

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



TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA MAGNITUD DE LA EROSIÓN HÍDRICA
MEDIANTE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE
SUELO (USLE) EN LA CUENCA LOCUMBA, TACNA - 2024”**

PARA OPTAR:
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

Bach. MARÍA MILAGROS MONTALICO MAMANI
Bach. ALEJANDRA VANESSA ROJAS ANCULLE

TACNA – PERÚ

2026

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

TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA MAGNITUD DE LA EROSIÓN HÍDRICA
MEDIANTE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE
SUELO (USLE) EN LA CUENCA LOCUMBA, TACNA - 2024”**

Tesis sustentada y aprobada el 27 de mayo de 2026; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : Dr. RICHARD SABINO LAZO RAMOS

SECRETARIO : Mtro. DIEGO YGOR CHOCANO ROSSI

VOCAL : Dr. ALEXANDER NICOLÁS VILACANQUI ALARCÓN

ASESOR : Ing. CARMEN ROSA ROMÁN ARCE

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotras, Maria Montalico Mamani y Alejandra Rojas Anculle, egresadas, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna identificadas con DNI 77679223 Y 71728275 respectivamente, así como Carmen Rosa Román Arce con DNI 42316863; declaramos en calidad de autor y asesor que:

1. Somos los autores de la tesis titulada: *“Evaluación de la magnitud de la erosión hídrica mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) en la cuenca Locumba, Tacna - 2024”*, 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, habiéndose 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.

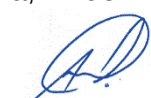
En virtud de lo expuesto, asumimos frente a La Universidad toda responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos asociados a la obra.

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, 27 de mayo del 2026


Maria Milagros Montalico Mamani
DNI: 77679223


Alejandra Vannesa Rojas Anculle
DNI: 71728275


Carmen Rosa Román Arce
DNI: 42316863

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres quienes con esfuerzo y dedicación supieron sacarme adelante, por recordarme que cada esfuerzo trae consigo recompensas, este es el fruto de su esfuerzo la herencia de su valentía, de su perseverancia, constancia y gratitud.

También a mis seres queridos a quienes hoy ya no están, pero siguen vivos en cada decisión que tomo y en cada logro que alcanzo, por ser mis eternos guías, cuya luz sigue acompañándome en este camino llamado vida. A mi asesora, por su gran dedicación, por ser mi guía en este camino académico, por enseñarme el verdadero significado de vocación, pues su orientación no solo fortaleció este trabajo sino mi manera de ver el mundo con paciencia, constancia y amor por el conocimiento.

María Milagros Montalico Mamani

Dedico este logro a Dios, por acompañarme en cada paso, darme fortaleza y abrir caminos aun cuando yo no podía verlos. Dedico también este trabajo, lleno de sentimientos profundos, a mi madre, a ti, que fuiste mi refugio y mi impulso, la voz que nunca dejó de creer en mí. Tu entrega, tu amor y tu inmensa fortaleza son la raíz de todo lo que hoy he podido alcanzar. A mi padre y a mi hermano Derly, quienes acompañaron mis cansancios y celebraron cada uno de mis avances, incluso los más pequeños, como si fueran grandes triunfos. A mis tíos, primos y a toda mi familia, por cada palabra, consejo o abrazo dejó una huella que me ayudó a continuar. A los seres queridos que ya no están, pero viven en mi memoria, a esas presencias que se volvieron luz y siguen guiando mis pasos. A mis mascotas, compañeras incondicionales que hicieron mis días más suaves con su afecto; y especialmente a mi Botitas, cuya ternura dejó una huella eterna en mi corazón.

Alejandra Vannesa Rojas Anculle

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a Dios, por brindarnos vida, salud y sabiduría, por guiarnos en cada etapa de nuestras vidas.

Agradecemos también a nuestros padres, por su apoyo incondicional, por su fe en nosotras incluso en los días más difíciles. A nuestros hermanos y familiares, por brindarnos palabras de aliento, comprensión, paciencia.

Extendemos nuestro especial agradecimiento a nuestra asesora, la Ing. Carmen Román, por su guía constante, su dedicación y la claridad con la que supo orientarnos en cada etapa de nuestra formación académica.

Agradecemos también a nuestros docentes, por su enseñanza, su apoyo académico y por contribuir a nuestra formación profesional. Cada uno de ellos, con sus conocimientos y exigencia, aportando de manera significativa a nuestro crecimiento académico y personal.

