una herramienta práctica y confiable, especialmente cuando se combina con tecnologías de sistemas de información geográfica.

## **1.2. Formulación del problema**

¿Cuál es la tasa de erosión hídrica del suelo estimada en la cuenca del Río Grande, aplicando el modelo RUSLE mediante técnicas de Sistemas de Información Geográfica?

## **1.2. Justificación**

La erosión hídrica representa una problemática relevante en las zonas altoandinas, donde factores naturales y actividades humanas aceleran la pérdida de suelo. En la cuenca del río Grande, ubicada en la región Cajamarca, la combinación de lluvias intensas, suelos frágiles y un uso inadecuado del territorio ha intensificado este proceso, afectando la estabilidad del paisaje y la disponibilidad de agua. Esta situación evidencia la necesidad de contar con herramientas técnicas que permitan evaluar y mitigar sus impactos.

El modelo RUSLE ha sido validado y ampliamente utilizado a nivel internacional por su capacidad para estimar empíricamente la pérdida de suelo, considerando variables como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la longitud y pendiente del terreno, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación. No obstante, su implementación en el norte del Perú aún es limitada. Por ello, esta investigación busca no solo aplicar el modelo en un contexto específico, sino también reforzar su relevancia metodológica y operativa como una herramienta accesible y

replicable para la evaluación de la erosión hídrica en cuencas similares.

A través de este estudio se pretende contribuir al conocimiento técnico sobre el funcionamiento y aplicabilidad del modelo RUSLE, destacando su valor en investigaciones ambientales y procesos de planificación territorial. Asimismo, se busca fortalecer las bases teóricas sobre el uso de modelos predictivos en la estimación de la erosión hídrica, evidenciando su utilidad en la toma de decisiones orientadas a la conservación de suelos y la gestión sostenible de los recursos naturales a nivel local y regional.

## **1.4. Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo general***

Estimar la tasa de erosión hídrica en la Cuenca del Río Grande, aplicando el modelo RUSLE con técnicas de Sistemas de Información Geográfica.

### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- ✓ Cuantificar los factores de entrada del modelo RUSLE, como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la longitud de pendiente, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación del suelo.
- ✓ Determinar las tasas de erosión hídrica en la última década 2013-2023, utilizando datos hidrometeorológicos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

## **1.5. Hipótesis**

La tasa de erosión hídrica en la cuenca del Río Grande, distrito de La Encañada, provincia de Cajamarca, estimada mediante el modelo RUSLE y herramientas geográficas supera las 400 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de suelo perdido durante el periodo 2013-2023.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes

Arias et al. (2022) realizaron un estudio para la estimar la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE en la cuenca media alta del Río Mira en Ecuador; su objetivo fue analizar y comprender cómo se distribuye la erosión en la cuenca. Para ello, aplicaron el modelo RUSLE utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados indicaron que los niveles de erosión varían entre 0 y 5 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, con un promedio de 32,79 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, evidenciando que la región enfrenta una de las erosiones más severas a nivel global.

Reyes et al. (2022) realizaron un estudio en la cuenca Valle de Bravo - Amanalco (CVBA) para analizar la erosión del suelo entre 2005 y 2021. Aplicaron la metodología de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), ajustada por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), adaptada al uso con Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados mostraron que gran parte de la cuenca presenta erosión moderada, especialmente en la región occidental, cerca de la presa Valle de Bravo, atribuida a la deforestación y a los cambios en el uso del suelo.

Torres et al. (2020) analizaron la erosión del suelo en la cuenca del Cañón del Sumidero, en Chiapas, México. El objetivo fue elaborar cartografía de erosión hídrica y evaluar su distribución espacial y temporal. Para ello, aplicaron las metodologías USLE/RUSLE adaptadas a Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados indicaron que el 73% de la cuenca presenta algún nivel de erosión, con una pérdida promedio anual de 41.5 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, destacando junio como el mes de mayor erosión (7 021 906.9 tn).

Flores (2021) realizó un estudio en la cuenca Chocaya, municipio de Quillacollo, Cochabamba, con el objetivo de identificar y categorizar las áreas más vulnerables a la erosión hídrica. Utilizó la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (RUSLE) combinada con

herramientas SIG para calcular los factores R, K, LS, C y P, y mediante álgebra de mapas identificó las zonas de erosión y sus respectivos valores. Los resultados indicaron que los valores de erosión se distribuyeron en los rangos: muy bajo (45,55 %), bajo (43,64 %), leve (5,13 %), moderado (1,75 %), grave (2,86 %), muy grave (0,77 %) y extremo (0,3 %), con la erosión grave superando las 100 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y representando alrededor del 1 %. Más del 80 % de la cuenca presentó erosión baja (0-10 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), atribuida a la cobertura vegetal, que reduce significativamente la energía cinética de las gotas de lluvia y, por ende, la erosión hídrica.

Guasca (2023) llevó a cabo un estudio en la cuenca del Río Cravo Sur, Colombia, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) y Sistemas de Información Geográfica (SIG). En la primera fase, estimó los factores de erosión, como la erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), el relieve (LS) y la cobertura vegetal (C). Posteriormente, mediante álgebra de ráster, calculó la Erosión Hídrica Potencial (EHP) y la Erosión Hídrica Efectiva (EHE). Los resultados indicaron que la EHP, correspondiente a áreas sin cobertura vegetal, afectaba 55 141 ha (10.6% del área de la cuenca) con niveles de erosión severa a catastrófica, mientras que la EHE, que considera la cobertura vegetal, mostraba solo 1 685 ha (0.3% del área total) en el mismo rango. El estudio subraya la importancia de la cobertura vegetal en la protección del suelo, y la necesidad de identificar y priorizar áreas susceptibles para mitigar la erosión hídrica.

Gamboa (2023) desarrolló una investigación en la cuenca del Río Tumbes, con una extensión de 1 663.28 km<sup>2</sup> y altitudes entre 0 y 1 589 msnm. La precipitación anual varió entre 27 874 y 88 724 mm. El objetivo principal fue estimar la tasa de erosión hídrica en la cuenca utilizando la metodología RUSLE y técnicas de teledetección, apoyadas por Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se procesaron cinco factores clave: la erosividad (R) a partir de registros mensuales de precipitación; la erodabilidad (K) usando datos de clases texturales y

materia orgánica de SoilGrids; la longitud y pendiente (LS) derivadas de un Modelo Digital de Elevación (DEM); y la cobertura vegetal (C) estimada con imágenes satelitales Landsat 7 y 8. Los resultados mostraron que el 31.92% de la cuenca tiene pérdidas críticas superiores a  $200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , y el 8.11% presenta pérdidas menores a  $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . En cuanto a la erosión actual, el 58.16% de la cuenca presenta pérdidas menores a  $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , mientras que el 0.25% enfrenta erosión severa, superando las  $200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . La tasa de erosión potencial se estimó en  $167.18 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , y la erosión actual fue de  $5.06 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , con la generación de mapas de erosión para el período 2000 - 2022.

Chipana (2022) realizó un estudio en la cuenca del Río Chumbao con el objetivo de calcular la pérdida promedio anual de suelo, utilizando la metodología RUSLE para estimar la erosión media anual. Para ello, se emplearon los factores R, K y LS para determinar la pérdida de suelo, mientras que el factor C fue evaluado a través del método NDVI y observación directa. Los resultados indicaron que el factor R varió entre 0 y  $6\,965.87 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ . El factor K abarcó el 98.1% del territorio, con una textura de suelo franco arcilla-arenosa, mientras que el 1.9% restante presentó una textura franco-arcillosa. La pendiente de la zona varió entre 0 y 256%, con el 40.32% de la superficie mostrando una inclinación de 30 a 60%. En cuanto a la cobertura vegetal, el 50.6% del área mostró "vegetación ligera" y el 43.2% presentó vegetación mediana. Los factores de erosividad, topografía y cobertura vegetal fueron determinantes en las notables pérdidas anuales de suelo en la cuenca del Río Chumbao.

Ayllón y Ccenhua (2021) realizaron una investigación en la cuenca del Río Cañete, departamento de Lima, con el objetivo de estimar y comparar las tasas de erosión utilizando el modelo RUSLE. Dado que, demostró ser vulnerable a eventos climáticos extremos, como el fenómeno de El Niño en el año 2017. Para ello, recopilaron datos de precipitación, temperatura, tipos de suelo, topografía y cobertura vegetal a partir de diversas fuentes satelitales. Se dividieron

las subcuencas y se determinaron los valores de los factores (R, K, LS, C y P). Los resultados indicaron que los factores R y LS tienen una influencia significativa en los niveles de erosión hídrica. El modelo espacial permitió identificar las zonas con mayor potencial erosivo; como resultado, se recomendó la implementación de prácticas de conservación del suelo en la subcuenca alta y la gestión adecuada de las actividades agrícolas en la subcuenca baja.

Taco (2021) desarrolló un estudio con el objetivo de evaluar el nivel de erosión hídrica en la cuenca de la quebrada Chamacha, ubicada en los distritos de Antioquía y San Andrés de Tupicocha, en la provincia de Huarochirí, Región Lima. La metodología empleada se basó en el uso del Sistema de Información Geográfica (SIG) y la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE). Los resultados indicaron que las áreas con Erosión Hídrica Potencial Alta de 50 a 200 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> cubren 267.96 ha, lo que equivale al 3.02% del área estudiada, y están localizadas principalmente en la parte alta de la cuenca, donde se registran altos niveles de precipitación, terrenos con pendientes pronunciadas y escasa vegetación.

Jáuregui (2018) estimó la pérdida de suelo en la microcuenca del Río Jucusbamba, en la provincia de Luya, Amazonas, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Percepción Remota. Para calcular los factores de la ecuación, se utilizaron datos de precipitación (Factor R), el mapa de suelos de la FAO (Factor K), el modelo digital de elevación (Factor LS), el mapa de cobertura y uso del suelo (Factor C) y el mapa de pendiente (Factor P). Los resultados mostraron que el 93,34 % del área presenta pérdidas de suelo leves, el 3,94 % pérdidas moderadas, el 1,82 % pérdidas altas, el 0,61 % pérdidas muy altas y solo el 0,29 % alcanzó niveles severos de pérdida de suelo. Las zonas con mayores tasas de erosión se ubicaron en las áreas media y baja de la microcuenca.

Nayaka (2018) estimó la pérdida de suelo anual en la cuenca del Río Tingo, Cajamarca, para evaluar la vulnerabilidad a la erosión hídrica utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) y un modelo geoespacial con herramientas SIG. El estudio se desarrolló en tres fases: recopilación de datos sobre cobertura vegetal, tipos de suelo, precipitación, geología y planificación de puntos de muestreo; trabajo de campo para recolectar muestras de suelo y evaluar factores como la cobertura vegetal, las prácticas agrícolas y el análisis de las muestras de suelo, determinando su textura y contenido de materia orgánica; el resultado fue un mapa temático que evidenció que las áreas con mayor pendiente y cobertura vegetal limitada, son más susceptibles a la erosión hídrica, siendo la pendiente y la cobertura vegetal factores más determinantes que la precipitación en el proceso de erosión.

Sánchez (2019) evaluó la capacidad de transporte de sedimentos en la cuenca Ronquillo, en los Andes del Norte de Perú, específicamente en Cajamarca, durante el período de diciembre de 2017 a mayo de 2018. La metodología empleada consistió en el uso de parcelas experimentales distribuidas mediante un muestreo estratificado para clasificar la erosión y la vegetación. Se establecieron trece parcelas de 1 m<sup>2</sup>, distribuidas en dos zonas: cinco parcelas en la zona Z1, Majadapampa, con erosión mínima, y ocho parcelas en la zona Z2, Ronquillo Alto, con erosión severa. Los resultados mostraron que la capacidad promedio de transporte de sedimentos en la zona Z1 fue de 5,0 g m<sup>2</sup> h, mientras que en la zona Z2 fue de 26,2 g m<sup>2</sup> h, con el 55 % de los sedimentos siendo de tamaño fino. En áreas con mayor actividad humana, como cultivos, caminos y carreteras, el transporte de sedimentos finos aumentó hasta un 80 %. Además, observaron que un incremento del 20 % en la pendiente duplicó el transporte de sedimentos, mientras que un aumento del 10 % en la cobertura vegetal redujo hasta cuatro veces el transporte de sedimentos.

Moreno y Suyon (2021) realizaron un estudio en la cuenca Jequetepeque durante el periodo 1997-2017, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE) como modelo. La metodología incluyó la recopilación de datos clave, como precipitaciones, un modelo digital de elevación (DEM) y una base de datos sobre tipos de suelos y vegetación. Inicialmente, llevó a cabo una caracterización física y biológica de la cuenca, seguida por el análisis de los factores que afectan la erosión (R, K, LS y C) utilizando Sistema de Información Geográfica (SIG). Calcularon tanto la erosión potencial como la erosión actual, y propusieron una estrategia para la conservación de la cuenca. Como resultado, se clasificaron los niveles actuales de erosión hídrica en las categorías: normal (42 %), ligera (12 %), moderada (11 %), severa (24 %), muy severa (11 %) y catastrófica (0,09 %).

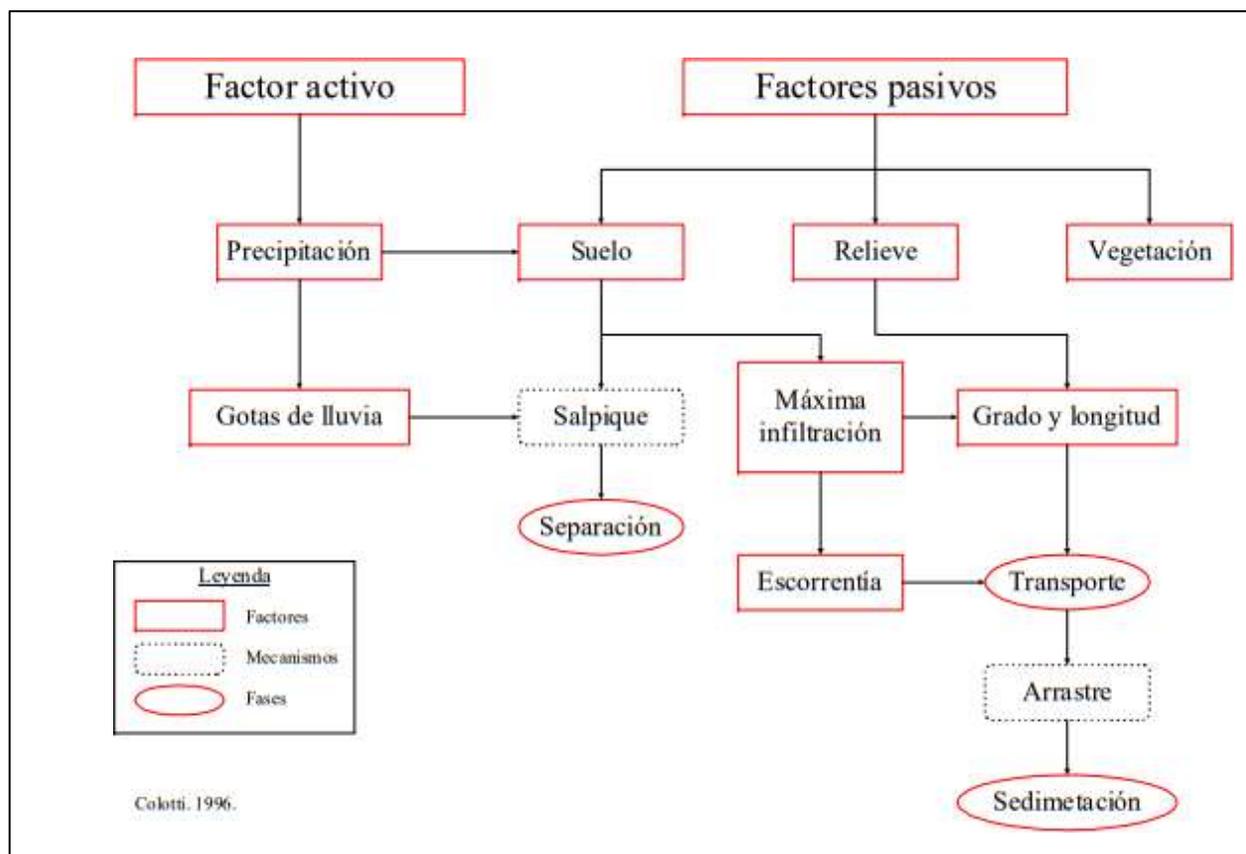
Calle (2021) llevó a cabo un estudio en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas - Namballe, analizando dos escenarios: uno con cambios en el uso del suelo y otro sin cambios. Se analizaron factores como la erosividad de las precipitaciones, la erodabilidad del suelo, la topografía y la cobertura vegetal. Estos factores se integraron utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS) en ArcGIS 10.7. Los resultados mostraron que el escenario con modificaciones en el uso del suelo tenía una tasa de erosión de  $35,92 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , en comparación con  $1,53 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en el escenario sin cambios. La validación confirmó que el cambio en el uso del suelo estaba asociado con una mayor erosión, especialmente debido a la expansión agropecuaria y la pérdida de cobertura vegetal debido a la quema de terrenos.

## **2.2. Bases Teóricas**

### ***2.2.1. Erosión de suelo***

La erosión se puede definir de manera amplia como un proceso mediante el cual el suelo es desplazado por la influencia de factores como el agua y el viento. Este proceso implica la participación de dos elementos esenciales: un componente pasivo, representado por el suelo, y un componente activo, que puede ser el agua, el viento o su participación alternante. La cubierta vegetal, por otra parte, interactúa regulando la relación entre estos elementos (León, 2001).

También puede definirse como el fenómeno geológico que ocurre cuando las partículas y materiales del suelo se liberan, se transportan y, por último, se depositan en otro sitio (Cardona et al., 2007). Al respecto, Alatorre y Beguería (2009) señalan que, en un sentido geomorfológico, los términos erosión, remoción y transporte se utilizan a menudo para referirse a una unidad de paisaje específica, como una ladera o una cuenca hidrográfica. La severidad de la erosión dependerá de la proporción de material separado y de la capacidad de transporte de los agentes erosivos, por lo que la erosión puede limitarse por separación (cuando la capacidad de transporte de los agentes erosivos es mayor que la cantidad de material liberado) o por transporte (cuando el material liberado es mayor al que se puede transportar).

**Figura 1***Componentes de la erosión del suelo*

Fuente: Colotti (1996).

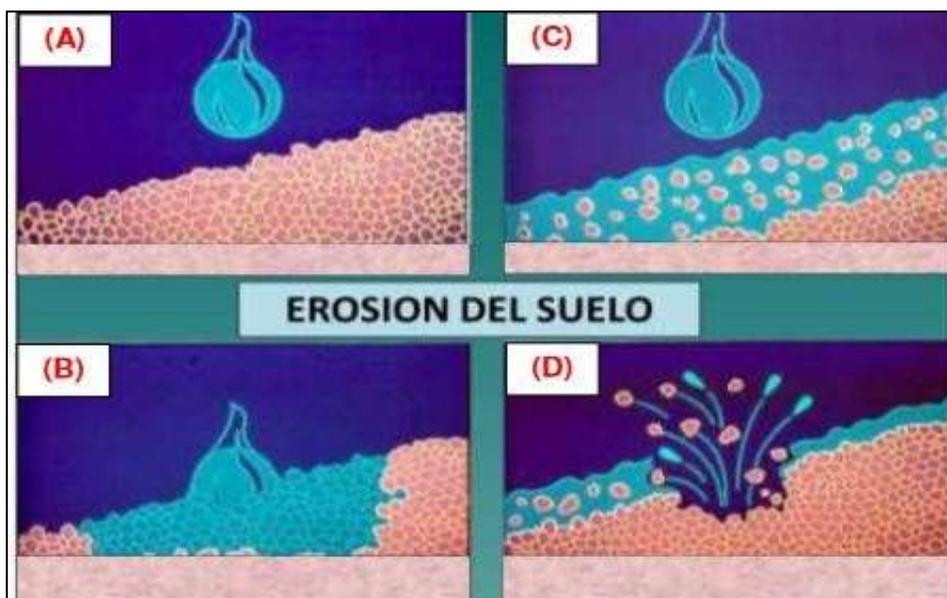
### ***2.2.2. Proceso de la erosión de Suelo***

Se refiere a la secuencia de desintegración y movimiento del suelo ocasionada por fenómenos naturales como la lluvia y el viento, así como por prácticas inadecuadas llevadas a cabo por el ser humano en sus terrenos. Estos procesos de pérdida gradual contribuyen a la disminución de la profundidad del suelo y a la degradación de su fertilidad. Las consecuencias de este fenómeno perduran en el tiempo, generando un daño que no puede ser revertido. En la región altoandina del Perú, este fenómeno adquiere gran relevancia, afectando significativamente la productividad de los suelos en esa zona montañosa (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014).

En otro aspecto, se indica que el proceso de remoción y desplazamiento de los materiales que conforman la capa superficial del suelo ocurre mediante la acción de agentes como el agua, el viento, el hielo, entre otros. Estos procesos de erosión provocan una disminución en la fertilidad natural del suelo, además de generar un deterioro progresivo de su estructura física, lo que incrementa su vulnerabilidad a la degradación y afecta otras de sus funciones (Kogut, 2023).

### Figura 2

*La erosión del suelo por efectos de las lluvias*



*Nota.* (A) Las gotas de lluvia golpean el suelo, (B) La lluvia persistente provoca la humedad del suelo y el desprendimiento de partículas, (C) Las partículas desprendidas son arrastradas, (D) El impacto de las gotas de lluvia dispersa las partículas humedecidas. Fuente: CENEPRED (2015).

#### 2.2.3. Tipos de Erosión

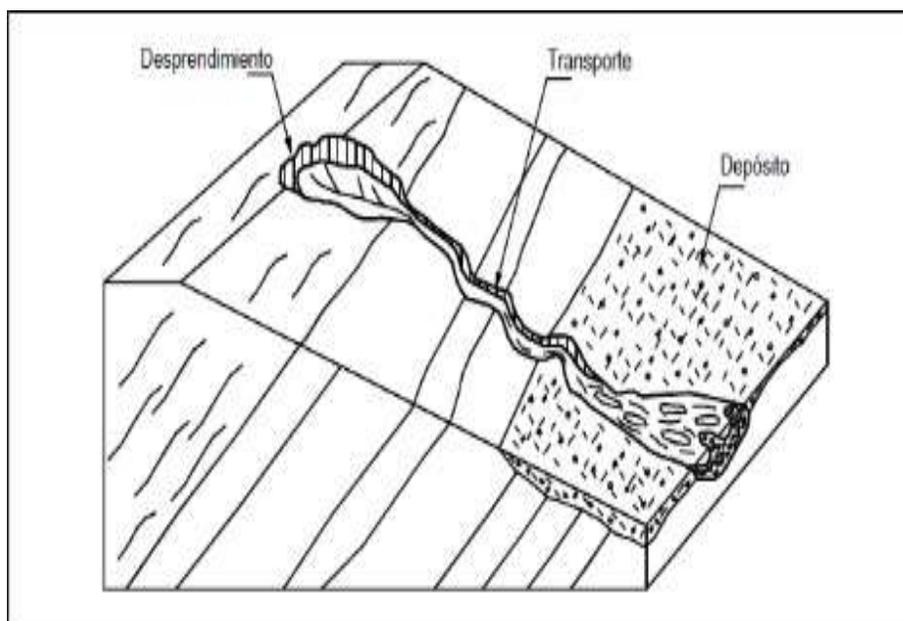
Existen dos factores principales responsables de la erosión: el agua y el viento. En consecuencia, se distinguen dos tipos de erosión: la eólica y la hídrica.

### ***a. Erosión eólica***

La erosión eólica se origina por la acción del viento, siendo más frecuente en áreas planas y de clima árido. Este tipo de erosión ocurre cuando el suelo, sin cobertura vegetal, queda expuesto a altas velocidades del viento. Según Ada (2015), la erosión eólica se genera cuando la velocidad del viento supera la fuerza de la gravedad y la adherencia de las partículas, lo que permite que estas se transporten en suspensión. Las partículas más pequeñas (0.1-0.5 mm) son ligeras y se desplazan fácilmente con el viento (Vásquez et al., 2016).

### ***b. Erosión Hídrica***

Teniendo en cuenta a Molina et al. (2021) la erosión hídrica es un fenómeno en el cual los materiales del suelo se descomponen, se transportan y se depositan como resultado de la influencia de la lluvia y el flujo superficial del agua, así mismo Tayupanta (1993) afirma que debido a la energía cinética generada por el agua al caer sobre la tierra y al desplazarse a lo largo de la superficie del terreno. Mientras que, Vásquez et al. (2016) señala que, la erosión hídrica ocurre principalmente en áreas de ladera, donde las lluvias son intensas y no se implementan prácticas agrícolas adecuadas ni una correcta gestión del riego.

**Figura 3***Proceso de la erosión hídrica*

Fuente: Suárez (2001)

**2.2.4. Factores que influyen en la erosión hídrica**

Es posible ofrecer una descripción más detallada de los factores que influyen en la erosión hídrica, tales como el clima, las características del suelo, la topografía y la vegetación. Estos son parámetros naturales que determinan la intensidad del fenómeno. Para Tayupanta (1993), algunos de los factores que aceleran la pérdida de suelo y contribuyen a la disminución de la productividad incluyen:

**a) Precipitación**

Hay una relación directa entre las precipitaciones y la cantidad de suelo erosionado; la intensidad, cantidad, duración, distribución y frecuencia de las lluvias influyen significativamente en la pérdida de suelo.

### ***b. Características del Suelo***

El tipo de material original, el grado de meteorización, las propiedades físicas, la cantidad de materia orgánica y las características químicas son factores determinantes en el proceso de erosión del suelo. Dentro de estos componentes, tienen mayor influencia la distribución del tamaño de las partículas, el nivel de agregación, la textura superficial, la profundidad del perfil y la humedad inicial (Tayupanta, 1993).

La erosión se manifiesta con mayor intensidad en suelos compuestos principalmente por arena y limo, mientras que en suelos arcillosos tiende a ser menos notable. Los suelos con un contenido de arcilla cercano al 35% suelen ser más cohesivos, ya que forman agregados resistentes que soportan mejor el impacto de las gotas de lluvia y evitan la dispersión de partículas. Además, estos suelos presentan superficies rugosas y terrones que retienen una cantidad considerable de agua, lo cual fortalece su resistencia frente a la erosión laminar (Zapata, 2018).

Por el contrario, las arenas y limos de textura gruesa son más propensos a la erosión, ya que carecen de cohesión y no poseen las propiedades protectoras características de los suelos arcillosos (Tayupanta, 1993).

### ***c. Topografía***

Las características del relieve, como el ángulo, la longitud y la forma de la pendiente, juegan un papel determinante en el proceso de erosión. A medida que el ángulo de inclinación aumenta, el transporte del suelo hacia las partes bajas se intensifica, observándose una mayor erosión en pendientes con inclinaciones del 5 al 10% en comparación con las más suaves. Del mismo modo, la longitud de la pendiente influye en este fenómeno, ya que la escorrentía tiende a intensificarse a medida que aumenta la distancia desde la cima. La forma de la pendiente, ya sea uniforme, cóncava, convexa o mixta, también condiciona el nivel de erosión, generando mayores pérdidas de suelo a medida que la inclinación y longitud de la pendiente se incrementan (González,

1991).

