

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**“EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA SUBCUENCA  
DEL RÍO CAPLINA UTILIZANDO EL MODELO U.S.L.E.  
MEDIANTE EL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO,  
TACNA - 2023”**

**PARA OPTAR:**

**TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. JOSÉ MIGUEL CALDERÓN CÁRDENAS**

**Bach. SUNDUS DELIA DEL PILAR VIZCARRA SOTO**

**TACNA – PERÚ**

**2024**

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS**

**“EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA SUBCUENCA  
DEL RÍO CAPLINA UTILIZANDO EL MODELO U.S.L.E.  
MEDIANTE EL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO,  
TACNA - 2023”**

Tesis sustentada y aprobada el 12 de julio de 2024; estando el jurado calificador integrado por:

**PRESIDENTE : Dr. RICHARD SABINO LAZO RAMOS**

**SECRETARIA : M Sc. MARISOL MENDOZA AQUINO**

**VOCAL : M Sc. MARCO ALBERTO NAVARRO GUZMÁN**

**ASESORA : Ing. CARMEN ROSA ROMÁN ARCE**

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, José Miguel Calderón Cárdenas y Sundus Delia del Pilar Vizcarra Soto, egresados, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificados con DNI 71415824 y 72977281 respectivamente, así como Carmen Rosa Román Arce con DNI 42316863; declaramos en calidad de autores y asesor que:

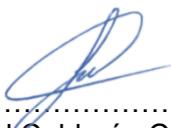
1. Somos los autores de la tesis titulado: *Evaluación de la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina utilizando el modelo U.S.L.E. mediante el Sistema de Información Geográfico, Tacna - 2023*, la cual presentamos para optar el Título Profesional de *Ingeniero Ambiental*.
2. La tesis es completamente original y no ha sido objeto de plagio, total ni parcialmente, habiendo respetado rigurosamente las normas de citación y referencias para todas las fuentes consultadas.
3. Los datos presentados en los resultados son auténticos y no han sido objeto de manipulación, duplicación ni copia.

En virtud de lo expuesto, asumimos frente a *La Universidad* toda responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la *tesis*, así como por los derechos asociados a la obra.

En consecuencia, nos comprometemos ante a *La Universidad* y terceros a asumir cualquier perjuicio que pueda surgir como resultado del incumplimiento de lo aquí declarado, o que pudiera ser atribuido al contenido de la tesis, incluyendo cualquier obligación económica que debiera ser satisfecha a favor de terceros debido a acciones legales, reclamos o disputas resultantes del incumplimiento de esta declaración.

En caso de descubrirse fraude, piratería, plagio, falsificación o la existencia de una publicación previa de la obra, aceptamos todas las consecuencias y sanciones que puedan derivarse de nuestras acciones, acatando plenamente la normatividad vigente.

Tacna, 12 de julio de 2024

  
.....  
José Miguel Calderón Cárdenas  
DNI: 71415824

  
.....  
Sundus Delia del Pilar Vizcarra Soto  
DNI: 72977281

  
.....  
Carmen Rosa Román Arce  
DNI: 42316863

## DEDICATORIA

A mi querida madre Adeli, cuyo amor sin límites, sacrificios y apoyo constante, me dan la fuerza para seguir alcanzando mis metas. Gracias por tus consejos y en especial, por tu paciencia. Esta tesis es tanto tuya como mía, porque sin ti, nada de esto hubiera sido posible.

A la memoria de mis abuelos, Teodora y Alejandro, porque seguirán siendo una fuente de inspiración y fortaleza en mi vida. Sus enseñanzas, amor y valores, han dejado una huella imborrable en mi corazón y seguirán guiando cada uno de mis pasos.

A mi familia, Erika y Hugo, gracias por creer en mí y por estar presentes en este camino.

A mis fieles compañeras de cuatro patas, Camila, Maya y Leia, que, con sus miradas llenas de amor y ternura, su energía, travesuras y su leal compañía me siguen recordando la importancia de disfrutar cada momento.

José Miguel Calderón Cárdenas

A mis padres que son mi motivo para tener ganas de seguir adelante y no decaer en el camino.

Sundus Delia del Pilar Vizcarra Soto

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a la Universidad Privada de Tacna y a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, que, con sus conocimientos y experiencias, contribuyeron en nuestra formación profesional.

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestra asesora Ing. Carmen Román Arce, por su apoyo y orientación durante la realización de esta tesis. Su experiencia y dedicación han sido fundamentales para nuestro aprendizaje y crecimiento académico.

José Miguel Calderón Cárdenas  
Sundus Delia del Pilar Vizcarra Soto

## ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADOS .....	II
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS .....	x
RESUMEN .....	X
ABSTRACT .....	XI
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	2
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Formulación del problema .....	2
1.2.1 Problema general .....	3
1.2.2 Problemas específicos .....	3
1.3 Justificación e Importancia .....	3
1.4 Objetivos .....	4
1.4.1 Objetivo General .....	4
1.4.2 Objetivos Específicos .....	4
1.5 Hipótesis .....	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. Antecedentes de la investigación .....	5
2.2. Bases Teóricas .....	8
2.2.1. Erosión Hídrica.....	8
2.2.2. Modelo Universal de Pérdida de Suelo (USLE).....	10
2.2.3. Modelo de Elevación Digital (DEM).....	13
2.2.4. Sistema de Información Geográfico (SIG).....	13
2.3. Definición de términos.....	13
2.3.1. Cuenca Hidrográfica.....	13
2.3.2. Erosión Hídrica.....	14

2.3.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	14
2.3.4. Modelo Universal Soil Loss Equation (USLE) .....	14
2.3.5. Sistema de Información Geográfica (SIG).....	14
2.3.6. Subcuenca .....	14
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO .....	15
3.1. Diseño de la investigación .....	15
3.2. Acciones y actividades.....	15
3.2.1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).....	15
3.2.2. Erosión hídrica del suelo .....	21
3.2.3. Recomendaciones y medidas de mitigación .....	21
3.3. Materiales y/o instrumentos .....	21
3.4. Población y/o muestra de estudio .....	22
3.5. Operacionalización de variables .....	22
3.5. Procesamiento y análisis de datos .....	23
CAPÍTULO IV: RESULTADOS .....	24
4.1. Cálculo de la pérdida de suelo promedio anual .....	24
4.1.2. Factor de erosividad de la lluvia (R) .....	24
4.1.3. Factor de erodabilidad del suelo (K).....	25
4.1.4. Factor de longitud y pendiente del terreno (LS) .....	26
4.1.5. Factor de cobertura y manejo del suelo (C) .....	29
4.2. Erosión hídrica en la subcuenca Caplina.....	35
4.3. Recomendaciones y medidas de mitigación .....	40
4.3.1. Recomendaciones Generales.....	40
4.3.2. Medidas de Mitigación para Áreas con Erosión Nula o Ligera (Verde) .....	41
4.3.3. Medidas de Mitigación para Áreas con Erosión Moderada (Amarillo) .....	41
4.3.4. Medidas de Mitigación para Áreas con Erosión Alta (Rojo) .....	41
4.3.5. Recomendaciones Específicas .....	41
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	43
5.1. Discusión de Resultados con otros autores .....	43
CONCLUSIONES .....	45
RECOMENDACIONES.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
ANEXOS.....	50

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Valores del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) .....	12
Tabla 2. Valores de Pendiente para determinar Factor LS .....	18
Tabla 3. Metadatos de Imágenes Satelitales .....	19
Tabla 4. Operacionalización de variables de investigación .....	23
Tabla 5. Valores para el Factor K .....	25
Tabla 6. Valores de la Pendiente .....	27
Tabla 7. Valores del Factor C en Diferentes Años .....	32
Tabla 8. Resultados de Clases de Erosión .....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología del Modelo USLE .....	20
Figura 2. Mapa de Ubicación .....	22
Figura 3. Valores del Factor R en la Cuenca .....	24
Figura 4. Mapa del Factor R .....	25
Figura 5. Mapa del Factor K.....	26
Figura 6. Valores obtenidos del Factor LS .....	28
Figura 7. Mapa del Factor LS.....	29
Figura 8. Mapa de Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) - 2013 .....	30
Figura 9. Mapa de Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) - 2016 .....	30
Figura 10. Mapa de Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) - 2019 .....	31
Figura 11. Mapa de Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) - 2023 .....	31
Figura 12. Valores obtenidos del Factor C.....	33
Figura 13. Mapa del Factor C .....	34
Figura 14. Comparación de Resultados de Clases de Erosión .....	35
Figura 15. Mapa de la Erosión de suelo en el año 2013 .....	37
Figura 16. Mapa de la Erosión de suelo en el año 2016 .....	38
Figura 17. Mapa de la Erosión de suelo en el año 2019 .....	39
Figura 18. Mapa de la Erosión de suelo en el año 2023 .....	40

## RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo general evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina utilizando el Modelo Universal de Pérdida de Suelo (USLE) mediante el Sistema de Información Geográfico (SIG). En cuanto a la metodología, se aplicó el método USLE para calcular la pérdida de suelo en diferentes áreas de la subcuenca del río Caplina. Se generaron mapas temáticos para mostrar la distribución espacial de la erosión hídrica. Los factores considerados fueron la erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), la longitud y pendiente del terreno (LS), la cobertura y manejo del suelo (C) y las prácticas de conservación (P). En cuanto a los resultados obtenidos en la pérdida de suelo, la erosión nula o ligera constituye la mayor parte del área de la subcuenca en todos los años analizados, con un ligero aumento desde 55,85 % en 2013 hasta 56,20 % en 2023. La erosión moderada representa una parte significativa del área, mostrando una fluctuación entre 2013 y 2023. Se incrementa desde 27,44 % en 2013 a 27,56 % en 2023, indicando una leve tendencia al aumento. La erosión alta, aunque abarca una porción menor, ha mostrado una ligera disminución, pasando de 16,71 % en 2013 a 16,24 % en 2023. Finalmente, las áreas con erosión crítica, que presentan altas pendientes y mínima cobertura vegetal, han sido identificadas como las más vulnerables. En cuanto a las medidas de mitigación propuestas, se promueve la preservación de la vegetación natural existente, la implementación de prácticas agrícolas sostenibles para prevenir la degradación del suelo, el uso de cultivos de cobertura, la rotación de cultivos y métodos de siembra directa, plantar especies que ayuden a estabilizar el suelo y prevenir la erosión, y la aplicación inmediata de técnicas de ingeniería de suelos y revegetación para evitar la pérdida masiva de suelo. La evaluación de la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina utilizando el modelo USLE y herramientas SIG ha revelado patrones claros de erosión que requieren atención inmediata. Las medidas de mitigación propuestas buscan abordar las áreas más vulnerables y promover prácticas sostenibles que garanticen la conservación del suelo y el uso sostenible de los recursos naturales en la región. Esta investigación proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas y la implementación de políticas efectivas de gestión del suelo.

**Palabras clave:** erosión hídrica; sistema de información geográfico; medidas de mitigación

## ABSTRACT

The general objective of this thesis is to evaluate water erosion in the Caplina River sub-basin using the Universal Soil Loss Equation (USLE) model through the Geographic Information System (GIS). Regarding the methodology, the USLE method was applied to calculate soil loss in different areas of the Caplina River sub-basin. Thematic maps were generated to show the spatial distribution of water erosion. The factors considered were rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), cover management (C), and support practices (P). Regarding the results obtained in soil loss, negligible or light erosion constitutes the majority of the sub-basin area in all the years analyzed, with a slight increase from 55.85 % in 2013 to 56.20 % in 2023. Moderate erosion represents a significant part of the area, showing a fluctuation between 2013 and 2023. It increased from 27.44 % in 2013 to 27.56 % in 2023, indicating a slight upward trend. High erosion, although it covers a smaller portion, has shown a slight decrease, from 16.71 % in 2013 to 16.24 % in 2023. Finally, critical erosion areas, which have high slopes and minimal vegetation cover, have been identified as the most vulnerable. As for the proposed mitigation measures, they include promoting the preservation of existing natural vegetation, implementing sustainable agricultural practices to prevent soil degradation, using cover crops, crop rotation, and direct seeding methods, planting species that help stabilize the soil and prevent erosion, and the immediate application of soil engineering and revegetation techniques to avoid massive soil loss. The evaluation of water erosion in the Caplina River sub-basin using the USLE model and GIS tools has revealed clear erosion patterns that require immediate attention. The proposed mitigation measures aim to address the most vulnerable areas and promote sustainable practices that ensure soil conservation and the sustainable use of natural resources in the region. This research provides a solid foundation for informed decision-making and the implementation of effective soil management policies.

**Keywords:** water erosion; geographic information system; mitigation measures

## INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es un fenómeno global que afecta la sostenibilidad de los recursos naturales y la seguridad alimentaria. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la degradación del suelo, incluida la erosión, afecta aproximadamente al 33% de las tierras agrícolas en todo el mundo. Este proceso no solo reduce la productividad agrícola, sino que también contribuye a la sedimentación de cuerpos de agua, la pérdida de biodiversidad y la emisión de gases de efecto invernadero (Pimentel, 2006). En respuesta a estos desafíos, numerosos estudios internacionales han adoptado el Modelo Universal de Pérdida de Suelo (USLE) como una herramienta estándar para evaluar y mitigar la erosión hídrica, aprovechando las tecnologías geoespaciales y geomáticas para mejorar la precisión y la eficacia de las evaluaciones (Renard et al., 1997).

En Perú, la erosión hídrica representa un problema crítico debido a la diversidad geográfica y climática del país. Regiones como la sierra y la costa experimentan tasas significativas de erosión que amenazan la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental. Las políticas nacionales han comenzado a enfocarse en la gestión integrada de cuencas y la conservación de suelos, destacando la necesidad de estudios detallados y específicos que puedan informar decisiones y acciones a nivel regional. La aplicación de modelos predictivos como el USLE, complementados con herramientas geoespaciales y geomáticas, es esencial para desarrollar estrategias efectivas de manejo de suelos y agua en el país (Morales et al., 2018).

La subcuenca del río Caplina, ubicada en la región de Tacna, es una zona particularmente vulnerable a la erosión hídrica debido a su clima árido, topografía accidentada y prácticas agrícolas intensivas. Esta área es crucial para la agricultura local y el suministro de agua, lo que subraya la importancia de preservar la calidad y cantidad del suelo (Cortez y Flores, 2021). A nivel local, existe una necesidad urgente de evaluaciones precisas que puedan identificar las áreas más afectadas y proponer medidas de mitigación adecuadas. El presente estudio se centra en esta subcuenca, utilizando el Modelo Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y herramientas geoespaciales y geomáticas para evaluar la magnitud y distribución de la erosión hídrica durante el año 2023.

## **CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1 Descripción del problema**

La subcuenca del río Caplina, ubicada en la región de Tacna, enfrenta un desafío significativo relacionado con la erosión hídrica y la degradación del suelo. Este problema se manifiesta de manera diversa debido a factores como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la topografía del terreno, las prácticas de manejo del suelo y la cobertura vegetal. Estos elementos interactúan de manera compleja, dando lugar a una variabilidad en la magnitud y distribución espacial de la erosión hídrica en la región.

Uno de los principales desafíos es comprender la erosividad de la lluvia en la subcuenca del río Caplina y cómo esta variable afecta la tasa de erosión del suelo en diferentes áreas. La erosividad está directamente relacionada con la cantidad e intensidad de las precipitaciones, así como con la energía cinética generada por las lluvias, factores clave que influyen en el proceso de erosión hídrica (Renard et al., 1997)

La topografía del terreno, específicamente la longitud y pendiente de las laderas, también desempeña un papel fundamental en la erosión hídrica. Las variaciones en la topografía pueden generar áreas con tasas de erosión diferentes, lo que requiere un análisis detallado para identificar las zonas más críticas. (Moore y Burch, 1986)

Además, las prácticas de manejo del suelo y la cobertura vegetal en la subcuenca del río Caplina influyen significativamente en la erosión hídrica. Las prácticas agrícolas intensivas, junto con la deforestación y el uso inadecuado del suelo, han exacerbado la erosión (Pimentel, 2006). Evaluar cómo estas prácticas impactan en la erosión hídrica y qué medidas pueden ser efectivas para mitigar este proceso es crucial para el manejo sostenible de la subcuenca.

En resumen, la descripción del problema se centra en entender la complejidad de la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina, abordando aspectos como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la topografía del terreno y las prácticas de manejo del suelo. Estos elementos son fundamentales para desarrollar estrategias de conservación y manejo del suelo efectivas, que mitiguen los efectos de la erosión y promuevan la sostenibilidad ambiental en la región.

### **1.2 Formulación del problema**

En cuanto a la formulación del problema de la investigación está la podemos exponer en las siguientes interrogantes.

### **1.2.1 Problema general**

¿Cuál es la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina, Tacna, durante el año 2023, y cómo se pueden identificar eficazmente las áreas más afectadas?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- a. ¿Cuál es la pérdida de suelo promedio anual en diferentes áreas de la subcuenca del río Caplina calculada mediante la USLE?
- b. ¿Cuáles son las áreas más vulnerables a la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina según los resultados de la USLE y el análisis geoespacial?
- c. ¿Qué medidas de mitigación específicas se pueden proponer para reducir la erosión hídrica en las áreas identificadas como más vulnerables en la subcuenca del río Caplina?