A nuestros grandes amigos, quienes compartieron con nosotras noches de estudio, dudas constantes, anécdotas y risas que hicieron más llevaderos nuestros días en la época universitaria. A nuestra casa de estudios, nuestro segundo hogar la Universidad Privada de Tacna, por acogernos entre sus aulas y ser el espacio donde se nos permitió crecer académica y personalmente, gracias por brindarnos las herramientas necesarias. A todos aquellos que, de una u otra manera, aportaron con su tiempo, sus consejos, su apoyo y su presencia, gracias por ser parte de este camino.

María Milagros Montalico Mamani
Alejandra Vannesa Rojas Anculle

ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADOS	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.1. Descripción del problema'	3
1.2. Formulación del problema.....	4
1.2.1. Problema general	4
1.2.2. Problemas específicos.....	4
1.3. Justificación e importancia	5
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. Hipótesis	7
1.5.1. Hipótesis general	7
1.5.2. Hipótesis específicas	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes de la investigación.....	8
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	8
2.1.2. Antecedentes Nacionales	10
2.1.3. Antecedentes Locales	11
2.2. Bases teóricas	12

2.2.1. Erosión Hídrica	12
2.2.2. Metodología USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo).....	14
2.3. Definición de términos.....	17
2.3.1. Cuenca hidrográfica.....	17
2.3.2. Distribución espacial de la erosión	18
2.3.3. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)	18
2.3.4. Factor de erosividad (R)	19
2.3.5. Factor de erodabilidad del suelo (K)	19
2.3.6. Factor topográfico (LS)	19
2.3.7. Factor de cobertura vegetal (C)	20
2.3.8. Factor de prácticas de conservación (P).....	20
2.3.9. Erosión Hídrica	20
2.3.10. Magnitud de pérdida de suelo	20
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	21
3.1. Diseño de la investigación	22
3.2. Acciones y actividades.....	22
3.2.1. Factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal	22
3.2.2. Tasa de pérdida de suelo, aplicando USLE	23
3.2.3. Áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica	24
3.3. Materiales y/o instrumentos	24
3.4. Población de estudio.....	25
3.5. Operacionalización de variables	27
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis estadístico.....	28
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	30
4.1. Factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal	30
4.1.1. Información climática (Factor R)	30
4.1.2. Información edáfica (Factor K).....	32
4.1.3. Información topográfica (Factor LS).....	35
4.1.4. Uso y cobertura del suelo (Factor C)	37

4.1.5. Prácticas de manejo agrícola (Factor P)	44
4.2. Tasa de pérdida de suelo aplicando USLE	44
4.3. Áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica	47
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	49
5.1. Caracterización de los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal	49
5.2. Cálculo de la tasa de pérdida de suelo aplicando el modelo USLE	49
5.3. Identificación de las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica	50
CONCLUSIONES	51
RECOMENDACIONES	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXOS	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)	17
Tabla 2. Operacionalización de variables de investigación	28
Tabla 3. Distribución del área por clases del Factor R en la cuenca Locumba	31
Tabla 4. Parámetros edáficos y valores del Factor K calculados para las unidades de suelo	32
Tabla 5. Distribución del área por unidades de suelo y valores del Factor K	33
Tabla 6. Distribución del área por rangos de pendiente para el cálculo del Factor LS36	
Tabla 7. Reclasificación de NDVI.....	38
Tabla 8. Comparativa NDVI — Áreas estimadas por clase (Km ²)	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la Zona de estudio.....	27
Figura 2. Distribución espacial del Factor R (erosividad de la lluvia)	30
Figura 3. Distribución espacial del Factor K (erodabilidad del suelo)	34
Figura 4. Distribución espacial del Factor LS (longitud y pendiente del terreno).....	37
Figura 5. NDVI año 2013	39
Figura 6. NDVI año 2024	40
Figura 7. Distribución espacial del Factor C derivado del NDVI para el año 2013	43
Figura 8. Distribución espacial del Factor C derivado del NDVI para el año 2024	44
Figura 9. Distribución espacial de la pérdida de suelo para el año 2013	45
Figura 10. Mapa de distribución espacial de la pérdida de suelo para el año 2024	46