#### ***d. Cobertura Vegetal***

La presencia de vegetación desempeña un papel clave como barrera natural que reduce el impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, dispersando así la energía que estas transportan. Parte del agua que precipita es interceptada por la vegetación, lo que favorece un incremento en la tasa de infiltración. Otra fracción del agua se evapora, mientras que el resto desciende y se desplaza por la pendiente. La densidad y el tipo de vegetación influyen en la escorrentía y en la cantidad de suelo susceptible a erosión, siendo estas cifras más elevadas en terrenos desprovistos de vegetación y menores en áreas con cultivos, bosques o pastizales (Tayupanta, 1993).

#### ***2.2.5. Formas de erosión***

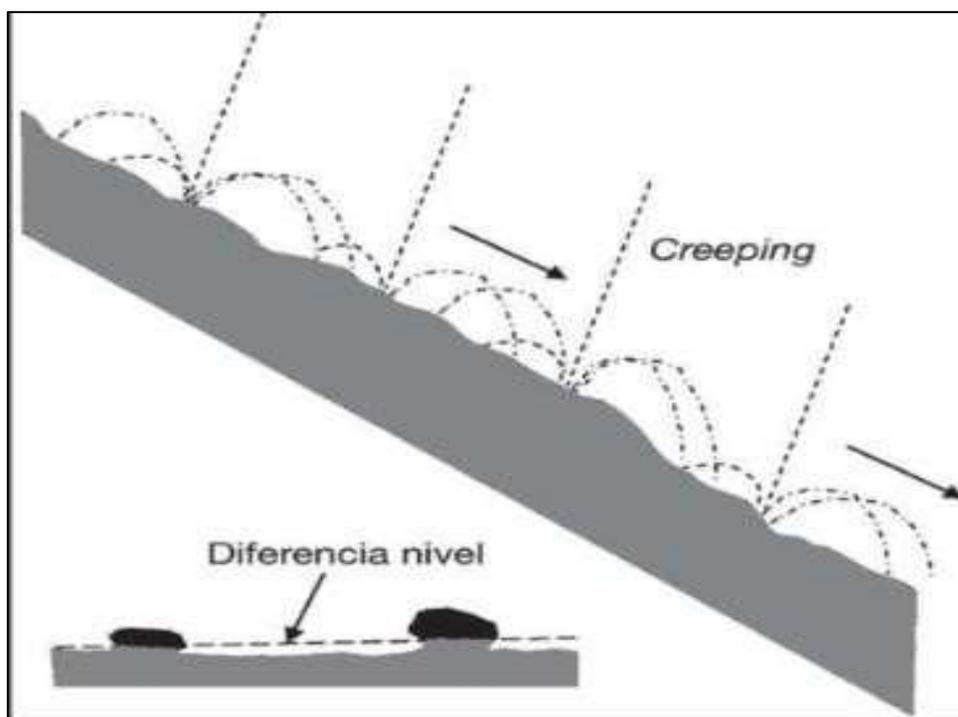
Como se sabe, la erosión ocurre principalmente en zonas agrícolas debido al impacto de las gotas de lluvia. Dependiendo de su mecanismo de acción, la erosión hídrica puede clasificarse en varios tipos.

##### ***a. Erosión por salpicadura***

De acuerdo con Guevara y De la Torre (2019) describen que se origina debido al impacto directo de las gotas de lluvia, lo que provoca la separación y el transporte de partículas finas del suelo. Aunque en corrientes superficiales de poca profundidad la salpicadura no suele ser evidente, esta contribuye al incremento de la turbulencia y, en consecuencia, a la capacidad del flujo para movilizar materiales. Durante un episodio de lluvia intensa, grandes volúmenes de suelo pueden ser desplazados simultáneamente al aire, lo que implica que una gran cantidad de partículas sean salpicadas de una sola vez.

## Figura 4

### Proceso de erosión por salpicadura



Fuente: CENEPRED (2013).

#### *b. Erosión laminar*

Este fenómeno ocurre cuando se desprenden y transportan finas capas de la superficie del suelo debido al efecto de la escorrentía difusa. Las gotas de lluvia provocan alteraciones en la capa superficial del terreno, permitiendo que parte del agua se infiltre mientras que otra porción se acumula en la superficie.

Este proceso genera una lámina de agua con flujos que varían entre 2 y 3 mm de grosor. El flujo laminar suele ser superficial y se desplaza principalmente en la cima de las laderas, pero va incrementando su profundidad conforme desciende por el talud. Aunque este tipo de flujo presenta un poder erosivo bajo, en ciertas áreas puede volverse turbulento, lo que incrementa significativamente su capacidad de erosión. Con la persistencia de la lluvia y el movimiento del

flujo, se genera turbulencia, lo cual intensifica aún más la erosión. Como resultado, el agua puede adquirir tonalidades marrones o amarillentas debido a la presencia de sedimentos. Las zonas de cultivo sin cobertura vegetal y los suelos expuestos al sobrepastoreo son particularmente vulnerables a este tipo de erosión laminar (Suárez, 2001).

*c. Erosión en surcos*

Se produce cuando el agua de escorrentía superficial se concentra en la capa superior del suelo debido a las irregularidades naturales de la superficie. Este flujo, canalizado en corrientes pequeñas a lo largo de una pendiente, genera una concentración que, impulsada por la fuerza de arrastre, ocasiona erosión y la formación de surcos o canales incipientes. Inicialmente apenas perceptibles, estos surcos se van profundizando con el tiempo. En ellos, la energía del agua en movimiento aumenta progresivamente, generando una fuerza suficiente para despojar y trasladar partículas del suelo. Al principio, los pequeños canales tienen una forma en V, pero con el tiempo pueden transformarse en una forma en U (Suárez, 2001).

*d. Erosión en cárcavas y zanjas*

Se conoce como cárcava a un canal de erosión con una sección superior que supera un pie de altura, estos canales no pueden ser mitigados mediante prácticas agrícolas. Las cárcavas presentan una capacidad de transporte de sedimentos superior a la de los surcos, ya que cuentan con mayores tasas de flujo, así mismo actúan como conductos de concentración y transporte de agua y sedimentos, siendo capaces de capturar a sus vecinas y transformar progresivamente su sección de una forma en V a una en U. En comparación con los surcos, las cárcavas son considerablemente más extensas y transportan flujos de agua concentrados durante y después de las lluvias, su avance o retroceso implica la formación de una o varias gradas, manifestadas como cambios abruptos de pendiente (Suárez, 2001).

### **2.2.6. Cuenca Hidrográfica**

Vásquez et al. (2016) manifiesta que una cuenca hidrográfica se define como una unidad territorial natural delimitada por una divisoria topográfica (*Divortium Aquarum*), que recoge las precipitaciones y canaliza el flujo de agua de escorrentía hacia un único colector, generalmente un río principal.

Además, los mismos autores señalan que una cuenca hidrográfica es un sistema completo, abierto y complejo que alberga el ciclo hidrológico. En su funcionamiento intervienen factores naturales, sociales, ambientales, económicos, políticos e institucionales que interactúan de manera dinámica y estrechamente interrelacionada. Como cualquier sistema complejo, las interacciones entre sus componentes generan efectos que superan la simple suma de sus partes, de forma análoga al cuerpo humano

Por otro lado, también reconocen que la cuenca permite el flujo, la influencia y las acciones que traspasan sus propios límites; es decir, tiene la capacidad de recibir e influir más allá de su territorio. A pesar de su importancia estratégica para la gestión de los recursos, representa solo una pequeña fracción de la superficie terrestre (Vásquez et al., 2016).

### **2.2.7. Métodos Para cuantificar la erosión hídrica en una Cuenca**

Los métodos empleados para cuantificar la erosión hídrica se clasifican generalmente en directos e indirectos. En el caso de los métodos directos, se incluyen:

#### **A. Parcelas de escorrentía**

Las parcelas experimentales son esencialmente herramientas de campo que se utilizan para evaluar la cantidad de escorrentía y sedimentos producidos en un área de tierra específica. En estas parcelas, se conocen en detalle las características del suelo, la topografía, la morfología, así como la información relacionada con la vegetación, la cobertura del suelo, las prácticas de manejo y la historia de los usos del suelo, entre otros aspectos. Desde un punto de vista conceptual, la pérdida

de suelo medida en las parcelas experimentales representa la erosión que ocurriría en una sección de la ladera con dimensiones idénticas a las de las parcelas, ubicada aguas abajo a partir de la división de aguas (Saturnino et al., 2002).

### ***B. Clavos de erosión***

Tapia et al. (2008) menciona que el método de los clavos de erosión se presenta como un método para evaluar de manera precisa la erosión hídrica en una región específica, se debe a que no solamente calcula la erosión hídrica en sí misma, sino que también mide la cantidad de suelo que se deposita en el mismo sitio, conocida como sedimentación, posibilita la creación de un equilibrio entre las pérdidas y los aportes de suelo en la zona determinada, lo que permite obtener estimaciones más precisas de las pérdidas de suelo en el área. Esto marca una diferencia fundamental con respecto a los métodos convencionales, que, al no tomar en cuenta este fenómeno, tienden a sobrestimar la erosión.

En el caso de los métodos indirectos, se incluyen a los siguientes:

#### ***A. Ecuación universal de pérdida de suelos (USLE)***

Ibáñez et al. (2012) explican que la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) constituye un enfoque cuantitativo para evaluar de manera indirecta la pérdida de suelo debida a procesos de erosión hídrica. La estimación de la erosión se basa en la modelización de la respuesta del sistema natural del suelo ante la precipitación pluvial. Este método, creado por Wischmeier y Smith en 1958 y 1978 en Estados Unidos, se considera una ecuación empírica de tipo paramétrico. Desarrollaron el modelo utilizando datos recopilados en la década de 1950 de numerosas parcelas de campo ubicadas en diversas regiones del país, con condiciones climáticas, edáficas, topográficas y de uso del suelo muy diversas.

### ***B. Ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE)***

Según Velásquez (2008) manifiesta que las investigaciones sobre la erosión del suelo y sus efectos en la producción agrícola comenzaron en la década de 1930. Durante las décadas de 1940 y 1956, los científicos comenzaron a elaborar métodos numéricos para calcular la magnitud de la pérdida de tierra en las áreas productoras de maíz en Estados Unidos. Se incluyeron varios factores en la ecuación original de pérdida de tierra, en la que se tuvieron en cuenta la pendiente y las prácticas agrícolas.

El mencionado autor también señala que se descubrió que la ecuación de pérdida de suelo podría ser de gran utilidad para la planificación agrícola, y que la ecuación inicialmente diseñada para el cinturón maicero podría ser aplicada a otras regiones. En 1946, un grupo de expertos se reunió en Ohio para revisar los coeficientes utilizados previamente y añadir un coeficiente relacionado con la precipitación. En 1954, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) establecieron el Centro Nacional de Datos de Escorrentía y Pérdida de Suelos (CNDEPS) en la Universidad Purdue. El propósito del centro era ubicar, recopilar y consolidar todos los datos disponibles a nivel mundial a través de Estados Unidos.

La técnica empleada para calcular la pérdida de suelo se fundamenta en el modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), introducido inicialmente por Wischmeier y Smith en 1962 y posteriormente publicado en su versión definitiva en el Manual 534 del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Wischmeier y Smith, 1978). Este modelo cuenta con una variante llamada "Revised Universal Soil Loss Equation" (RUSLE), desarrollada por (Renard y Foster en 1989). Este enfoque ha sido ampliamente adoptado tanto en Estados Unidos como en otros países que enfrentan desafíos relacionados con la erosión. La formulación matemática del modelo RUSLE propuesto por Renard es la siguiente:  $A = R * K * LS * C * P$ .

Donde:

**A:** Este es el cálculo de la pérdida promedio de suelo en el espacio y el tiempo. por unidad de área (ton. ha-1. año).

**R:** Corresponde al factor de erosividad (MJ.mm. ha-1.h-1. año-1) de lluvia.

**K** = Factor de erosionabilidad del suelo (t ha-1 h Mj-1 mm-1 ha)

**LS:** representa el factor L de longitud de pendiente, nos da la tasa de pérdida de terreno según la longitud de la pendiente del área de estudio.

**C:** Este es el factor de cobertura vegetal la relación de pérdida de tierras de un área asegurada y la gestión específica de la pérdida de tierras (adimensional).

**P:** Factor de prácticas de conservación o prácticas de apoyo pérdida de terreno por medidas de apoyo, como contornos o pérdida de terreno en terrazas. (adimensional).

### ***2.2.8. Factores que componen el modelo RUSLE***

#### **2.2.8.1. Factor R**

Índice de erosión pluvial y refleja la influencia de la energía cinética de los chubascos sobre la erosión, al romper las partículas del suelo y compactar su superficie, así como su intensidad máxima, determinando la ocurrencia de escorrentía superficial cuando se aumenta la capacidad de infiltración que se supera (González del Tánago, 1991).

Por su parte Colotti (1999) define al factor R como el poder agresivo de la lluvia sobre la superficie terrestre, reflejando la energía con la que las gotas de lluvia impactan en la superficie del suelo con una intensidad suficiente para descomponer los agregados superficiales en partículas de tamaño que pueden ser transportadas. En este contexto, la precipitación puede desempeñar un papel activo como agente impulsor del proceso de erosión al actuar directamente sobre el suelo, o bien, puede actuar como un agente pasivo que facilita la movilización de partículas erosionadas.

Para facilitar el cálculo original del factor R, es oportuno citar a Crettaz et al. (2016) en el estudio que realizaron, indican que el Índice Modificado de Fournier (IMF), está dada por la relación entre la suma de los cuadrados de las precipitaciones mensuales en un año, frente a la precipitación media anual, expresada por la siguiente ecuación:

$$IMF_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{ij}^2}{P_m}$$

Donde:

**IMF<sub>j</sub>**: Índice Modificado de Fournier, para el año j.

**P<sub>ij</sub>**: Precipitación mensual del mes i (mm), del año j.

**P<sub>m</sub>**: Precipitación media anual (mm).

**Tabla 1**

*Clasificación del Factor R (anual)*

<b>Clasificación</b>	<b>Factor R (MJ/ha*mm/hr)</b>
Bajo	0-50
Moderado	50-550
Alto	550-1000
Muy Alto	>1000

Fuente: Crettaz et al. (2016)

### **2.2.8.2. Factor K**

Al respecto sobre este factor, Gonzáles del Tánago (1991) indica que la «erosionabilidad», o vulnerabilidad de la erosión del suelo, es una propiedad del suelo relacionada con el tamaño de

grano, porosidad, condiciones hidrológicas, etc., y es distinta de la “erosión” del suelo, un proceso que surge de su capacidad de ser erosionado. Este desgaste depende de la exposición a ciertas condiciones climáticas, relieve y cobertura vegetal.

El SENAMHI (2017) menciona que es una evaluación práctica de la predisposición natural de un suelo a la erosión causada por el agua, la cual se determina a partir de las características inherentes del suelo. La medición del coeficiente K se realiza en una escala que va de 0 a 1, siendo 0 indicativo de suelos con baja susceptibilidad a la erosión y 1 de suelos altamente propensos a la erosión hídrica.

Con los datos obtenidos sobre textura, estructura, permeabilidad y materia orgánica identificable, se puede determinar el factor K, por medio de la ecuación de Wischmeier y Smith en 1978, que sigue a continuación es la siguiente:

$$100K = 2,1M^{1,14}(10 - a) (12 - a) + 3,25(b - 2) + 2.5(c - 3)$$

Donde:

$$M: (\% \text{ limo} + \% \text{ arena muy fina}) * (\% \text{ limo} + \% \text{ arena} - \% \text{ arena fina})$$

**a:** % de materia orgánica

**b:** Parámetro de tipo de estructura de suelo

**c:** Clase de permeabilidad

Por otro lado, Sharpley y Williams (1990) que, con los datos de estructura y materia orgánica en la capa superficial del suelo, el coeficiente K se puede determinar con base en las siguientes ecuaciones:

$$K_{usle} = f_{csand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand}$$

$$K_{Rusle} = K \text{ factor} = K_{usle} \times 0,1317$$

Donde

$$fcsand = [0.2 + 0,3 \times \exp(-0,256 \times m_s \times (1 - \frac{m_{silt}}{100}))]$$

$$fcl - si = (\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}})^{0,3}$$

$$forgc = (1 - \frac{0,25 \times orgC}{orgC + \exp[3,75 - 2,95 \times orgC]})$$

$$fhisand = (1 - \frac{0,7 \times (1 - \frac{m_s}{100})}{(1 - \frac{m_s}{100}) + \exp[-5,51 + 22,9 \times (1 - \frac{m_s}{100})]})$$

**ms:** % de contenido de fracción de arena ( $\phi$  de 0,5 – 2 mm)

**msilt:** % de contenido de fracción de limo ( $\phi$  de 0,002 – 0,05 mm)

**mc:** % de contenido de fracción de arcilla ( $\phi < 0,002$  mm)

**orgC:** % de contenido de fracción de carbono orgánico

### 2.2.8.3. Factor LS

El SENAMHI (2017) indica que el factor de longitud (L) de ladera es una medida adimensional, caracterizada como la relación entre la tasa de erosión anual de una parcela con una longitud de ladera específica. Por otro lado, el factor de pendiente (S) se define como la relación entre la tasa de erosión de una parcela determinada y su pendiente correspondiente. La longitud de una pendiente influye significativamente en la tasa de erosión del suelo, destacando la pendiente como una de las variables primordiales que determinan la liberación de sedimentos en la cuenca (González del Tánago, 1991).

La obtención del factor LS se basa principalmente en el Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona. Inicialmente se crea un mapa de pendiente utilizando el valor beta en la ecuación propuesta por Foster (1977). Una vez generada esta superficie, se procede a calcular F y, posteriormente m, mediante las ecuaciones propuestas por Foster y con base en este ráster, se

puede realizar un análisis para identificar las áreas más propensas a la erosión (Alvarez, 2020).

$$L = 1 \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

$$m = \left( \frac{F}{1 + F} \right)$$

$$F = \frac{\frac{\text{sen}\beta}{0.0896}}{3(\text{sen}\beta)^{0.8} + 0.56}$$

Dentro de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se aplica la ecuación propuesta por Desmet y Gover para su cálculo. Para llevar a cabo este proceso, se requiere el valor previamente calculado de m, así como las superficies de dirección y acumulación de flujo (A) del área en cuestión. Estos datos son esenciales para determinar la longitud de la ladera. Además, se debe tener en cuenta el tamaño del píxel (D).

$$L_{(ij)} = \frac{[A_{(ij)} + D^2]^{(m+1)} - A_{(ij)}^{(m+1)}}{X^m * D^{(m+2)} * 22.13^m}$$

Donde:

**L:** Factor de longitud

**$\beta$ :** pendiente a nivel de píxel

**m:** pendiente

**F:** factor en función de la pendiente

**D:** Tamaño de píxel (cell size)

**x:** Coeficiente de forma (x = 1 para sistemas pixeleados)

Se emplea la fórmula condicional para calcular el factor S, la cual presenta ecuaciones. En caso de que la tangente de beta es menor a 0.09, se aplica una ecuación; de lo contrario, si es mayor o igual a 0.09, se utiliza la ecuación correspondiente. Posteriormente, se lleva a cabo la

multiplicación de los rásters de L y S con el fin de obtener el ráster final que representa el factor LS. La unidad de medida para este factor es adimensional. La ecuación correspondiente a este proceso es la siguiente:

$$S_{(i,j)} = 10.8 * \sin\beta_{(i,j)} + 0.03$$

$$S_{(i,j)} = 16.8 * \sin\beta_{(i,j)} - 0.5$$

Rieso (2015) afirma que, en los enfoques predictivos de erosión, resulta fundamental establecer con precisión los límites de las pendientes para distinguir las tasas presentes en las áreas agrícolas y forestales, así como para anticipar futuras intervenciones en dichas zonas, con el objetivo de simplificar el cálculo del mapa de este factor topográfico, se incorpora una tabla, basada en el análisis de Mintegui (1983), que permite obtener el valor del factor LS únicamente con conocer el rango de pendiente y es más eficaz.

**Tabla 2**

*Valores del factor LS en función de la pendiente*

<b>Gradiente de pendiente (%)</b>	<b>Factor LS</b>
0 – 3	0.3
3 – 12	1.5
12 – 18	3.4
18 – 24	5.6
24 – 30	8.7
30 – 60	14.6
60 – 70	20.2
70 - 100	25.2
Más de 100	28.5

Fuente: Mintegui (1983).

#### 2.2.8.4. Factor C

Los indicadores de vegetación representan la capacidad de la cobertura vegetal para prevenir el transporte de sedimentos. Si el suelo permanece pobre durante la temporada de lluvias, la habilidad para separar y transportar materiales será mayor que cuando existen varios tipos de coberturas (Castro, 2013).

En ese mismo orden de ideas, Gonzáles del Tánago (1991) mencionó que la vegetación es un factor natural que protege el suelo contra la fuerza erosiva de las lluvias, al controlar no sólo la energía con la que las gotas de lluvia llegan a la superficie del suelo, sino también la tasa de escurrimiento superficial.

La cobertura del suelo y su gestión cambian con el tiempo, lo que tiene un impacto positivo en la disminución de la pérdida de suelo. Esta variable, junto con la pendiente, es el factor más importante para controlar y gestionar la erosión de suelos (Loredo et al., 2007).

Por otro lado, Pacheco et al. (2019) en su investigación nos dice que el Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) se presenta como un indicador eficaz para la representación espacial de la cobertura vegetal y puede establecer una correlación precisa con el Factor C mediante una expresión matemática de alta precisión.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Donde:

**NDVI:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

**NIR:** Luz infrarroja cercana.

**Red:** Luz roja visible

Fórmulas para determinar el Factor C a partir del NDVI

$$FC_{VK} = \exp \left( -\alpha * \frac{NDVI}{\beta - NDVI} \right)$$

Donde:

**FC<sub>VK</sub>**= Factor C Van der Kniff et al. (1999)

**Exp** = Función exponencial

$\alpha$  = Alfa (2)

**$\beta$**  = Beta (1)

**NDVI** = Índice normalizado de diferencia de vegetación

$$FC_D = \left( \frac{1 - NDVI}{2} \right)$$

Donde:

**FC<sub>VK</sub>**= Factor C Carvalho D. F. al. (2014)

**NDVI** = Índice normalizado de diferencia de vegetación

#### **2.2.8.5. Factor P**

Este último factor aborda la influencia de las prácticas de conservación del suelo en las tasas de erosión, ya sea mediante la realización de trabajos culturales o disponiendo la vegetación de acuerdo con las curvas de nivel, en forma de fajas o terrazas. Este enfoque tiene como objetivo interrumpir las líneas de escorrentía, contribuyendo así a la prevención de la erosión del suelo (SENAMHI, 2017). Así mismo Cortolima, (2007) señala que es una de las variables muy importantes y se utiliza para evaluar el efecto de las acciones para prevenir la erosión del suelo, como el cultivo en curvas de nivel, terrazas, franjas, etc.

**Tabla 3***Factor de prácticas de conservación (P)*

<b>Pendiente</b>	<b>Contorno</b>	<b>Cultivo en franjas</b>	<b>Terraza</b>
0.0 - 7.0	0.55	0.27	0.10
7.0 - 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 - 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 - 26.8	0.90	0.45	0.18
26.8 >	1.00	0.50	0.20

Fuente: (Kim , 2006)

**2.2.8.6. Técnicas de conservación de suelos*****A. Sistema agroforestal***

Farrell y Altieri (1999) describen a los sistemas agroforestales como métodos tradicionales y ampliamente practicados de uso del suelo, en los cuales se integran de manera espacial y/o temporal árboles junto con cultivos agrícolas y/o animales. Estos sistemas combinan prácticas agrícolas y forestales para lograr una producción sostenible dentro de una misma unidad de terreno.

Mendieta y Molina (2007) indican que, específicamente para la erosión, las propuestas vegetativas se dividen principalmente en dos categorías:

La primera propuesta consiste en plantar árboles de raíces profundas a lo largo de las líneas de contorno, formando franjas con el objetivo de asegurar y estabilizar la pendiente, además de actuar como barreras naturales contra la erosión. Una ventaja de esta medida es que requiere menos inversión en capital y mano de obra, tanto para su establecimiento como para su operación y mantenimiento. Asimismo, la barrera viva, además de proteger el suelo de la erosión, permite obtener productos como leña, forraje y abono verde (Mendieta y Molina, 2007).

La segunda propuesta, que puede combinarse con la primera, consiste en reciclar la biomasa tras la cosecha para reducir la exportación de nutrientes del área. Por ejemplo, las hojas y tallos de los cultivos agrícolas, así como las ramas y copas de los árboles, pueden esparcirse por el campo como mulch. Esto contribuye a conservar la humedad, ofrece una capa protectora contra la erosión (ya sea por salpicaduras o superficial) y facilita su reutilización como abono verde (Mendieta y Molina, 2007).

### ***B. Terrazas de absorción***

Se trata de una serie sucesiva de plataformas (bancos o terraplenes) dispuestas en forma de escaleras en las laderas, las cuales pueden construirse a nivel o con una ligera inclinación hacia el interior. Son ideales para terrenos destinados al cultivo en limpio, como hortalizas, tubérculos y granos. También resultan adecuadas para cultivos permanentes, como pastos cultivados y frutales, y en casos excepcionales, pueden emplearse para la plantación de especies forestales. No se recomienda construir terrazas de absorción en terrenos altamente degradados, superficiales, con laderas muy empinadas o suelos demasiado sueltos o arenosos, a menos que se realicen trabajos de mejora del suelo, como la incorporación de materia orgánica (Vásquez et al., 2016).

### ***C. Barreras vivas***

Vásquez et al. (2016) recomienda implementar barreras vivas como una práctica adecuada en terrenos con pendientes inferiores al 10%. En áreas con pendientes superiores al 10%, el establecimiento de barreras vivas debe ir acompañado de otras prácticas de conservación, como el cultivo en fajas, surcos en contorno, acequias o zanjas de infiltración, terrazas, entre otras.

Las plantas destinadas a formar la barrera viva deben sembrarse en doble hilera, con una separación de aproximadamente 15-20 cm entre ellas. En regiones con zanjas o acequias de infiltración, se sugiere sembrar la barrera viva entre 10-20 cm por encima del borde superior. La distancia entre las barreras vivas dependerá del tipo de cultivo y de la inclinación del terreno.

### ***2.2.10. Uso del SIG en la Erosión Hídrica***

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen herramientas fundamentales en el estudio y gestión de la erosión del suelo, ya que permiten representar espacialmente los procesos erosivos, realizar análisis detallados y generar modelos predictivos. Gracias a estas capacidades, es posible elaborar mapas de erosión, identificar zonas con mayor susceptibilidad y evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación implementadas (Camargo et al., 2013).