## **1.3 Justificación e Importancia**

La aplicación del Modelo Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y herramientas geoespaciales permite obtener datos detallados y precisos sobre la erosión hídrica, lo cual es fundamental para la toma de decisiones informadas en la gestión del suelo y el agua.

Los resultados de esta investigación pueden utilizarse para desarrollar políticas y estrategias de conservación del suelo, planificación territorial y gestión de cuencas hidrográficas en la subcuenca del río Caplina, contribuyendo así al desarrollo sostenible de la región. El uso de tecnologías geoespaciales y geomáticas junto con el USLE representa un enfoque innovador y eficiente para evaluar la erosión hídrica a nivel local, proporcionando herramientas efectivas para la monitorización y prevención de este fenómeno.

La investigación proporcionará información clave sobre las áreas más vulnerables a la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina, permitiendo la implementación de medidas de conservación del suelo específicas y efectivas. La erosión hídrica puede afectar la calidad y cantidad de agua disponible en la región. Comprender sus patrones y distribución ayudará a mejorar la gestión de los recursos hídricos y a garantizar un suministro de agua sostenible.

Al reducir la erosión hídrica y mejorar la calidad del suelo, se promueve un entorno más propicio para la agricultura y la producción de alimentos, lo que contribuye al desarrollo económico y social de la comunidad local.

La investigación fomentará prácticas de manejo del suelo más sostenibles y resilientes, lo que a su vez contribuirá a la preservación de la biodiversidad, la mitigación del cambio climático y la protección de los ecosistemas locales.

En resumen, la investigación sobre la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina utilizando el USLE y herramientas geoespaciales es fundamental para abordar los desafíos ambientales y socioeconómicos en la región, promoviendo un desarrollo sostenible y una mejor calidad de vida para sus habitantes.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina utilizando el modelo U.S.L.E. mediante el Sistema de Información Geográfico, Tacna – 2023

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- a. Aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para calcular la pérdida de suelo promedio anual en diferentes áreas de la subcuenca del río Caplina
- b. Generar mapas temáticos y modelos geoespaciales que representen la distribución espacial de la erosión hídrica en la subcuenca, identificando las áreas más vulnerables y prioritarias para la conservación del suelo
- c. Proponer recomendaciones y medidas de mitigación específicas basadas en los resultados obtenidos, con el objetivo de reducir la erosión hídrica y mejorar la sostenibilidad del uso del suelo en la subcuenca del río Caplina en Tacna

## **1.5 Hipótesis**

Se espera que la evaluación de la erosión hídrica utilizando el Modelo Universal de Pérdida de Suelo (USLE) en la subcuenca del río Caplina, Tacna, revele patrones significativos de erosión, identificando áreas críticas con altas tasas de pérdida de suelo.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de la investigación

Para desarrollar correctamente la metodología se revisó información bibliográfica, la cual nos permitirá discernir mejor la temática.

Empezamos revisando la investigación de Jaya-Santillán (2023), que mediante SIG y utilizando el modelo USLE, buscaba modelar las tasas de erosión en la Microcuenca de Río Muchacho (MRM) donde dicha erosión se atribuye principalmente a la deforestación y compactación del suelo, malas prácticas agrícolas (p.ej. monocultivos, siembra en laderas, barbecho corto) y al uso incontrolado de la tierra desde la década de 1960 (Chancay et al., 2021). Los resultados de la simulación muestran una pérdida media de suelo de 74,4 t/ha/año, considerada en a la categoría de "erosión alta". Las cabeceras de la MRM, caracterizadas por suelos dispersos, vegetación escasa, pastoreo, entre otros, presentaron tasas de erosión del suelo de moderada a muy altas (>25 t/ha/año). Por otro lado, las áreas con alta densidad de vegetación, pendientes moderadas y escasas precipitaciones presentaron una tasa baja de erosión (0-25 t/ha/año) y se ubican principalmente en la parte central y baja de la cuenca. Los resultados de la simulación mostraron una distribución de los datos sesgada a la derecha ( $skew = 1,8$ ), es decir presenta valores de erosión altos con mayor frecuencia; y leptocúrtica ( $kurt = 21,2$ ) con valores atípicos poco frecuentes.

En la investigación de Ramos y Sánchez (2023), nos indica que eligieron como zona de estudio a la microcuenca del río Puela, cantón Penipe, donde estimaron la pérdida de suelo mediante el uso de SIG y del modelo USLE, cada factor hallado reflejaba el estado actual de la microcuenca, durante el análisis pudieron determinar que, los factores R y LS estableció que existe erosión en gran parte de la zona de estudio, el factor de la erosionabilidad del suelo (K) permitió determinar que los suelos son de tipo franco arenoso, franco arenoso arcilloso y franco limoso. Al concluir, determinaron que la relación de los factores K, LS, P, R, C) y las herramientas SIG estimaron una pérdida de suelo leve o nula en la mayor parte de la zona de estudio.

A continuación, la investigación de Alarcón y Sánchez (2023), con el objetivo de predecir la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca del río Negro, emplearon la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), donde se interactuó los elementos promotores de la erosión del suelo, tales como: erosividad de lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), topografía (LS), cobertura vegetal (C) y prácticas

conservacionistas (P). Para el factor R empleó datos de precipitación mensual, el factor K obtuvo aplicando la ecuación de Williams, para el factor LS utilizó las fórmulas de Renard utilizando un DEM de 30m de pixel y aplicando los valores de Mintegui para su caracterización, para el factor C, utilizó la metodología del NDVI y luego empleó la fórmula de Van Der Knijff et al. (2000) y, por último, para el factor P asumió el valor de 1, ya que no identificó prácticas de conservación de suelos en el área de estudio. Los resultados determinaron que la erosión leve osciló entre 0,380 – 49,841 t\*ha-1 \*año-1 con un área de 17 065,26 ha y la erosión muy alta, osciló entre 699,896 – 1 802,164 t\*ha-1 \*año-1 con un área de 19,01 ha; esta última lo justifica por las fuertes pendientes de la zona alta de la subcuenca y la actividad agropecuaria presente en el área de estudio.

Según Castro et al. (2022), determinaron la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca del río Estibaná mediante el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) haciendo uso de una data de precipitaciones pluviométricas registrados 11 años, realizaron muestreos de suelo, mediciones de pendientes y evaluaciones de cobertura vegetal, seleccionaron 3 zonas dentro del área de estudio con pendientes diferentes en donde cada una se estableció un ensayo con 03 bloques y 3 tratamientos: cobertura natural (CN), sin cobertura + barrera viva con *Chrysopogon zizanioides* (SC+BV) y sin cobertura (SC). Nos indican que la investigación se dividió en 2 etapas: la primera donde se realizaron la toma de muestras de suelo y la evaluación de cobertura vegetal en campo y la segunda que involucró trabajo de laboratorio, análisis e interpretación de datos y determinaron que en la subcuenca la pérdida estimada de suelo osciló entre 0.021–70.670 t/ha/año y que en los suelos sin cobertura en pendientes >6 % excedió la tasa tolerable de pérdida de suelo.

En la investigación de Mejía (2021), la cual pretende predecir espacialmente la erosión del suelo en zonas áridas mediante teledetección, en la Quebrada del Diablo, en la ciudad de Tacna. Utilizó los modelos U.S.L.E (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) y R.U.S.L.E (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada), ambos relacionados con los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El proceso se realiza mediante la obtención de los factores R, K, LS, C y P para estimar los resultados, a partir de estos modelos se muestra la mayor tasa de erosión hídrica por aumento de precipitaciones en 2020 y las estimaciones oscilan entre 0 y 50 ton/ha/año, consideradas en los rangos bajo, ligero y medio.

De acuerdo a la investigación de Morante y Gonzales (2019), buscaron realizar mapas de erosión hídrica de la cuenca del río Perené porque está sujeta a fuertes lluvias que pueden provocar deslizamientos que causan bloqueos de carreteras, la pérdida de vidas humanas, ganado y cultivos, reduciendo los flujos económicos. Y recurren a la elaboración de mapas de erosión utilizando la metodología de Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (U.S.L.E). También tuvieron en cuenta que esta metodología determina la cantidad de suelo perdido, obtenido a partir del producto de 6 factores, cada se obtiene de diferentes formas. Los factores del método son: factor K (erodabilidad del suelo), factor R (erosividad de la lluvia), factor C (cobertura del suelo), factor LS (factor de longitud de pendiente) y factor P (conservación del suelo); y el producto se construye de acuerdo con la metodología. Los autores de la investigación proporcionaron un mapa general que muestra las áreas más susceptibles a la erosión. Esta información fue muy importante para los proyectos de los Gobiernos Regionales y Municipios.

Asimismo, la investigación de Laqui (2019), donde busca estimar la erosión y el transporte potencial de sedimentos en la subcuenca del río Callazas en la región Tacna, utilizó el modelo USLE junto a las herramientas SIG (Sistema de Información Geográfica) para estimar la tasa de erosión hídrica y con la metodología a nivel conceptual media obtuvo el valor de 108,9 ton/ha.año como promedio en 50 años (1954 – 2003) siendo considerada una erosión moderada y con las herramientas SIG, un valor de 64,3 ton/ha.año siendo considerado una erosión ligera. Al obtener esos valores, la estimación del volumen total de sedimentos retenidos en la futura represa Callazas es de 0.372 millones de metros cúbicos (MMC) según el método USLE, y de 0.485 MMC según la fórmula de transporte de sedimentos de Engelud-Hansen. La suma de ambas metodologías proyecta un volumen total de sedimentos de 0.857 MMC. Esto, proyectado para los próximos 50 años, representa menos del 1 MMC del volumen total de sedimentos propuesto en el estudio de factibilidad de la represa Callazas.

Revisamos la investigación de Jaramillo (2015), donde utilizó herramientas de Sistema de Información Geográfica para realizar el modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (U.S.L.E) y que fue aplicado en la subcuenca río Portoviejo, provincia de Manabí, con la finalidad de obtener aquellos rangos donde se ubiquen las áreas que fueron afectadas por la erosión hídrica y crear un mapa de erosión de la zona de estudio. El proceso estudió factores como: la erosividad (R), erodabilidad de suelo (K), longitud y pendiente (LS), cobertura y uso de suelo (C) y prácticas de conservación (P), estos factores mencionados fueron combinados utilizando el programa ArcGIS 9.3, dando los

siguientes registros: de 0 - 5 ton/ha\*año, con un área de 74,67 % (erosión muy baja); de 5 - 10 ton/ha\*año, con un área de 22,51 % (erosión baja); de 10 - 25 ton/ha\*año, con un área de 2,26 % (erosión leve); de 25 - 50 ton/ha\*año, con un área de 0,24 % (erosión moderada); de 50 - 100 ton/ha\*año, con un área de 0,11 % (erosión grave); de 100 - 200 ton/ha\*año, con un área de 0,21 % (erosión muy grave).

Teniendo en cuenta la investigación de Del Águila (2010), que mediante la aplicación del modelo U.S.L.E / R.U.S.L.E busca estimar la tasa de pérdida de suelos por erosión hídrica en la microcuenca puente Pérez en Tingo María y con ayuda del software ArcGIS 9.2 analizar y representar cada factor que compone la ecuación: erosividad de precipitaciones, la erosión del suelo, la longitud y pendiente de las laderas y la cobertura vegetal. La tasa de erosión promedio de la subcuenca Puente Pérez fue de 0 a 3,046 t/ha/año; agrupados en rangos tabulados adaptados de FAO, UNESCO y UNEP (1980); se determinó que el 82 % de la microcuenca presenta una erosión de baja a moderada, mientras que el 18 % restante presentó una erosión fuera de los límites aceptables, con áreas clasificadas como de alto riesgo. Luego de realizar un análisis de correlación entre la erosión y el factor de C, se determinó que el uso y la cobertura del suelo tenían un efecto directo en el proceso de erosión ( $R = 0,87$ ).

Para concluir, en la investigación de Herrera y Herrera (2009), que tiene la finalidad de evaluar los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en el municipio San José de los Remates durante la temporada de lluvias en el año 2006, bajo las siguientes estrategias de cobertura: bosque autóctono y grama natural. Los autores obtuvieron que la mayor pérdida de suelo se dio en las áreas del bosque autóctono con un valor promedio de 0,0068 t/ha, mientras que las áreas de grama natural, los resultados fueron menores con un valor promedio de 0,0264 t/ha. Finalmente, recomendaron que este tipo de estudios debería ser realizado a mediano y a largo plazo para conocer con más detalles el proceso de erosión hídrica de suelo y los posibles impactos que podría generar.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Erosión Hídrica**

Se considera un proceso de transporte y separación de partículas del suelo debido a las precipitaciones, afectando la fertilidad y productividad del suelo, ya que, el proceso reduce los niveles de materia orgánica. Puede llegar a diversos grados de intensidad que pueden generar un ambiente desfavorable para el crecimiento vegetal y sobre todo

un desequilibrio a nivel de cuencas hidrológicas. Se tienen los siguientes procesos de erosión.

**a. Desprendimiento**

En este proceso intervienen las gotas de lluvia, que, al momento de caer, desprenden partículas de la superficie del suelo y algunas de estas partículas podrían moverse hacia la parte más baja del terreno.

**b. Transporte**

Es el desplazamiento del material desprendido. En esta etapa se pueden producir diferentes tipos de erosión, por ejemplo: erosión en cárcavas, erosión laminar, erosión en surcos, etc.

**c. Sedimentación**

En este proceso el suelo que ya está desprendido y transportado se acumula en diferentes sitios modificando las formas del relieve terrestre.

También se tiene los siguientes tipos de erosión, los cuales pueden clasificarse en:

**a. Erosión natural o geológica**

Este tipo de erosión ocurre de forma natural y sin intervención del hombre. Existen factores como el agua y el viento, que al estar en movimiento sobre la superficie arrasan con las partículas del suelo.

**b. Erosión antrópica o acelerada**

Es el proceso causado por acción del hombre, que altera la capa superficial como resultado del mal manejo del suelo.

También debemos estudiar las formas de erosión.

**a. Erosión por salpicaduras**

Esto es causado principalmente por las gotas de lluvia que caen directamente sobre la superficie de la tierra. El efecto de la erosión dependerá de la forma y el tamaño de las gotas y de la capacidad de erosión del suelo.

**b. Erosión laminar**

La erosión laminar es la pérdida de una capa delgada y uniforme en un terreno inclinado. Es considerada de una forma más perjudicial ya que es provocada por precipitaciones.

**c. Erosión en surcos**

Se da cuando el agua de lluvia se concentra y al no usar métodos para conservar el suelo, se lleva parte de la superficie terrestre, iniciando con pequeños canales que finalmente se convierten en surcos.

**d. Erosión en cárcavas**

Se considera un estado más avanzado de los surcos, es decir, varían dependiendo de las dimensiones del caudal ya que son de gran tamaño y profundidad.

**2.2.2. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)**

Desarrollada originalmente por Wischmeier y Smith (1965), la USLE ayuda a estimar la tasa de erosión hídrica en terrenos agrícolas y naturales, la cantidad media de suelo que se pierde por unidad de área durante un período específico. La ecuación 1, es una herramienta determinante que consiste de los siguientes factores:

$$A = R * K * L S * C * P \quad (1)$$

Donde:

A: Pérdida de suelo promedio anual (toneladas por hectárea por año, t/ha/año).

R: Factor de erosividad de la lluvia (MJ·mm/(ha·h·a)).

K: Factor de erodabilidad del suelo (t·ha·h/(ha·MJ·mm)).

LS: Factor de longitud y pendiente del terreno (adimensional).

C: Factor de cobertura y manejo del suelo (adimensional).

P: Factor de prácticas de conservación (adimensional).

A continuación, realizamos la descripción de los factores:

**a. Factor R (Erosividad de la lluvia)**

La ecuación 2, representa el efecto de la lluvia en la erosión. Se calcula considerando la intensidad y la energía cinética de las lluvias en una región específica. Roose (1995), citado por Ramos (2001) calculó el factor R, mediante la siguiente ecuación.

$$R = 1,73 * 0.5 * P \quad (2)$$

Donde:

P: Precipitación media anual, generándose el mapa de isoerodientes, del cual se obtiene la superficie que representa el factor R.

### b. Factor K (Erodabilidad del suelo)

Indica la susceptibilidad del suelo a la erosión, dependiendo de sus propiedades físicas y químicas, como textura, estructura, contenido de materia orgánica y permeabilidad.

Para obtener esta variable, nos dirigimos a la página de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) donde descargamos el mapa digital de suelos del mundo en formato shapefile y para la metodología, consideramos la ecuación 3, que es la fórmula de Williams (2000), presentada a continuación:

$$K = 0,1317 * A*B*C*D \quad (3)$$

Dónde:

A: Contenido de fracción de arena (0,05 - 2 mm de diámetro) en %

B: Contenido de fracción de limo (0,002 - 0.05 mm de diámetro) en %

C: Contenido de fracción de arcilla (< 0,002 mm de diámetro) en %

D: Contenido de carbono orgánico %

### c. Factor LS (Longitud y pendiente del terreno)

La ecuación 4, es la combinación de dos factores: longitud de la pendiente (L) y grado de la pendiente (S), siendo una fórmula combinada según Wischmeier y Smith (1965).

$$LS = (L / 22,13)^m * (0,065 + 0,045S + 0,0065S^2) \quad (4)$$

Donde:

L: Longitud de la pendiente en metros

S: Pendiente en porcentaje

m: Exponente que varía con la pendiente.