RESUMEN

La investigación evaluó la magnitud de la erosión hídrica en la cuenca Locumba, ubicada en la región Tacna, mediante la aplicación del modelo Universal Soil Loss Equation integrado con análisis espacial y técnicas de teledetección, con el propósito de caracterizar los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo, así como calcular la pérdida potencial de suelo e identificar las áreas con mayor susceptibilidad; para ello se emplearon datos climáticos que permitieron estimar el factor de erosividad con valores entre cuatro mil trescientos veinticinco y trescientos cuarenta y seis mil, mapas edáficos que generaron valores de erodabilidad entre 0,015 y 0,020, modelos digitales de elevación que definieron pendientes desde 0 hasta 60 por ciento y un índice de cobertura vegetal con valores mínimos y máximos de 0,185 y 0,727 en el año 2024, cuya integración permitió obtener un mapa de pérdida de suelo con predominancia de niveles muy bajos y bajos en la mayor parte del territorio, mientras que los valores moderados, altos y muy altos se concentraron en el sector noreste, donde la topografía abrupta y la reducción de la cobertura vegetal incrementaron la susceptibilidad; asimismo, las clases de erosión oscilaron desde menos de 1 tonelada por hectárea al año hasta más de 40 toneladas por hectárea al año, evidenciando una relación directa entre pendiente, erodabilidad y disminución del índice de vegetación, concluyéndose que el modelo representó adecuadamente la distribución espacial del potencial erosivo y que las áreas críticas identificadas constituyen zonas prioritarias para la aplicación de prácticas de conservación de suelos y el desarrollo de estrategias de manejo sostenible del territorio.

Palabras clave: Cobertura vegetal; degradación del suelo; erosión hídrica; USLE.

ABSTRACT

The research assessed the magnitude of water erosion in the Locumba watershed, located in the Tacna region, through the application of the Universal Soil Loss Equation model integrated with spatial analysis and remote sensing techniques, with the aim of characterizing climatic, edaphic, topographic, vegetation cover, and management factors, as well as estimating potential soil loss and identifying areas with higher susceptibility. For this purpose, climatic data were used to estimate the erosivity factor with values ranging from four thousand three hundred twenty-five to three hundred forty-six thousand; soil maps generated erodibility values between 0,015 and 0,020; digital elevation models defined slopes from 0 to 60 percent; and a vegetation cover index showed minimum and maximum values of 0,185 and 0,727 in 2024. The integration of these factors made it possible to produce a soil loss map showing a predominance of very low and low levels across most of the territory, while moderate, high, and very high values were concentrated in the northeastern sector, where steep topography and reduced vegetation cover increased susceptibility. Additionally, erosion classes ranged from less than 1 ton per hectare per year to more than 40 tons per hectare per year, demonstrating a direct relationship between slope, erodibility, and the decrease in vegetation index. It was concluded that the model adequately represented the spatial distribution of erosive potential and that the identified critical areas constitute priority zones for implementing soil conservation practices and developing sustainable land management strategies.

Keywords: Vegetation cover; Soil degradation; Water erosion; USLE.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica constituye uno de los principales procesos de degradación del suelo en cuencas hidrográficas, especialmente en territorios áridos y semiáridos donde la cobertura vegetal es limitada, las precipitaciones presentan alta variabilidad y la topografía favorece el escurrimiento superficial. Este fenómeno ocasiona la pérdida progresiva de la capa superficial del suelo, reduce su capacidad productiva, incrementa el transporte de sedimentos y afecta la sostenibilidad de los ecosistemas y de las actividades humanas asociadas al uso del territorio. En la región Tacna, la cuenca Locumba representa un espacio de importancia ambiental, agrícola e hidrológica; sin embargo, presenta condiciones naturales y antrópicas que pueden favorecer la ocurrencia de procesos erosivos.

El problema de investigación se centra en la limitada información cuantitativa y espacial actualizada sobre la magnitud de la erosión hídrica en la cuenca Locumba. Si bien existen estudios relacionados con la estimación de la erosión del suelo mediante modelos empíricos y herramientas de Sistemas de Información Geográfica, aún se requiere contar con una evaluación específica que integre factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo agrícola en esta cuenca. La falta de información hace que se complique la identificación de zonas críticas y limitar la toma de decisiones en cuanto a la conservación del suelo y la planificación sostenible del territorio.