Por su parte, Domínguez (2000) señala que un Sistema de Información Geográfica (SIG) se puede describir como una metodología o técnica que permite de manera efectiva la integración de datos geográficos básicos para producir información adicional. Esto se logra mediante la utilización de fuentes de información y una serie de recursos informáticos, incluyendo hardware y software, que simplifican esta tarea.

Este proceso forma parte de un proyecto dirigido por un grupo de personas y supervisado por expertos encargados de su implementación y desarrollo. Cabe señalar que un SIG es una herramienta que fusiona datos gráficos, como mapas, con datos alfanuméricos, como estadísticas, para generar información adicional relacionada con el espacio geográfico (Radicelli et al., 2019).

#### ***a. Modelos de representación en un sistema de información geográfica***

##### ***i. Modelo vectorial***

Este modelo de datos se basa en coordenadas y representa datos geográficos como puntos, líneas y polígonos. En este modelo, cada entidad puntual se representa como un par de coordenadas, mientras que las entidades lineales y poligonales se representan como listas ordenadas de vértices. Los atributos están vinculados a cada característica vectorial, lo que lo distingue del modelo de datos ráster donde los atributos están asociados con celdas de cuadrícula. (ESRI, 2010).

## **ii. *Modelo Ráster***

En su configuración más básica, un ráster consiste en una cuadrícula de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas, donde cada celda contiene un valor que representa datos, como la temperatura. Además, los rústeres pueden incluir contenido digital, como fotografías aéreas, imágenes de sensores, gráficos digitales e incluso mapas escaneados.

## **2.3 Definición de Términos**

### **a. *Cobertura vegetal***

Se refiere a la vegetación natural o cultivada que cubre la superficie del suelo. Su presencia es clave para reducir la erosión, mejorar la infiltración del agua, conservar la humedad del suelo y proteger su estructura frente al impacto de las gotas de lluvia (FAO, s.f.).

### **b. *Energía cinética de la lluvia***

Se refiere a la fuerza generada por el movimiento de las gotas de agua mientras caen desde la atmósfera hacia el suelo. Esta energía desempeña un papel clave en la erosión hídrica, ya que el impacto de las gotas puede romper la estructura del suelo y favorecer su movilización (Roldán y Fernández, 2006).

### **c. *Fisiografía***

Disciplina que consiste en reconocer y delimitar las diferentes formas del relieve terrestre, tomando en cuenta elementos como la topografía, geología, drenaje, litología y vegetación (IIAP, 2010).

### **d. *Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)***

Medida sencilla de la salud de la vegetación, proporcionando una estimación de la biomasa fotosintéticamente activa o, en términos más simples, el bienestar de la vida vegetal (EOS Data

Analytics, 2024).

***e. Pendiente***

Inclinación de los terrenos y se define como el ángulo formado por dos lados, siendo la forma común de expresar la medida del ángulo mediante el sistema sexagesimal (grados, minutos y segundos). Generalmente, en terrenos agrícolas, se evita que la pendiente supere los 45° debido a consideraciones agronómicas, de conservación y manejo del suelo. Sin embargo, en la región natural de la sierra, es frecuente que este límite se supere con relativa frecuencia, alcanzando niveles de 50° o más (Alcántara, 2011).

***f. Red hidrográfica***

Red formada por un río principal y una serie de afluentes que se extienden hasta las zonas más altas de la cuenca, para clasificar la red se utilizan métodos Strahler-Horton y Gravelius, el primero ordena las partes según si tienen ramas y cómo están conectadas, el de Gravelius invierte el ordenamiento de los vectores es decir, es la que está formada por varios ríos y otros cursos de agua permanentes o temporales, incluidos lagos y embalses, dentro de un área determinada (World Meteorological Organization, 2012).

***g. Relieve***

Características elevadas o sobresalientes que se encuentran en la superficie con diversos patrones, que son montañas, mesetas y llanuras son algunos de los tipos distintivos de relieve de la superficie de la Tierra. (Instituto Nacional, s.f).

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1. Ubicación de la cuenca del Río Grande**

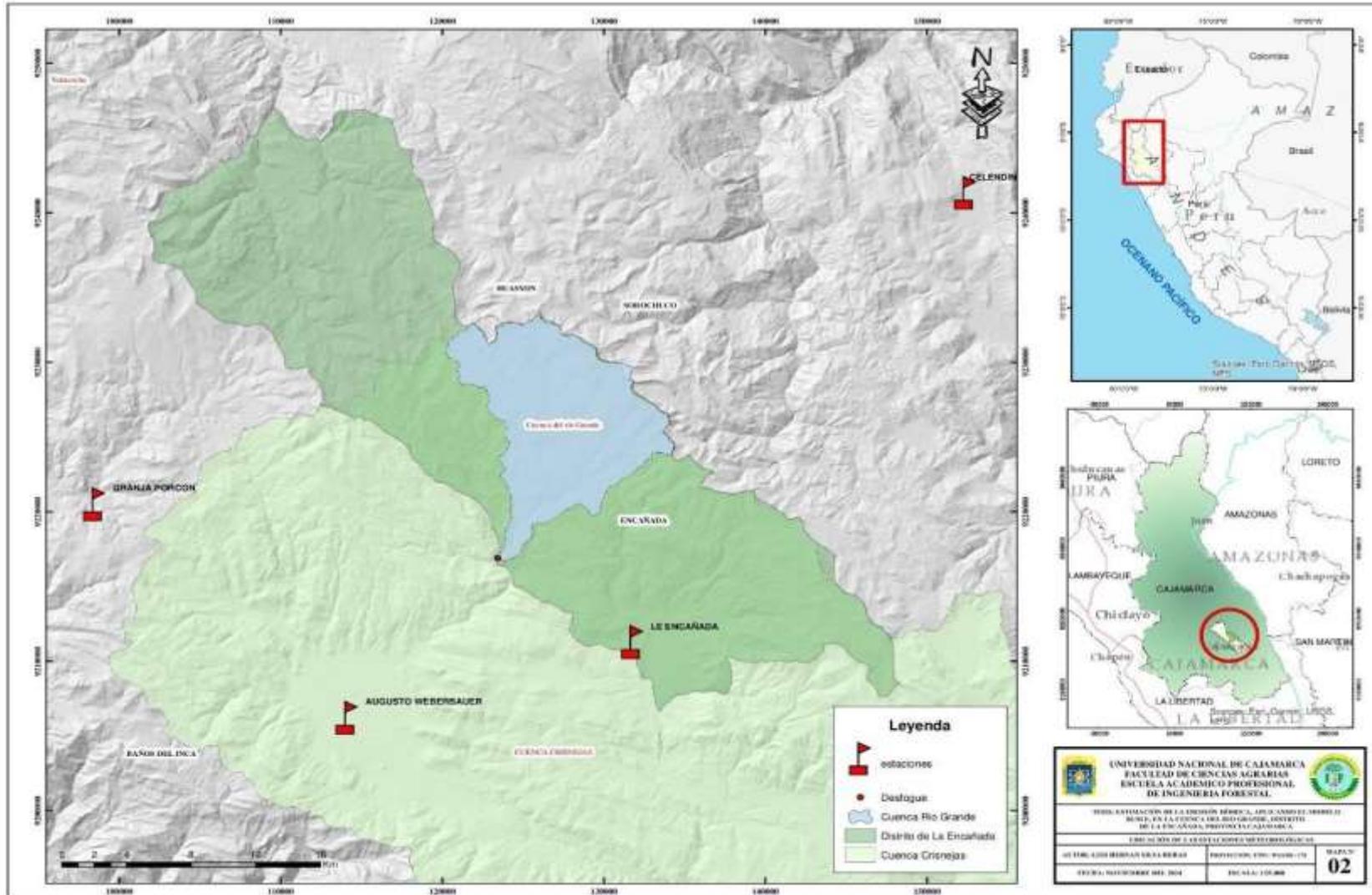
La estimación de la erosión hídrica comprendió el análisis de la cuenca del Río Grande, ubicada en el distrito de La Encañada, provincia y departamento de Cajamarca. La altitud en la cuenca varía entre los 2473 y 2916 msnm, abarcando una superficie total de 11 429.11 ha y un perímetro de 114.29 km.

La cuenca del río Grande limita al norte con los distritos de Huasmin y Sorochuco, en la provincia de Celendín, y al sur con el distrito de Baños del Inca, perteneciente a la provincia de Cajamarca. Las aguas desembocan en el Río Chonta, el cual forma parte del sistema hidrográfico que fluye hacia el Río Crisnejas y, posteriormente, al Río Marañón.



Figura 5

Ubicación de las estaciones meteorológicas



### 3.2. Accesibilidad

El acceso a la cuenca del Río Grande se realiza a través de una ruta que inicia en la ciudad de Cajamarca, con dirección al centro poblado de Otuzco. El trayecto comienza por una vía pavimentada, la cual posteriormente da paso a una carretera afirmada que atraviesa el cañón Sangal, permitiendo el ingreso hacia la parte baja de la cuenca, en la zona de Tres Tingos. A lo largo de esta ruta, se transita por lugares emblemáticos como las Ventanillas de Combayo, continuando hacia el caserío Yerbabuena, correspondiente a la parte media de la cuenca. Finalmente, el camino asciende hasta el caserío San Nicolás de Challuagón, ubicado en la parte alta, desde donde es posible tener una visión panorámica de toda la cuenca.

### 3.3. Características de la cuenca del Río Grande

#### 3.3.1 Hidrografía

Según la ZEE (2011) el departamento de Cajamarca abarca ríos y lagunas principales que fluyen desde la parte alta, formando un significativo potencial hídrico esencial para el sistema de irrigación, la producción agrícola, así como para actividades industriales y mineras. En el ámbito de estudio, se identificaron 43 ríos mediante uso herramientas de SIG, permitiendo cartografiar su extensión. Los ríos de mayor longitud, como el Río Grande (18.08 km), Huayramachay (5.93 km) y Yanacocha (4.78 km).

**Tabla 4**

*Quebradas y río principal pertenecientes a la cuenca del Río Grande*

Nº	Red-Hi	Nombre	Longitud en Km
1	Q	Salvia Grande	1.59
2	Q	Quinuapampa	1.6
3	Q	Portachuelo	0.97
4	Q	Ñic Ñic	1.67
5	Q	Chugur	2.15
6	Q	Caparrosa	1.74

<b>N°</b>	<b>Red-Hi</b>	<b>Nombre</b>	<b>Longitud en Km</b>
7	Q	Río Seco (El Caire)	1.33
8	Q	Las Totoras	2.36
9	Q	Chupicarrio (Colorada)	2.93
10	Q	Chorro Blanco	3.14
11	Q	Los Cuyes	1.47
12	Q	Chaquicocha	2.14
13	Q	El Potrero	0.85
14	Q	Chinalinda	0.74
15	Q	El Chorro	0.53
16	Q	Cinco Tacchana	0.89
17	Q	La Rangra	1.16
18	Q	La Huaylla	1.18
19	Q	Coheguauana	2.45
20	Q	Shugur	1.28
21	Q	La Tranca	0.82
22	Q	La Cortadera	0.76
23	Q	La Tacshana	2.14
24	Q	Cashapampa	0.97
25	Q	Poroporo	1.45
26	Q	Las Minas	2.06
27	Q	Habasmayo	3.24
28	Q	Yanacocha	4.78
29	Q	Peña Colorada - Suytorume	2.28
30	Q	Mishacocha	3.04
31	Q	Suyturume	2.96
32	Q	Colorado	3.15
33	Q	Quisquimayo	4.17
34	Q	Huayramachay	5.93
35	Q	Canchacorral	2.18
36	R	Grande	18.08
37	Q	Huayramachay	2.05
38	Q	El Lirio	2
39	Q	Chailhuagon	0.56
40	Q	Río Seco (El Caire)	1.09
41	Q	Suyturume	1.36
42	Q	Yanacocha	1.37
43	Q	Habasmayo	2.49

Fuente: Adaptado de ZEE Cajamarca (2011).

### 3.3.2 Lagunas

Dentro de la cuenca en total son 6 lagunas (Mishacocha Chica, Mishacocha, Chailhuagon, Caparrosa, Kerosene, y Mamacocha). Estas presentan una variación en sus superficies que va desde 0.9 ha hasta 13.9 ha como se muestran en la siguiente Tabla.

**Tabla 5**

*Número total de Lagunas en la cuenca del Río Grande*

Nº	Nombre	ha	Km <sup>2</sup>
1	Mishacocha chica	13.9698	0.1396
2	Mishacocha	3.4771	0.0347
3	Chailhuagon	8.83965	0.0883
4	Caparrosa	0.8915	0.0089
5	Kerosene	1.23925	0.0123
6	Mamacocha (Yanacocha)	9.7841	0.0978

Fuente: Adaptado de ZEE Cajamarca (2011).

### 3.3.3 Clima

En el análisis climático realizado en base a la ZEE de Cajamarca del año 2011, en la cuenca se identificó un clima frío caracterizado por condiciones secas en invierno.

**Tabla 6***Identificación del clima en la cuenca del Río Grande*

<b>C</b>	<b>Clima</b>	<b>Descripción</b>
1	Frio	Seco en invierno. Temperatura media superior a +10 °C, por lo menos durante 4 meses

Fuente: Adaptado de ZEE Cajamarca (2011).

**3.3.4 Suelos**

A partir de la información disponible, se extrajeron los datos correspondientes a los tipos de suelo presentes en la cuenca del río Grande. Los más representativos son Paramosol y sus asociaciones con Leptosol (PS-L) y Andosol (T-L y PA), como se muestra en la Tabla 7. Esta información contribuye a una mejor comprensión del recurso suelo en el área de estudio. Según Poma y Alcántara (2011), la evaluación del recurso suelo es clave para determinar la Capacidad de Uso Mayor, sirviendo como base para la formulación de planes de desarrollo agrícola y la realización de investigaciones técnicas.

**Tabla 7***Tipos de suelos en la cuenca Río Grande*

<b>N°</b>	<b>Código</b>	<b>Suelo</b>
1	T-L	Andosol-Leptosol
2	PS-L	Paramosol-Leptosol
3	H-L	Phaeozem-Leptosol
4	L	Leptosol
6	PS	Paramosol
8	PA	Paramo andosol
10	PS-L	Paramosol-Leptosol
11	PA-L	Paramo Andosol-Leptosol

Fuente: Poma y Alcantara (2011)

### 3.3.5 Geología

El departamento de Cajamarca incluye una amplia variedad de formaciones geológicas con vínculos históricos que abarcan desde el Precámbrico hasta la era Cenozoica. Su composición litológica integra rocas metamórficas, sedimentarias, formaciones volcánicas y sedimentos cuaternarios (Durán, 2018). En la cuenca del Río Grande se han identificado 14 tipos de formaciones geológicas, con predominancia de rocas sedimentarias como areniscas, lutitas, calizas y margas, distribuidas en diversas formaciones (Carhuaz, Chimú, Inca, Pariatambo, Cajamarca, entre otras). También están presentes rocas volcánicas, específicamente dacitas y tobas/aglomerados (Dacitas y Volcánico Huambos) (Durán, 2018).

**Tabla 8**

*Identificación formaciones geológicas en la cuenca del Río Grande*

N°	Código	Descripción	Tipo de roca	Litología
1	Ki-ca	Formación Carhuaz	Sedimentaria	Areniscas, lutitas.
2	Ki-chim	Formación Chimú	Sedimentaria	Areniscas, lutitas
3	Ki-in	Formación Inca	Sedimentaria	Calizas, lutitas, margas.
4	Ki-pa	Formación Pariatambo	Sedimentaria	Dolomitas bituminosas, margas, calizas.
5	Ks-ca	Formación Cajamarca	Sedimentaria	Calizas, margas
6	Ks-qm	Formación Quilquiñan/Mujarrun	Sedimentaria	Calizas, lutitas, margas.
7	Ks-yu	Formación Yumagual	Sedimentaria	Calizas, lutitas, margas.
8	Qp-fg	Depósitos Fluvioglaciares	Sedimentaria	Gravas subredondeadas a subangulosas, arena.
9	Ki-f	Formación Farrat	Sedimentaria	Cuarcitas, areniscas
10	Ki-sa	Formación Santa	Sedimentaria	Calizas, lutitas, margas.
11	Pe-da	Dacitas	Volcánica	Dacita
12	Ki-chu	Formación Chulec	Sedimentaria	Calizas, lutitas, margas.
13	Nm-vh	Volcánico Huambos	Volcánica	Tobas, aglomerados, brechas.
14	Ks-yu	Formación Yumagual	Sedimentaria	Calizas, lutitas, margas.

Fuente: Adaptado de Durán (2018).

### 3.3.6 Geomorfología

La ZEE (2011) se realizó un estudio geomorfológico en el departamento de Cajamarca, en el cual se definió la geomorfología como una de las disciplinas especializadas en el estudio del relieve. De esta forma en la cuenca del río Grande se han identificado 10 unidades geomorfológicas que presentan diversos procesos morfológicos. Los principales procesos incluyen movimiento complejo, erosión de laderas, derrumbes, y deslizamientos, que varían según la inclinación y el tipo de roca (como rocas del Cretáceo, Neógeno, y depósitos fluvioglaciares).

**Tabla 9**

*Identificación de unidades geomorfológicas en la cuenca del Río Grande*

N°	Unidas geomorfológicas	Proceso Morfológico
1	Ladera de montaña empinada en rocas del neógeno	Reptación, caída de rocas, derrumbes, movimiento complejo
2	Colinas intermontañosas en rocas del cretáceo inferior y del paleógeno	Movimiento complejo, erosión de laderas
3	Montaña fuertemente inclinada en rocas del cretáceo inferior	Movimiento complejo, erosión de laderas
4	Altiplanicie moderadamente empinada en depósito fluvioglacial	Erosión de laderas, flujo
5	Altiplanicie moderadamente empinada en depósito fluvioglacial	Erosión de laderas, flujo
6	Ladera de montaña moderadamente empinada en rocas del cretáceo superior	Movimiento complejo, derrumbes, caída de rocas
7	Montaña moderadamente empinada en rocas del cretáceo inferior	Deslizamientos, flujo
8	Ladera de montaña moderadamente empinada en rocas del neógeno	Erosión de laderas
9	Colinas intermontañosas en rocas del cretáceo inferior	Movimiento complejo, erosión de laderas
10	Altiplanicie moderadamente empinada en rocas volcánicas	Movimiento complejo, erosión de laderas

Fuente: Adaptado de ZEE Cajamarca (2011).

### ***3.3.7 Fisiografía***

El escenario fisiográfico de la cuenca del Río grande presenta rasgos topográficos, características geográficas, las elevaciones, las inclinaciones y los tipos de rocas que componen las diversas estructuras geológicas. Alcántara (2011) realizó el proceso de Zonificación Ecológica Económica - ZEE a nivel macro en coordinación con el Gobierno Regional de Cajamarca (GORECAJ) donde se ha llevado a cabo un estudio fisiográfico del departamento de Cajamarca. Este análisis permitirá identificar y categorizar las diversas características de la cuenca.

La cuenca río grande se distingue por paisajes montañosos formados principalmente sobre secuencias sedimentarias (calizas, lutitas y margas) y materiales extrusivos (tobas dacíticas y brechas ácidas). Los paisajes colinosos están compuestos de secuencias fosilíferas de calizas arenosas, mientras que las altiplanicies incluyen depósitos fluvioglaciares e intrusivos de dacitas. Esta variedad geomorfológica aporta complejidad al entorno, afectando los procesos erosivos y la estabilidad de las laderas dentro de la cuenca.

**Tabla 10***Unidades fisiográficas en la cuenca del Río Grande*

N°	Símbolo	Gran Paisaje	Paisaje
1	MEdLF	Montañoso	Montañas extrusivas formadas sobre tobas dacíticas y brechas de composición acida
2	MSkalcLF	Colinoso	Colinas sedimentarias formadas sobre una secuencia fosilífera de calizas arenosas, lutitas calcáreas y margas
3	MSkalcLD	Montañoso	Montañas sedimentarias formadas sobre una secuencia fosilífera de calizas arenosas, lutitas calcáreas y margas
5	AFgDE	Altiplanicie	Altiplanicie formada sobre deposito Fluvio-Glaciario
6	MSsmkLE	Montañoso	Montañas sedimentarias formadas sobre una secuencia de margas y calizas gris parduzcas en bancos más o menos uniformes
7	MSkLE	Montañoso	Montañas sedimentarias formadas sobre calizas gris oscuras o azuladas, con delgados lechos de lutitas y margas
11	MSabLE	Montañoso	Montañas sedimentarias formadas sobre areniscas blancas de grano medio a grueso
12	MEdLE	Montañoso	Montañas extrusivas formadas sobre tobas dacíticas y brechas de composición acida
13	MSkalcLF	Colinoso	Colinas sedimentarias formadas sobre una secuencia fosilífera de calizas arenosas, lutitas calcáreas y margas
14	MSkalcLE	Colinoso	Colinas sedimentarias formadas sobre una secuencia fosilífera de calizas arenosas, lutitas calcáreas y margas
15	AIdcLE	Altiplanicie	Altiplanicies intrusivas formadas sobre dacitas compuestas por pequeños fenocristales de plagioclasa y cuarzo

Fuente: Adaptado de ZEE Cajamarca (2011).

### 3.3.8 Zonas de vida

Sánchez y Vásquez (2011) hicieron la fase de actualización del mapa departamental de zonas de vida a cargo del ZEE – Cajamarca, así mismo manifiestan que las zonas representan subconjuntos de interacción ecológica en el territorio, abarcando aspectos climáticos, hídricos y

geo-espaciales, con la finalidad inherente de promover la existencia de la zona de vida.

La cuenca del río Grande cuenta con cinco: bosque húmedo montano tropical (bh-MT), bosque seco montano bajo tropical (bs-MBT), tundra pluvial alpino tropical (tp-AT), bosque muy húmedo montano tropical (bmh-MT) y páramo pluvial subalpino tropical (pp-SAT) (Sánchez y Vásquez, 2011).

**Tabla 11**

*Zonas de vida en la cuenca del Río Grande*

N°	Símbolo	Descripción
1	bh-MT	bosque húmedo Montano Tropical
2	bs-MBT	bosque seco Montano Bajo Tropical
3	tp-AT	tundra pluvial Alpino Tropical
4	bmh-MT	bosque muy húmedo Montano Tropical
5	pp-SAT	paramo pluvial Subalpino Tropical

### **3.3.9 Cobertura vegetal y uso actual**

Alcántara (2011) señala que al delimitar diversas formas de cubierta vegetal y usos de la tierra, la intención es proporcionar una comprensión de los diversos tipos de utilización en un momento específico e ilustrar la manera en que ha evolucionado la explotación de sus recursos, con apoyo de imágenes satelitales Landsat, obteniendo información valiosa para la cuenca, que sirve para determinar el alto grado de erosión en zonas de escasa cobertura vegetal y la erosión moderada en zonas de bosques naturales, pastos naturales, vegetación arbustiva y terrenos de pendientes suaves donde el suelo está más protegido.

Con la información actualizada del MINAM (2015) se elaboró la siguiente Tabla, donde se detalla los diversos tipos de cobertura vegetal y usos actuales presentes en la cuenca del río

Grande. Además, durante la salida a campo se verificaron las condiciones de cada tipo de cobertura, confirmando su correspondencia con los datos obtenidos. Este análisis permite identificar áreas vulnerables a la erosión y definir estrategias de manejo adecuadas.

**Tabla 12**

*Tipos de cobertura vegetal y usos actuales de la cuenca del Río Grande*

N°	Símbolo	Cobertura Vegetal y uso actual	Símbolo
1	Agri	Agricultura andina	Agri
2	Bo	Bofedal	Bo
3	L/Co	Lagunas, lagos y cochas	L/Co
4	Ma	Matorral arbustivo	Ma
5	Pj	Pajonal andino	Pj

**Figura 6**

*Agricultura andina en el sector de Combayo, ubicado dentro de la cuenca del Río Grande*

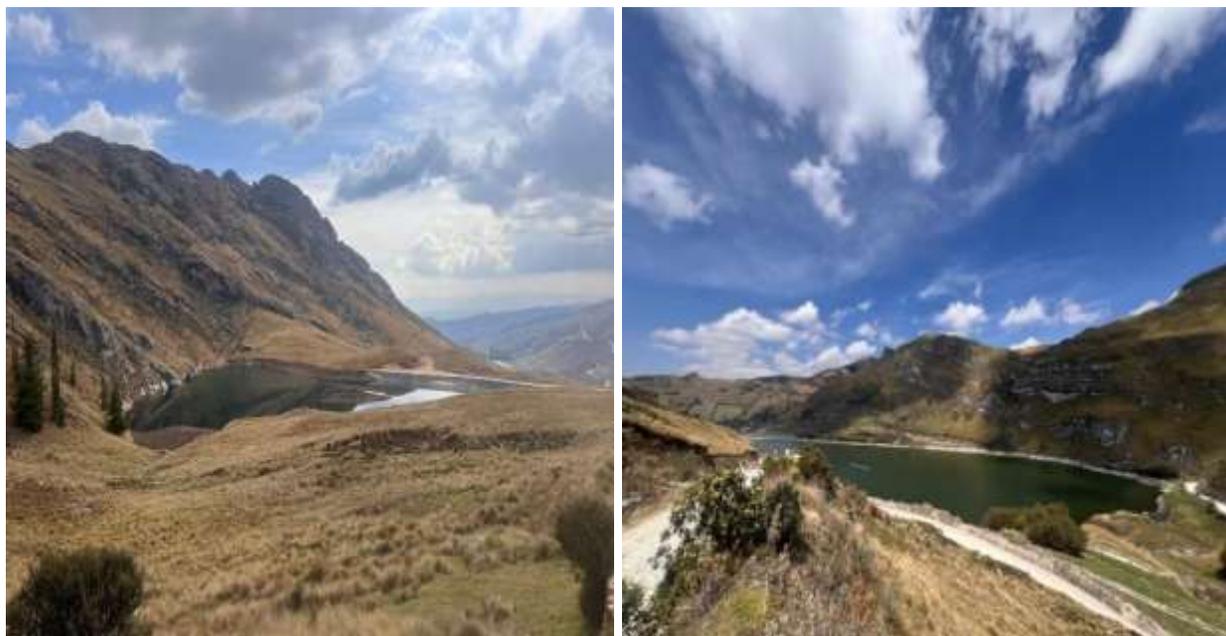


**Figura 7**

*Bofedal en la parte alta de la cuenca del Río Grande*

**Figura 8**

*Lagunas en la cuenca del río Grande*



*Nota:* Las imágenes muestran las lagunas Kerosene - Galeno y San Nicolás – Challuagon, ubicadas en la parte alta de la cuenca.

**Figura 9**

Matorral arbustivo en la cuenca del Río Grande – caserío Yerba Buena



**Nota:** La imagen muestra un área cubierta predominantemente por matorrales arbustivos, una vegetación característica de zonas de altura en la cuenca del río Grande.

**Figura 10**

*Pajonales en la cuenca del Río Grande – caserío las lagunas de Combayo*



*Nota:* Pajonal andino, una vegetación herbácea característica de las partes altas de la cuenca.