### d. Factor C (Cobertura y manejo del suelo)

Refleja el impacto de las prácticas de manejo y el tipo de vegetación sobre la erosión. Se basa en la comparación entre las tasas de erosión de suelo cubierto y descubierto. Para obtener el factor C, se puede utilizar el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI).

### ***Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)***

Es un indicador utilizado en teledetección para evaluar la cantidad y salud de la vegetación en una determinada área. Su base teórica se fundamenta en cómo la vegetación refleja la luz en diferentes longitudes de onda, para ello, se aplica la ecuación 5, haciendo uso de imágenes satelitales.

$$NDVI = \left( \frac{B5 - B4}{B5 + B4} \right) \quad (5)$$

Donde:

B4: es el valor de reflectancia en el infrarrojo cercano (Infrarrojo cercano - NIR)

B3: es el valor de reflectancia en el rojo (Red - RED)

Finalmente, aplicando la ecuación 6, se determinará el factor C.

$$C = \left( \frac{1 - NDVI}{2} \right) \quad (6)$$

Se utilizó esta fórmula debido a que es una herramienta efectiva y accesible para estimar el impacto de la cobertura vegetal en la erosión del suelo.

**Tabla 1**

*Valores del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)*

<b>Valores</b>	<b>Descripción</b>
- 1 – 0	Cuerpos de agua
0 – 0,2	Suelo denudado
0,2 – 0,4	Vegetación escasa
0,4 – 0,6	Vegetación buena
0,6 - 1	Vegetación buena o abundante

- e. Factor P (Prácticas de conservación).** Representa la efectividad de prácticas de manejo y conservación del suelo, como terrazas, contornos de cultivos y franjas de vegetación. Se determina mediante tablas basadas en las prácticas específicas aplicadas en la región. Cuando no es posible determinar esto según como lo refiere Rodríguez (2007), el factor es igual a 1.

### 2.2.3. Modelo de Elevación Digital (DEM)

Es una ilustración gráfica 3D sobre datos tridimensionales basado en celdas, que permite cuantificar las características de la superficie de suelo. Y se pueden clasificar en los siguientes Modelos Digitales.

#### *a. Modelo Digital de Superficie (MDS)*

Representa todos los elementos que forman parte de la superficie de la tierra, como la vegetación, edificaciones, etc.

#### *b. Modelo Digital de Terreno (MDT)*

Muestra la forma del terreno desnudo, es decir, sin vegetación, sin edificaciones y cualquier otro elemento que no forme parte del terreno.

### 2.2.4. Sistema de Información Geográfico (SIG)

Es un sistema conformado por un conjunto de medios y métodos informáticos, considerado como hardware y software que utiliza datos geográficos que se usan para recolectar, almacenar, manejar, analizar y extender geográficamente la información determinada con la finalidad de solucionar problemas complicados de planificación y gestión. Los Sistemas de Información Geográfica es un campo muy amplio y puede ser aplicado en diferentes actividades que cuenten con componentes espaciales, los campos más utilizados son los siguientes: Medio Ambiente, Infraestructuras, Recursos Minerales, Información de Rutas, Geomarketing y Cartografía. Para la interpretación de información geográfica, se conocen muchos softwares que se utilizan para el análisis de resultados, y los principales son:

*a. ArcGIS.* Es un sistema completo que permite analizar, recopilar, organizar, etc, toda información geográfica, y es la plataforma más empleada usada a nivel mundial.

*b. QGIS.* Es un software libre que nos permite generar, analizar, editar, etc, cualquier información geoespacial. Con el tiempo se ha ido estableciendo como un sistema que puede tener muchas funcionalidades.

## 2.3. Definición de términos

### 2.3.1. Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una región delimitada geográficamente donde toda la precipitación y los flujos de agua superficiales convergen hacia un único punto de salida, y es esencial para la comprensión y gestión del ciclo hidrológico y los recursos hídricos (Chorley, 1969).

### **2.3.2. Erosión Hídrica**

La erosión hídrica un proceso físico donde las partículas de suelo se desprenden y son transportadas por acción de las lluvias, ocasionando un deterioro de los suelos debido a la desaparición del suelo superficial (Álvarez, 2019).

### **2.3.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**

Es un indicador esencial en la teledetección para evaluar la salud y la densidad de la vegetación terrestre. Este índice se calcula a partir de la reflectancia en el espectro del infrarrojo cercano y el rojo, y sus valores oscilan entre -1 y 1, representando distintas condiciones de cobertura vegetal y suelo (Tucker, 1979).

### **2.3.4. Modelo Universal Soil Loss Equation (USLE)**

Es una herramienta fundamental para predecir la erosión del suelo en campos agrícolas, considerando factores como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la topografía, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación (Wischmeier y Smith, 1965).

### **2.3.5. Sistema de Información Geográfica (SIG)**

Es una herramienta tecnológica que integra hardware, software y datos geográficos para capturar, gestionar, analizar y mostrar información georreferenciada, permitiendo visualizar y entender patrones y relaciones espaciales (Burrough, 1986).

### **2.3.6. Subcuenca**

Es una superficie de terreno conformada por ríos secundarios que fluyen en su totalidad en dirección al río principal. Cada afluente tiene su respectiva cuenca, una subcuenca es aquel que tiene un área que varía entre 10.000 a 60.000 hectáreas (Moreno, 2017).

## CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1. Diseño de la investigación

La presente investigación es de tipo **no experimental**, ya que no existe manipulación de las variables.

### 3.2. Acciones y actividades

Las acciones y actividades las detallamos a continuación en base a los objetivos propuestos.

#### 3.2.1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

Para evaluar la erosión del suelo mediante la metodología USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo), es fundamental identificar y cuantificar diversos factores que influyen en este proceso. A continuación, se detalla la metodología empleada en la presente investigación para determinar estos factores y así obtener una estimación precisa de la erosión del suelo:

##### **a. Factor de erosividad de la lluvia (R)**

Se tomó como base de información la precipitación media anual generada en la zona de estudio. Roose en 1995, citado por Ramos (2001) calculó el factor R, mediante la siguiente ecuación.

$$R = 1,73 * 0,5 * P$$

Donde P: Precipitación media anual, generándose el mapa de isoerodientes, del cual se obtiene la superficie que representa el factor R.

##### **b. Factor de erodabilidad del suelo (K)**

Para evaluar la susceptibilidad del suelo a la erosión, es esencial disponer de datos detallados y precisos sobre las características del suelo en la zona de estudio. En esta investigación, utilizamos recursos proporcionados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para obtener la información necesaria. A continuación, se describe el proceso seguido para adquirir y utilizar estos datos:

- En primer lugar, nos dirigimos al portal de la FAO, específicamente a su sección dedicada a los recursos de suelos. Desde allí, descargamos el mapa digital de suelos del mundo en formato shapefile, que es compatible con los sistemas de información geográfica (SIG). Este formato permite una fácil manipulación y análisis de los datos espaciales.
- El mapa digital de suelos proporciona una representación detallada de las distintas unidades de suelo presentes en la zona de estudio. Cada unidad de suelo está acompañada de una serie de datos descriptivos que incluyen información sobre su composición, textura, estructura, capacidad de retención de agua, permeabilidad, y otros factores relevantes para la evaluación de su erodabilidad.
- Una vez descargados los datos, procedimos a integrarlos en nuestro sistema SIG. Esta integración nos permitió superponer el mapa de suelos con otros datos geospaciales, como la topografía y la cobertura vegetal, facilitando un análisis más completo y preciso de la susceptibilidad del suelo a la erosión.
- Además, analizamos cada unidad de suelo individualmente para identificar sus características específicas que influyen en la erodabilidad. Este análisis incluyó el estudio de factores como la textura del suelo (proporción de arena, limo y arcilla), el contenido de materia orgánica, y la estructura del suelo. Estos datos fueron cruciales para calcular el Factor K de la metodología USLE, que mide la susceptibilidad intrínseca del suelo a la erosión.
- Finalmente, los datos obtenidos del mapa digital de suelos y el análisis detallado de cada unidad de suelo se utilizaron para realizar una evaluación exhaustiva de la susceptibilidad del suelo a la erosión en la zona de estudio. Los resultados proporcionaron una base sólida para el desarrollo de estrategias de manejo del suelo, orientadas a minimizar la erosión y promover la sostenibilidad agrícola y ambiental.
- Para hallar el factor K, utilizamos los datos de la tabla anterior y aplicamos la fórmula de Williams.

$$K = 0,1317 * A*B*C*D$$

Dónde:

A: Contenido de fracción de arena (0,05 - 2 mm de diámetro) en %

B: Contenido de fracción de limo (0,002 - 0,05 mm de diámetro) en %

C: Contenido de carbono orgánico %

D: Contenido de fracción de arcilla (< 0,002 mm de diámetro) en %

$$A = (0,2 + 0,3 \exp[-0,0256 \cdot ARENA \left(1 - \frac{LIMO}{100}\right)])$$

$$B = \left(\frac{LIMO}{ARCILLA + LIMO}\right)^{0,3}$$

$$C = \left[1 - \frac{0,25 \cdot CARB.ORG.}{CARB.ORG. + \exp[3,72 - 2,95 \cdot CARB.ORG.]}\right]$$

$$D = \left[1 - \frac{0,70 * \left(1 - \frac{ARENA}{100}\right)}{\left(1 - \frac{ARENA}{100}\right) + \exp[-5,51 + 22,9 \left(1 - \frac{ARENA}{100}\right)]}\right]$$

### c. **Factor de longitud y pendiente del terreno (LS)**

La metodología USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) incorpora la topografía del terreno a través de dos factores clave: el factor L (longitud de la pendiente) y el factor S (grado de la pendiente). Estos factores son fundamentales para determinar cómo la inclinación y la longitud de las laderas influyen en la erosión del suelo. Para crear un mapa de pendientes en el marco de un Sistema de Información Geográfica (SIG), es necesario disponer de un Modelo Digital del Terreno (MDT) o Digital Elevation Model (DEM). Este modelo digital proporciona una representación tridimensional de la superficie terrestre, permitiendo un análisis detallado de las características topográficas del área de estudio. Una vez obtenido el DEM, se pueden calcular los valores de pendiente y longitud de cada ladera. Estos cálculos son esenciales para determinar los factores L y S de la USLE, que juntos forman el factor LS. Este factor LS representa el efecto combinado de la longitud y la inclinación de la pendiente en la erosión del suelo.

Según Ramos (2001), nos presenta los valores asignados directamente a una ladera para el cálculo del factor LS, tal como lo elaboró la Facultad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes en Madrid. Estos valores proporcionan una referencia práctica para la aplicación de la USLE en diferentes condiciones topográficas.

El proceso de elaboración de un mapa de pendientes incluye varios pasos clave:

- Obtención del DEM. Descargamos un DEM de alta resolución que cubre la zona de estudio. Estos modelos pueden obtenerse de diversas fuentes, como la NASA, el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), o bases de datos nacionales y regionales.
- Procesamiento del DEM. Utilizando software de SIG, procesamos el DEM para generar un mapa de pendientes. Este procesamiento incluye la derivación de las pendientes y la longitud de las laderas, así como la identificación de las áreas con diferentes grados de inclinación.
- Cálculo del factor LS: Aplicamos los valores de referencia (como los citados por Ramos, 2001) para calcular el factor LS para cada unidad de terreno en la zona de estudio. Este cálculo se realiza combinando los valores de longitud y porcentaje de pendiente derivados del mapa de pendientes.

**Tabla 2**

*Valores de Pendiente para determinar Factor LS*

<b>Grupos de pendientes (%)</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
> 100	28,5

**d. Factor de cobertura y manejo del suelo (C)**

Para determinar el valor del índice de vegetación, hemos trabajado con el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI). Este índice es importante para evaluar la cobertura y el vigor de la vegetación en la zona de estudio, lo cual influye directamente en la susceptibilidad del suelo a la erosión.

Para calcular el NDVI, hemos utilizado imágenes satelitales Landsat 8. Estas imágenes se descargan del portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en Earth Explorer. A continuación, se detalla el proceso seguido para obtener y utilizar estas imágenes:

- Descarga de Imágenes Satelitales. Accedimos a la página del USGS Earth Explorer. Utilizamos los criterios de búsqueda específicos para la zona de estudio, que corresponden a Path: 002 / Row: 072 y Path: 002 / Row: 073. Estos parámetros aseguran que las imágenes cubren completamente el área de interés.

**Tabla 3***Metadata de Imágenes Satelitales*

ID	Date Acquired	Landsat Product Identifier L1	Path	Row
1	5/04/2013	LC08_L1TP_002072_20130405_20200913_02_T1	002	072
2	5/04/2013	LC08_L1TP_002073_20130405_20200912_02_T1	002	073
3	5/06/2016	LC08_L1TP_002072_20160605_20200906_02_T1	002	072
4	5/06/2016	LC08_L1TP_002073_20160605_20200906_02_T1	002	073
5	2/09/2019	LC08_L1TP_002072_20190902_20200826_02_T1	002	072
6	2/09/2019	LC08_L1TP_002073_20190902_20200826_02_T1	002	073
7	25/02/2023	LC09_L1TP_002072_20230225_20230308_02_T1	002	072
8	25/02/2023	LC09_L1TP_002073_20230225_20230308_02_T1	002	073

- Procesamiento de Imágenes. Una vez descargadas las imágenes, utilizamos software especializado de procesamiento de imágenes. Este paso incluye correcciones radiométricas y atmosféricas para garantizar la precisión de los datos de reflectancia.
- Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. El NDVI se calcula utilizando las bandas del espectro infrarrojo cercano (NIR) y rojo (Red) de las imágenes Landsat 8. Este índice oscila entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican alta densidad de vegetación saludable, mientras que valores cercanos a 0 o negativos indican poca o ninguna vegetación.
- Generación de Mapas de Vegetación. Con el NDVI calculado, generamos mapas de vegetación que muestran la distribución y densidad de la cobertura vegetal en la zona de estudio. Estos mapas son esenciales para el análisis de la erosión del suelo, ya que la vegetación juega un papel crucial en la protección contra la erosión.
- Integración con USLE. Los valores de NDVI se utilizan para ajustar el Factor C (Cobertura y manejo del suelo) en la metodología USLE. Este factor refleja el impacto de la cobertura vegetal en la reducción de la erosión.

La integración de los datos de NDVI en la USLE permite una estimación más precisa de la pérdida de suelo por erosión, considerando la variabilidad espacial de la vegetación.

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

Dónde: C: Factor C

El uso de imágenes Landsat 8 y el cálculo del NDVI nos proporcionan una herramienta poderosa para evaluar y monitorear la cobertura vegetal en la zona de estudio. Esto, a su vez, contribuye significativamente a la precisión de las estimaciones de erosión del suelo y al desarrollo de estrategias de conservación adecuadas. Para la investigación se realizó el análisis multitemporal trabajando con 4 años para ver la evolución de la erosión del suelo.

**e. Factor de prácticas de conservación (P)**

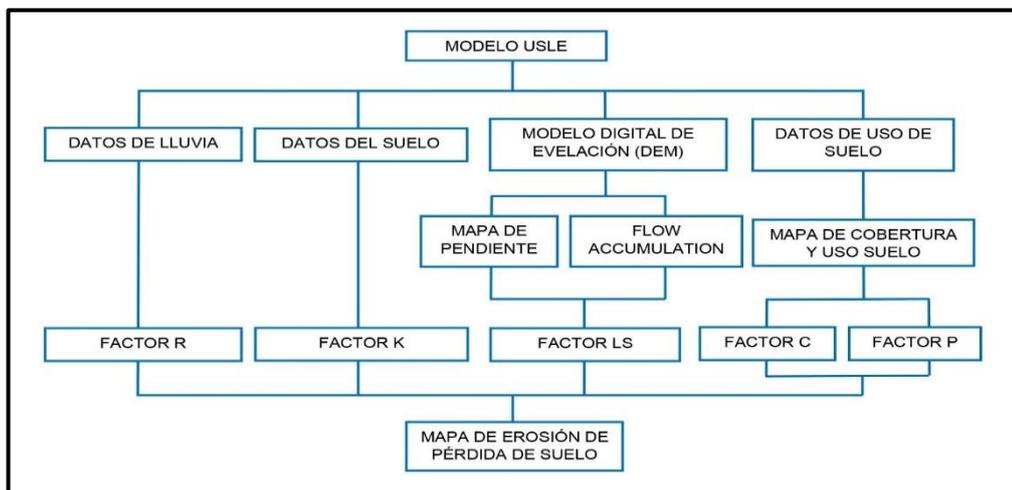
Se consideró el valor de 1, ya que no existen prácticas de control de erosión ni manejo de actividades productivas.