Los antecedentes recientes demuestran que la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo constituye una herramienta útil para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica, especialmente cuando se integra con variables ambientales mediante Sistemas de Información Geográfica. Investigaciones como las de Ke-xin y Ying-xian (2021), Zaragoza (2021), Pighini et al. (2022), Alarcón y Sánchez (2023), Chili (2024), Nuñez (2024), y Calderón y Vizcarra (2024), coinciden en señalar que la erosión hídrica está condicionada principalmente por la pendiente del terreno, la cobertura vegetal, las características edáficas y la erosividad de la lluvia. En este contexto, la aplicación del modelo USLE se presenta como una alternativa metodológica pertinente para estimar la pérdida potencial de suelo y representar espacialmente las zonas con mayor susceptibilidad a procesos erosivos.

La importancia de la investigación se aborda en cuanto a una problemática asociada a la pérdida del suelo por procesos de erosión hídrica. También permite

identificar las áreas con mayor susceptibilidad a la erosión, generando información útil para la conservación del suelo y la protección de los recursos naturales de la cuenca.

La investigación contribuye a disminuir el vacío de información existente sobre la dinámica erosiva en la cuenca Locumba, aplicando herramientas de modelamiento espacial y análisis geográfico. Desde la perspectiva territorial, los resultados obtenidos podrán servir como base técnica para orientar acciones de manejo sostenible, priorizar zonas críticas y planificar medidas de conservación que favorezcan una gestión más adecuada del territorio.

También se orienta a determinar la magnitud y distribución espacial de la erosión hídrica en la cuenca Locumba, Tacna, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Como respuesta tentativa al problema de investigación, se plantea la hipótesis de que la erosión hídrica en la cuenca Locumba presenta una magnitud significativa y una distribución espacial diferenciada, determinada principalmente por la variación de los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo agrícola considerados en la ecuación USLE.

Por ello, el objetivo general de la investigación fue evaluar la magnitud de la erosión hídrica en la cuenca Locumba, Tacna, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Para alcanzar este propósito, se plantearon como objetivos específicos caracterizar los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo que influyen en la erosión hídrica; calcular la tasa de pérdida de suelo en las diferentes zonas de la cuenca mediante la USLE; e identificar las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica a partir de la integración espacial de los factores considerados en el modelo.

Finalmente, la investigación se desarrolló mediante un enfoque geoespacial, integrando información climática, edáfica, topográfica y satelital en un entorno SIG. La aplicación del modelo USLE permitió estimar la pérdida potencial de suelo en toneladas por hectárea por año, así como generar mapas temáticos que representan la distribución espacial de la erosión hídrica en la cuenca Locumba, contribuyendo con información técnica para la gestión sostenible del recurso suelo.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

En las últimas décadas se ha observado un incremento de la erosión hídrica, situación que afecta la estabilidad del territorio y compromete la sostenibilidad de los recursos naturales. La erosión hídrica, entendida como el desprendimiento y transporte de partículas del suelo por acción del agua, representa una de las principales formas de degradación del suelo en regiones áridas y semiáridas, como las que caracterizan al sur del Perú (Morgan, 2005). Sus efectos repercuten directamente en la calidad del suelo, la productividad agrícola, la funcionalidad de los ecosistemas y la seguridad hídrica de las comunidades asentadas en la cuenca.

La erosión hídrica en la cuenca Locumba responde a la interacción de factores naturales y antrópicos que, en conjunto, intensifican la pérdida de suelo. Entre los factores naturales destacan las precipitaciones estacionales, intensas y de distribución irregular, propias de la región, las cuales generan incrementos repentinos de la escorrentía superficial. Esta condición se ve agravada por la topografía accidentada de la cuenca, donde predominan pendientes pronunciadas que favorecen el arrastre de partículas del suelo hacia las zonas medias y bajas. De esta manera, las características climáticas y geomorfológicas del territorio incrementan su susceptibilidad natural frente a los procesos erosivos, incluso en áreas con cobertura vegetal moderada.