### **3.4. Equipos y materiales**

- ✓ 01 cámara fotográfica Cannon T5
- ✓ 01 GPS Garmin Oregon 550
- ✓ Libretas de campo
- ✓ Imágenes satelitales

### **3.5. Variables**

- ✓ Tasas de erosión hídrica
- ✓ Factor de erosividad de la lluvia
- ✓ Factor de erodabilidad del suelo
- ✓ Factor longitud de la pendiente
- ✓ Factor de cobertura vegetal
- ✓ Factor de prácticas de conservación del suelo

#### ***3.5.1 Unidad de análisis***

La unidad de análisis es la cuenca del río Grande se analizó la tasa de erosión hídrica a nivel espacial mediante la segmentación del área en celdas (píxeles) generadas a partir de modelos digitales de elevación con resolución de 12.5 m. Cada píxel representa una unidad mínima de análisis dentro de la cuenca, permitiendo el cálculo de los factores del modelo RUSLE (R, K, LS, C y P) y la identificación de zonas críticas de pérdida de suelo. Esta estructura espacial facilita una estimación precisa, continua y detallada de la erosión hídrica a escala de paisaje.

### **3.6 Metodología**

La primera fase consistió en la recolección de información base de la zona de estudio, utilizando fuentes secundarias provenientes de entidades oficiales, con la finalidad de conocer las características de la hidrografía, clima, suelos, geología, geomorfología, fisiografía, red vial, cobertura vegetal y uso actual del suelo.

### **a. Recolección de información cartográfica y satelital**

Se recopilaron diversos tipos de información relevante para la zona de estudio. Se trabajó con las Cartas Nacionales del Instituto Geográfico Nacional (14g y 15g), que proporcionaron detalles sobre curvas de nivel, ríos, cotas y lagunas. También se utilizó un modelo ráster del sensor Alos Palsar, con una resolución espacial de 12,5 m, correspondiente a los años 2010 y 2011. Además, se emplearon datos del ASTER GDEM en formato GeoTIFF, con una resolución de 30 m, y se incluyeron imágenes satelitales Landsat 8 del año 2023.

Asimismo, se utilizaron shapefiles extraídos de la mapoteca virtual del Gobierno Regional de Cajamarca, así como de fuentes adicionales como la FAO, el MINAM, la ANA y el MTC. En todos estos procesos se ha tenido al Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramienta fundamental para la organización, análisis espacial e integración de los datos geoespaciales utilizados en este estudio.

Durante el período de estudio, además de recopilar datos geoespaciales, se realizó una fase de levantamiento de campo para identificar los tipos de cobertura vegetal y los usos actuales del suelo. Asimismo, se llevó a cabo un mapeo detallado de las características de la zona de estudio mediante el análisis con Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que permitió obtener una visión integral y actualizada del área investigada.

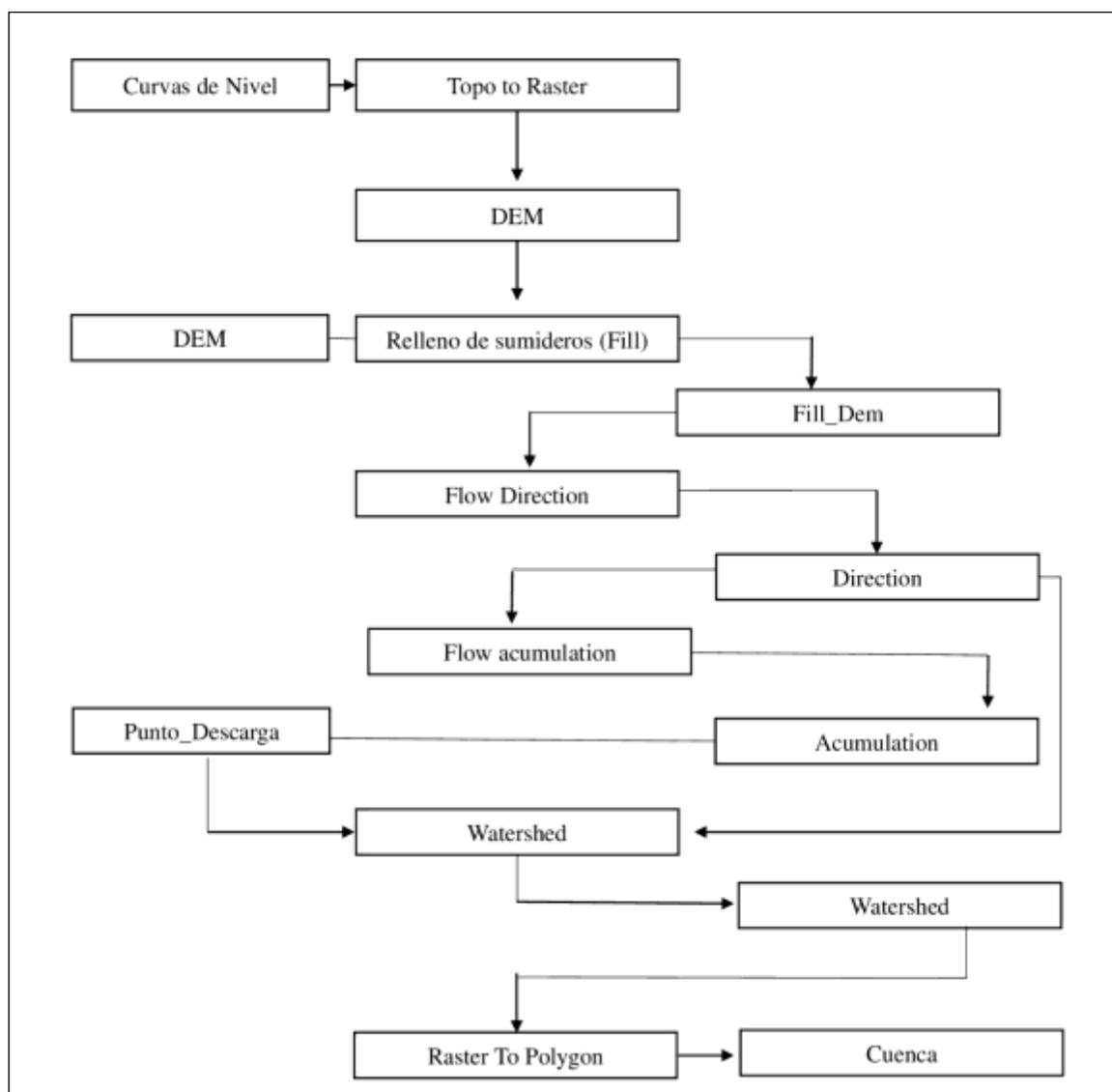
#### ***3.6.1 Delimitación de la zona de estudio***

Se ejecutó utilizando el software ArcMap 10.5, reconocido por su capacidad para realizar tareas avanzadas de geoprocésamiento. El proceso comenzó con la carga de la base de datos, seguida del procesamiento del Modelo de Elevación Digital (DEM), que es esencial para la modelización topográfica. Se creó una geodatabase destinada a almacenar los resultados generados durante cada etapa del análisis. Posteriormente, se calcularon las direcciones de flujo, lo cual es crucial para determinar el trayecto del agua en el área de estudio. A continuación, se

estableció un punto de descarga, delimitando de forma precisa la cuenca hidrográfica para su análisis. La siguiente fase consistió en vectorizar la cuenca, transformando los datos rasterizados en un formato vectorial más adecuado para el análisis posterior. Cabe destacar que los resultados de este procedimiento pueden variar en función de la calidad del DEM utilizado y la elección del umbral de acumulación, lo cual afecta directamente la resolución y precisión de los modelos generados.

**Figura 11**

*Procedimiento para delimitar la cuenca del Río Grande*



### **3.7 Procesamiento y análisis de datos**

En esta etapa se procedió al procesamiento de todos los datos recopilados. Para ello, se emplearon modelos digitales de elevación (DEM) del sensor ALOS PALSAR, con una resolución espacial de 12.5 metros, y del ASTER GDEM, con una resolución de 30 metros. Asimismo, se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8 del año 2023, coberturas de uso del suelo y de cobertura vegetal proporcionadas por el Ministerio del Ambiente (MINAM), datos de precipitación media anual obtenidos de estaciones meteorológicas del SENAMHI y datos provenientes de la FAO.

#### **A. Factor R**

Para calcular el Factor de índice de erosividad pluvial (R), se llevó a cabo la extracción de datos provenientes de estaciones pluviométricas proporcionados por el SENAMHI. Estos datos descargados comprendieron las precipitaciones diarias de 4 estaciones pluviométricas durante el período de 2013-2023. Después de organizar los datos pluviométricos, se aplicó la fórmula del IMF (índice modificado de Fournier) en cada estación para estimar el índice de erosividad pluvial.

Con los datos obtenidos importados y asignados se procedió a realizar la interpolación utilizando la herramienta "Spline" para los 4 puntos de las estaciones pluviométricas, obteniéndose así el raster del Factor "R".

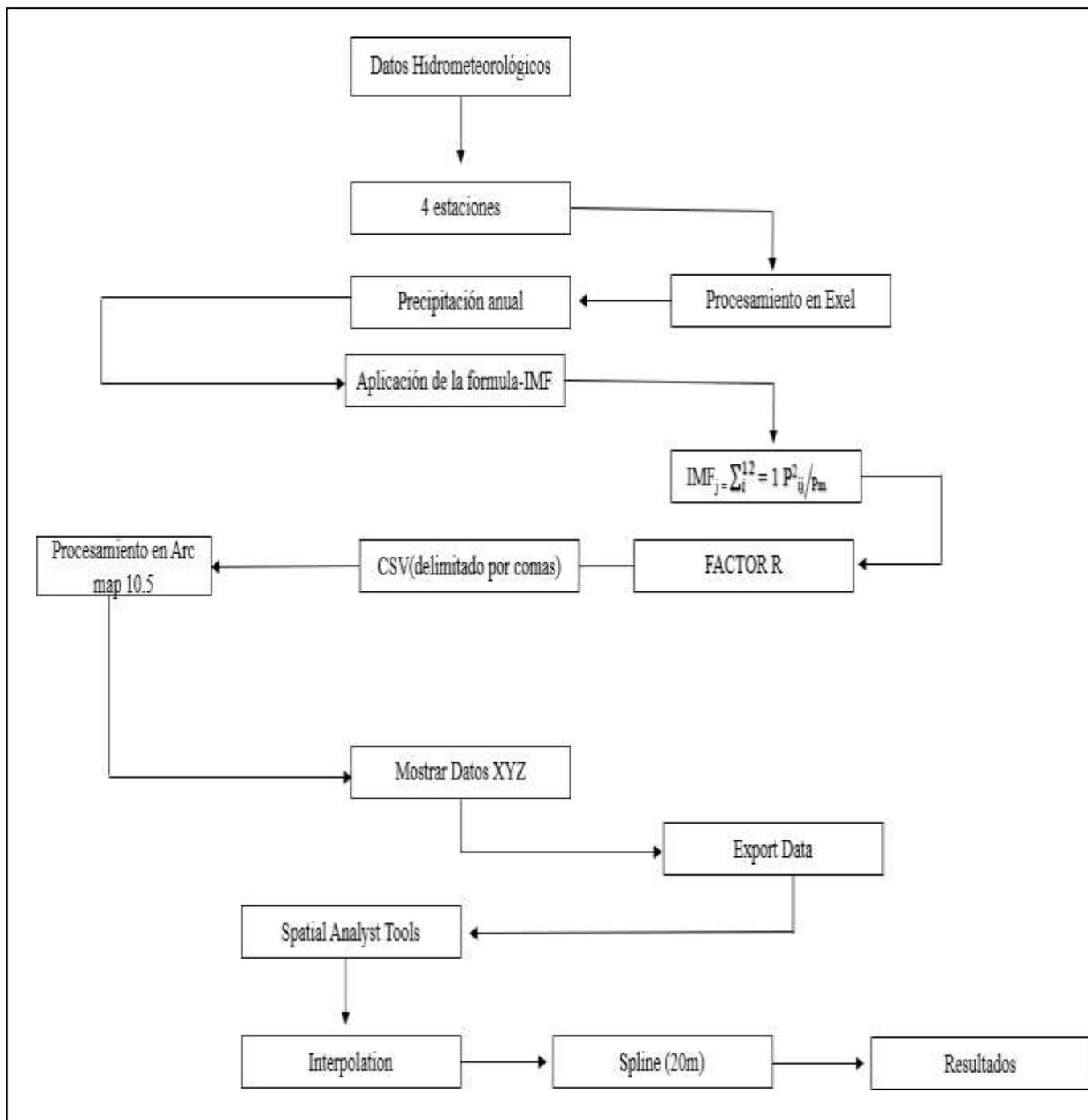
**Tabla 13***Estaciones pluviométricas del área de influencia de la cuenca del río Grande*

<b>ID</b>	<b>Nombre de la estación</b>	<b>Tipo de estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud (msnm)</b>
1	Augusto Weberbauer	CM	776880.9	9206978.4	2673
2	Granja Porcón	CM	761452.5	9221443.8	3149
3	Celendín	CM	815593.8	9241556.4	2062
4	La Encañada	CM	794592.6	9211766.4	2980

*Nota.* Se utilizaron registros de precipitación mensual y anual total provenientes de cuatro estaciones meteorológicas convencionales ubicadas dentro del área de influencia de la cuenca del Río Grande.

**Figura 12**

*Procedimiento para calcular el Factor R*



Finalmente, se llevó a cabo la clasificación de este ráster de acuerdo con la siguiente Tabla.

**Tabla 14***Clasificación de Índice Modificado de Fournier*

<b>Clasificación</b>	<b>Factor R (MJ/ha*mm/hr)</b>
Bajo	0-50
Moderado	50-550
Alto	550-1000
Muy Alto	>1000

Fuente: Crettaz et al. (2016)

**B. Factor K**

Para la obtención del factor de erodabilidad del suelo (K), se empleó el mapa mundial de suelos elaborado por la FAO y la UNESCO, digitalizado a una escala de 1:5.000.000. Este insumo, en formato vectorial y originalmente en proyección geográfica (latitud-longitud), fue reproyectado al sistema de coordenadas UTM, zona 17 Sur, datum WGS 1984.

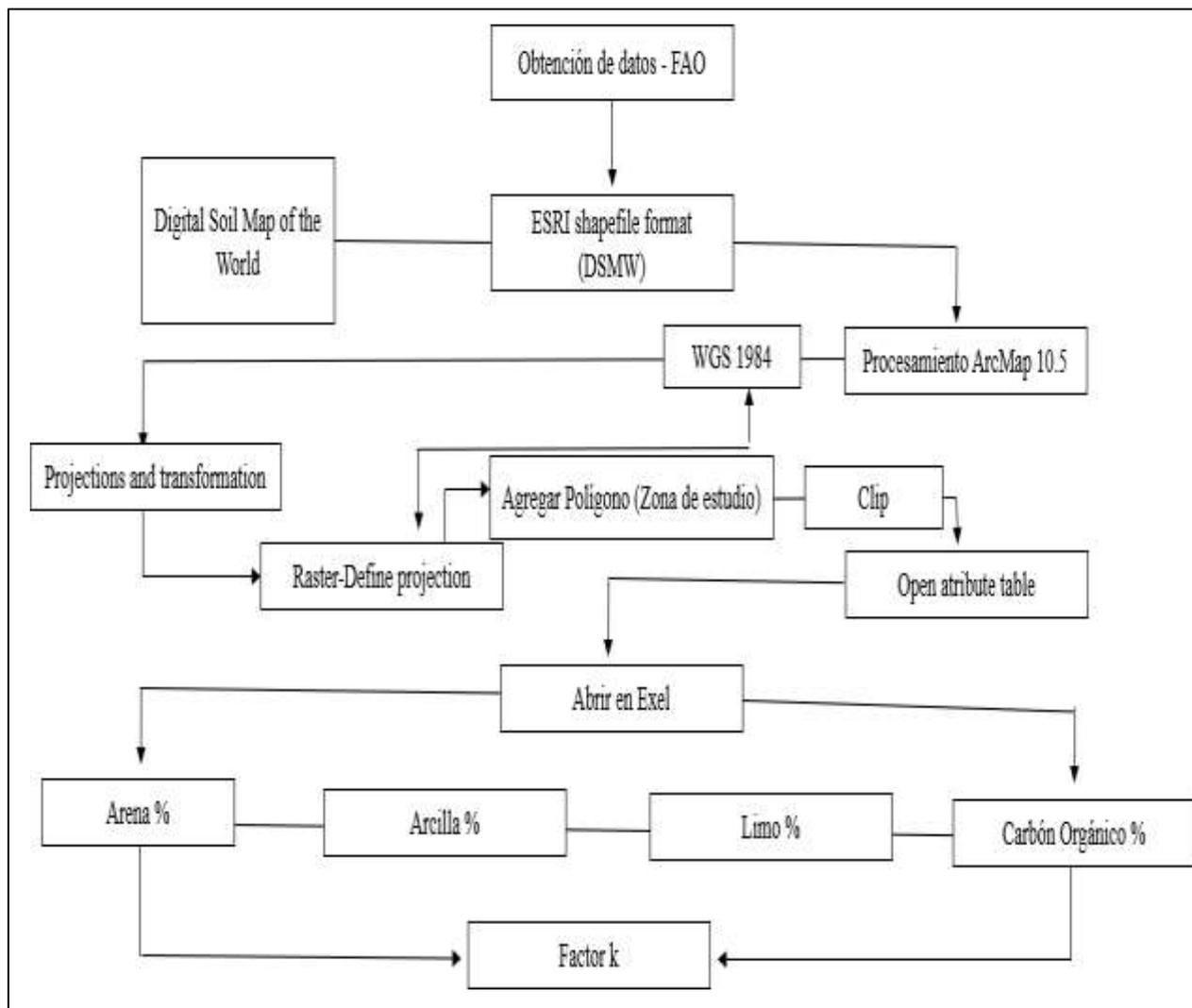
**Tabla 15***Información vectorial de suelos (FAO)*

<b>Símbolo</b>	<b>Nombre del Suelo</b>	<b>Arena (%)</b>	<b>Limo (%)</b>	<b>Arcilla (%)</b>	<b>Materia Orgánica</b>
I	Lithosls	39.1	26.5	34.6	1.46
TH	Humic Andosol	58.9	16.2	24.9	0.97

Utilizando la información recopilada de la FAO, el factor de erodabilidad se calculó y reasignó en función de los valores del factor K específicos de cada tipo de suelo. Este proceso se llevó a cabo utilizando herramientas de reclasificación dentro del software.

**Figura 13**

*Procedimiento para calcular el Factor K*



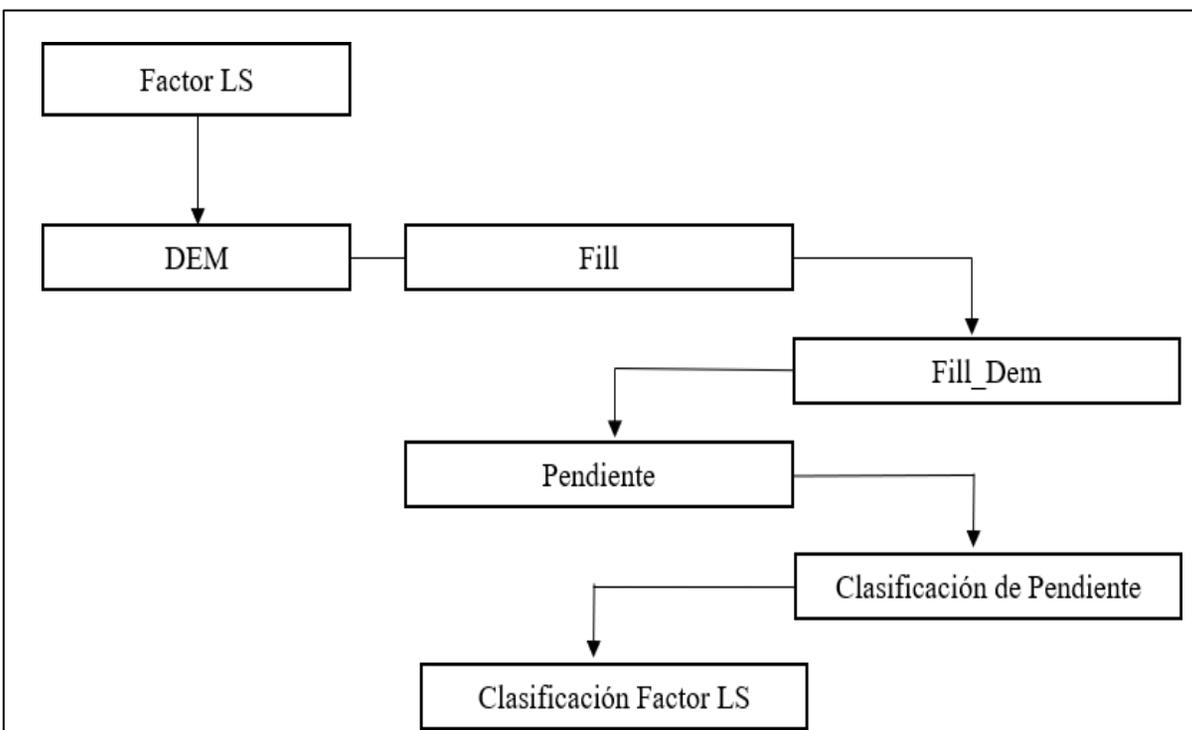
### C. Factor LS

Se utilizaron datos ráster de la plataforma Alaska satélite Alos Palsar, con una resolución de 12.5 m, para obtener una mejor precisión en la zona de estudio y calcular la Longitud de pendiente. La información ráster se obtuvo de los años 2010 y 2011 y se importó al software ArcGIS 10.5.

Para el Factor LS (Longitud de Pendiente y Factor de Gradiente), se empleó el Método Mintegui (1983), el cual asocia directamente la Pendiente con el Factor LS.

**Figura 14**

*Procedimiento para calcular el Factor LS*



*Nota.* El factor LS fue elaborado en base a un Modelo de Elevación Digital (DEM); este fue procesado y reclasificado para la obtención del mapa del factor LS.

#### **D. Factor C**

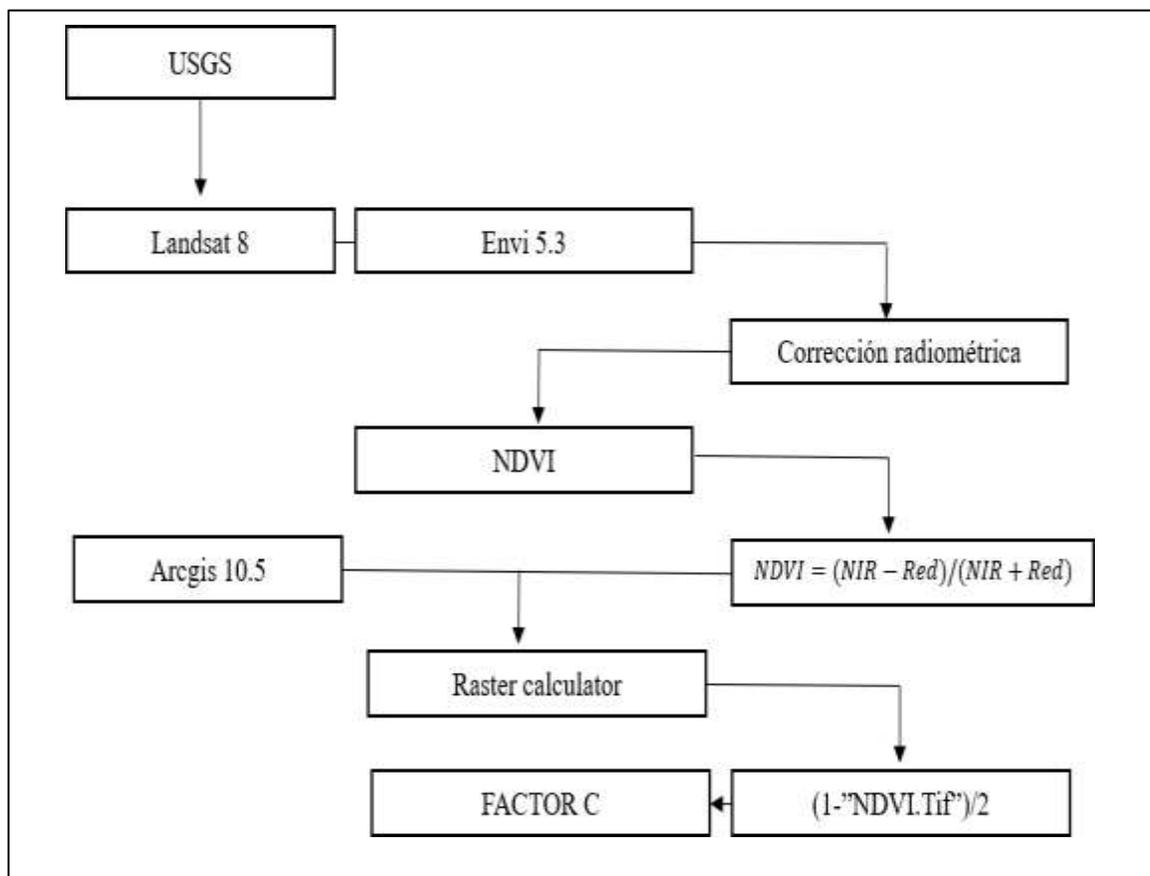
El cálculo de la cobertura vegetal se realizó mediante técnicas de procesamiento de imágenes y análisis de datos. Se emplearon imágenes de Landsat 8 de la zona de interés, las cuales se descargaron de forma gratuita a través del portal Geo Servidor USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos).

Asimismo, se llevó a cabo un preprocesamiento de las imágenes para corregir posibles

distorsiones y mejorar la calidad de los datos. Se utilizó la corrección radiométrica para garantizar la consistencia, precisión y comparabilidad de las imágenes satelitales, lo que facilitó su uso en el proceso de cálculo del factor C.

### Figura 15

*Procedimiento para calcular el Factor C*



Posteriormente, se llevó a cabo la clasificación del raster para asignar los valores correspondientes al factor C en cada unidad espacial de la cuenca. Este proceso permitió integrar los datos de cobertura terrestre y generar un mapa temático que refleja la variación del factor C en toda el área de estudio.