**f. Erosión del suelo**

Finalmente, para determinar la erosión del suelo, se integran todos los factores clave utilizando la metodología USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo). A continuación, en la figura 1 se detalla cómo se combinan estos factores para obtener una estimación precisa de la erosión del suelo:

**Figura 1**

*Metodología del Modelo USLE*



### 3.2.2. Erosión hídrica del suelo

Se realizó la estimación de la cantidad de suelo perdido por erosión en diferentes periodos de tiempo. La ecuación USLE se aplicó a nivel de celdas en el SIG, multiplicando los valores de R, K, LS, C y P para cada celda, lo que permitió generar mapas detallados de pérdida de suelo. Los resultados de la estimación de la erosión hídrica del suelo se visualizan en forma de mapas y tablas. Estos resultados permiten una identificación clara de las áreas críticas donde la erosión es más severa, facilitando así la toma de decisiones informadas para la implementación de medidas de mitigación. Considerando:

- **Mapas de Erosión Hídrica.** Mapas Anuales. Se generaron mapas para los años 2013, 2016, 2019 y 2023, mostrando la distribución espacial de la erosión hídrica en la subcuenca.
- **Zonas Críticas.** Los mapas identifican zonas con alta, moderada y baja erosión, destacando las áreas con mayor pérdida de suelo.
- **Tablas de Pérdida de Suelo.** Pérdida Promedio Anual. Las tablas resumen la pérdida de suelo promedio anual en toneladas por hectárea por año (t/ha/año) para diferentes áreas de la subcuenca.
- **Comparación Temporal.** Se incluyen comparaciones de la pérdida de suelo entre los diferentes años, destacando las tendencias y cambios a lo largo del tiempo.
- **Identificación de Áreas Críticas.** La visualización de los resultados en mapas y tablas facilita la identificación de áreas donde la erosión es más severa. Estas áreas críticas, generalmente caracterizadas por pendientes pronunciadas, suelos altamente erodibles y baja cobertura vegetal, requieren atención prioritaria para la implementación de medidas de conservación del suelo.

### 3.2.3. Recomendaciones y medidas de mitigación

Con base en los resultados, se pueden desarrollar y recomendar estrategias de manejo y conservación del suelo específicas para las áreas más afectadas. Estas estrategias pueden incluir prácticas como la reforestación, la construcción de terrazas y la implementación de sistemas de manejo de agua y suelo.

### 3.3. Materiales y/o instrumentos

Los materiales que se tomaron en cuenta fueron:

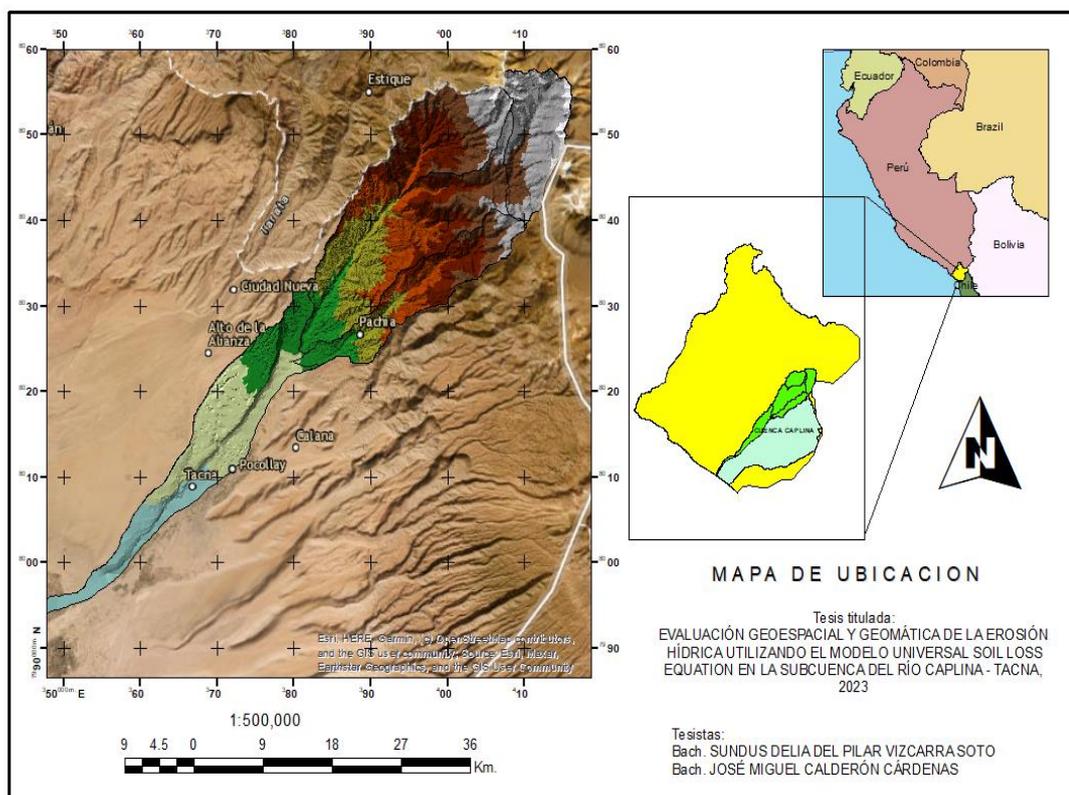
- Imágenes satelitales Landsat 8-9 OLI / TIRS
- Modelo Digital de Elevación (DEM)

- Las herramientas que nos facilitaron el procesamiento de ArcMap

### 3.4. Población y/o muestra de estudio

La población del estudio corresponde a la cuenca del río Caplina, mientras que la muestra se centra en la subcuenca del río Caplina. Como se observa en la figura 2, la cuenca del río Caplina se encuentra situada al sur del Perú, en la región y provincia de Tacna, y abarca los distritos de Palca, Pachía, Calana, Pocollay, Ciudad Nueva, Alto de la Alianza, Gregorio Albarracín y Tacna. La subcuenca del río Caplina, que es la zona de estudio específica, tiene una superficie de 1,085.21 km<sup>2</sup>, se extiende en dirección noreste-suroeste y cuenta con el río Palca como su principal tributario (Gobierno Regional de Tacna, 2023).

Figura 2



Mapa de Ubicación

### 3.5. Operacionalización de variables

En cuanto a la operación de variables podemos considerar las siguientes:

**Tabla 4***Operacionalización de variables de investigación*

<b>Variable</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicador</b>	<b>Escala</b>	<b>Técnicas o métodos</b>
Variable 1 Erosión hídrica	Se considera un proceso de transporte y separación de partículas del suelo debido al agua de lluvia, reduciendo los niveles de materia orgánica que afecta a la fertilidad y productividad del suelo.	Factor R	Precipitación	+Valores de precipitación (mm)	Método indirecto U.S.L.E
		Factor K	Textura	%	Herramienta de análisis geo-espacial
		Factor LS	Pendiente	%	
		Factor C	Cobertura Vegetal	Valores de clasificación	
		Factor P	Prácticas de protección	Área (km <sup>2</sup> )	

### 3.5. Procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento de datos se utilizó herramientas de análisis geoespacial, así como la metodología de USLE y en cuanto al análisis de datos se hizo uso de la cuantificación de resultados individualmente y se integró en la ecuación USLE. Utilizando software de SIG, realizamos los cálculos de manera espacialmente explícita, generando mapas detallados de erosión del suelo. Los resultados se presentaron en forma de mapas y tablas, mostrando la distribución espacial de la erosión del suelo en la zona de estudio. Esto permitió identificar las áreas más vulnerables y con mayores tasas de erosión.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

### 4.1. Cálculo de la pérdida de suelo promedio anual

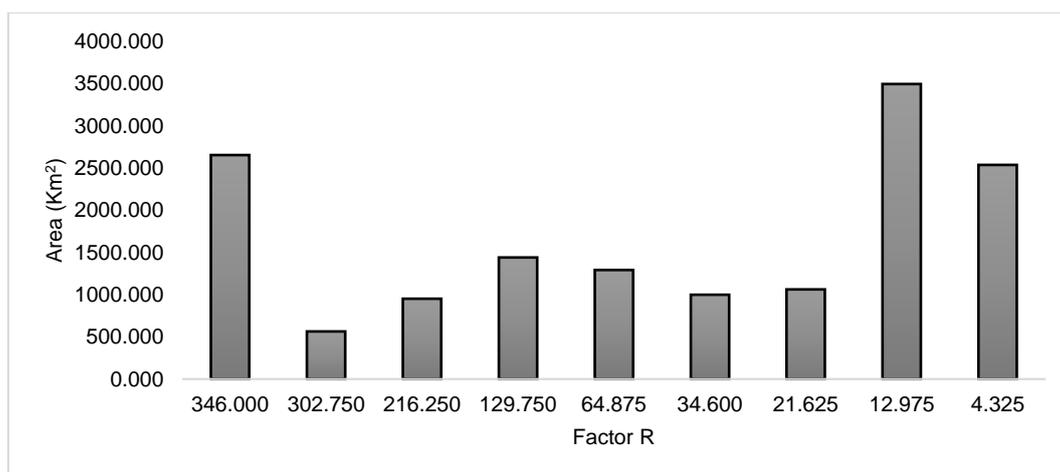
#### 4.1.2. Factor de erosividad de la lluvia (R)

La figura 3 es un diagrama de barras que muestra la relación entre el Factor R (erosividad de la lluvia) y el área correspondiente (en Km<sup>2</sup>) que cada valor de Factor R cubre. Los valores del Factor R varían desde 4,325 hasta 346. La mayoría del área se concentra en los extremos del Factor R, con picos notables en 346 y 12,975. Existe una tendencia de mayor área asociada con los extremos altos y bajos del Factor R.

Las áreas correspondientes a los valores intermedios del Factor R son menores en comparación con los valores extremos.

**Figura 3**

*Valores del Factor R en la Cuenca*



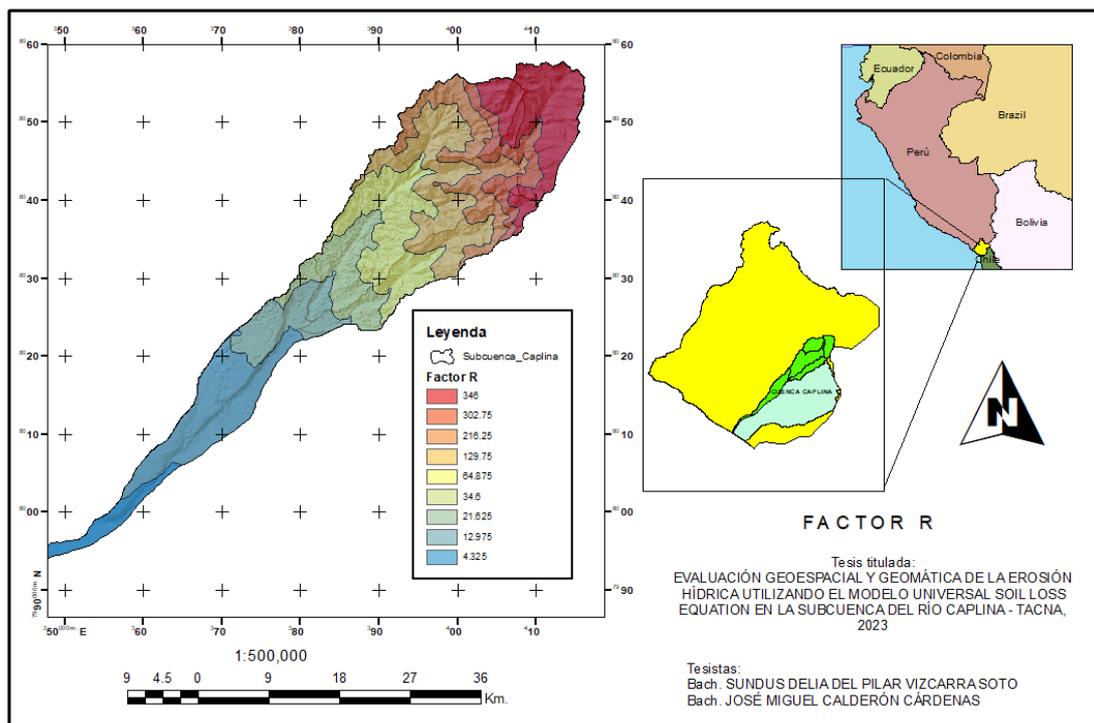
La figura 4 es un mapa que muestra la distribución espacial del Factor R (erosividad de la lluvia) en la subcuenca del Río Caplina, en Tacna, Perú. La leyenda indica los diferentes rangos de valores del Factor R y sus respectivas áreas en la subcuenca, coloreadas de acuerdo con estos valores; las áreas en rojo y tonos más oscuros (valores de 346 y 302,75) se encuentran principalmente en la parte norte de la subcuenca. Estas áreas tienen la mayor erosividad de la lluvia. Áreas con valores intermedios del Factor R (129.75, 64.875, y 34.6) se encuentran en la zona central de la subcuenca. Estas áreas presentan una erosividad moderada. Las áreas en tonos azules y verdes (valores de 4.325 y 12.975) se encuentran predominantemente en la parte sur de la subcuenca, indicando menor erosividad.

Implicaciones de la Erosión, las áreas con alto Factor R (norte de la subcuenca) son más susceptibles a la erosión debido a la alta energía de las lluvias en estas zonas.

Las áreas con Factor R bajo (sur de la subcuenca) tienen menor susceptibilidad a la erosión, lo que puede influir en las estrategias de manejo y conservación del suelo.

**Figura 4**

*Mapa del Factor R*



#### 4.1.3. Factor de erodabilidad del suelo (K)

Al realizar las ecuaciones para cada unidad de suelo de la subcuenca del río Caplina, obtenemos los siguientes resultados:

**Tabla 5**

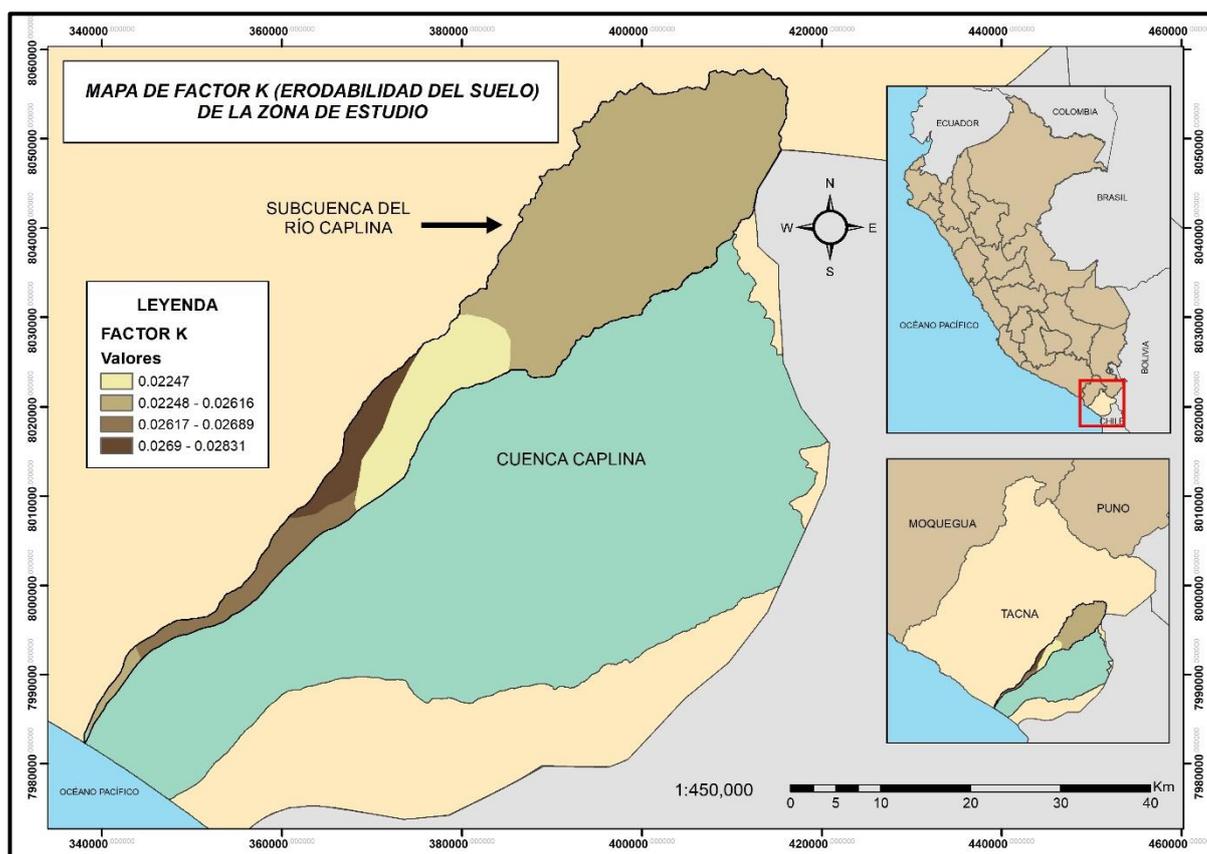
*Valores para el Factor K*

Símbolo de unidad de suelo	A	B	C	D	A*B*C*D	Factor K
I	0,28479	0,75631	0,92717	0,99424	0,19855	0,02615
RE	0,26799	0,80053	0,98743	0,96343	0,20409	0,02688
TV	0,28869	0,91290	0,83040	0,98236	0,21499	0,02831
JE	0,26176	0,78001	0,88670	0,94219	0,17058	0,02247

La figura 5 es un mapa que muestra el factor K en la subcuenca del río Caplina, cada unidad de suelo está representada por un color, que corresponde a la erosión que pueda darse por la composición de los 4 elementos que son: arena, limo, arcilla y carbón orgánico.