Las actividades humanas han contribuido a acelerar y agravar esta problemática. Las modificaciones en el uso y cobertura del suelo, como la ampliación de áreas agrícolas, la reducción de la vegetación natural y el sobrepastoreo, han disminuido la capacidad del suelo para protegerse frente al impacto directo de la lluvia. Del mismo modo, las prácticas agrícolas inadecuadas, la labranza convencional y la limitada implementación de medidas de conservación incrementan la fragilidad del territorio. Como consecuencia, se generan pérdidas de la capa fértil del suelo, azolvamiento de ríos y canales, deterioro de la infraestructura hidráulica y afectación de la productividad agrícola. Estos impactos no solo comprometen el equilibrio ambiental de la cuenca, sino también la economía local y la seguridad alimentaria de las comunidades que dependen del recurso suelo.

La cuenca Locumba presenta una limitada disponibilidad de estudios actualizados, cuantitativos y espacialmente detallados sobre la magnitud de la erosión hídrica. Esta carencia dificulta la identificación de áreas críticas, el reconocimiento de

los factores que inciden con mayor fuerza en la pérdida de suelo y el diseño de estrategias efectivas de manejo sostenible. En consecuencia, la falta de información técnica constituye una brecha científica y operativa que limita la capacidad de las autoridades, instituciones y actores locales para implementar medidas preventivas y correctivas adecuadas.

Entonces resulta necesario aplicar herramientas metodológicas que permitan estimar la pérdida potencial de suelo y comprender los factores que condicionan su distribución espacial. En este sentido, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) se presenta como un modelo pertinente, debido a que integra variables climáticas, edáficas, topográficas, de cobertura vegetal y de prácticas de manejo, representadas mediante los factores R, K, LS, C y P. Su aplicación permite cuantificar la erosión hídrica de manera sistemática y espacializada, facilitando la delimitación de zonas con mayor susceptibilidad erosiva y la generación de información útil para la planificación territorial.

El problema central de la investigación se orienta a la necesidad de evaluar cuantitativa y espacialmente la magnitud de la erosión hídrica en la cuenca Locumba, así como los factores que condicionan su ocurrencia. Esta evaluación permitirá generar una base técnica y científica para orientar medidas de mitigación, conservación del suelo y manejo sostenible del territorio, contribuyendo así a una mejor toma de decisiones ambientales en la cuenca.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es la magnitud y distribución espacial de la erosión hídrica en la cuenca Locumba, Tacna, y de qué manera puede ser estimada mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)?

1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Qué factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura y de manejo agrícola influyen en la erosión hídrica en la cuenca Locumba?
- b. ¿Cuál es la tasa de pérdida de suelo en las distintas zonas de la cuenca Locumba, estimada mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)?

- c. ¿Qué áreas presentan mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca Locumba, a partir de la integración de los factores considerados en la USLE?

1.3. Justificación e importancia

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación del suelo más importantes en las regiones áridas y semiáridas, ya que afecta directamente la productividad agrícola, la calidad ambiental y el bienestar público. En la cuenca de Locumba, este fenómeno se ha intensificado en los últimos años como resultado de la interacción de factores naturales y la actividad humana. Entre los factores naturales destacan las precipitaciones irregulares, la escorrentía superficial y el desnivel del terreno; mientras que de los factores antrópicos destaca la expansión de la agricultura sin prácticas de manejo adecuadas, la reducción de la cobertura vegetal y el uso inadecuado del suelo. A pesar de la importancia de este problema, la información disponible sobre la extensión y distribución geográfica de la erosión hídrica en la cuenca es aún limitada, lo que dificulta planificar medidas de conservación, mitigación y gestión sostenible de la zona.

En el aspecto ambiental, la investigación resulta importante porque permitirá identificar las zonas con mayor vulnerabilidad frente a la erosión hídrica, aportando información relevante para la protección del suelo, el agua y la biodiversidad. La pérdida progresiva de suelo disminuye su fertilidad, incrementa el riesgo de desertificación y puede favorecer la obstrucción de ríos, canales e infraestructura hidráulica, lo que afecta la estabilidad de los ecosistemas locales. En este contexto, la estimación de la pérdida de suelo mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) proporcionará una base técnica para orientar prácticas de conservación, acciones de restauración de áreas degradadas y estrategias de gestión sostenible de los recursos naturales.

En cuanto a lo social, el estudio es importante porque la erosión hídrica afecta directamente la seguridad alimentaria y la calidad de vida en comunidades cuyas actividades diarias dependen de la agricultura y los recursos hídricos. La erosión de la capa superior del suelo fértil afecta los rendimientos, mientras que la sedimentación en ríos y canales puede amenazar la disponibilidad y calidad del agua para consumo y riego. La identificación de áreas críticas permitirá generar información técnica útil para apoyar la toma de decisiones, fortalecer prácticas sustentables y promover una gestión más efectiva del área por parte de residentes y autoridades locales.