**Tabla 16**

*Factor C, según tipo y cobertura de uso del suelo de la cuenca del Río Grande*

<b>Clases</b>	<b>Clase de cobertura terrestre</b>	<b>C</b>
1	Bosque	0.1
2	Bosque, cultivos y pastizales	0.2
3	Matorrales y pastizales	0.3
4	Cultivos y pastoreo	0.4
5	Bofedales y forestales	0.5
6	Vegetación Escasa	0.6
7	Vegetación páramo	0.9
8	Suelo desnudo	1

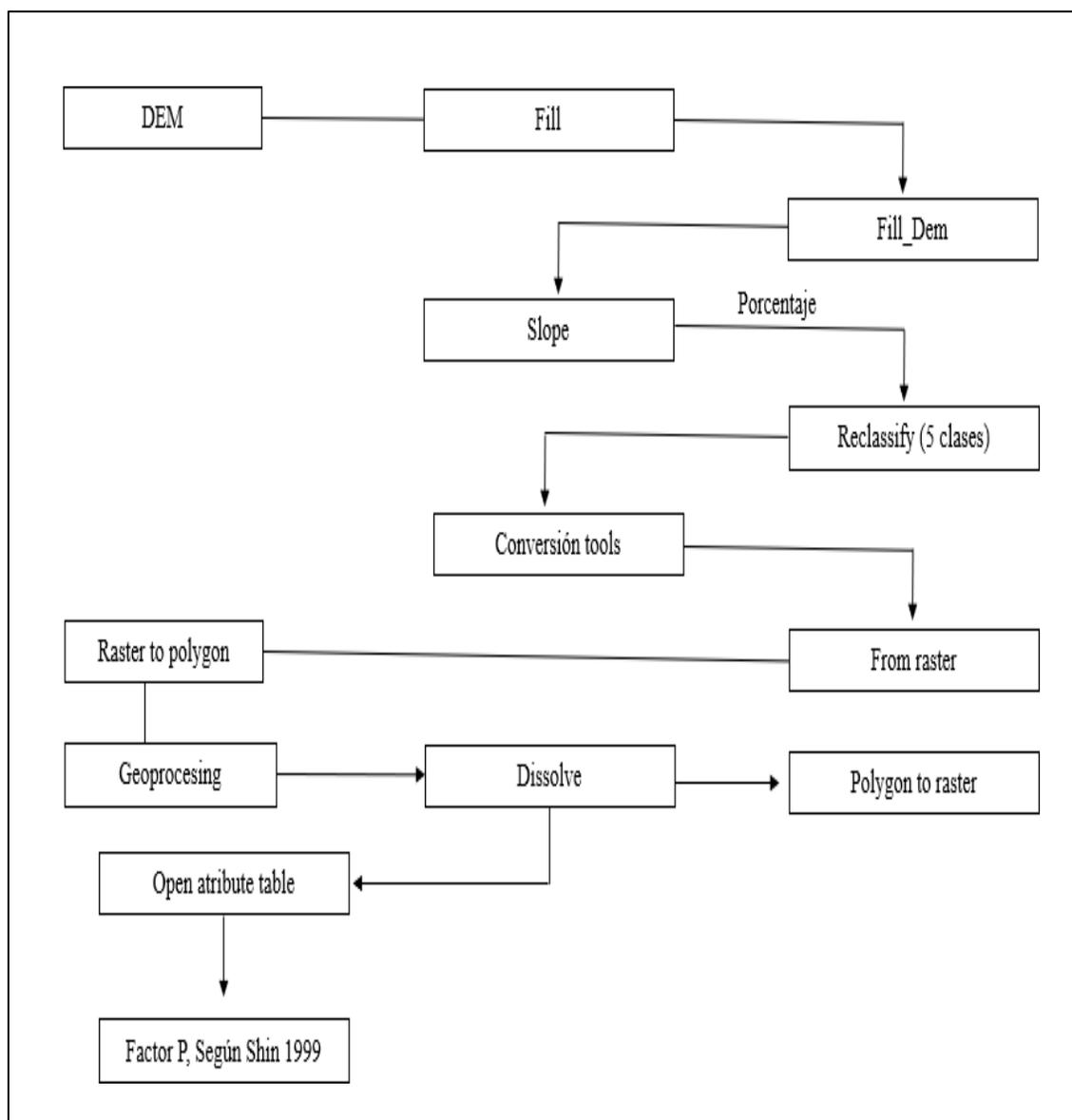
Fuente: Dumas et. al (2012)

### **E. Factor P**

Se llevó a cabo el procesamiento del ráster de 12.5 m de resolución, lo cual requirió el uso de herramientas como Slope. En este paso, se aplicaron los procesos pertinentes para calcular la tasa anual de pérdida de suelo.

**Figura 16**

*Procedimiento para calcular el Factor P*



*Nota.* El factor P se elaboró utilizando un Modelo de Elevación Digital (DEM), mediante el análisis de pendiente y su reclasificación según valores asignados por categorías de conservación del suelo

### **F. Cuantificación y representación de la pérdida de suelo**

Para evaluar la pérdida de suelo en la cuenca del Río Grande, en el distrito de La Encañada, se mapeó la distribución espacial de la erosión hídrica. Todos los mapas correspondientes a los cinco

parámetros del modelo RUSLE se desarrollaron utilizando un sistema de coordenadas común. La información ráster se procesó con una resolución espacial de celda de  $12,5 \times 12,5$  m. Las capas individuales de cada factor se superpusieron y multiplicaron a nivel de píxel mediante la calculadora ráster del software de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

**Tabla 17**

*Rangos de pérdida de Suelo*

<b>Clases de Pérdida de Suelo</b>	<b>Rangos (t. ha<sup>-1</sup>. Año<sup>-1</sup>)</b>
Severa	> 40
Muy alta	20 – 40
Alta	10 - 20
Moderada	5 – 10
Leve	0 – 5

Fuente: Kayet et al. (2018)

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Factores que intervienen en la estimación del Modelo RUSLE

#### 4.1.1 Factor R (Erosividad de la lluvia)

Para calcular el Factor R, se utilizaron datos pluviométricos proporcionados por el SENAMHI correspondientes al período 2013-2023. En primer lugar, se calculó la precipitación promedio anual (PPA) sumando los valores mensuales registrados en cada estación meteorológica analizada. A continuación, se aplicó la fórmula del Índice Modificado de Fournier (IMF), para obtener el Factor R total de cada estación, siguiendo la metodología descrita en el punto 3.5.1 del presente estudio.

**Tabla 14**

*Determinación del factor R a partir de datos de precipitación promedio anual (PPA) del SENAMHI, periodo 2013–2023.*

N°	Estación Meteorológica	Altitud (msnm)	Este	Norte	PPA	Factor R
1	Augusto Weberbauer	2673	776880.9	9206978	709.92	89.53
2	Granja Porcón	3149	761452.5	9221444	1449.64	363.51
3	Celendín	2062	815593.8	9241556	994.54	235.06
4	La Encañada	2980	794592.6	9211766	998.03	228.76

Los valores mínimos del Factor R en el área de estudio alcanzan los 97.75 MJ·mm/ha·año, como se observa en la Figura 21 correspondiendo a zonas con lluvias menos intensas y menor capacidad de causar erosión, lo que implica un riesgo bajo de erosión hídrica debido a la reducida energía cinética de las precipitaciones. En contraste, las zonas con lluvias más intensas presentan valores máximos de hasta 635.51 MJ·mm/ha·año, generando una mayor energía capaz de desagregar el suelo y aumentar significativamente el riesgo de erosión. La representación

cartográfica de estos resultados muestra cuatro niveles de erosividad claramente diferenciados: bajo, moderado, alto y muy alto, proporcionando una visión integral de la distribución espacial del riesgo erosivo en el área de estudio.

**Tabla 18**

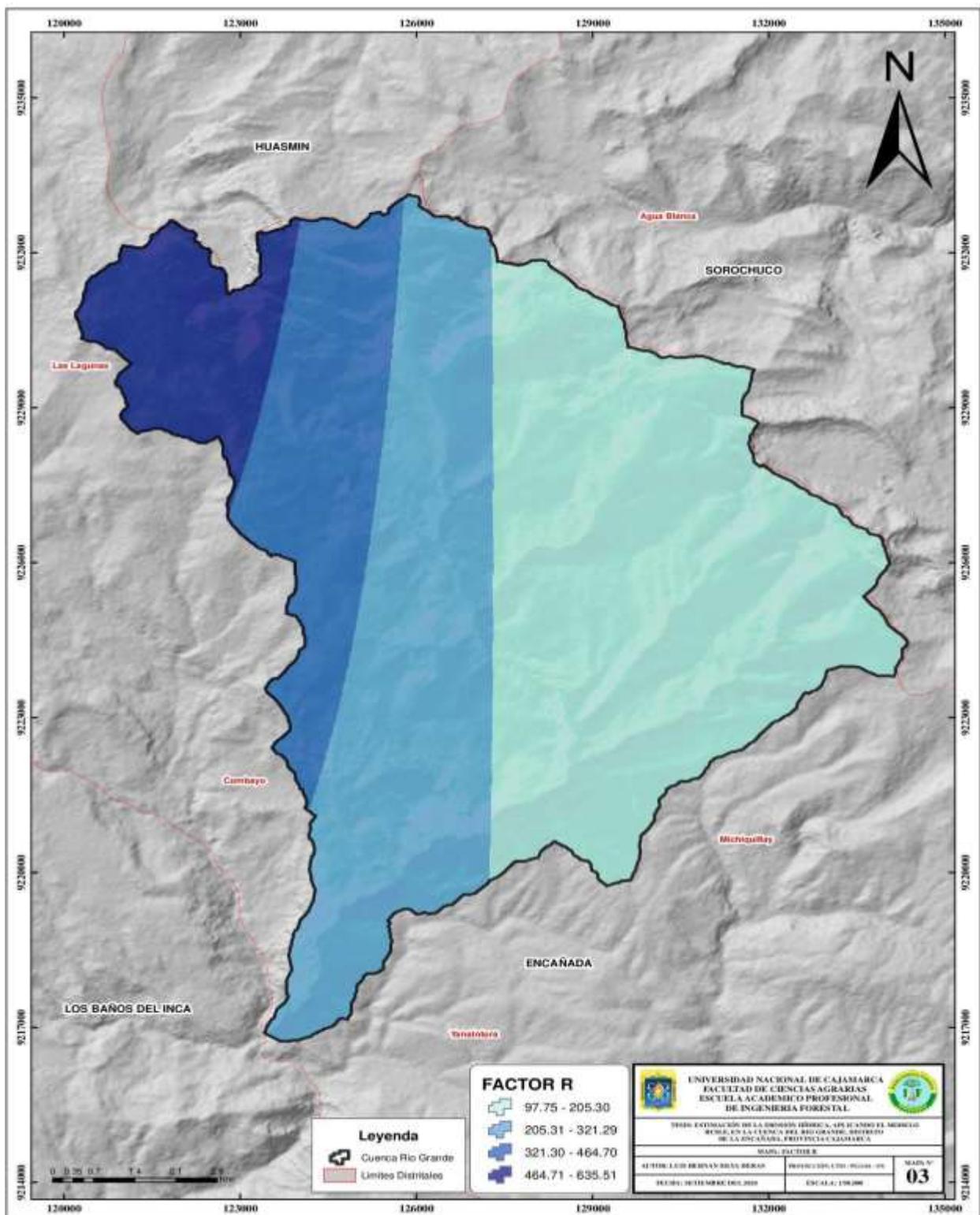
*Datos interpolados con la herramienta Spline*

<b>Clasificación</b>	<b>Factor R (MJ/ha*mm/hr)</b>
Bajo	97.75 -205.30
Moderado	205.31 - 321.29
Alto	321.30 - 464.70
Muy Alto	464.71 - 635.51

Según se muestra en la Figura 17, las zonas con mayores valores del factor de erosividad de la lluvia (R), representadas con tonalidades de azul oscuro, se ubican principalmente en el sector noroeste de la cuenca, en las proximidades de Huasmin y Las Lagunas. En contraste, las áreas con menor erosividad (tonos azul claro) se encuentran hacia el sureste, abarcando zonas como Michiquillay y Encañada. Esta distribución espacial responde, en gran medida, a los gradientes altitudinales presentes en la cuenca, así como a la influencia de la orografía en el patrón de precipitaciones, junto con otras características geoclimáticas del área de estudio.

Figura 17

Mapa del Factor de Erosividad aplicando Índice modificado de Fournier



Los resultados de este estudio se relacionan parcialmente con lo encontrado por Nayaka (2018) en la cuenca del río Tingo, Cajamarca, donde también se utilizó el modelo RUSLE. En dicho estudio, se identificó que la pendiente del terreno y la cobertura vegetal eran los factores más influyentes en el proceso de erosión. En el caso de la cuenca del río Grande, además de estos factores, se observó que el factor R (que representa la erosividad de la lluvia) cumple un papel importante, especialmente en el sector noroeste, donde las precipitaciones son más intensas. Esta diferencia podría deberse a las características propias de cada cuenca, como la altitud, el relieve y la forma en que se distribuyen las lluvias.

#### **4.1.2 Factor *k* (Erodabilidad del suelo)**

Los resultados del análisis del factor de erodabilidad (K) muestran que los suelos tipo Lithosol, representados en color marrón oscuro, se concentran principalmente en la zona norte del área analizada, como se observa en la Figura 18. Estos suelos presentan un valor de K de  $0.02825 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ , lo que indica una alta susceptibilidad a la erosión hídrica. Esta condición se debe a sus características físicas, como la poca profundidad, la elevada pedregosidad y una estructura poco desarrollada. En contraste, los suelos tipo Humic Andosol, representados en color amarillo claro, se localizan predominantemente en la zona sur. Estos suelos presentan un valor de K de  $0.02195 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ , lo que refleja una menor erodabilidad. Su estructura suelta, alto contenido de materia orgánica y buena capacidad de retención de agua permiten una mayor resistencia a los procesos erosivos.

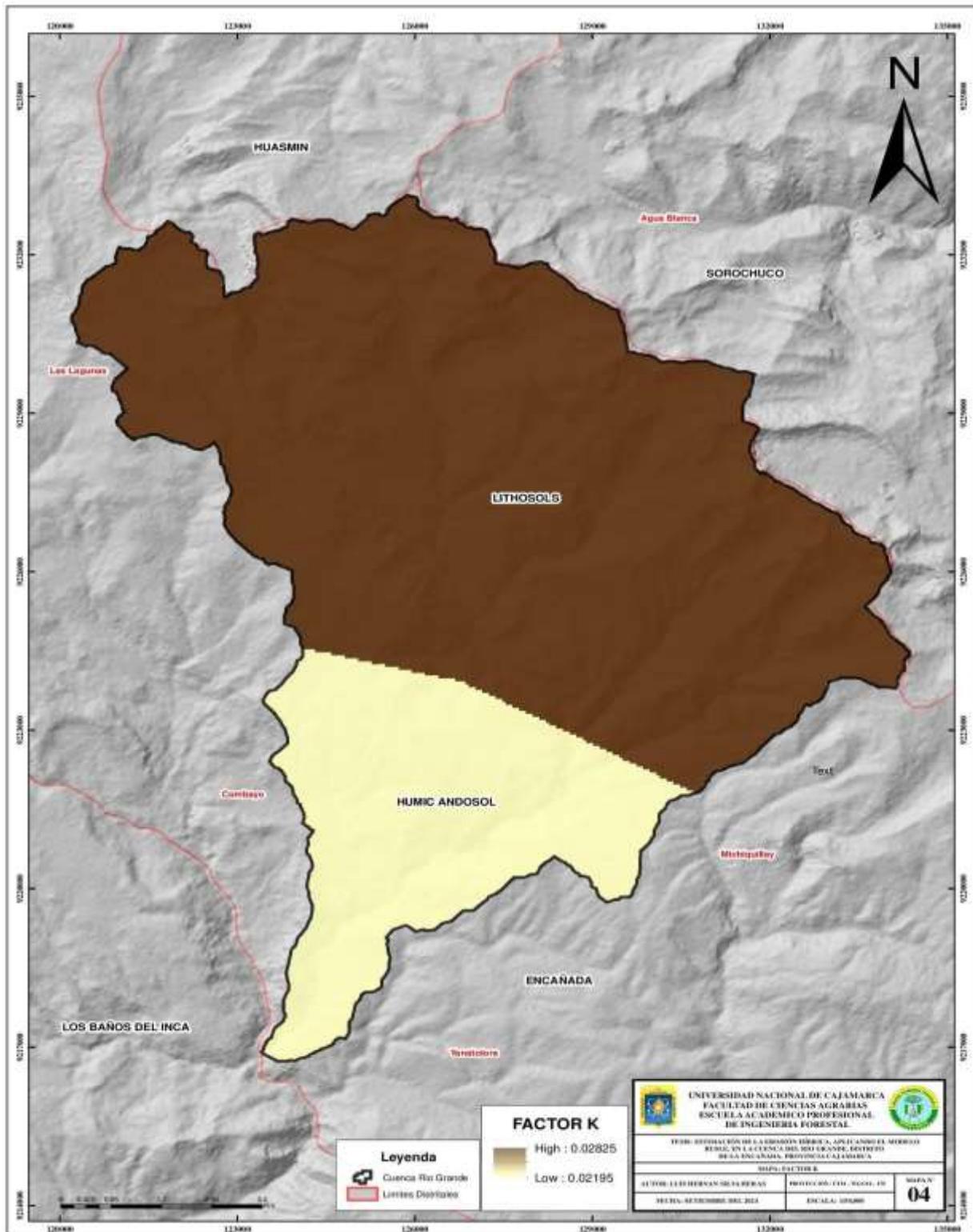
**Tabla 19**

*Factor K calculado*

Nombre	Fcsand	F cl-si	F orgn	f hisand	k usle	k
Lithosols	0.34375	0.76191	0.81895	1.00000	0.21449	0.02825
Humic Andosol	0.284793	0.631194	0.927169	1.00000	0.166667	0.02195

Figura 18

Mapa del Factor K de la cuenca rio Grande



Los resultados obtenidos concuerdan con lo observado en estudios previos. Los suelos tipo Lithosol, con texturas entre franco arenosa y arcillo limosa, colores oscuros asociados al contenido de hierro y estructura poco desarrollada, presentaron un valor elevado del factor K (0.02825), lo que indica alta susceptibilidad a la erosión (Museo Virtual de Suelo, s/f). Por otro lado, los suelos Humic Andosol, con horizontes superficiales ricos en materia orgánica, estructura suelta y buena capacidad de retención de agua, registraron un valor de K menor (0.02195), evidenciando su mayor resistencia a la erosión (FAO, 2015). Estos resultados demuestran que las propiedades físicas y químicas del suelo influyen directamente en su erodabilidad.

Estos hallazgos también son coherentes con lo planteado por el SENAMHI (2017), que indica que el coeficiente K permite evaluar la predisposición natural de un suelo a la erosión, y que valores cercanos a 0.03, como el encontrado en los Lithosoles, reflejan una susceptibilidad alta, mientras que valores por debajo de 0.022, como en los Humic Andosoles, indican una resistencia considerable.

#### **4.1.3 Factor LS (Longitud y pendiente)**

A partir de datos ráster se obtuvo el factor LS (longitud y gradiente de pendiente), siguiendo la propuesta metodológica de Mintegui (1983). Para ello, se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) a partir del cual se calculó la pendiente en porcentaje. Esta fue clasificada en rangos con valores específicos del factor LS, lo que permitió realizar una reclasificación de los resultados. Posteriormente, los datos fueron vectorizados para su representación cartográfica y la cuantificación de áreas afectadas. La Tabla 20 presenta el resumen cuantitativo del factor LS según los rangos de pendiente establecidos.

**Tabla 20**

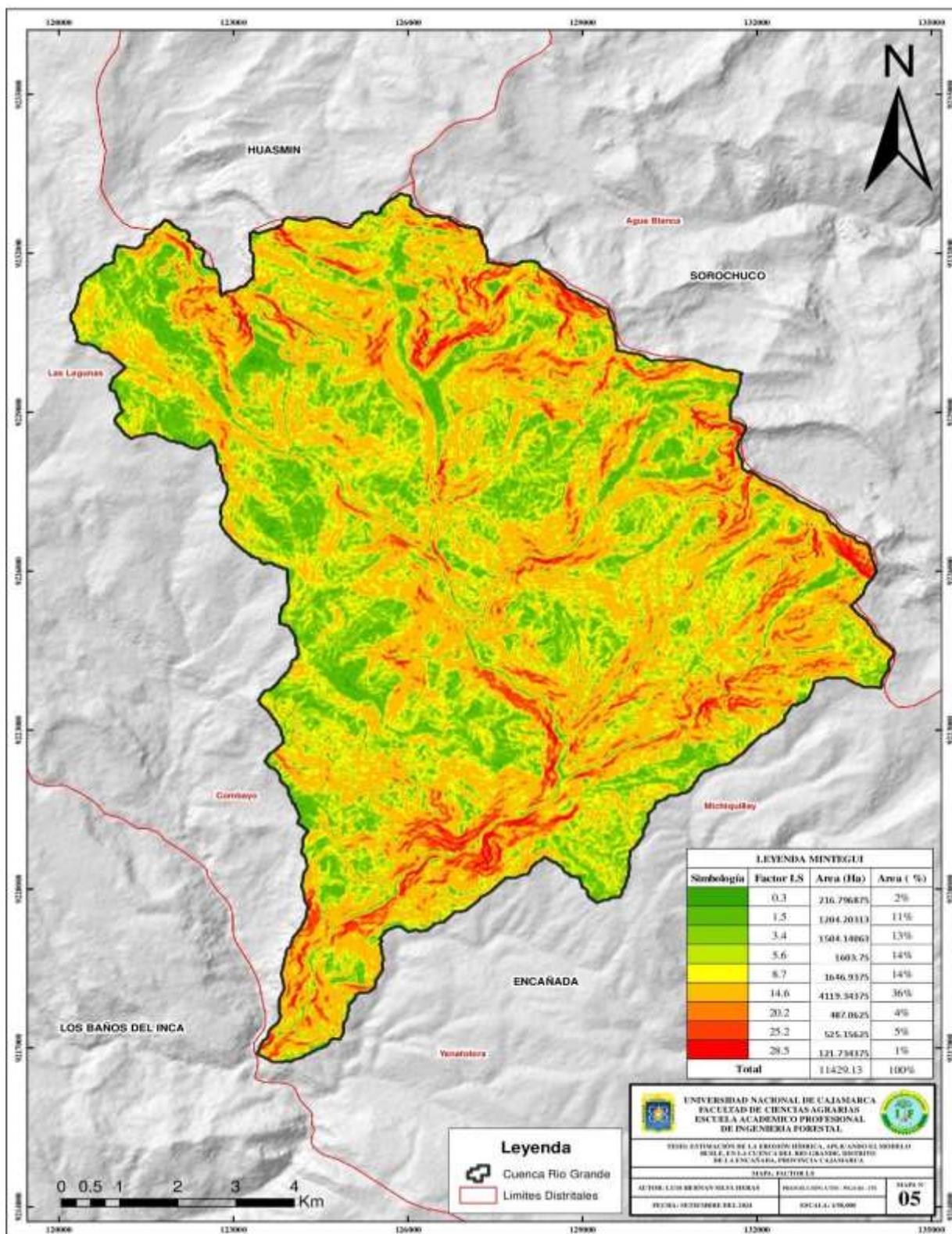
Área total del Factor LS

<b>Gradiente de pendiente</b> (%)	<b>Factor LS</b>	<b>Área</b> (%)
0 - 3	0.3	2
3 - 12	1.5	11
12 - 18	3.4	13
18 - 24	5.6	14
24 - 30	8.7	14
30 - 60	14.6	36
60 - 70	20.2	4
70 - 100	25.2	5
Más de 100	28.5	1

En la Figura 19, los colores indican distintos rangos de valores de Factor LS, que van de verde (valores bajos) a rojo oscuro (valores altos). Esta gradiente de colores facilito la identificación de áreas con diferentes susceptibilidades a la erosión.

Figura 19

Rangos de valores de Factor LS de la cuenca del Río Grande



a. **Rango Bajo (0.3 - 5.6)**

Representa las áreas en tonos verde y amarillo, estas están concentradas principalmente en el sur y suroeste de la cuenca. Estas zonas, que abarcan aproximadamente el 40% del área total (2% en verde y 38% en amarillo y verde claro), presentan pendientes cortas y suaves, lo que disminuye la velocidad de la escorrentía y reduce la erosión.

b. **Rango Moderado (5.6 - 14.6)**

Estas áreas, en tonos amarillos y naranjas ocupan aproximadamente el 64% del área total (14% en cada una de las clases 5.6 y 8.7, y 36% en la clase 14.6). Se encuentran en la parte central y norte del área de estudio y representan pendientes intermedias, donde la velocidad de escorrentía aumenta, incrementando el riesgo de erosión.

c. **Rango alto (20.2 - 28.5)**

Estas áreas, representadas en rojo y rojo oscuro, muestran los valores de LS más elevados y corresponden a las pendientes más largas y empinadas. Aunque solo representan el 6% del área total (5% en la clase 25.2 y 1% en la clase 28.5), estas zonas son las más propensas a la erosión hídrica debido a la alta velocidad de la escorrentía.

Los resultados del presente estudio coinciden con lo señalado por Chipana (2022), quien evidenció que las pendientes del 30 al 60% presentan alta susceptibilidad a la erosión, elevando significativamente el factor LS. Del mismo modo, Ayllón y Ccenhua (2021) destacaron la influencia predominante de los factores R y LS en los niveles de erosión hídrica en la cuenca del Río Cañete, resaltando la importancia del análisis topográfico. Asimismo, Jáuregui (2018) encontró que las mayores tasas de pérdida de suelo se concentran en las zonas medias y bajas con mayores pendientes, lo cual refuerza que la topografía es un factor determinante en los procesos

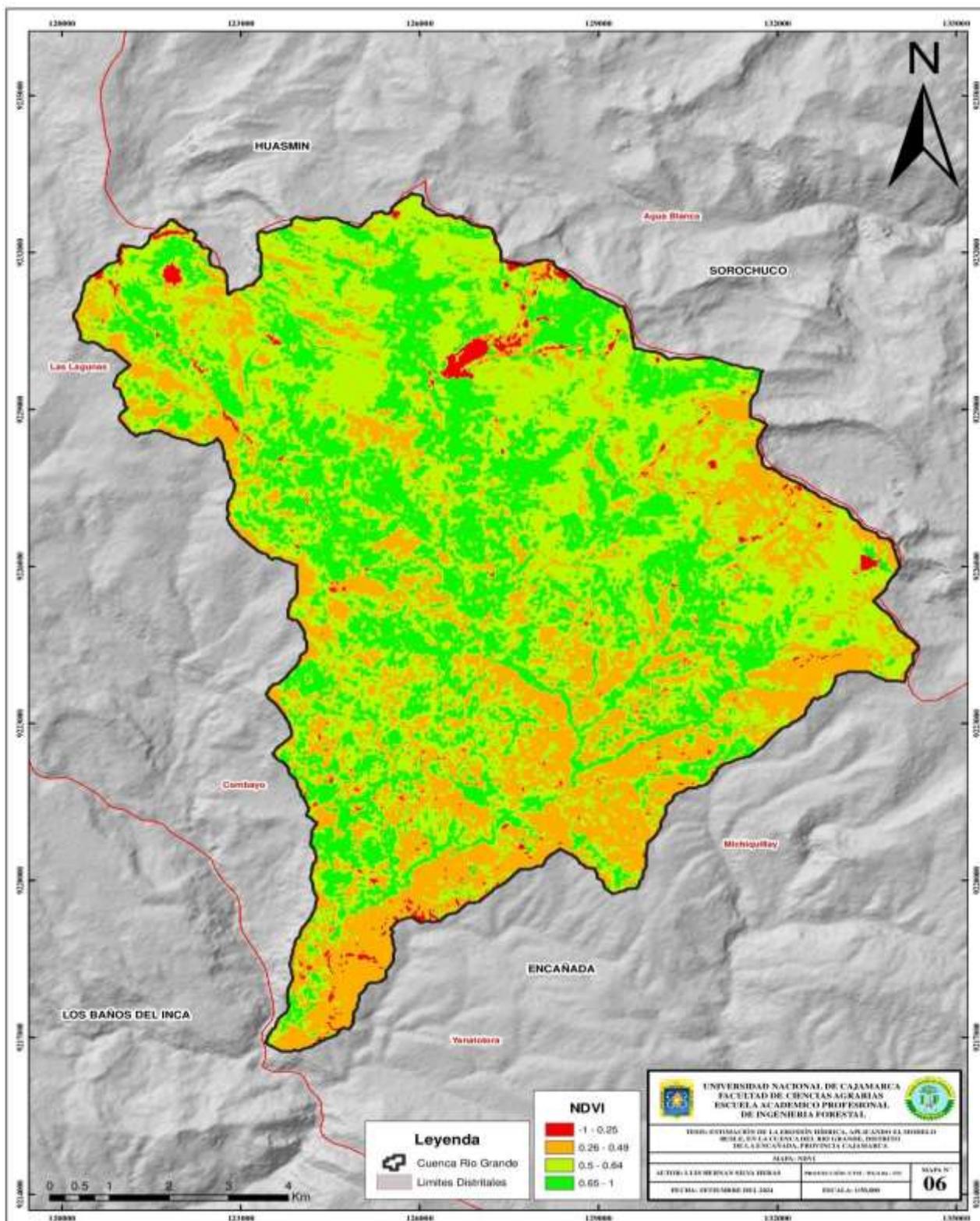
de erosión.