**Figura 5**

*Mapa del Factor K*



#### 4.1.4. Factor de longitud y pendiente del terreno (LS)

La gráfica muestra la distribución del área en kilómetros cuadrados según diferentes rangos de pendiente en la subcuenca del río Caplina. A continuación, se detallan algunos puntos clave:

- Rango de pendiente 3 - 12 % y 30 - 60 %: Estas categorías abarcan la mayor parte del área, con 213,192 km<sup>2</sup> (23,44 %) y 226,908 km<sup>2</sup> (24,95 %) respectivamente.
- Rangos de pendiente 12 - 18 %, 18 - 24 %, y 24 - 30 %: También representan una porción significativa del área, con valores entre 118,275 km<sup>2</sup> (13,01 %) y 144,661 km<sup>2</sup> (15,91 %).

- Pendiente 0 - 3 %: Representa un área menor comparativamente, con 61,758 km<sup>2</sup> (6,79 %).
- Pendientes muy altas (60 - 70 % y 70 - 100 %): Ocupan una porción mínima del área total, con 4,977 km<sup>2</sup> (0,55 %) y 2,838 km<sup>2</sup> (0,31 %) respectivamente.

**Tabla 6***Valores de la Pendiente*

Pendiente (%)	Área	
	Km <sup>2</sup>	%
0 - 3	61,758	6,791
3 - 12	213,192	23,444
12 - 18	136,745	15,038
18 - 24	144,661	15,908
24 - 30	118,275	13,007
30 - 60	226,908	24,953
60 - 70	4,977	0,547
70 - 100	2,838	0,312
Total	909,354	100,000

La figura 6 muestra la distribución del área en kilómetros cuadrados según el factor LS (Longitud y Pendiente) para diferentes rangos de pendiente. Aquí hay algunos puntos clave del análisis:

- 0 - 3 %: El área correspondiente a este rango de pendiente es la menor entre los rangos principales, con aproximadamente 61,758 km<sup>2</sup>.
- 3 - 12 %: Este rango tiene una de las mayores áreas, con 213,192 km<sup>2</sup>.
- 12 - 18 %, 18 - 24 % y 24 - 30 %: Estos rangos también tienen áreas significativas, con valores de 136,745 km<sup>2</sup>, 144,661 km<sup>2</sup> y 118,275 km<sup>2</sup> respectivamente.
- 30 - 60 %: Este es el rango con el área más grande, con 226,908 km<sup>2</sup>, lo que indica que una parte sustancial del terreno tiene pendientes pronunciadas.
- 60 - 70 % y 70 - 100 %: Estos rangos tienen las áreas más pequeñas, con 4,977 km<sup>2</sup> y 2,838 km<sup>2</sup> respectivamente.

Para realizar una interpretación de los resultados:

- Factores LS Bajos (0 - 3 % y 3 - 12 %). Estas áreas son menos susceptibles a la erosión debido a pendientes suaves y longitudes de escorrentía más cortas.
- Factores LS Moderados (12 - 18 %, 18 - 24 % y 24 - 30 %). Estas áreas tienen pendientes más pronunciadas, lo que incrementa el factor LS y, por tanto, la susceptibilidad a la erosión.

- Factores LS Altos (30 - 60 %). La mayor parte del área se encuentra en este rango, lo que sugiere una alta susceptibilidad a la erosión debido a pendientes pronunciadas y longitudes de escorrentía significativas.
- Factores LS Muy Altos (60 - 70 % y 70 - 100 %). Aunque estas áreas son pequeñas, tienen los factores LS más altos, indicando una susceptibilidad extremadamente alta a la erosión.

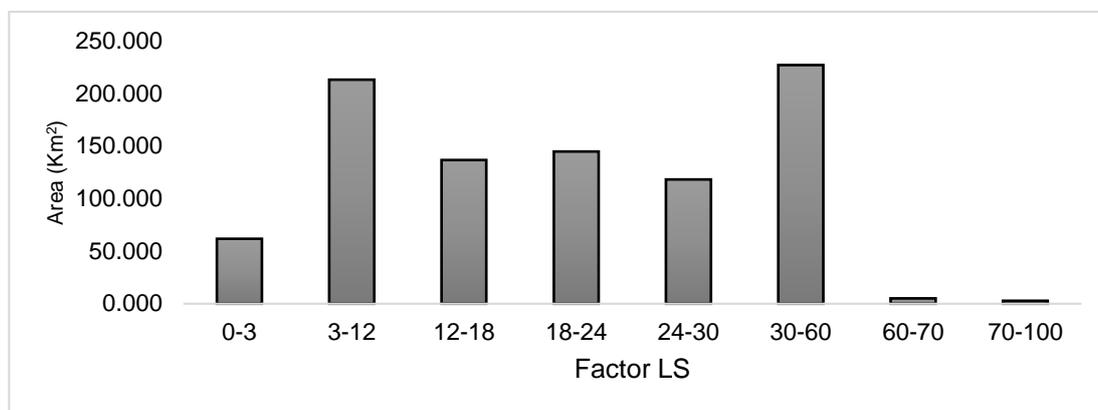
En cuanto a las Implicaciones para la Gestión de Suelos:

- Áreas con Factores LS Altos: Necesitan una atención especial en términos de prácticas de conservación del suelo y manejo de la cobertura vegetal para minimizar la erosión.
- Áreas con Factores LS Bajos y Moderados: Aunque son menos susceptibles a la erosión, aún pueden beneficiarse de prácticas de manejo adecuadas para mantener la estabilidad del suelo.

La figura destaca que una porción considerable del área estudiada tiene pendientes y longitudes de escorrentía que la hacen susceptible a la erosión. La mayor atención debe dirigirse a las áreas con factores LS altos, implementando medidas de conservación y manejo sostenible del suelo para reducir la erosión.

**Figura 6**

*Valores obtenidos del Factor LS*

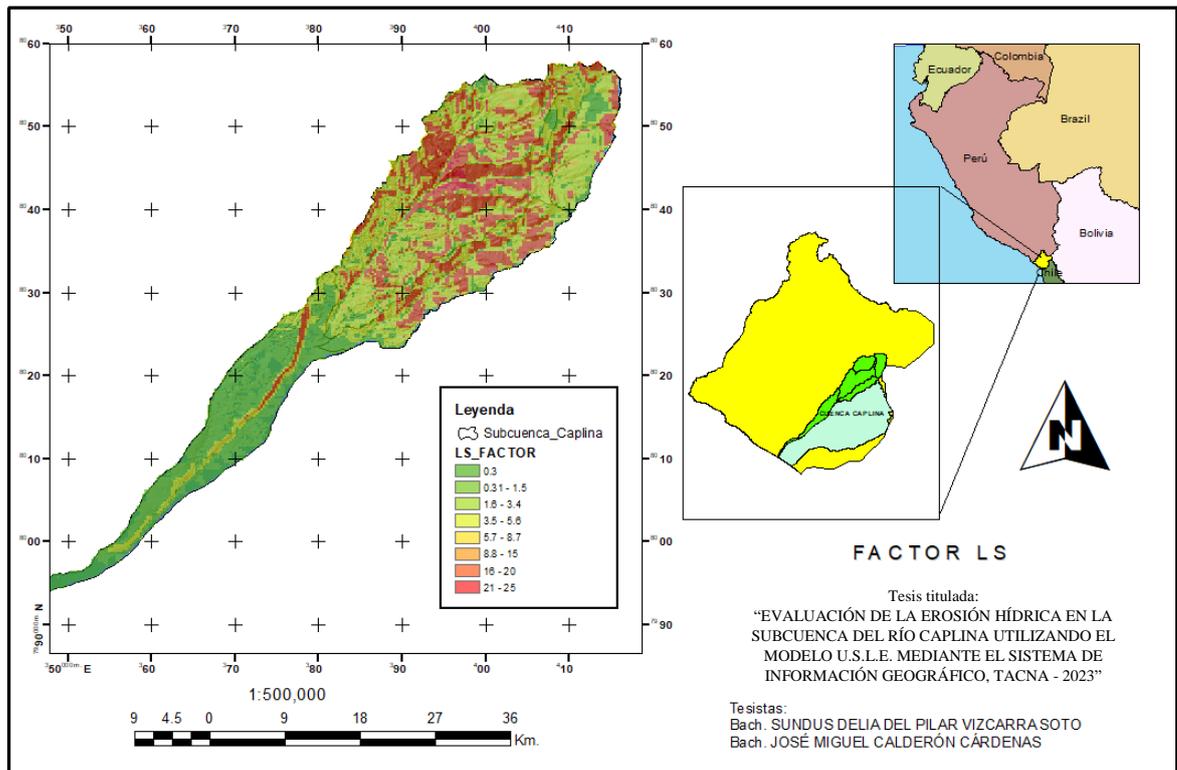


En la figura 7, nos indican variaciones en el factor LS a lo largo de la subcuenca del río Caplina, con áreas en diferentes colores que representan la severidad de la erosión hídrica esperada según la pendiente y longitud del terreno. Las áreas en rojo indican una mayor susceptibilidad a la erosión, mientras que las áreas en verde indican una menor susceptibilidad. Las zonas rojas son áreas críticas donde se espera una mayor erosión. Esto puede deberse a pendientes pronunciadas y longitudes mayores

de terreno expuesto. Las zonas verdes son más estables y menos susceptibles a la erosión, generalmente con pendientes más suaves y menores longitudes de exposición.

**Figura 7**

*Mapa del Factor LS*



#### 4.1.5. Factor de cobertura y manejo del suelo (C)

Las figuras 8, 9, 10 y 11 son resultados del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) en los diferentes años da como resultado una serie de rangos en cada mapa que se presenta a continuación:

Figura 8

Mapa de Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) - 2013

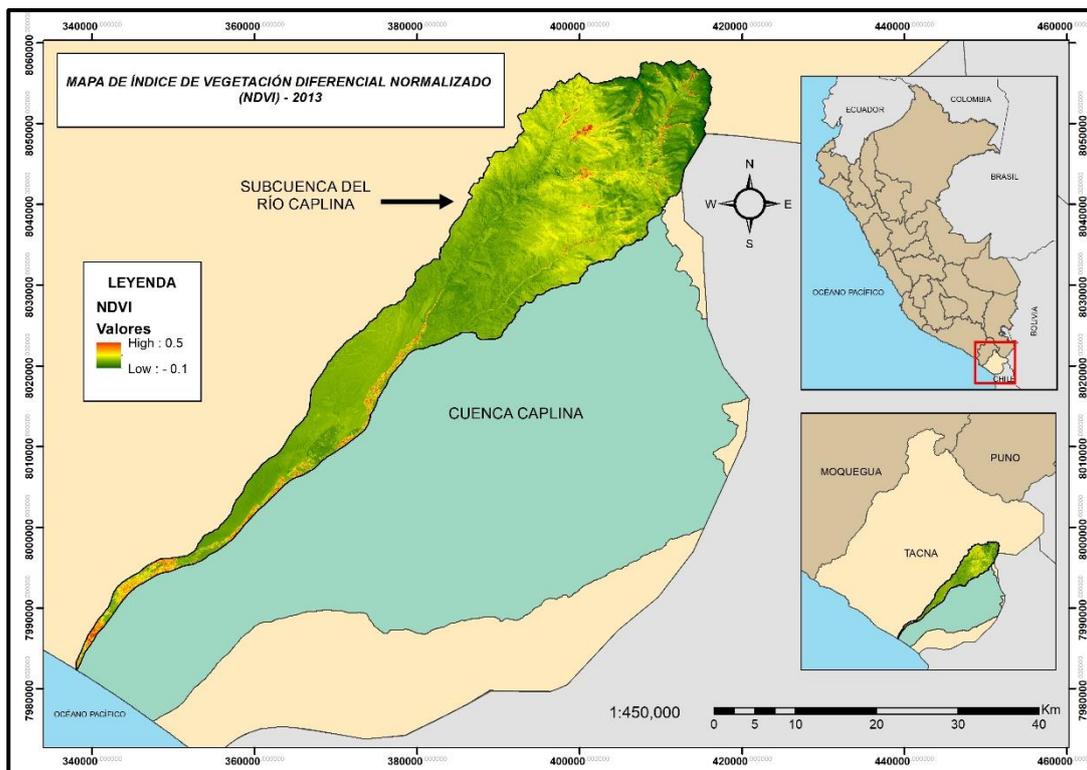


Figura 9

Mapa de Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) - 2016

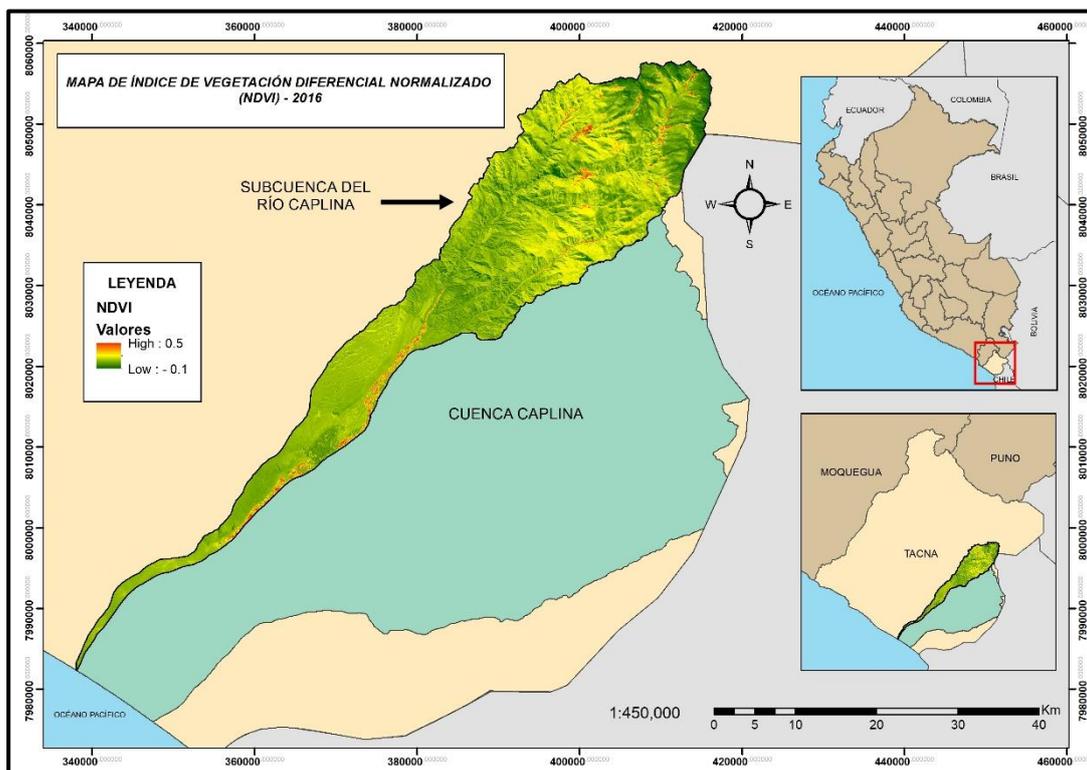


Figura 10

Mapa de Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) - 2019

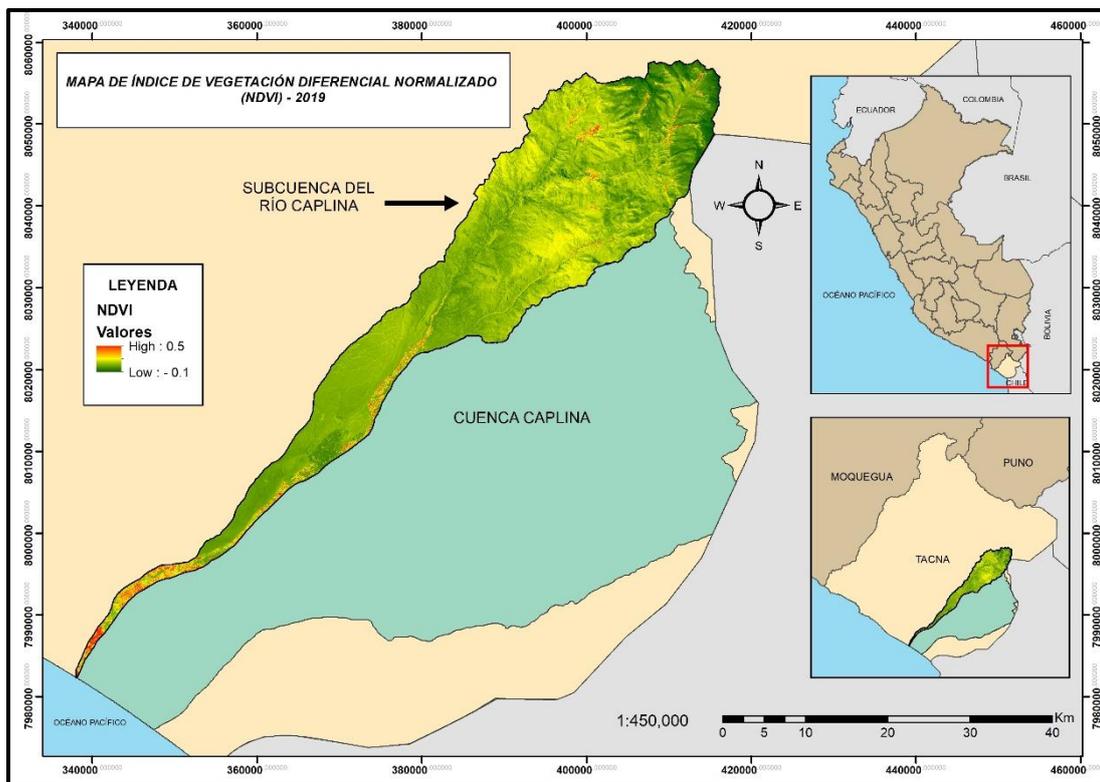
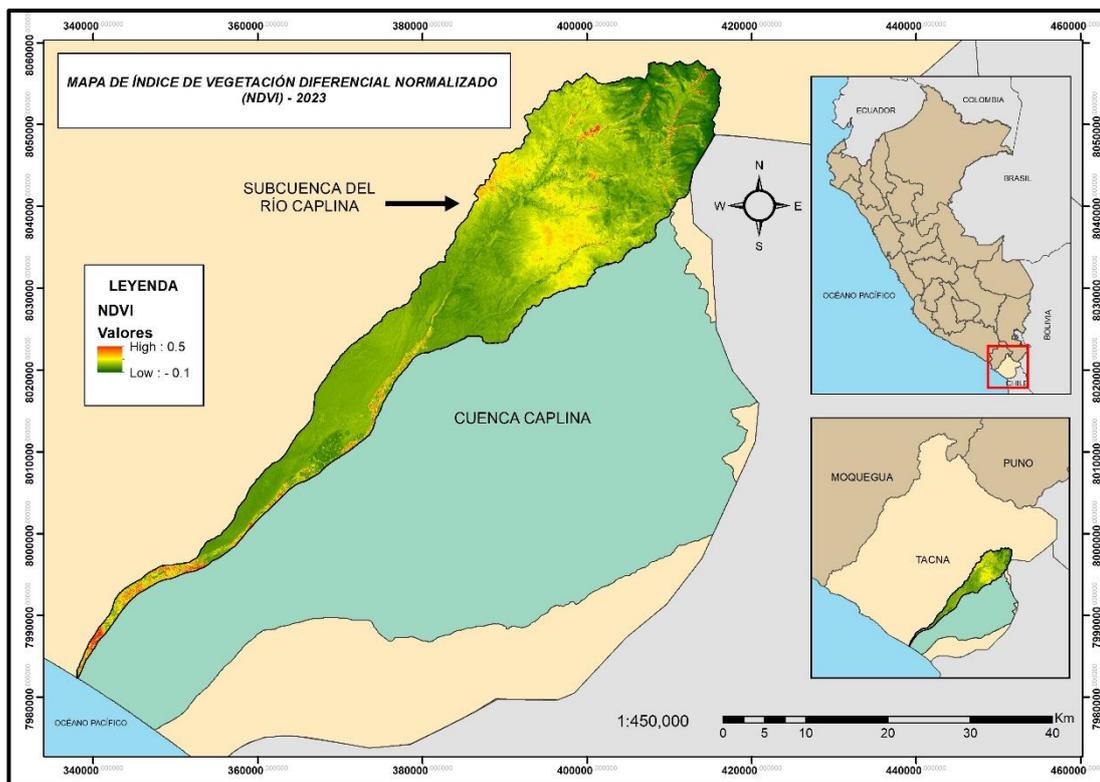


Figura 11

Mapa de Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) - 2023



En la siguiente tabla vamos a analizar cómo ha cambiado la cobertura vegetal en términos de área y porcentaje a lo largo de los años 2013, 2016, 2019 y 2023 para diferentes tipos de cobertura.

- Matorrales y Pastizales (0,2 - 0,3). La superficie de matorrales y pastizales ha mostrado un aumento desde 2013 (0,374 km<sup>2</sup>, 0,041 %) hasta 2023 (0,448 Km<sup>2</sup>, 0,049 %). Hubo una disminución en 2016 (0,061 km<sup>2</sup>, 0,007 %) y un ligero aumento en 2019 (0,114 km<sup>2</sup>, 0,013 %).
- Cultivos y Pastoreo (0,3 - 0,4). El área dedicada a cultivos y pastoreo ha fluctuado, con una disminución significativa en 2016 (5,455 km<sup>2</sup>, 0,597 %) comparado con 2013 (15,321 km<sup>2</sup>, 1,677 %). En 2019, hubo una recuperación (11,570 km<sup>2</sup>, 1,266 %) y un aumento en 2023 (17,538 km<sup>2</sup>, 1,919 %).
- Cultivo y Arbustales (0,4 – 0,5). Esta categoría ha permanecido relativamente estable en términos de área, representando la mayor parte de la superficie total en todos los años. Se observa una ligera variación, pero sigue siendo constante alrededor del 96,9 % al 97,5 % del área total.
- Vegetación Escasa (0,5 - 0,6). La vegetación escasa mostró un aumento significativo en 2016 (27,544 km<sup>2</sup>, 3,014 %) en comparación con 2013 (12,875 km<sup>2</sup>, 1,409 %). Sin embargo, esta superficie disminuyó en 2019 (11,609 km<sup>2</sup>, 1,271 %) y 2023 (10,182 km<sup>2</sup>, 1,114 %).

**Tabla 7**

*Valores del Factor C en Diferentes Años*

Cobertura Vegetal	Descripción	2013 Área		2016 Área		2019 Área		2023 Área	
		Km <sup>2</sup>	%						
0,2 - 0,3	Matorrales y Pastizales	0,374	0,041	0,061	0,007	0,114	0,013	0,448	0,049
0,3 - 0,4	Cultivos y Pastoreo	15,321	1,677	5,455	0,597	11,570	1,266	17,538	1,919
0,4 - 0,5	Cultivo y Arbustales	885,129	96,873	880,661	96,382	890,400	97,451	885,518	96,917
0,5 - 0,6	Vegetación Escasa	12,875	1,409	27,544	3,014	11,609	1,271	10,182	1,114
Total		913,698	100,000	913,721	100,000	913,693	100,000	913,685	100,000

En la figura 12 visualizamos estos cambios en la cobertura vegetal a lo largo de los años 2013, 2016, 2019 y 2023. A continuación, se presentan algunas observaciones clave:

- Matorrales y Pastizales (0,2 - 0,3). El área de matorrales y pastizales ha aumentado en 2023 en comparación con los años anteriores, aunque sigue

siendo una porción muy pequeña del área total. Hubo una disminución significativa en 2016, seguida de un aumento en 2019 y un mayor incremento en 2023.

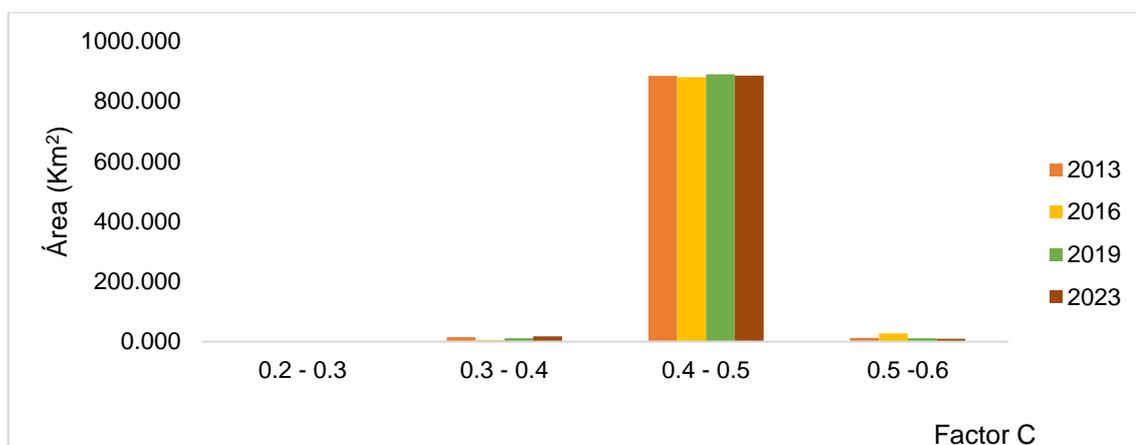
- Cultivos y Pastoreo (0,3 - 0,4). El área dedicada a cultivos y pastoreo ha mostrado fluctuaciones a lo largo de los años. Disminuyó notablemente en 2016, pero se ha recuperado y aumentado en 2019 y 2023.
- Cultivo y Arbustales (0,4 - 0,5). Esta categoría representa la mayor parte del área en todos los años, con pequeñas fluctuaciones. La superficie se ha mantenido relativamente constante alrededor del 96,9 % al 97,5 % del área total.
- Vegetación Escasa (0,5 - 0,6). Hubo un aumento significativo en el área de vegetación escasa en 2016, pero esta superficie disminuyó en 2019 y 2023.

Que implicancias trae esto:

- Estabilidad de Cultivo y Arbustales. La cobertura de cultivo y arbustales ha permanecido constante y dominante, lo que indica una estabilidad en esta categoría de uso del suelo.
- Fluctuaciones en Matorrales y Pastizales y Cultivos y Pastoreo. Las áreas de matorrales y pastizales y cultivos y pastoreo han mostrado variaciones, lo que puede reflejar cambios en las prácticas agrícolas, manejo del suelo, o condiciones climáticas.
- Vegetación Escasa. El aumento en 2016 y la disminución posterior pueden indicar cambios en la gestión de tierras o en las condiciones ambientales que afectan la vegetación.

**Figura 12**

*Valores obtenidos del Factor C*

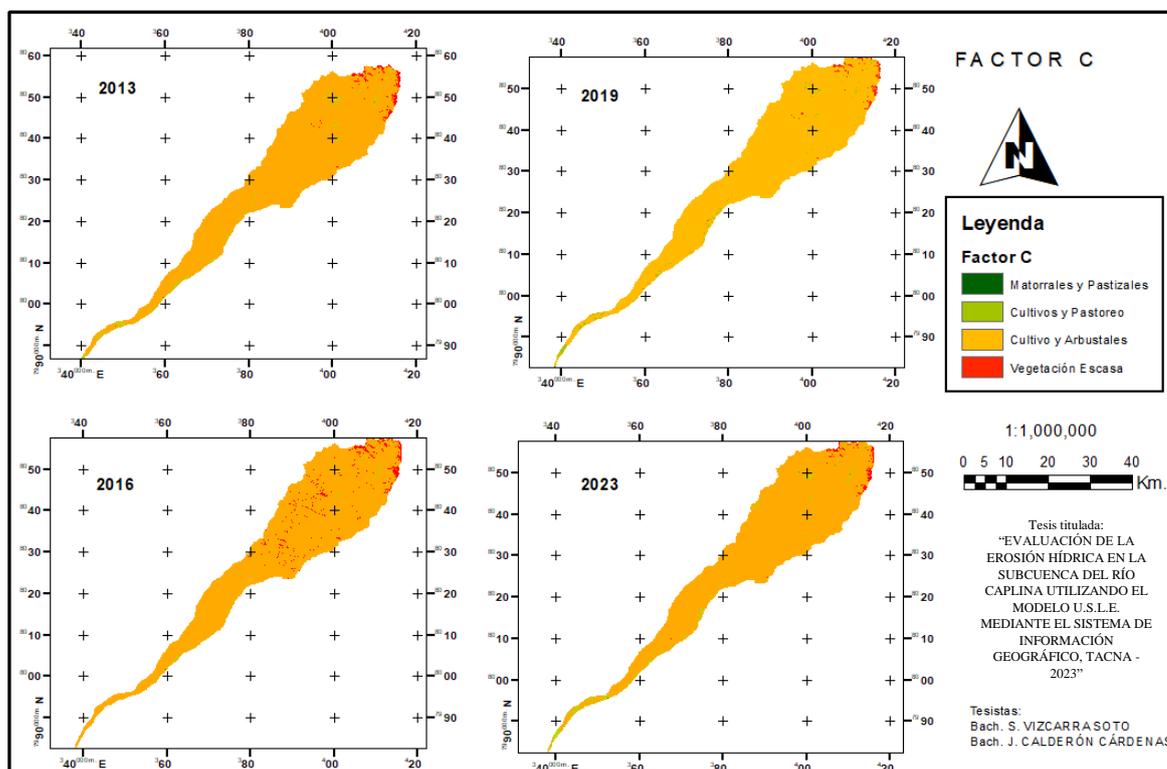


La figura 13 muestra la distribución del Factor C (cobertura y manejo de cultivo) en la subcuenca del río Caplina para los años 2013, 2016, 2019 y 2023.

- En el año 2013. La mayor parte del área está cubierta por cultivos y arbustales (naranja), con pequeñas áreas de vegetación escasa (rojo) y matorrales y pastizales (verde). Los cultivos y pastoreo (amarillo) también están presentes, pero en menor proporción.
- En el año 2016. Se observa un aumento significativo en las áreas de vegetación escasa (rojo) en comparación con 2013, especialmente en la parte norte de la subcuenca. La cobertura de cultivos y arbustales (naranja) sigue siendo dominante, pero hay una disminución en la proporción en algunas áreas.
- En el año 2019. La cobertura de cultivos y arbustales (naranja) vuelve a aumentar, cubriendo la mayoría del área. Las áreas de vegetación escasa (rojo) disminuyen en comparación con 2016. Los cultivos y pastoreo (amarillo) y matorrales y pastizales (verde) se mantienen estables.
- En el año 2023. Se observa una distribución similar a la de 2019, con una cobertura dominante de cultivos y arbustales (naranja). Las áreas de vegetación escasa (rojo) son menores en comparación con 2016, pero ligeramente mayores que en 2013. Los cultivos y pastoreo (amarillo) y matorrales y pastizales (verde) tienen una distribución limitada pero constante.

**Figura 13**

*Mapa del Factor C*



#### 4.2. Erosión hídrica en la subcuenca Caplina

En cuanto a la erosión hídrica se realizó la siguiente tabla junto a la figura 14 que es una comparación de resultados, y nos sirvió para realizar el análisis de la erosión para los años 2013, 2016, 2019 y 2023.

- Nula o ligera. Representa la mayor parte del área total en todos los años, con un aumento ligero del 55,847 % en 2013 al 56,195 % en 2023. Muestra una pequeña fluctuación en 2016 y 2019, pero mantiene una tendencia general de estabilidad.
- Moderada. Es la segunda clase de erosión más común, aunque su proporción ha disminuido ligeramente del 38,799 % en 2013 al 38,152 % en 2023. Hay una disminución continua en el área afectada por erosión moderada a lo largo de los años.
- Alta: Representa la menor proporción del área total, pero ha mostrado un ligero aumento del 5,354 % en 2013 al 5,653 % en 2023. Este aumento indica un empeoramiento en la severidad de la erosión en ciertas áreas.

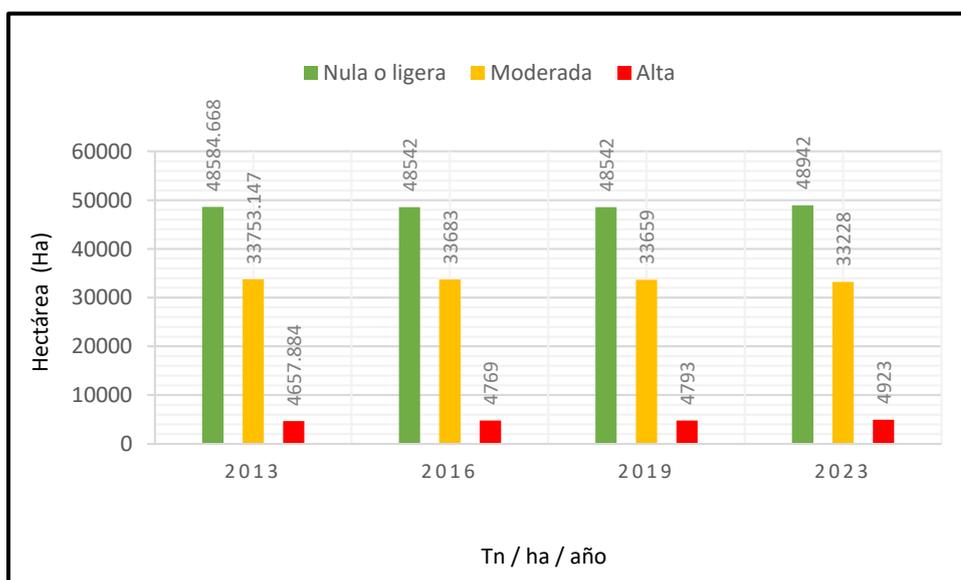
**Tabla 8**

*Resultados de Clases de Erosión*

Clase de erosión	2013		2016		2019		2023	
	Tn/ha/año	%	Tn/ha/año	%	Tn/ha/año	%	Tn/ha/año	%
Nula o ligera	48584,668	55,847	48542	55,799	48542	55,799	48942	56,195
Moderada	33753,147	38,799	33683	38,718	33659	38,691	33228	38,152
Alta	4657,884	5,354	4769	5,482	4793	5,510	4923	5,653
Total	86995,698	100	86995	100	86995	100,000	87093	100,000

**Figura 14**

*Comparación de resultados de clases de erosión*



Haciendo un análisis multitemporal en la clasificación podemos decir que:

- Clase Nula o ligera. Es la clase de erosión más predominante en todos los años, con un ligero aumento desde el 55,847 % en 2013 al 56,195 % en 2023. Esta clase muestra estabilidad, con un aumento gradual en el área cubierta por erosión nula o ligera.
- Clase Moderada. Representa la segunda clase de erosión más común, con una tendencia a la disminución a lo largo de los años, pasando del 38,799 % en 2013 al 38,152 % en 2023. Hay una reducción constante en el área afectada por erosión moderada, lo cual puede indicar mejoras en la gestión del suelo o cambios en las condiciones ambientales.
- Clase Alta. Esta clase tiene la menor proporción de área total, pero muestra un incremento del 5,354 % en 2013 al 5,653 % en 2023. El aumento en el área de erosión alta sugiere que ciertas áreas están experimentando una erosión más severa, lo que puede requerir atención y medidas de control más rigurosas. Esto implica que la mayoría del área está bajo esta categoría, lo que indica que una gran parte de la subcuenca está bien protegida o menos susceptible a la erosión.
- Disminución de Erosión Moderada. La reducción en esta categoría sugiere que las medidas de conservación del suelo podrían estar siendo efectivas, o que hay una transición hacia condiciones de erosión más severas en algunas áreas.
- Aumento en Erosión Alta. Aunque sigue siendo una pequeña proporción del área total, el incremento en esta categoría es preocupante y sugiere la necesidad de implementar estrategias de mitigación más agresivas en las áreas afectadas.