Desde la vista económica, la pérdida de suelo es un problema importante, ya que puede reducir la productividad agrícola, aumentar el costo de mantenimiento de

canales e infraestructura hidráulica y reducir la competitividad de las actividades productivas.

El conocimiento de la extensión y distribución espacial de la erosión permitirá priorizar inversiones en la conservación del suelo, optimizar el uso de los recursos disponibles y reducir los gastos relacionados con la obstrucción de canales, la degradación de tierras agrícolas y la pérdida de capacidad de producción. En este sentido, los resultados de la investigación pueden servir como apoyo para que las instituciones públicas y privadas tomen decisiones más eficientes y sostenibles. Finalmente, desde un enfoque científico, el estudio resulta fundamental ya que ayuda a reducir la falta de información existente sobre la extensión, distribución espacial y condicionantes de la erosión hídrica en la cuenca de Locumba. El uso de USLE utilizando herramientas de análisis espacial y sistemas de información geográfica permitirá el desarrollo de un modelo actualizado y metodológicamente consistente para estimar la pérdida potencial de suelo. Asimismo, el estudio generará evidencia empírica útil para futuras investigaciones en zonas áridas del sur del Perú, fortaleciendo el conocimiento sobre procesos de erosión, manejo de suelos y modelaciones ambientales utilizadas en la planificación espacial.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la magnitud de la erosión hídrica en la cuenca Locumba, Tacna, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Caracterizar los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo agrícola que influyen en la erosión hídrica en la cuenca Locumba.
- b. Calcular la tasa de pérdida de suelo en las diferentes zonas de la cuenca Locumba mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).
- c. Identificar las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca Locumba a partir de la integración espacial de los factores considerados en la USLE.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

La erosión hídrica en la cuenca Locumba, Tacna, presenta una magnitud diferenciada espacialmente, determinada por la interacción de los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo considerados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

1.5.2. Hipótesis específicas

- a. Los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo presentan variaciones espaciales dentro de la cuenca Locumba, influyendo en la magnitud de la erosión hídrica estimada mediante la USLE.
- b. La tasa de pérdida de suelo en la cuenca Locumba presenta diferentes niveles de erosión, expresados en toneladas por hectárea por año, como resultado de la integración de los factores R, K, LS, C y P del modelo USLE.
- c. Las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca Locumba se localizan principalmente en zonas con mayor pendiente, menor cobertura vegetal y condiciones edáficas más vulnerables a la pérdida de suelo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

La investigación realizada por Ke-xin y Ying-xian (2021), investigó por qué la erosión del suelo constituye la forma más prevalente de degradación de este. Utilizando tecnologías de análisis inverso, superposición de datos de detección remota, el modelo USLE y SIG, se simuló y calculó la erosión hídrica del suelo en el Parque Geológico Mundial Fangshan, China, durante los años 2011, 2012 y 2013. Además, se examinaron los cambios espacio temporales dinámicos de la erosión y se identificaron los puntos clave para su control en el área de estudio. Los hallazgos revelaron que la mayor intensidad de erosión se registró en pendientes pronunciadas de entre 25° y 35° ya altitudes de 400 a 800 metros. Asimismo, se encontró que el módulo promedio de erosión y el volumen total de suelo erosionado en 2012 fueron significativamente superiores a los de 2011 y 2013, lo que sugiere que los desastres naturales influyeron en los niveles de erosión durante ese año.

Zaragoza (2021), estudio la relación entre la cobertura del suelo y la erosión hídrica en Puebla por un periodo de 30 años en dos microcuencas. Para ello, se empleó como metodología principal la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) junto con análisis espaciales mediante el SIG. Los resultados mostraron que, la microcuenca C1 mostró un aumento en el área del 7% por bosques, lo cual contribuyó a reducir la tasa anual de pérdida de suelo por erosión. En la microcuenca C2, se observará una relación directa entre la cobertura agrícola y la tasa anual de pérdida de suelo. El estudio concluye que, aunque una mayor cobertura vegetal está relacionada con una disminución en la degradación del suelo, factores topográficos como la longitud y la inclinación de las pendientes desempeñan un papel determinante en el proceso de erosión hídrica, marcando diferencias significativas entre ambas microcuencas.