#### **4.1.4 Factor C (Cobertura vegetal)**

Los datos obtenidos del NDVI se agruparon en cuatro rangos representados mediante una escala de colores (Figura 20), los cuales reflejan el estado y densidad de la vegetación en el área de estudio. El rango de -1 a 0.25 (color rojo) indica ausencia de cobertura vegetal, predominando suelos desnudos, zonas urbanas, rocas o cuerpos de agua. El intervalo de 0.26 a 0.49 (color naranja) representa áreas con vegetación escasa o deteriorada, como pastizales degradados o cultivos en etapas iniciales o finales, caracterizadas por una baja actividad fotosintética. En el rango de 0.5 a 0.64 (verde claro) se identificó vegetación moderada, asociada a cultivos en crecimiento, arbustos o pastizales saludables con una actividad fotosintética intermedia. Finalmente, los valores entre 0.65 y 1 (verde intenso) corresponden a zonas con vegetación densa y saludable, tales como bosques, selvas o cultivos en su punto máximo de vigor, evidenciando una alta actividad fotosintética.

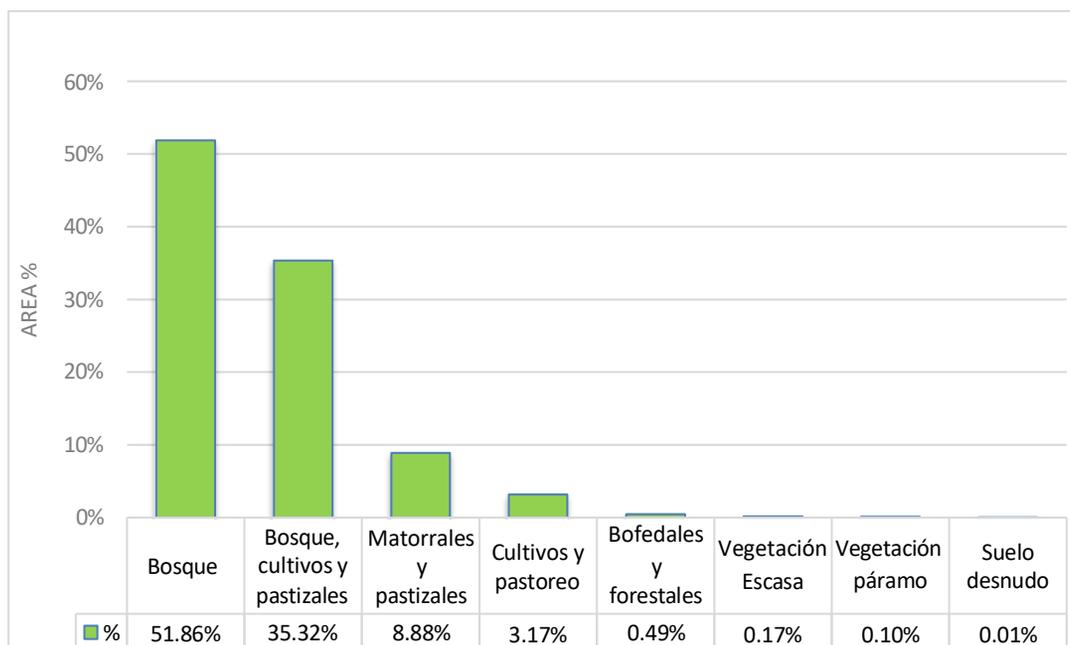
**Figura 20**

*Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada de la cuenca río Grande*



## Figura 21

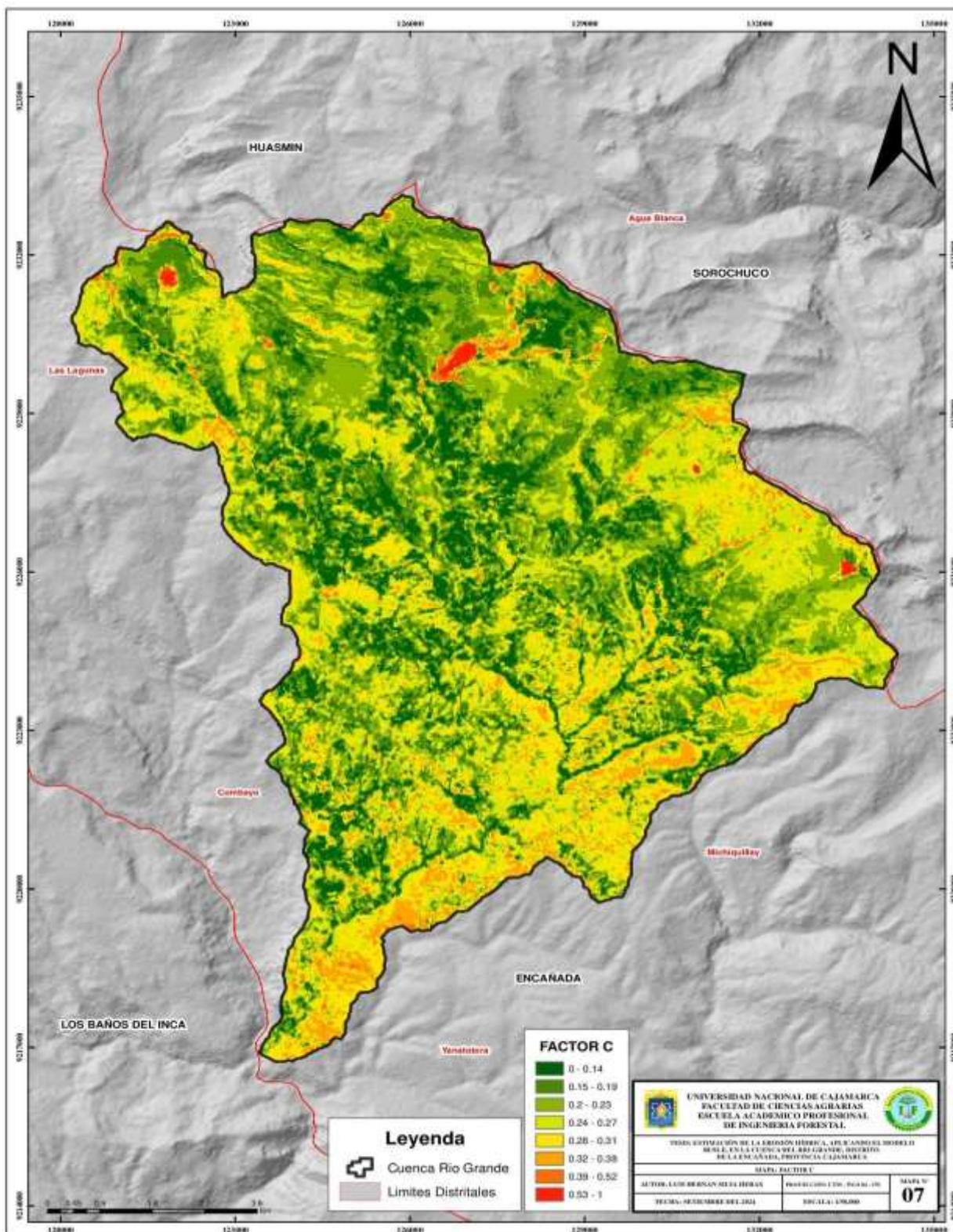
*Distribución porcentual del Factor C, según tipo de cobertura en la cuenca del Río Grande*



La investigación muestra que el área de estudio presenta un promedio ponderado del factor C de 0.269 (Figura 22), lo cual sugiere un nivel moderado de protección contra la erosión del suelo, debido a la cobertura vegetal predominante en la región. Este valor indica que, en general, la vegetación existente ofrece una barrera relativamente eficaz para reducir el impacto de la erosión hídrica, aunque ciertas áreas presentan vulnerabilidades específicas.

Figura 22

Factor C de la cuenca del Río Grande



La mayor parte del territorio está cubierto por matorrales y pastizales (51.86% del área total), bosques y cultivos (35.32%), que contribuyen significativamente a la protección del suelo, manteniendo valores bajos a moderados del factor C. Estas coberturas actúan como barreras naturales que absorben parte del impacto de las precipitaciones, reduciendo la velocidad del escurrimiento y, en consecuencia, disminuyendo el riesgo de erosión en gran parte de la región.

Sin embargo, se identificaron zonas puntuales con alta susceptibilidad a la erosión, especialmente en áreas de suelo desnudo y vegetación tipo páramo, que presentan factores C de 1 y 0.9, respectivamente. Aunque estas áreas representan menos del 0.5% de la superficie total, su alta exposición y baja cobertura vegetal las hace particularmente vulnerables a procesos erosivos intensos. Estas zonas críticas requieren atención prioritaria para evitar la degradación acelerada del suelo, por lo que se sugiere la implementación de estrategias de reforestación o de coberturas protectoras en estos puntos específicos.

Flores (2021) y Guasca (2023) reafirman que la cobertura vegetal desempeña un papel fundamental en la reducción de la erosión hídrica, evidenciado por el predominio de niveles bajos de pérdida de suelo en más del 80 % del territorio analizado. Sin embargo, a diferencia de los patrones más extensos observados por ambos autores, en este caso las zonas críticas de erosión son más puntuales, lo que podría atribuirse a la presencia de matorrales y pastizales que ofrecen una protección efectiva en la mayoría del área. Estas diferencias subrayan la relevancia del tipo y densidad de cobertura vegetal en el comportamiento espacial del fenómeno erosivo.

Sánchez (2019) constata el efecto atenuante de la cobertura vegetal sobre los procesos erosivos, aunque el enfoque aquí fue a escala espacial amplia y no mediante parcelas experimentales. Por otro lado, en contraste con los hallazgos de Chipana (2022), donde predominaban áreas con cobertura vegetal dispersa o poco densa en grandes extensiones, este

estudio identificó zonas de alta susceptibilidad de forma más localizada. No obstante, ambos trabajos coinciden en la relevancia del factor C dentro del modelo RUSLE y su vinculación directa con el tipo de cobertura vegetal como elemento clave en el control de la erosión.

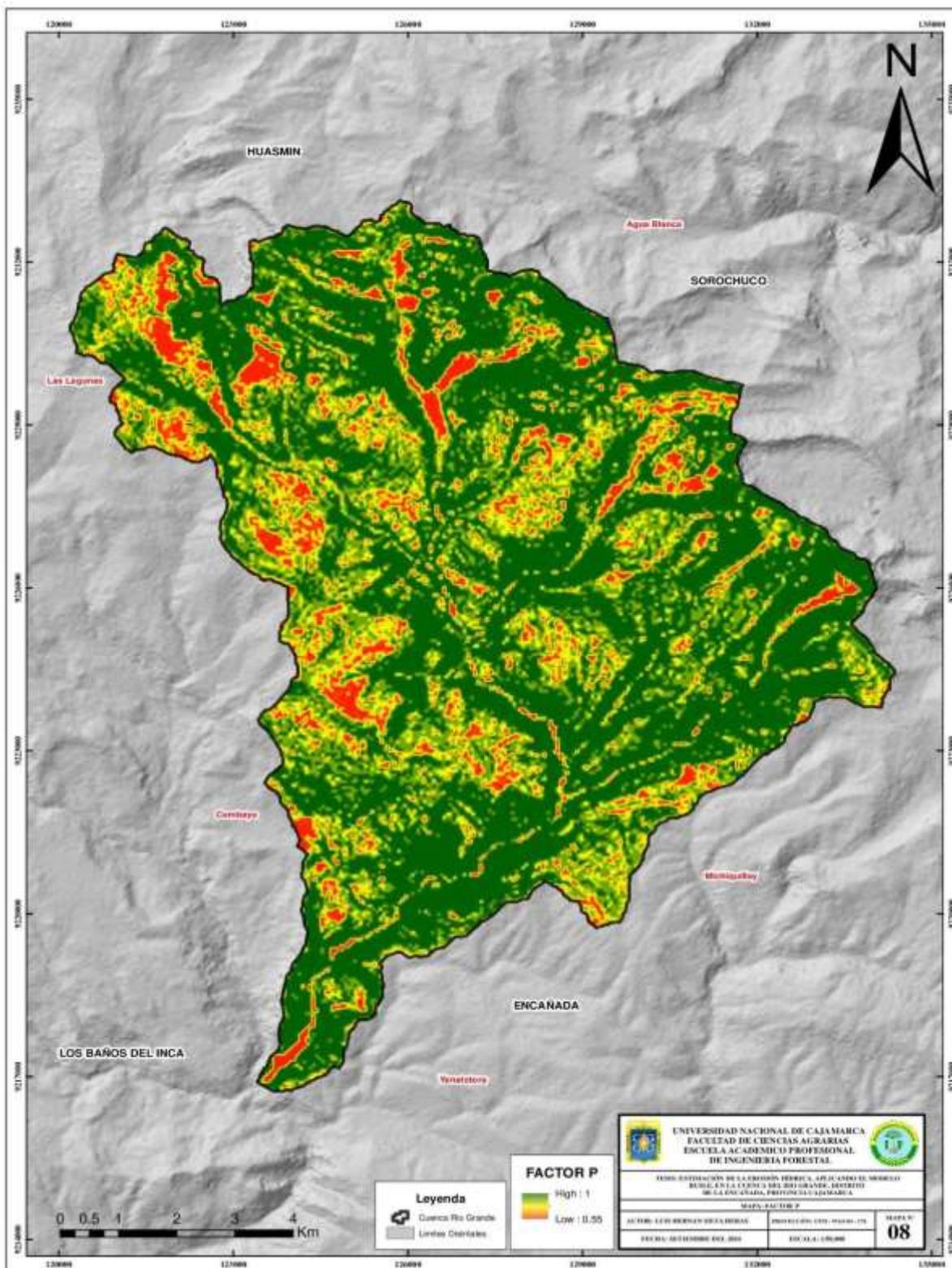
#### ***4.1.4 Factor P (Prácticas de conservación del suelo)***

Este último factor de RUSLE recoge la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión. El factor P se define como la relación entre la erosión que se produce en un campo con prácticas de conservación y la erosión que ocurriría en una parcela de referencia sin tratamiento. En otras palabras, este factor mide la capacidad de las prácticas de manejo del suelo para controlar la erosión en un área determinada (Figura 23).

Los valores cercanos a 1 corresponden a zonas donde no se aplican prácticas de conservación del suelo, lo que las hace más susceptibles a la erosión, debido a la ausencia de barreras físicas o vegetativas que reduzcan el impacto de la escorrentía. Por el contrario, los valores cercanos a 0.55 representan áreas en las que se han implementado prácticas efectivas de conservación, como terrazas, cultivos en curvas de nivel o barreras vivas, que disminuyen la velocidad del agua superficial y ayudan a retener el suelo, especialmente en terrenos con pendiente.

**Figura 23**

*Factor P de la cuenca del río Grande*



Esto se relaciona con lo señalado por el SENAMHI (2017), que indica que el factor P refleja la efectividad de prácticas como terrazas o cultivos en curvas de nivel para frenar la escorrentía y reducir la erosión del suelo. De igual manera, Ayllón y Ccenhua (2021) destacan la importancia de aplicar estas medidas, sobre todo en zonas con pendientes pronunciadas como la subcuenca alta del río Cañete, donde se detectaron altos niveles de erosión. Por ello, ambas fuentes coinciden en que las áreas con valores altos de P deben ser prioridad para implementar acciones de conservación del suelo.

#### 4.2 Estimación de las tasas de erosión hídrica en la cuenca del Río Grande

La pérdida de suelo por erosión hídrica fue estimada mediante el modelo RUSLE, que integra factores como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, las condiciones topográficas, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo. Los resultados evidencian una distribución heterogénea de la erosión, agrupada en cinco niveles de severidad. A continuación, se presentan los valores correspondientes a cada clase de pérdida de suelo.

**Tabla 22**

*Pérdida de suelo por tasas de erosión hídrica*

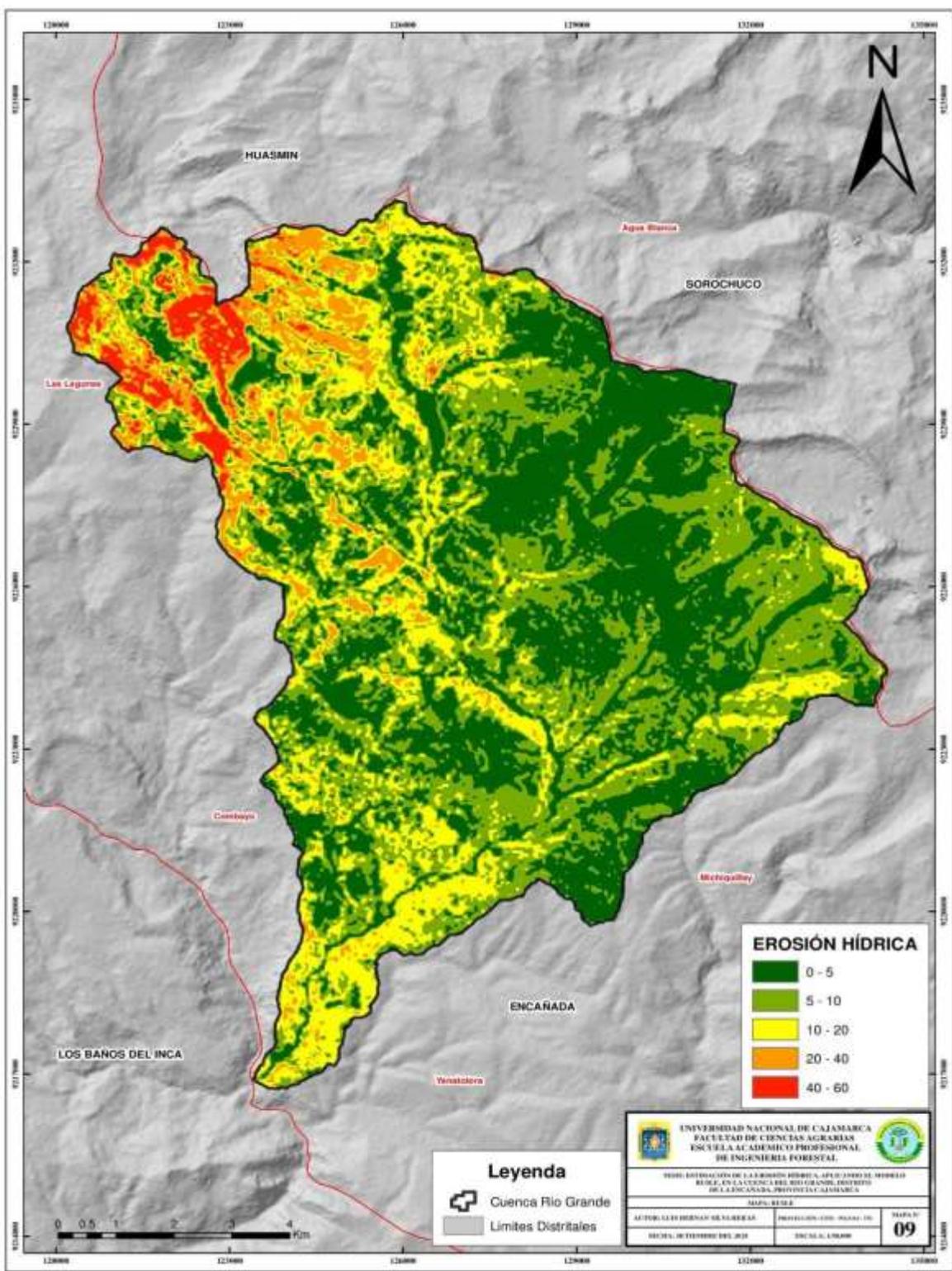
<b>Clases de Pérdida de Suelo</b>	<b>Rangos (tn ha<sup>-1</sup> . año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Área(ha)</b>	<b>%</b>
Leve	0 - 5	10002	87.58
Moderada	5 - 10	1263	11.06
Alta	10 - 20	148	1.30
Muy alta	20 - 40	6	0.05
Severa	> 40	1	0.01
		<b>11420</b>	<b>100.00%</b>

La pérdida de suelo leve abarca el 87.58% del área evaluada, equivalente a 10,002 ha, con tasas de erosión que oscilan entre 0 y 5 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. En segundo lugar, la pérdida de suelo moderada representa aproximadamente el 11.06% (1,263 ha), con una pérdida anual estimada entre 5 y 10 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. La categoría de pérdida alta comprende el 1.3% del territorio (148 ha), con tasas de erosión de 10 a 20 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Por su parte, las áreas clasificadas con pérdida muy alta y severa representan únicamente el 0.05% (6 ha) y el 0.01% (1 ha) respectivamente, con tasas de pérdida que oscilan entre 20 a 40 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

En general, los resultados indican que la mayor parte del área de estudio presenta niveles de pérdida de suelo entre leves y moderados, mientras que solo una pequeña fracción está expuesta a erosión alta o severa. Como se muestra en la Figura 24, las zonas con mayor pérdida de suelo se concentran principalmente en sectores con pendientes pronunciadas y escasa cobertura vegetal, factores que incrementan significativamente el riesgo de erosión hídrica.

**Figura 24**

*Pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Grande*



Los resultados obtenidos indican que la pérdida de suelo leve predomina con un 87.58% (10,002 ha), registrando entre 0 a 5 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Le sigue la pérdida moderada con 11.06% (1,263 ha) y tasas de 5 a 10 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, y la alta con 1.3% (148 ha), entre 10 a 20 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Finalmente, las pérdidas muy alta y severa representan solo el 0.05% (6 ha) y 0.01% (1 ha), con valores entre 20 a 40 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. En comparación, Moreno y Suyón (2021), al aplicar el modelo RUSLE en la cuenca del río Jequetepeque, encontraron que el 24 % de su superficie sufría erosión severa, lo cual contrasta marcadamente con este estudio y puede explicarse por una mayor presión agrícola y menor cobertura vegetal en esa cuenca. De manera similar, Calle (2021) demostró que la expansión agropecuaria en el Santuario Tabaconas - Namballe incrementó drásticamente la erosión hídrica; en la cuenca del río Grande, aunque se identifican zonas puntuales con intervención antrópica intensiva, estas representan solo el 1.3 % del área con pérdida de suelo alta. Este bajo porcentaje sugiere que la mayor parte de las zonas con alta erosión no están directamente asociadas a actividades humanas recientes, sino que podrían deberse a condiciones naturales como pendientes pronunciadas, suelos frágiles o escasa cobertura vegetal. Esto refuerza la necesidad de promover un uso sostenible del suelo, especialmente en áreas sensibles, para prevenir que la intervención humana intensifique los procesos erosivos existentes. Sánchez (2019), en un estudio de parcelas experimentales en la cuenca Ronquillo, destacó que la pendiente y la pérdida de cobertura vegetal son factores críticos que incrementan la erosión, lo cual se reafirma en esta investigación, ya que las áreas más afectadas coinciden con laderas pronunciadas y vegetación escasa.

López y García (2018), quienes reportaron valores más elevados en una cuenca vecina, se plantea que la variabilidad puede deberse a una parametrización distinta de los factores C y P, especialmente en zonas con coberturas degradadas. A nivel internacional, Arias et al. (2022), en la cuenca del río Mira (Ecuador), identificaron tasas de erosión promedio mucho mayores (32.79

t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y valores extremos de hasta 812.3 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Estos resultados reflejan condiciones climáticas más intensas y una topografía más accidentada en comparación con la cuenca del río Grande. En Bolivia, Flores (2021) reportó que más del 80 % de la cuenca Chocaya presentó niveles bajos de erosión, similar a este estudio, pero con áreas críticas aisladas que superaban las 100 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, lo que enfatiza la necesidad de manejo focalizado. Por su parte, Guasca (2023), en la cuenca del río Cravo Sur (Colombia), demostró que la cobertura vegetal puede reducir la erosión efectiva del 10.6 % al 0.3 %, patrón que también se observa en este estudio, confirmando que la vegetación es el principal regulador del proceso erosivo. Finalmente, Ramírez et al. (2019) coinciden con este trabajo al identificar a la pendiente como el principal factor de riesgo en zonas montañosas, aunque Gutiérrez y Salas (2015) priorizan las prácticas de manejo como el factor más influyente, lo que invita a futuras investigaciones a combinar ambas dimensiones para mayor precisión. Cabe resaltar que este estudio no incluyó el análisis de escenarios futuros bajo condiciones de cambio climático; sin embargo, Vargas et al. (2021) advierten que la alteración en los patrones de precipitación puede modificar significativamente la dinámica erosiva en el mediano y largo plazo, por lo que esta variable debería incorporarse en futuras evaluaciones para aumentar la robustez predictiva del modelo RUSLE.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los factores de entrada del modelo RUSLE permitió caracterizar espacialmente la susceptibilidad a la erosión hídrica en el área de estudio. El factor R varió entre 97.75 y 635.51 MJ·mm/ha·año, con los valores más altos en zonas de lluvias intensas. El factor K osciló entre 0.02195 y 0.02825, siendo los suelos tipo Lithosol los más vulnerables. El factor LS presentó valores máximos en áreas con pendientes largas y empinadas (6% del total). La cobertura vegetal (C) mostró predominancia de cobertura baja a moderada susceptibilidad (87.18%), y zonas críticas con alta vulnerabilidad no superaron el 0.5%. El factor P varió entre 0.55 y 1, reflejando contrastes entre áreas con y sin prácticas de conservación del suelo.

La cuenca del Río Grande predomina la pérdida de suelo leve (87.58%, 10,002 ha), con tasas de 0 a 5 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, seguida por la pérdida moderada (11.06%, 1,263 ha) con 5 a 10 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y el alta (1.3%, 148 ha) con 10 a 20 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Las pérdidas muy alta y severa son mínimas, representando el 0.05% (6 ha) y 0.01% (1 ha), con tasas de 20 a 40 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Esto evidencia una predominancia de erosión baja, pero con áreas puntuales que requieren intervención.