En la figura 15, se observa un mapa que muestra la erosión del suelo en la subcuenca del río Caplina para el año 2013, la mayor parte del área de la subcuenca está clasificada como de erosión nula o ligera. Estas áreas se encuentran predominantemente en las partes centrales y sureñas de la subcuenca.

La erosión moderada se encuentra en áreas específicas dispersas a lo largo de la subcuenca. Estas áreas parecen estar más concentradas en las partes noreste y algunas partes del centro de la subcuenca.

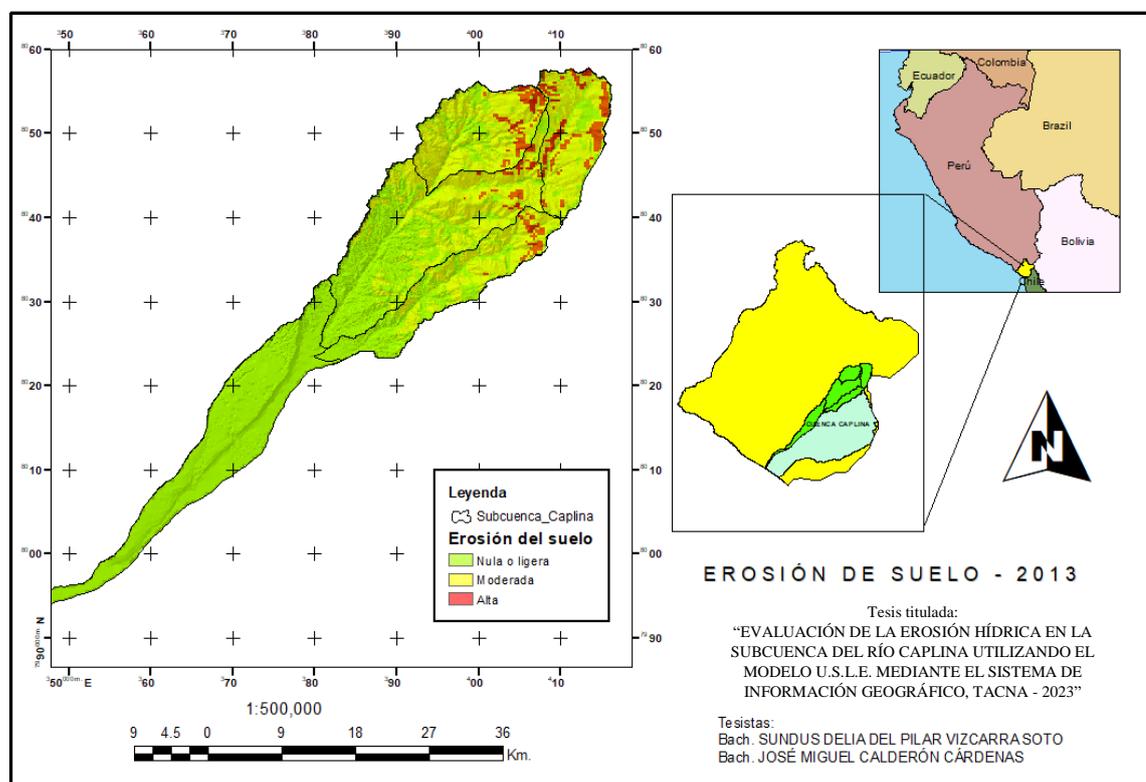
Las áreas con erosión alta están principalmente localizadas en el noreste de la subcuenca. Estas áreas son las más afectadas y representan una menor proporción en comparación con las áreas de erosión nula o ligera y moderada.

Si realizamos una comparación con Datos de Erosión, podemos decir que la erosión Nula o ligera presenta un área de 48584,668 ha (55,847 %), la zona moderada

tiene un valor de 33753,147 ha (38,799 %) y la erosión alta un área de 4657,884 ha (5,354 %).

**Figura 15**

*Mapa de la Erosión de suelo en el año 2013*



En la figura 16, el mapa para el año 2016 muestra la erosión del suelo en la subcuenca del río Caplina. Al igual que en el mapa anterior de 2013, se clasifica la erosión en tres categorías: nula o ligera, moderada y alta.

Si realizamos una comparación con Datos de Erosión, podemos decir que la erosión Nula o ligera presenta un área de 48542 Tn/ha/año (55,799 %), la zona moderada tiene un valor de 33683 Tn/ha/año (38,718 %) y la erosión alta un área de 4769Tn/ha/año (5,482 %).

La mayor parte del área de la subcuenca sigue clasificada como de erosión nula o ligera. Estas áreas continúan siendo predominantemente centrales y sureñas en la subcuenca.

La erosión moderada se encuentra en áreas específicas, similar a 2013, pero parece haber un ligero aumento en algunas regiones. Estas áreas se concentran principalmente en las partes noreste y algunas áreas del centro de la subcuenca.

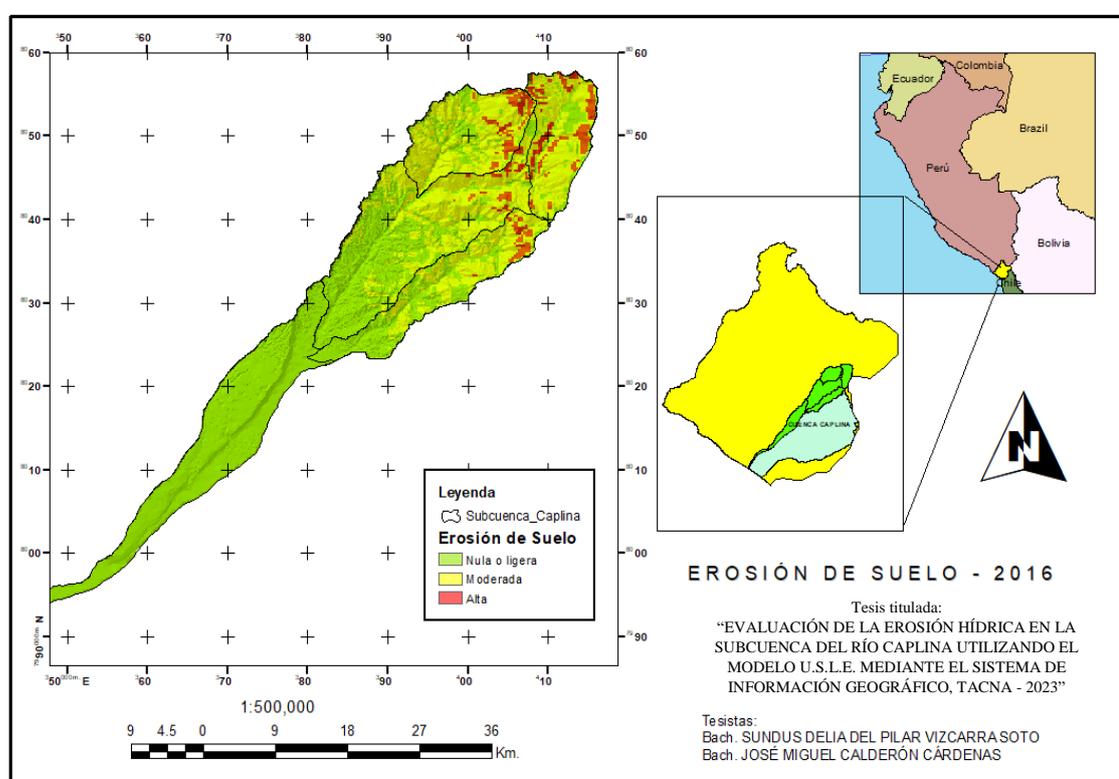
Las áreas con erosión alta están localizadas principalmente en el noreste de la subcuenca, similar a 2013. Hay una ligera expansión de las áreas rojas, indicando un aumento en la erosión severa.

El mapa de 2016 refleja los datos proporcionados, mostrando una ligera expansión de las áreas de erosión alta (rojo).

Las áreas de erosión moderada (amarillo) y nula o ligera (verde) se mantienen relativamente estables con pequeñas variaciones.

**Figura 16**

*Mapa de la Erosión de suelo en el año 2016*



En la figura 17, para el año 2019, la mayor parte del área de la subcuenca sigue clasificada como de erosión nula o ligera. Estas áreas continúan siendo predominantes en las partes centrales y sureñas de la subcuenca.

La erosión moderada sigue presente en áreas específicas, similar a los años anteriores, con algunas variaciones. Estas áreas se concentran principalmente en las partes noreste y algunas áreas del centro de la subcuenca.

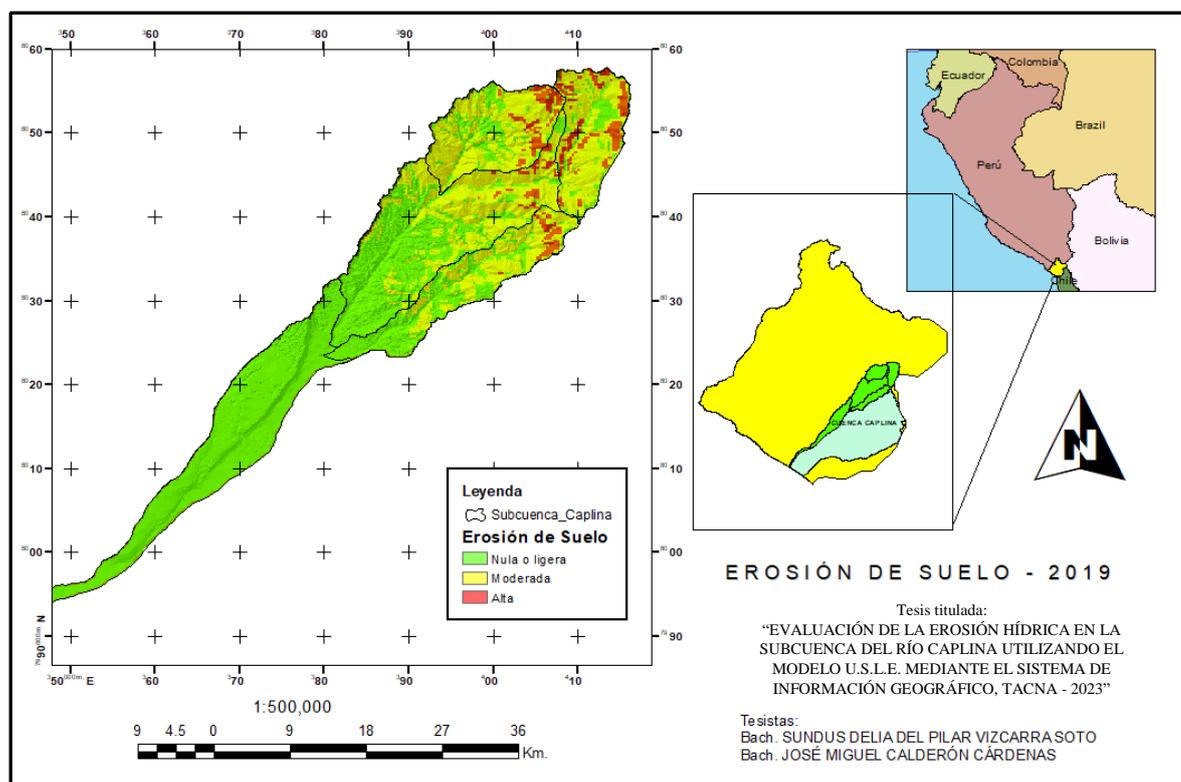
Las áreas con erosión alta están localizadas principalmente en el noreste de la subcuenca, similar a los años anteriores.

Si realizamos una comparación con Datos de Erosión, podemos decir que la erosión Nula o ligera presenta un área de 48542 Tn/ha/año (55,799 %), la zona

moderada tiene un valor de 33659 Tn/ha/año (38,691 %) y la erosión alta un área de 4793 Tn/ha/año (5,510 %).

**Figura 17**

*Mapa de la Erosión de suelo en el año 2019*



Finalmente, en la figura 18, para el año 2023 se tiene que la mayor parte del área de la subcuenca sigue clasificada como de erosión nula o ligera. Estas áreas continúan siendo predominantes en las partes centrales y sureñas de la subcuenca.

La erosión moderada sigue presente en áreas específicas, similar a los años anteriores, con algunas variaciones. Estas áreas se concentran principalmente en las partes noreste y algunas áreas del centro de la subcuenca.

Las áreas con erosión alta están localizadas principalmente en el noreste de la subcuenca, similar a los años anteriores. Hay una ligera expansión de las áreas rojas en comparación con 2019, indicando un aumento en la erosión severa.

El mapa de 2023 refleja los datos proporcionados, mostrando una ligera expansión de las áreas de erosión alta (rojo) en comparación con 2019.

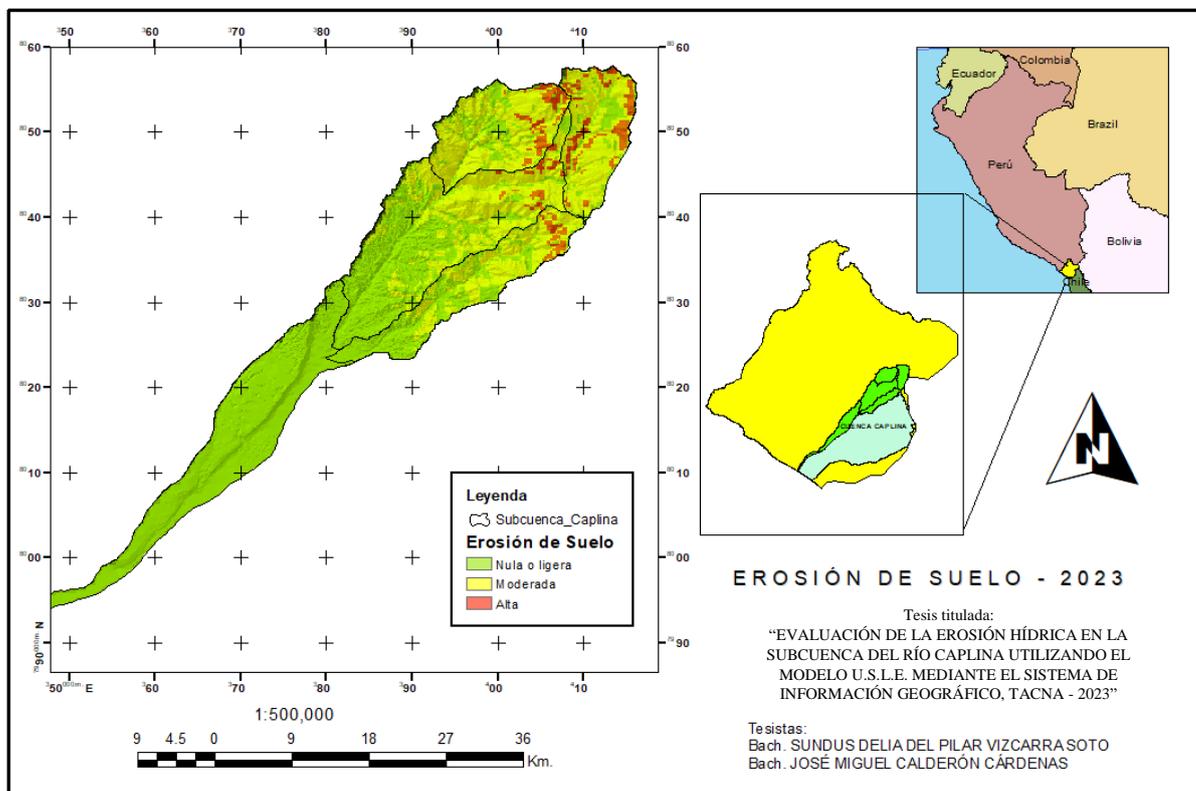
Las áreas de erosión moderada (amarillo) y nula o ligera (verde) se mantienen relativamente estables con pequeñas variaciones.

Y, por último, realizando una comparación con Datos de Erosión, podemos decir que la erosión Nula o ligera presenta un área de 48942 Tn/ha/año (56,195 %), la zona

moderada tiene un valor de 33228 Tn/ha/año (38,152 %) y la erosión alta un área de 4923 Tn/ha/año (5,653 %).