Realizar investigaciones más específicas sobre la relación entre los tipos de cobertura vegetal y los niveles de pérdida de suelo en las distintas subcuencas del Río Grande, con el objetivo de proponer estrategias efectivas de manejo del suelo para toda la cuenca.

El modelo RUSLE resulta pertinente y adaptable para la estimación de la erosión hídrica, por lo que se recomienda su uso como herramienta base en estudios similares. Sin embargo, se sugiere a futuros investigadores continuar explorando su aplicación en distintas escalas y contextos, así como compararlo con otros modelos más dinámicos para enriquecer el análisis.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alatorre, L. C., y Beguería, S. (2009). *Los modelos de erosión: Una revisión*. CSIC. [https://digital.csic.es/bitstream/10261/92858/1/BegueriaS\\_CuatGeom\\_2009.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/92858/1/BegueriaS_CuatGeom_2009.pdf)
- Alcántara Boñón, G. (2011). *Fisiografía del departamento Cajamarca*. Gobierno Regional de Cajamarca. <https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/FISIOGRAFIA.pdf>
- Álvarez, A. (2020). *Análisis temporal del nivel de la erosión hídrica de la subcuenca del río Ichu 2013 y 2017*. *Tayacaja*, 3(2). <https://doi.org/10.46908/rict.v3i2.97>
- Andrade, J. E., y Adame, J. G. (2022). *Evaluación de la erosión hídrica en la zona centro de México, cuenca Valle Bravo - Amanalco*. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, 1–22. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/137726>
- Arias, M. P., Saz, M. A., y Escolano, S. (2022). *Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE: Caso de estudio: cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador*. Universidad de Alicante. <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/129663>
- Arroyave A., J. (2002). *Prácticas adecuadas para la conservación de suelos y agua en terrenos de Laderas*. Manabí, Ecuador: Portoviejo, EC: INIAP, Estación Experimental Portoviejo, Departamento Nacional de Manejo de Suelos y Aguas. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/1312>
- Ayllón Misari, V. A., y Ccenhua Yapia, J. (2021). *Estimación del riesgo de erosión del suelo utilizando el modelo RUSLE-GIS: Un estudio de caso de la cuenca del río Cañete* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/663458>
- Calle Vidal, L. F. (2021). *Efecto de los cambios de uso de suelo en el aumento de la erosión hídrica a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la zona de amortiguamiento del*

- Santuario Nacional Tabaconas Namballe* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. <https://repositorio.ucss.edu.pe/handle/20.500.14095/1094>
- Camacho-Zorogastúa, K., Gómez-Lora, J. W., Gallo-Ramos, V. H., y Camacho-Zorogastúa, P. (2021). *Guía práctica de erosión hídrica. casos de estudio: Subcuenca Cumbaza y Yuracyacu – Amazonía peruana*. Lima: Environmental and Hydrologic Engineering S.A.C. <https://drive.google.com/file/d/1c9RRbismQRm0TWSscFNpgOFiL9MVdUhY7/view>
- Camargo, C., Vidal, R., y Andrades, J. (2014). Evaluación multitemporal de procesos de erosión en ladera mediante el uso de SIG y sensores remotos en la micro-cuenca torrencial ‘La Machirí’, estado Táchira-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 55(1), 85–99. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347732465006.pdf>
- Cardona, M., Colmenero, J., & de la Luz Valderrábano, M. (2007). *La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México*. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10414309.pdf>
- Carrasco J., J., y Riquelme S., J. (2003). *Métodos y prácticas de conservación de suelos y aguas*. Santiago, Chile. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/15702>
- Castro Mendoza, I. (2013). Soil loss estimate by hydric erosion at Madin dam watershed, state of Mexico, Mexico. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), 3-16. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382013000200001&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382013000200001&script=sci_arttext)
- Chipana Quispe, O. (2022). *Estimación de la pérdida de suelo media anual mediante la ecuación universal de pérdida de suelo revisada, en la cuenca del río Chumbao, provincias de Andahuaylas y Chincheros - Apurímac – 2019*. Universidad Tecnológica de los Andes, Apurimac, Perú. <https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/384>

- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (2015). *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales*. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/257/descargar>
- Colotti Bizzarri, E. (1999). La erosividad: cualidad de la lluvia poco conocida. *Terra. Nueva Etapa*, XV(24). Obtenido de [http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev\\_terr/article/view/1344](http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_terr/article/view/1344)
- Crettaz, E. J. (2016). Cálculo del Factor R de la USLE a través del Índice Modificado de Fournier. *XXV Congreso Argentino de la ciencia del suelo*, (pp.1-8). [https://www.researchgate.net/profile/jjgvozenovich/publication/321058206\\_calculo\\_del\\_factor\\_r\\_de\\_la\\_usle\\_a\\_traves\\_del\\_indice\\_modificado\\_de\\_fournier/links/5a0b06720f7e9b0cc025169f/calculo-del-factor-r-de-la-usle-a-traves-del-indice-modificado-de-fournier](https://www.researchgate.net/profile/jjgvozenovich/publication/321058206_calculo_del_factor_r_de_la_usle_a_traves_del_indice_modificado_de_fournier/links/5a0b06720f7e9b0cc025169f/calculo-del-factor-r-de-la-usle-a-traves-del-indice-modificado-de-fournier)
- Cruzado Vásquez, g., y Crisólogo Rodríguez, m. (2009). *Gobierno Regional de Cajamarca- Gerencia regional de planeamiento , presupuesto y acondicionamiento territorial. estudio de geología, gorecaj, cajamarca*. <https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/geologia.pdf>
- Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial. <https://cursosihlla.bdh.org.ar/sist.%20cart.%20y%20teledet./bibliografia/fundamentos-de-teledeteccion-emilio-chuvieco.pdf>
- Di Leo, y Néstor C. (2015). Drones: nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión. *Teledetección aplicada y sistemas de información geográfica*. <http://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/13373/2AM41.pdf?sequence>
- Domínguez Bravo, J. (2000). *"Breve introducción a la cartografía y a los sistemas de información geográfica (SIG)". CIEMAT*. [https://www.researchgate.net/profile/Javier-Dominguez12/publication/237467702\\_Breve\\_Introduccion\\_a\\_la\\_Cartografia\\_y\\_a\\_los\\_Si](https://www.researchgate.net/profile/Javier-Dominguez12/publication/237467702_Breve_Introduccion_a_la_Cartografia_y_a_los_Si)

stemas\_de\_Informacion\_Geografica\_SIG/links/0deec52724b3d7dcc4000000/Breve-

Introduccion-a-la-Cartografia-y-a-los-Sistemas-de-Form

Durán Ramírez, J. (2018). Estudio sedimentológico y estratigráfico de la microcuenca

Cochamarca - San Marcos Cajamarca Perú.

<https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/1844/Tesis.pdf?sequence=1>

&isAllowed=y

Environmental Systems Research Institute (ESRI), (2010). *ArcGis Desktop*. Recuperado de ESRI:

[https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-](https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm)

raster-data.htm

FAO. (s.f.). *Cobertura orgánica del suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la

Alimentación y la Agricultura. [https://www.fao.org/conservation-agriculture/in-](https://www.fao.org/conservation-agriculture/in-practice/soil-organic-cover/es/)

practice/soil-organic-cover/es/

Farrell, J. G., y Altieri, M. A. (1999). Sistemas agroforestales. *Agroecología: Bases científicas*

*para una agricultura sustentable*, 230-243.

Flores Soliz, R. (2021). Determinacion de zonas de erosion hidrica a partir de la Ecuacion

Universal De La Perdida Del Suelo (R.U.S.L.E)..

<http://ddigital.umss.edu.bo:8080/jspui/handle/123456789/34271>

Garcia, P. (2021). *¿Qué es un SIG, GIS o Sistema de Información Geográfica?* Geoinnova;

GEOINNOVA SL. [https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sig-gis-o-sistema-de-](https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sig-gis-o-sistema-de-informacion-geografica/)

informacion-geografica/

Gamboa Cruz, A. (2023). Estimación de la erosión hídrica aplicando la metodología RUSLE con

tecnicas de teledetección en la cuenca del río Tumbes 2000-2022. *Pregrado*. Universidad

Nacional

de

Tumbes,

Tumbes.<http://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/64161>

- Gaye, B., Brendan S., J., y Axel , S. (2015). *Preparando a familias campesinas con pequeñas fincas para adaptarse al cambio climático: Manual de Bolsillo 3; Manejo de los recursos hídricos*. Baltimore, MD, Estados Unidos. <https://asa.crs.org/2017/05/un-manual-de-bolsillo-para-el-manejo-de-los-recursos-hidricos/>
- González del Tánago, M. (1991). La ecuación universal de pérdidas de suelo: pasado, presente y futuro. *Ecología*, 5, 13-50. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147576>
- Guasca Jáuregui, J. (2023). *Estimación de la Erosión Hídrica en la Cuenca del Río Cravo Sur mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS Pro–ESRI®)*. Trabajo de Grado, Universidad Santo Tomás.
- Guevara Pérez, E., y De la Torre Villanueva, A. (2019). *Gestión integrada de los recursos hídricos por cuenca Y cultura del agua*. (A. N. (Ana), Ed.) Lima, Perú.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., y Gisbert Blanquer, J. (2012). *La Ecuación Universal De Pérdidas De Suelo (USLE)*. Universidad Politecnica de Valencia , producción vegetal . Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/16849>.
- Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana [IIAP]. (2010). Fisiografía [Publicación 1526]. [http://www.iiap.org.pe/Archivos/publicaciones/Publicacion\\_1526.pdf](http://www.iiap.org.pe/Archivos/publicaciones/Publicacion_1526.pdf)
- INEI. (2014). *Anuario de Estadísticas Ambientales 2013*. Lima: Oficina de Impresiones del Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- Instituto Nacional Geográfico;. (s.f). *Teledetección*. Madrid. Obtenido de <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>
- Jáuregui, A. A. (2018). Evaluación de la pérdida del suelo mediante el modelo RUSLE en la microcuenca del río Jucusbamba, Provincia De Luya, Región Amazonas (Perú). <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1552>

- Kaushik , G., y Bhattacharya, S. (2020). Una revisión del modelo RUSLE. *Revista de la Sociedad India de Teledetección*, 689–707. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12524-019-01097-0#citeas>
- kim , H. (2006). Soil erosion modeling using rusle and gis on the imha watershed. [https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce\\_old/resume/theses%20and%20dissertations/ki mhyoensik-thesis.pdf](https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/resume/theses%20and%20dissertations/ki mhyoensik-thesis.pdf)
- Kogut, P. (2023). Degradación del suelo: técnicas para evitar sus efectos. *EOS Data Analytics*. <https://eos.com/es/blog/degradacion-del-suelo/>
- León, J. (2001). *Estudio y control de la erosión hídrica*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/20071>
- López Bermúdez, F. (2012). La erosión entre la naturaleza y el hombre. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6429092.pdf>
- Mendieta López, M., y Rocha Molina, L. (2007). *Sistemas agroforestales*. Monagua, Nicaragua. <https://repositorio.una.edu.ni/2443/>
- Ministerio del Ambiente (MINAM), (2013). Obtenido de Ministerio del Ambiente: <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/el-peru-lucha-contr-la-desertificacion-y-la-sequia/>
- Ministerio del Ambiente (MINAM), (2015). *Mapa nacional de cobertura vegetal: memoria descriptiva*. Ministerio del Ambiente, Dirección general de evaluación, valoración y financiamiento del patrimonio natural, Lima. <https://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/10/mapa-nacional-de-cobertura-vegetal-final.compressed.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2014). *La erosión del suelo*. Lima, Perú. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/ais-2015/erosion-suelo.pdf>

- Molina, A., Vanacker, V., Rosas, B. M., Vivien, B., Román, F., Ochoa Tocachi, B., y Buytaert, W. (2021). Infraestructura natural para la gestión de riesgos de erosión e inundaciones en los Andes: ¿Qué sabemos? Resumen de políticas, Proyecto “Infraestructura natural para la seguridad hídrica”. pág. 17. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2021/06/Infraestructura-natural-para-la-gestion-de-riesgos-de-erosion-e-inundaciones-en-los-Andes.pdf>
- Moreno Avalos, L. M., y Suyon Solorzano, N. D. (2021). Determinación del nivel de erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la cuenca Jequetepeque, período 1997-2017. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/29407>
- Museo Virtual de Suelos. (sf). Litosol . Suelos del Uruguay: . Recuperado el 19 de noviembre de 2024, de <https://museovirtualdesuelos.net/suelos-del-uruguay/poco-desarrollado/litosol/>
- Nakaya Barzola, D. (2018). Estimación de la pérdida de suelo media anual mediante el modelo R.U.S.L.E., en la cuenca del río Tingo - Cajamarca. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3591>
- Nuñez J., S. (2019). Cajamarca en alerta: Ingemmet identifica zonas críticas. Ingemmet. <https://portal.ingemmet.gob.pe/documents/59082/977521/CAJAMARCA+EN+ALERTA.+ZONAS+CR%C3%8DTICAS+FINAL.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014: Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos (Actualización 2015). FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dea292cb-370d-46c7-a44d-59a617953c3b/content>

- Pacheco, H., Cevallos, R., y Vinces, C. Cálculo del factor C de la RUSLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo-Venezuela usando imágenes del satélite Miranda VRSS-1. *Espacios*, 40(03), 1-11. <https://www.revistaespacios.com/a19v40n03/a19v40n03p06.pdf>
- Poma Rojas, W., y Alcántara H. Boñón, G. (2011). *Estudio de suelos y capacidad de uso mayor del departamento de Cajamarca*. Cajamarca, Cajamarca, Perú. <https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/inf-suelos-zee091.pdf>
- Radicelli, C., Pomboza, M., Villacrés, P., & Boderó, E. (2019). *Sistemas de información geográfica y su aplicación en las ciencias sociales: Una revisión bibliográfica*. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/journal/5717/571760747003/html/>
- Renard, K., Foster, G., Weesies, D., McCool, D., & Yoder, D. (1989). *Predicting Soil erosion by water: A guide to conservation planning white the revised universal soil loss equation(RUSLE)*. United States Department of Agriculture. Washington D. C.: Agriculture Handbook 703. [https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/64080530/rusle/ah\\_703.pdf](https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/64080530/rusle/ah_703.pdf)
- Rieso García, J. (2015). *Análisis Comparativo de la estimación hídrica con la metodología USLE y las técnicas RS SIG. Aplicación al entorno del tramo medio de la cuenca del río Jarama*. Universidad Politecnica de Madrid, Guadalajara. [https://oa.upm.es/39075/1/Juan\\_Antonio\\_Riesco\\_Garcia.Pdf](https://oa.upm.es/39075/1/Juan_Antonio_Riesco_Garcia.Pdf)
- Sánchez Muñoz, M. (2019). *Capacidad de transporte de sedimentos de ladera por erosión hídrica en zonas de fuerte y baja erosión en la cuenca ronquillos*. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/5018>
- Sánchez Tello, S., y Vasquez Peralta, S. (2011). *Zonas de vida de cajamarca*. Gobierno Regional de Cajamarca, Cajamarca.

- <https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/ZonasVidasZEESegunMapaNacional.pdf>
- Sarría, F. (s.f.). *Sistemas de información geográfica*.  
<https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Saturnino, d., Gerardo, B., y Perez Gonzales, A. (2002). Parcelas experimentales para el estudio de la erosión hídrica. finca experimental la Higuerula. *1 a Reunión sobre Hidrología Forestal*, págs. 1-9.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), (2017). Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú. En E. Sabino Rojas, O. Felipe Obando, y W. Lavado Casimiro. Lima, Perú. Obtenido de [https://idesep.senamhi.gob.pe/portalidesep/files/tematica/atlas/erosi%C3%B3n\\_de\\_suelo/Atlas\\_Erosion\\_Suelos\\_por\\_Regiones\\_Hidrologicas\\_Peru.pdf](https://idesep.senamhi.gob.pe/portalidesep/files/tematica/atlas/erosi%C3%B3n_de_suelo/Atlas_Erosion_Suelos_por_Regiones_Hidrologicas_Peru.pdf)
- Suárez Díaz , J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. <https://www.erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales/>
- Taboada Barreto, L. (2011). *Evaluación de la erosión hídrica en areas con zanjas de infiltración*.  
<https://Agrorural/Practicas-de-Conservacion-de-Suelos-en-Laderas>
- Taco Agramonte, M. F. (2021). Uso del Sistema de Información Geográfica para la cuantificación de la erosión hídrica potencial en la Cuenca Chamacha - Lima.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12996/4875>
- Tapia Pizarro, T., Cuitiño Martínez, H., Flores V., P., Sangüesa P., C., y Martínez A, E. (2008). *Metodología de los clavos de erosión para la evaluación cuantitativa de la erosión hídrica superficial*.

[http://desarrollo.otalca.cl/temporal/ctha/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/j\\_metodologia\\_clavos\\_erosion.pdf](http://desarrollo.otalca.cl/temporal/ctha/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/j_metodologia_clavos_erosion.pdf)

Tayupanta J., J. (1993). *La erosión hídrica: proceso, factores y formas*. (U. d. Agropecuaria, Ed.) Quito. Recuperado de unidad de documentación e información técnica agropecuaria

Torres Benites, E., Cortes Becerra, J., Uresti Gil, J., Torres Cedillo, L., y Sinai Rivera Torres, P. (2020). Predicción de la erosión hídrica en la cuenca del Cañón del Sumidero, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*(11), págs. 1903-1915. Recuperado el 28 de Agosto de 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7696822>

Vasquez Peralta, C. (2011). *Estudio hidrológico de*. Cajamarca. <https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/hidrologia.pdf>

Vásquez Vásquez, A., Mejia M., A., Faustino M., J., Terán A., R., Vásquez R., I., Díaz R., J., Alcántara R., J. (2016). *Manejo y gestión de cuencas hidrográficas*. Lima: Fondo Editorial-UNALM.

Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). Department of Agriculture in cooperation with Purdue agricultural experiment station. Washington, D.C. : Predicting rainfall erosion losses—aguide to conservation planning. <https://www.researchgate.net/profile/Heriansyah-Putra-2/post/Which-formula-is-correct/attachment/59d64d4e79197b80779a6e2c/AS%3A487650378424321%401493276318482/download/USLE.pdf>

Zapata, R. (2018). *Tipos de suelo: Caracterización de suelos arcilloso y limosos*. Edu.ar. <https://ww.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/TIPOS%20DE%20SUELO.pdf>

## VII. ANEXOS

## Anexo 1

*Precipitación mensual y anual de la estación Augusto Weberbauer*

<b>AÑO/MES</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>P-A (mm/año)</b>
<b>2013</b>	61.5	98.0	213.6	73.8	62.6	7.5	5.7	8.9	3.7	110.7	17.0	51.9	714.9
<b>2014</b>	75.7	67.3	143.2	78.8	26.9	5.0	2.0	3.9	27.7	26.5	45.7	114.9	617.6
<b>2015</b>	184.7	55.4	202.2	63.0	75.8	3.0	4.4	0.1	27.8	16.8	99.6	39.5	772.3
<b>2016</b>	82.9	85.3	121.3	56.2	7.0	1.6	2.1	1.1	25.1	60.0	16.1	63.1	521.8
<b>2017</b>	77.5	72.3	138.9	78.6	47.2	12.0	2.3	20.9	21.2	65.3	63.2	168.1	767.5
<b>2018</b>	99.0	126.4	117.3	73.3	50.1	10.8	0.5	0.0	24.4	61.8	97.4	69.4	730.4
<b>2019</b>	46.9	107.3	172.7	78.1	37.4	9.1	11.8	0.0	7.6	121.8	60.4	162.7	815.8
<b>2020</b>	38.2	31.2	S/D	S/D	S/D	S/D	27.6	0.7	10.6	33.2	58.3	140.4	340.2
<b>2021</b>	100.8	54.3	138.6	129.5	38.2	10.5	4.5	12.3	23.7	108.8	58.3	45.7	725.2
<b>2022</b>	64.5	177.9	161.2	94.0	52.7	20.2	9.4	21.6	40.9	31.2	6.3	65.0	744.9
<b>2023</b>	87.6	119.8	74.3	68.6	49.4	0.0	3.5	3.3	3.1	106.5	87.8	173.4	777.3

## Anexo 2

*Precipitación mensual y anual de la Estación Granja Porcón*

<b>AÑO/MES</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>P-A (mm/año)</b>
<b>2013</b>	141.0	279.9	352.4	196.2	193.4	32.8	17.7	33.8	30.4	174.5	28.0	238.5	1718.6
<b>2014</b>	137.4	189.9	228.0	103.4	79.3	5.1	9.6	10.5	65.8	97.4	91.4	209.3	1227.1
<b>2015</b>	370.6	159.6	286.4	108.9	158.4	1.7	9.7	0.4	24.6	88.4	126.3	107.8	1442.8
<b>2016</b>	166.5	133.4	163.5	137.1	36.8	44.9	1.1	0.0	45.7	146.9	41.4	172.9	1090.2
<b>2017</b>	156.0	235.8	367.0	133.3	170.7	43.9	1.2	49.9	51.7	146.8	37.7	228.9	1622.9
<b>2018</b>	262.5	198.3	201.7	153.0	111.3	8.2	0.0	2.5	59.0	157.1	152.9	162.3	1468.8
<b>2019</b>	93.6	154.3	378.2	137.3	62.8	5.8	14.1	0.0	21.6	190.2	176.5	311.7	1546.1
<b>2020</b>	62.9	140.0	S/D	87.8	40.2	15.5	48.0	19.0	25.3	48.2	114.2	354.4	955.5
<b>2021</b>	282.3	139.4	288.6	137.7	63.7	52.6	5.9	22.6	83.2	224.4	179.3	241.5	1721.2
<b>2022</b>	167.1	321.6	286.5	159.0	56.2	52.7	5.0	27.5	86.2	57.3	21.8	162.4	1403.3
<b>2023</b>	221.0	246.8	217.1	144.9	58.5	8.4	2.7	26.2	7.1	141.5	126.4	301.2	1501.8

**Anexo 3***Precipitación mensual y anual de la Estación Celendín*

<b>AÑO/MES</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>P-A (mm/año)</b>
<b>2013</b>	76.0	58.9	167.1	66.7	63.0	21.1	16.5	33.2	4.7	166.5	35.3	116.8	825.8
<b>2014</b>	78.1	146.5	156.8	84.0	126.8	1.3	0.3	4.4	33.2	70.0	62.2	80.9	844.5
<b>2015</b>	179.3	28.9	230.7	114.2	77.3	5.5	3.1	0.0	0.6	35.7	101.6	40.0	816.9
<b>2016</b>	108.4	170.5	130.8	42.9	6.7	2.1	1.8	2.0	37.1	134.0	19.4	215.1	870.8
<b>2017</b>	240.0	93.9	300.2	169.7	81.1	16.2	1.1	16.9	20.7	100.0	76.0	171.2	1287.0
<b>2018</b>	150.6	110.0	145.3	62.5	62.0	25.4	0.0	2.1	53.2	123.1	235.4	90.0	1059.6
<b>2019</b>	120.8	146.7	229.9	108.9	34.2	2.4	9.6	2.5	4.7	142.2	137.1	112.2	1051.2
<b>2020</b>	75.1	51.2	S/D	S/D	S/D	S/D	38.2	0.6	41.5	33.7	80.3	255.2	575.8
<b>2021</b>	103.4	39.5	250.0	S/D	20.2	33.3	6.3	21.9	43.1	144.0	230.6	150.4	1042.7
<b>2022</b>	151.0	180.6	259.0	70.2	23.2	50.4	22.5	9.4	42.8	123.7	24.8	67.8	1025.4
<b>2023</b>	148.2	139.8	193.6	109.3	58.3	7.8	1.4	0.4	10.5	76.0	109.7	222.6	1077.6

**Anexo 4***Precipitación mensual y anual de la Estación Encañada*

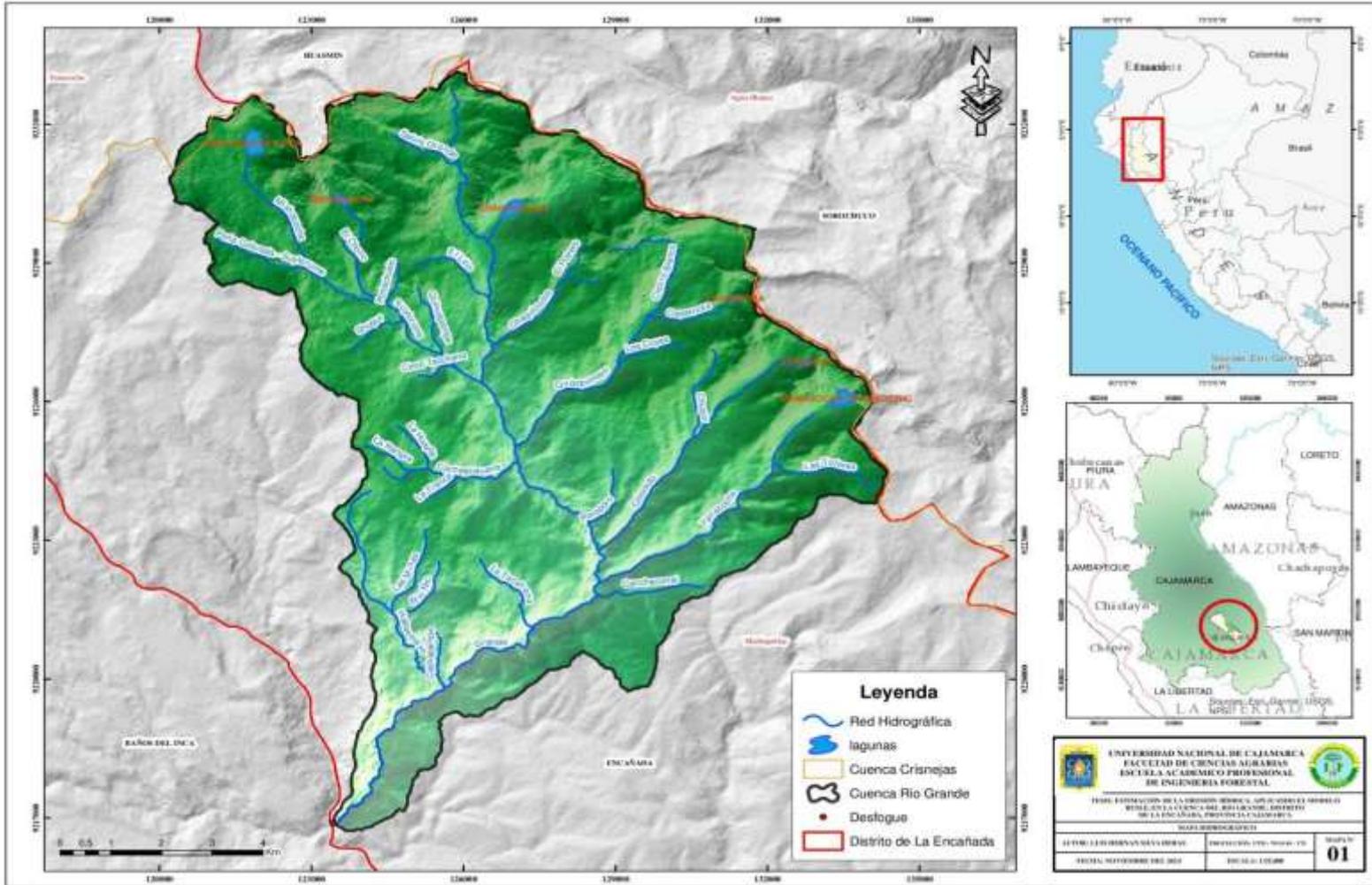
<b>AÑO/MES</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>P-A (mm/año)</b>
<b>2013</b>	44.5	96.9	182	39.4	115	11.2	3.6	19	0	157	39.5	94.5	801.9
<b>2014</b>	90.3	138.9	175	95.3	79.8	0	0.3	0.6	44	91.9	100	136	952.6
<b>2015</b>	188.3	71.4	261	70.4	104	3.3	5.3	0	3	27.8	171	23.2	928
<b>2016</b>	138.7	95.2	125	72.3	3.2	23.1	0.8	0.6	62	85.1	8.2	197	811.2
<b>2017</b>	105.9	101.1	276	93.2	69.6	18.4	3.2	28	14	103	41.6	131	984.8
<b>2018</b>	98.3	187	76.8	146.1	145	6.3	0	0	56	108	207	52.6	1083
<b>2019</b>	53.1	133.5	199	152.1	56.2	15.4	7.2	0	19	135	82.2	172	1024.5
<b>2020</b>	67.6	50.6	115	74.5	47.5	19.8	41	1	19	45.1	112	208	801.3
<b>2021</b>	116.5	89.7	242	110.4	80.9	24.1	2.1	14	16	211	161	115	1182.2
<b>2022</b>	73.8	220.3	299.4	132.8	46.4	59.6	7.0	11.4	36.4	109.1	8.0	121.1	1125.3
<b>2023</b>	263.2	186.4	184.6	129.9	56.2	5.0	4.3	9.0	16.8	168.8	69.1	190.1	1283.4

**Anexo 5***Clasificación del factor C de la cuenca del Río Grande*

<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Clase de cobertura terrestre</b>	<b>C</b>	<b>f(C)*área</b>	<b>%</b>	<b>C ponderado</b>
3.62	Bosque	0.1	0.36	3.17	0.269
40.37	Bosque y cultivos	0.2	0.72	35.32	
59.27	Matorrales y pastizales	0.3	1.09	51.86	
10.15	Cultivos y pastoreo	0.4	1.45	8.88	
0.56	Bofedales y forestales	0.5	1.81	0.49	
0.19	Vegetación Escasa	0.6	2.17	0.17	
0.12	Vegetación páramo	0.9	3.26	0.10	
0.01	Suelo desnudo	1	3.62	0.01	
<b>114.28</b>				<b>100.00%</b>	

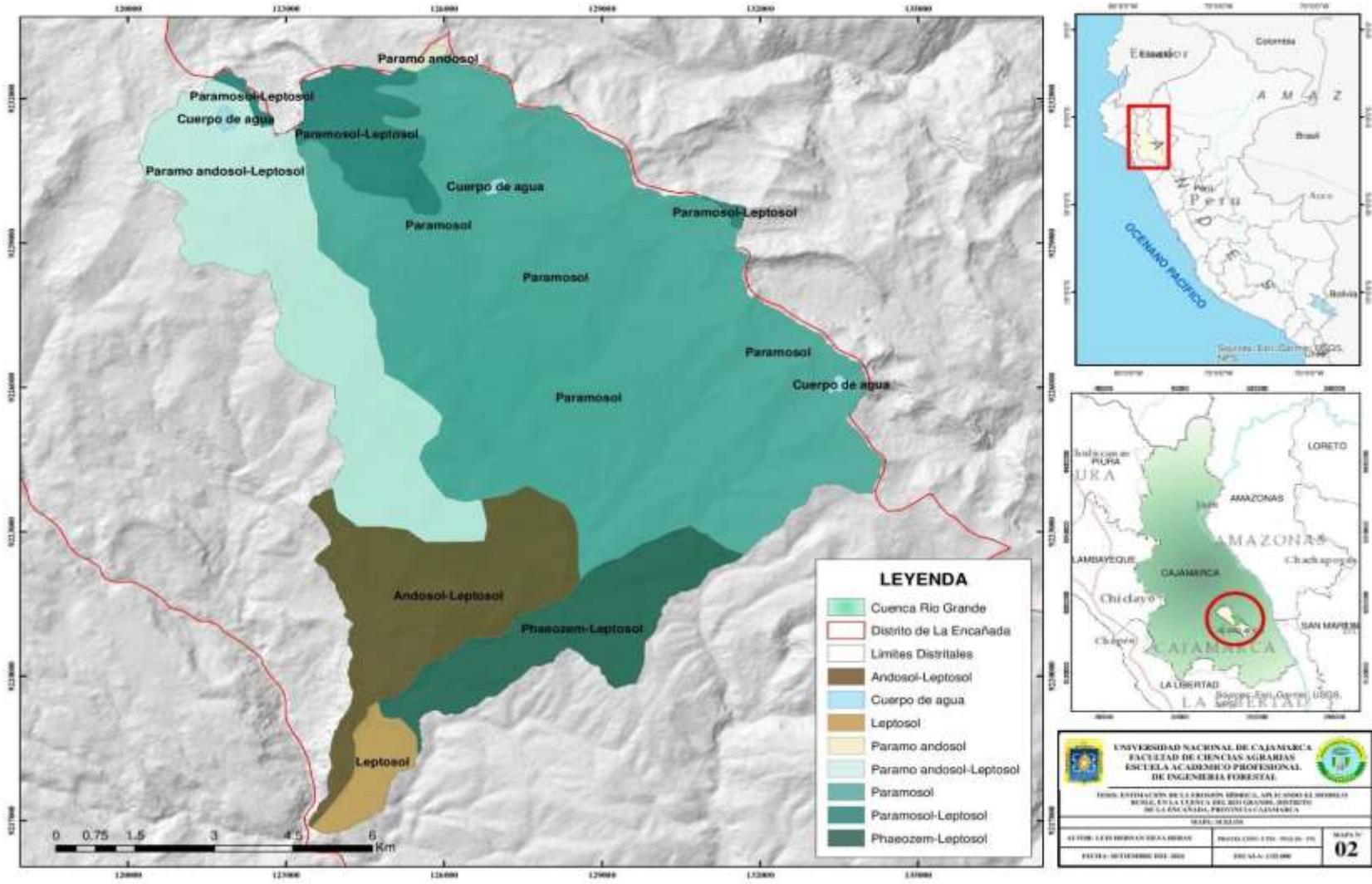
**Anexo 6**

*Mapa Hidrográfico de la cuenca del Río Grande*



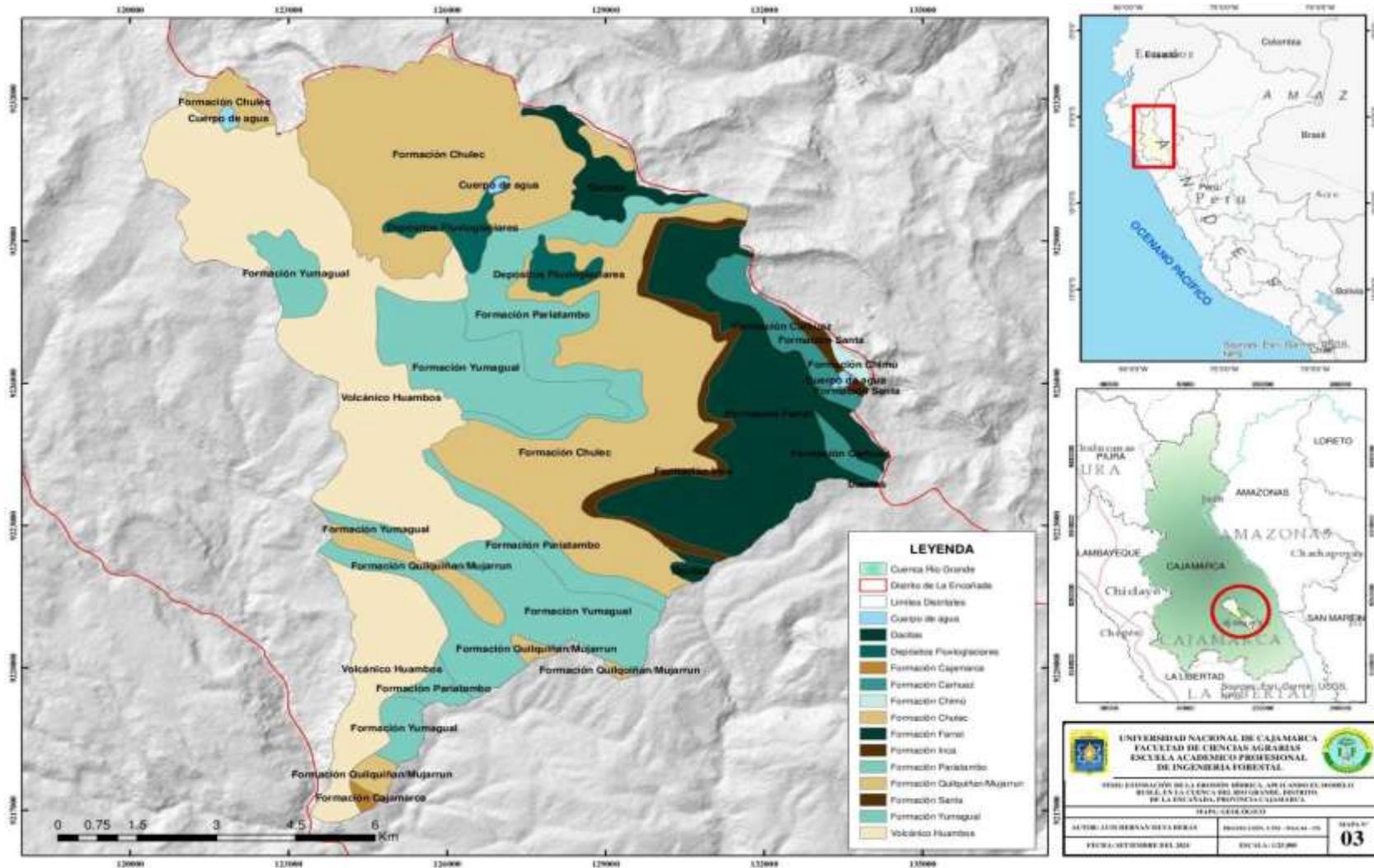
### Anexo 7

### Mapa de Suelos de la cuenca del Río Grande



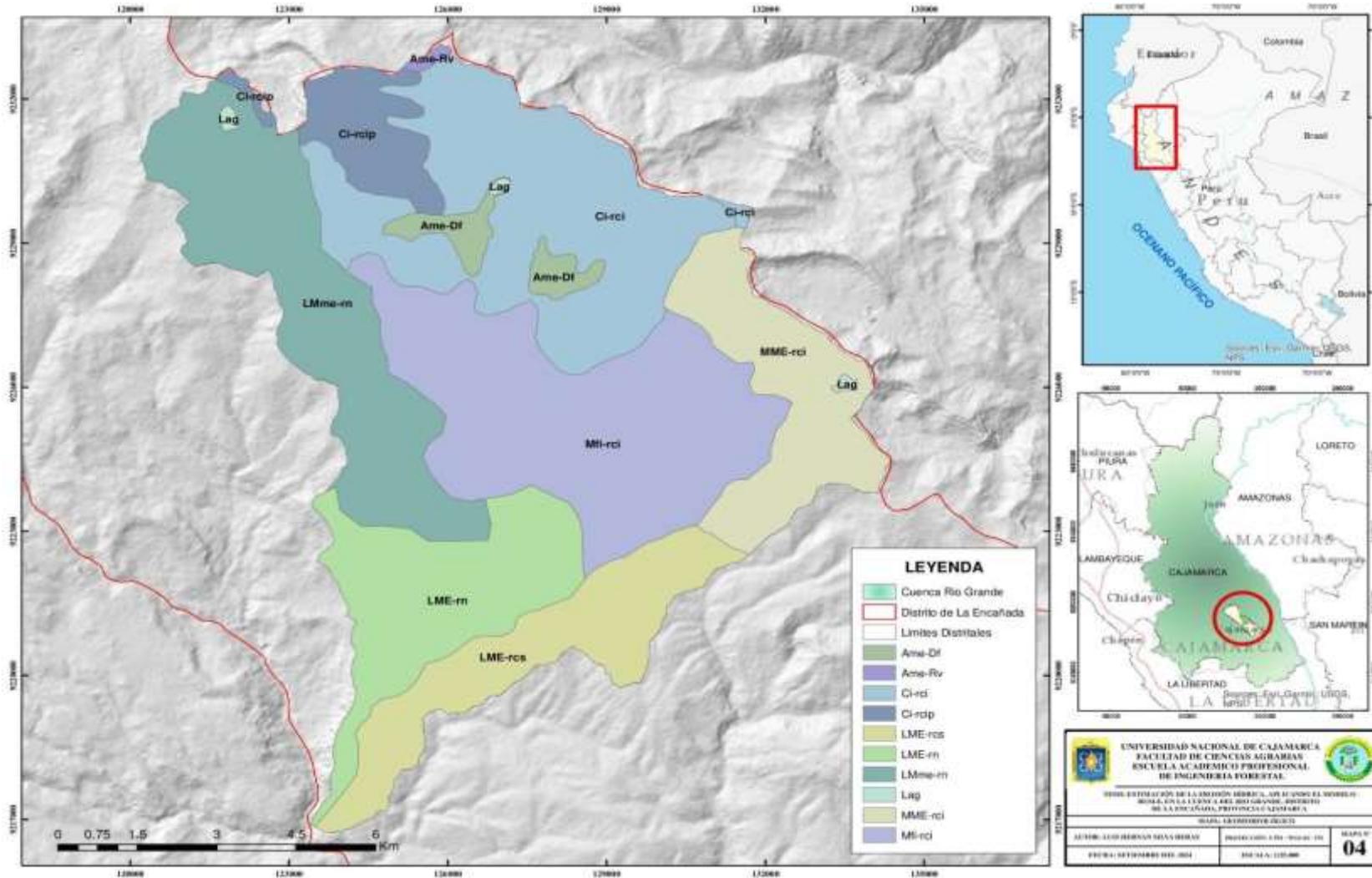
Anexo 8

Mapa Geológico de la cuenca del Río Grande



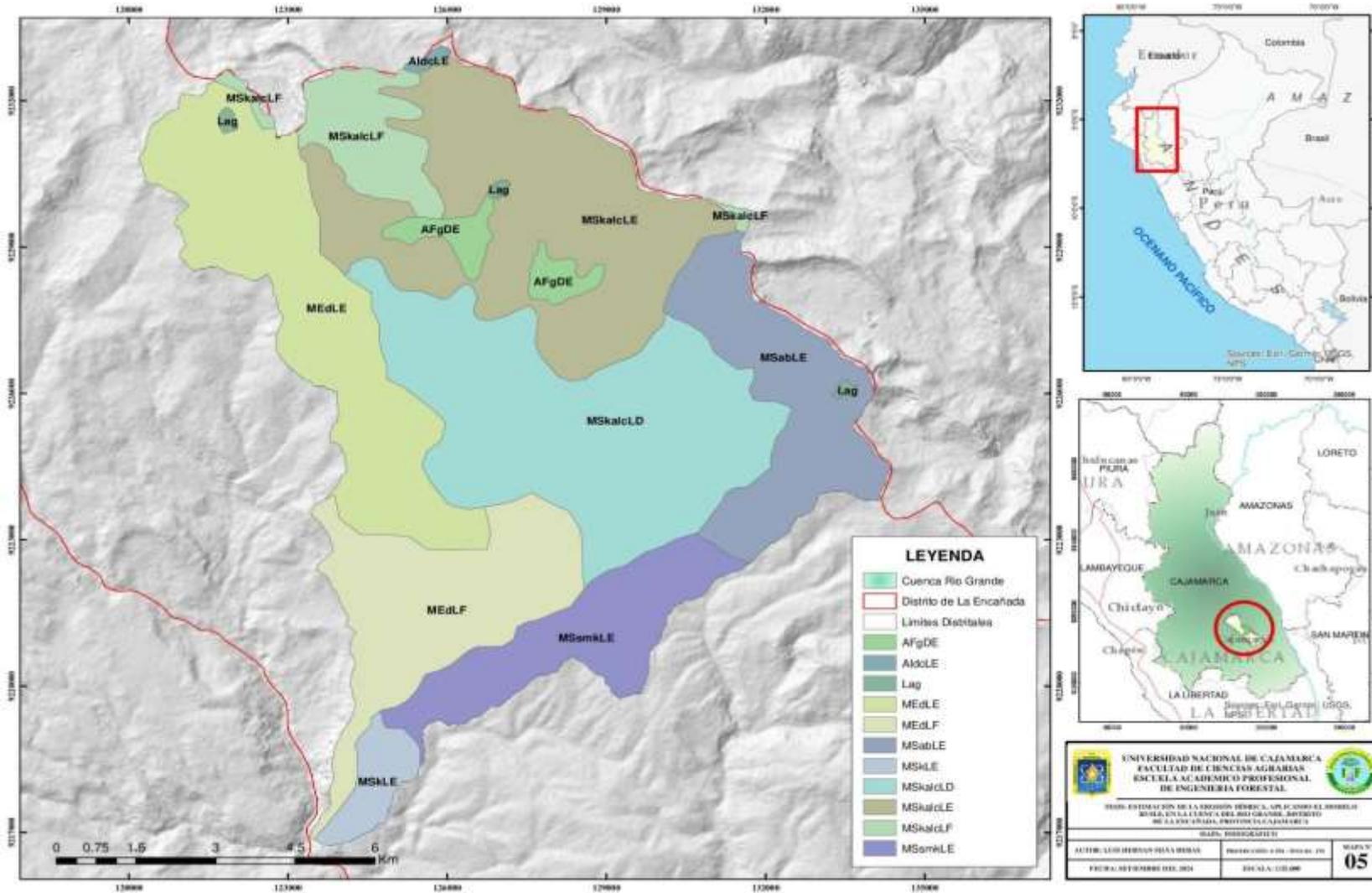
### Anexo 9

Mapa Geomorfológico de la cuenca del Río Grande



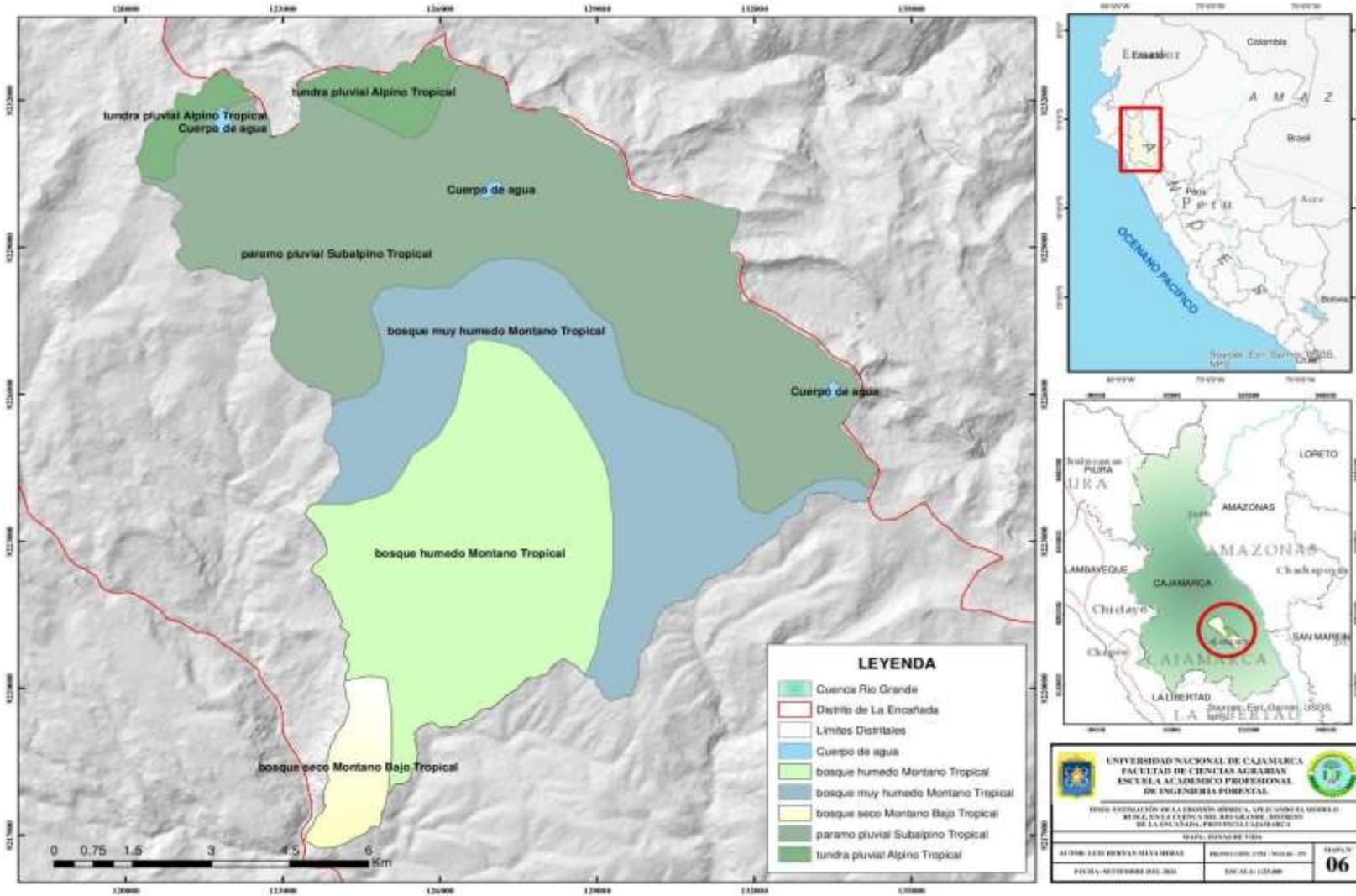
Anexo 10

Mapa Fisiográfico de la cuenca río del Río Grande



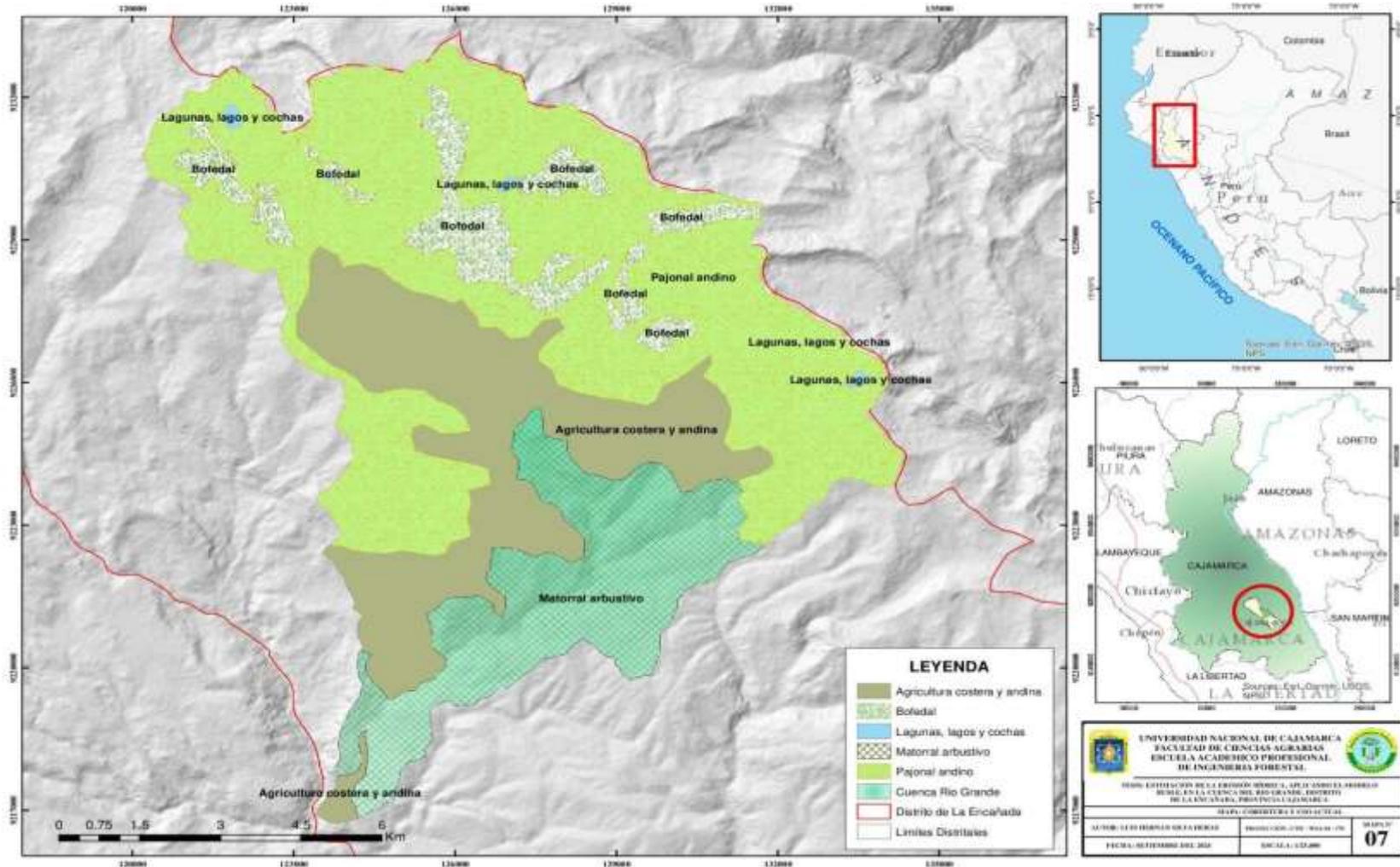
### Anexo 11

#### Zonas de vida de la cuenca río Grande



Anexo 12

Cobertura y uso actual de la cuenca río Grande



**PANEL FOTOGRAFICO****Anexo 13**

*Parte alta de la cuenca del Río Grande*

**Anexo 14**

*Parte media de la cuenca – El Milagro de Combayo*



**Anexo 15**

*Parte baja de la cuenca del Río Grande – Sector Cashapampa*

**Anexo 16**

*Vista panorámica del Río grande, zona de Combayo*



**Anexo 17**

*Zonas con erosión severa en la parte baja de la cuenca del Río Grande*

**Anexo 18**

*Zonas con alto grado de erosión - Caserío Maraypata*



**Anexo 19**

*Suelos con erosión moderada en el caserío de Quinuapampa*

**Anexo 20**

*Erosión leve en el caserío Yerbabuena Alta*



**Anexo 21**

*Barreras vivas de Polylepis sp. en el caserío de Yerba buena chica*