**Figura 18**

*Mapa de la Erosión de suelo en el año 2023*



### 4.3. Recomendaciones y medidas de mitigación

Para abordar la erosión del suelo en la subcuenca del río Caplina, se deben implementar estrategias y medidas de mitigación específicas que respondan a las áreas con diferentes niveles de erosión. Basándonos en los resultados obtenidos, aquí hay algunas recomendaciones y medidas de mitigación para cada categoría de erosión:

#### 4.3.1. Recomendaciones Generales

- **Monitoreo Continuo:** Establecer un sistema de monitoreo regular para evaluar la efectividad de las medidas implementadas y ajustar las estrategias según sea necesario.
- **Educación y Capacitación:** Realizar programas de educación y capacitación para agricultores y comunidades locales sobre prácticas sostenibles de manejo del suelo.

#### 4.3.2. Medidas de Mitigación para Áreas con Erosión Nula o Ligera (Verde)

- **Mantenimiento de la Vegetación.** Preservar la cobertura vegetal existente para proteger el suelo de la erosión.
- **Agricultura de Conservación.** Promover prácticas de agricultura de conservación como el uso de cultivos de cobertura, labranza mínima y rotación de cultivos para mantener la estructura del suelo.
- **Control de Escorrentía.** Implementar estructuras sencillas para el control de la escorrentía, como zanjas de infiltración y barreras vegetales.

#### 4.3.3. Medidas de Mitigación para Áreas con Erosión Moderada (Amarillo)

- **Terrazas Agrícolas.** Construir terrazas para reducir la velocidad del agua y aumentar la infiltración, disminuyendo la erosión en pendientes moderadas.
- **Barreras Vivas.** Plantar setos y franjas de vegetación perenne a lo largo de las curvas de nivel para reducir la escorrentía superficial y evitar la erosión.
- **Reforestación y Agroforestería.** Fomentar la reforestación y la agroforestería para mejorar la cobertura del suelo y aumentar la estabilidad del mismo.

#### 4.3.4. Medidas de Mitigación para Áreas con Erosión Alta (Rojo)

- **Construcción de Diques y Presas de Retención.** Establecer diques y presas de retención en las áreas más afectadas para controlar la escorrentía y reducir la erosión severa.
- **Revegetación con Especies Nativas.** Realizar proyectos de revegetación con especies nativas que tienen raíces profundas y pueden estabilizar el suelo.
- **Control de Torrentes.** Implementar técnicas de control de torrentes, como la construcción de gaviones y muros de contención, para estabilizar las pendientes y reducir la erosión.
- **Rotación de Pastoreo.** Implementar sistemas de rotación de pastoreo para evitar el sobrepastoreo y permitir la recuperación de la vegetación.

#### 4.3.5. Recomendaciones Específicas

- **Evaluación del Suelo y Agua.** Realizar evaluaciones periódicas del suelo y del agua para detectar cambios en la calidad y en la estabilidad del suelo.
- **Planificación del Uso de la Tierra.** Desarrollar y aplicar planes de uso de la tierra que incluyan zonas de conservación y áreas de producción agrícola sostenible.

- **Incentivos para Prácticas Sostenibles.** Proveer incentivos económicos y técnicos para los agricultores que adopten prácticas sostenibles de manejo del suelo.
- **Colaboración Interinstitucional.** Fomentar la colaboración entre diferentes instituciones gubernamentales, ONG y comunidades locales para implementar y supervisar las medidas de mitigación.

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

### 5.1. Discusión de Resultados con otros autores

#### 5.1.1. Aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para calcular la pérdida de suelo promedio anual en diferentes áreas de la subcuenca del río Caplina

En la investigación de Ramos y Sánchez (2023) sobre la microcuenca del río Puela en el Cantón Penipe, se estimó la pérdida de suelo mediante el uso de SIG y el modelo USLE, determinando que gran parte de la zona presenta erosión debido a varios factores. Los suelos fueron clasificados en franco arenoso, franco arenoso arcilloso y franco limoso. La combinación de los factores K, LS, P, R, C y las herramientas SIG indicó una pérdida de suelo leve o nula en la mayor parte de la zona de estudio.

Nuestra investigación utiliza el modelo USLE y herramientas geoespaciales para generar mapas temáticos y evaluar la erosión hídrica en una subcuenca más grande. Se identificaron áreas con erosión nula o ligera en su mayoría, pero con un aumento leve en las áreas de erosión alta desde 2013 hasta 2023, concentrándose principalmente en el noreste de la subcuenca.

Ambas investigaciones utilizan el modelo USLE y herramientas geoespaciales para evaluar la erosión hídrica y determinan la magnitud y distribución de la erosión, proporcionando una base para medidas de conservación. La diferencia es que nuestra investigación abarca una subcuenca más grande con un análisis temporal (2013-2023), mientras que la de Puela se centra en una microcuenca específica. Nuestra investigación propone medidas de mitigación detalladas según las categorías de erosión, mientras que la de Puela se enfoca en la relación entre los factores de erosión y la clasificación del suelo.

#### 5.1.2. Generar mapas temáticos y modelos geoespaciales que representen la distribución espacial de la erosión hídrica en la subcuenca, identificando las áreas más vulnerables y prioritarias para la conservación del suelo

La investigación de Jaramillo (2015) se realizó en la subcuenca del río Portoviejo en Manabí, con el objetivo de mapear las áreas afectadas por erosión hídrica utilizando SIG y el modelo USLE. Evaluaron factores como la erosividad, erodabilidad del suelo, pendiente, cobertura del suelo y prácticas de conservación. Los resultados mostraron los siguientes registros: de 0 - 5 (ton/ha\*año), con un área de 74,67% (erosión muy baja); de 5 - 10 (ton/ha\*año), con un área de 22,51 % (erosión baja); de 10 - 25

(ton/ha\*año), con un área de 2.26% (erosión leve); de 25 - 50 (ton/ha\*año), con un área de 0,24 % (erosión moderada); de 50 - 100 (ton/ha\*año), con un área de 0,11 % (erosión grave); de 100 - 200 (ton/ha\*año), con un área de 0,21 % (erosión muy grave).

En nuestra investigación se generaron mapas temáticos y modelos geoespaciales que representan la distribución espacial de la erosión hídrica en la subcuenca, identificando las áreas más vulnerables y prioritarias para la conservación del suelo. Se identificaron erosión nula o ligera, es la más predominante en todos los años, con un ligero aumento desde el 55,847 % en 2013 al 56,195 % en 2023, erosión moderada que representa la segunda clase de erosión más común, con una tendencia a la disminución a lo largo de los años, pasando del 38,799 % en 2013 al 38,152 % en 2023 y erosión alta que es la de menor proporción de área total, pero muestra un incremento del 5,354 % en 2013 al 5,653 % en 2023.

Ambas investigaciones utilizan SIG para evaluar la erosión hídrica y crear mapas detallados. La diferencia principal es que nuestra investigación abarca un período de 10 años (2013 - 2023), mientras que la de Jaramillo se enfoca en un solo año.

### **5.1.3. Proponer recomendaciones y medidas de mitigación específicas basadas en los resultados obtenidos, con el objetivo de reducir la erosión hídrica y mejorar la sostenibilidad del uso del suelo en la subcuenca del río Caplina en Tacna**

La investigación de Herrera y Herrera (2009) evaluó la pérdida de suelo en el municipio San José de los Remates durante la temporada de lluvias de 2006 utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Encontraron que la mayor pérdida de suelo ocurrió en áreas de bosque autóctono, mientras que en las áreas de grama natural la erosión fue menor. Recomiendan realizar estudios a mediano y largo plazo para entender mejor la erosión hídrica y sus posibles impactos.

En nuestra investigación, proponemos medidas de mitigación como terrazas agrícolas, barreras vivas, revegetación con especies nativas y sistemas de control de torrentes para áreas con alta erosión. También promovemos prácticas agrícolas sostenibles.

Ambas investigaciones usan el modelo USLE para evaluar la erosión hídrica y buscan reducirla y mejorar la sostenibilidad del uso del suelo. Ambas identifican el grado de erosión y proponen recomendaciones para mitigar sus impactos. La diferencia principal es que nuestra investigación en la subcuenca del río Caplina abarca un análisis temporal de 2013 a 2023, mientras que la de San José de los Remates se centró en la temporada de lluvias de 2006.

## CONCLUSIONES

La evaluación de la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina mediante la USLE y herramientas geoespaciales ha permitido identificar áreas críticas con diferentes niveles de erosión. Los resultados han demostrado la efectividad de estas metodologías para la detección precisa y la caracterización de la erosión, proporcionando una base sólida para la planificación de medidas de conservación del suelo y mitigación en la región.

La aplicación de la USLE ha permitido calcular la pérdida de suelo promedio anual en la subcuenca del río Caplina. Los resultados indican que las áreas con pendientes pronunciadas y cobertura vegetal escasa son las más afectadas por la erosión. Se ha observado un incremento gradual en la erosión alta en ciertas áreas desde 2013 hasta 2023, lo que subraya la necesidad de intervenciones específicas para controlar la pérdida de suelo en estas regiones.

Los mapas temáticos y modelos geoespaciales generados han proporcionado una representación visual clara de la distribución espacial de la erosión hídrica en la subcuenca. Estos mapas han identificado áreas vulnerables con erosión alta en el noreste de la subcuenca y han destacado la predominancia de erosión nula o ligera en las partes centrales y sureñas. Estas herramientas son cruciales para priorizar las áreas que requieren medidas de conservación del suelo y mitigación de la erosión.

Las recomendaciones y medidas de mitigación propuestas incluyen la implementación de terrazas agrícolas, barreras vivas, revegetación con especies nativas, y sistemas de control de torrentes para áreas con erosión alta. Para áreas con erosión moderada, se sugiere el uso de prácticas de agricultura de conservación y el establecimiento de barreras vegetales. Las áreas con erosión nula o ligera deben mantener la cobertura vegetal existente y adoptar técnicas de manejo sostenible del suelo. Estas medidas están diseñadas para reducir la erosión hídrica, mejorar la sostenibilidad del uso del suelo y proteger los recursos naturales en la subcuenca del río Caplina.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda al Gobierno Regional de Tacna, Ministerio del Ambiente, Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Autoridad Nacional del Agua, municipalidades locales y organizaciones académicas realizar evaluaciones periódicas del suelo y del agua para detectar cambios en la calidad y en la estabilidad del suelo.

Implementar planes de uso de la tierra que incluyan zonas de conservación y áreas de producción agrícola sostenible.

Promover la zonificación de actividades según la capacidad de uso del suelo y su vulnerabilidad a la erosión, para ello, se puede involucrar entidades como el Instituto Nacional de Defensa Civil para garantizar una gestión adecuada del territorio.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Alarcón Linares, C. A., & Sánchez Altamirano, B. (2023). *Predicción de la erosión hídrica del suelo aplicando el método USLE en la subcuenca río Negro, Rioja, San Martín*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. Repositorio institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14095/2101>
- Alvarez Ticllasuca, A. (2019). *Análisis temporal del nivel de la erosión hidrica de la subcuenca del río Ichu 2013 Y 2017* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio institucional. Obtenido de <https://repositorio.unh.edu.pe/items/5f12bfcf-72ca-414c-8fee-360243117b22>
- Arias Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2023). *Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. Caso de estudio: cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador*. Investigaciones Geograficas. doi:<https://doi.org/10.14198/INGEO.22390>
- Arias Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2023). *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]. investigaciones geograficas. doi:<https://doi.org/10.14198/INGEO.22390>
- Castro Villarreal, J. A., Cabrera Rodríguez, J. A., & Villarreal Núñez, J. E. (2022). *Pérdida de suelo evaluada por el método USLE en la subcuenca del río Estibaná, Panamá*. Revista agronómica, 71-4 p 369-376. doi:<https://doi.org/10.15446/acag.v71n4.108071>
- Cortez, A., & Flores, M. (2021). Impacto de la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina. Journal of Environmental Studies.
- Del Aguila Angulo, M. (2011). *Estimación del factor de erosividad (R) y determinación de la tasa de erosión hídrica mediante Usle y Musle de la Microcuenca La Alcantarilla - Las Palmas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14292/420>
- Gobierno Regional de Tacna. (2023). Aprobación del Plan de Ordenamiento Territorial del Gobierno Regional de Tacna.
- Herrera Castro, E., & Herrera López, D. (2009). *Evaluación de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo: Municipio San José de los Remates*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio institucional. Obtenido de <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/2076>

- Jaramillo Veliz, J. (2015). *Estudio del riesgo por erosión hídrica del suelo utilizando el modelo U.S.L.E. mediante herramientas S.I.G. aplicando en la subcuenca río Portoviejo, provincia de Manabí. [Tesis de maestría, Universidad Central del Ecuador].* Repositorio institucional. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/4235>
- Jaya Santillan, J. (2023). *Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE.* FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo, 15(1), 26–39. doi:<https://doi.org/10.29166/revfig.v15i1.4269>
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519-539.
- Laqui Calizaya, F. (2019). *Estimación de la erosión y transporte potencial de sedimentos hasta el eje de la futura represa Callazas en sub-cuenca del río Callazas en la región Tacna-Perú [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].* Repositorio académico UPC. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/626410>
- Mejía Marcacuzco, J., Pino Vargas, E., Guevara Pérez, E., Olivos Alvites, V., & Condori Ventura, M. (2021). *Predicción espacial de la erosión del suelo en zonas áridas medianteteledetección. Estudio de caso: Quebrada del Diablo, Tacna, Perú.* *Revista Ingeniería UC*, Vol. 28, 252 – 264.
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1294-1298.
- Morales, H., Rodríguez, L., & Chávez, P. (2018). Aplicación del modelo USLE en la gestión de cuencas en Perú. *Revista de Geografía y Ordenamiento Territorial.*
- Morante Vargas, S., & Gonzales Carrasco, D. (2019). *Elaboración de Mapas de Erosión en la Cuenca del Río Perené [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].* Repositorio académico UPC. doi:<https://doi.org/10.19083/tesis/625315>
- Moreno Roldan, H. L. (2017). *Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el método USLE y haciendo uso del SIG en la subcuenca del río Olleros - distrito de Olleros periodo 2015 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo].* Repositorio institucional. Obtenido de <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1993>
- Pimentel, D. (2006). Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8(1), 119-137.

- Peña Laureano, F., Cotrina Chávez, G., & Acosta Pereira, H. (2000). *Hidrogeología de la cuenca del río Caplina - Región Tacna. Boletín N°01 Serie H*. Obtenido de <http://www.rlc.fao.org/es/tierra/pdf/gestio/tema32.doc>
- Ramos Arboleda, B. A., & Sánchez Pullas, E. S. (2023). *Estimación de la pérdida de suelo utilizando el modelo USLE y herramientas SIG, en la microcuenca del río Puela, cantón Penipe. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]*. Repositorio institucional. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10459>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Department of Agriculture.
- Rojas Vilches, O., & Martínez Reyes, C. (2011). *Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales*. Revista Universitaria de Geografía, 20( ), 83-116. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383239103004>
- Rouse, J., Hass, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Paper- A20*. NASA Technical Reports Server. Obtenido de <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. The USDA Agricultural Handbook No. 537*. 58 p.

**ANEXOS**

### Anexo 1. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p><b>Problema general</b></p> <p>¿Cuál es la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina, Tacna, durante el año 2023, y cómo se pueden identificar eficazmente las áreas más afectadas?</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina utilizando el modelo U.S.L.E. mediante el Sistema de Información Geográfico, Tacna – 2023</p>	<p><b>Hipótesis general</b></p> <p>Se espera que la evaluación de la erosión hídrica utilizando el Modelo Universal de Pérdida de Suelo (USLE) en la subcuenca del río Caplina, Tacna, revele patrones significativos de erosión, identificando áreas críticas con altas tasas de pérdida de suelo.</p>	<p><b>Variable</b></p> <p>- Erosión Hídrica</p>	<p><b>Tipo de investigación:</b></p> <p>- Cualitativo</p> <p><b>Nivel de investigación:</b></p> <p>- Descriptivo</p>
<p><b>Problemas específicos</b></p> <p>a. ¿Cuál es la pérdida de suelo promedio anual en diferentes áreas de la subcuenca del río Caplina calculada mediante la USLE?</p> <p>b. ¿Cuáles son las áreas más vulnerables a la erosión hídrica en la subcuenca del río Caplina según los resultados de la USLE y el análisis geoespacial?</p> <p>c. ¿Qué medidas de mitigación específicas se pueden proponer para reducir la erosión hídrica en las áreas identificadas como más vulnerables en la subcuenca del río Caplina?</p>	<p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>a. Aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para calcular la pérdida de suelo promedio anual en diferentes áreas de la subcuenca del río Caplina</p> <p>b. Generar mapas temáticos y modelos geoespaciales que representen la distribución espacial de la erosión hídrica en la subcuenca, identificando las áreas más vulnerables y prioritarias para la conservación del suelo</p> <p>c. Proponer recomendaciones y medidas de mitigación específicas basadas en los resultados obtenidos, con el objetivo de reducir la erosión hídrica y mejorar la sostenibilidad del uso del suelo en la subcuenca del río Caplina en Tacna</p>		<p><b>Indicador</b></p> <p>- Precipitación - Textura - Pendiente - Cobertura Vegetal - Prácticas de protección</p>	<p><b>Diseño de investigación</b></p> <p>- No experimental</p>