La investigación realizada por Valdebenito (2019), tuvo como objetivo estimar la erosión actual y potencial en la comuna de Punitaqui, empleando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Para ello, se utilizó este modelo considerando datos relacionados con la precipitación, las características del suelo, la vegetación y las pendientes, lo que permitió determinar la erosión en las cuencas estudiadas. El análisis identificó zonas críticas con alta susceptibilidad a la erosión hídrica, principalmente en

áreas con pendientes pronunciadas y suelos sin protección. Por lo tanto, se concluyó que las regiones más afectadas por la erosión hídrica coinciden con pendientes acentuadas y suelos degradados, destacando la necesidad de aplicar medidas de conservación del suelo y promover un manejo sostenible de los recursos en las cuencas más vulnerables.

La investigación desarrollada por García (2021), tuvo como propósito analizar la erosión hídrica en suelos de ladera ubicados en el centro de México, evaluando también la influencia de la lluvia en los cambios de rugosidad superficial y su relación con la generación de sedimentos. Además, se realizaron comparaciones entre las tasas de erosión obtenidas mediante la técnica del perfilómetro de varillas (PV) y la medición de sedimentos (MS), frente a las estimaciones del modelo USLE. Para esta investigación se utilizó la metodología USLE junto con las herramientas previamente mencionadas. Se diseñaron parcelas de escurrimiento bajo condiciones agrícolas y pecuarias, aplicando cuatro tipos de tratamiento con tres repeticiones: suelo desnudo, barbechado, barbechado con esquilmos y pastizal inducido. Los resultados mostraron que el modelo USLE sobrestimó las pérdidas de suelo entre 10,9 y 25,9 veces en comparación con MS y PV, cuyas tasas fueron de 2,32 y 0,98 t ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Asimismo, los datos obtenidos mediante PV evidenciaron indicios de recuperación del suelo debido a la reconfiguración de su rugosidad superficial tras cada ciclo de lluvia, lo cual explica la débil relación entre las tormentas y la producción de sedimentos.

La investigación de Pighini et al. (2022), tuvo como finalidad examinar la relación entre aspectos hidrológicos y la pérdida de suelo en la zona de estudio, a través de la generación de mapas temáticos que sirvieron como herramientas para el ordenamiento territorial de la cuenca. El estudio buscó contribuir a la identificación de distintos umbrales de pérdida de suelo considerando la influencia entre la infiltración y el escurrimiento. Para lograr este propósito, se combinaron mapas de variables hidrológicas y pérdida de suelo, lo que permitió localizar y caracterizar áreas vulnerables a la erosión hídrica como parte del proceso de planificación territorial. Entre los parámetros analizados se incluyeron la curva número, el índice topográfico y la ecuación USLE. Los resultados demostraron que la pérdida de suelo muestra un aumento, relacionado de manera directa con la generación de escurrimientos y de forma inversa con el riesgo de encharcamiento. También, se observó que el reemplazo de vegetación con alta capacidad de absorción de agua y suelos estables por cultivos del área vulnerable a la erosión hídrica dentro del umbral.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Alvarez (2020), en su investigación tuvo como objetivo de estimar los niveles de erosión hídrica en la subcuenca del río Ichu durante los años 2013 y 2017. La metodología principal la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y el análisis espacial apoyado en herramientas de SIG. En 2013, la tasa promedio más alta de erosión hídrica alcanzó los 406,98 t/ha/año, afectando un área de 18.1 hectáreas, mientras que la tasa mínima registrada fue de 0,46 t/ha/año. Para el año 2017, se identificó un aumento, con una tasa promedio máxima de 554,36 t/ha/año, se dividió un área de 25 hectáreas, y una tasa mínima de 0,39 t/ha/año. Estos resultados evidencian una variación considerable en los niveles de erosión hídrica entre ambos años, atribuida principalmente a cambios en la cobertura vegetal y en las precipitaciones pluviales.

Alarcón y Sánchez (2023), realizaron un estudio enfocado en la predicción de la pérdida de suelo por erosión hídrica, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). En el análisis, se consideran los principales factores que promueven la erosión, incluyendo la erosión por precipitaciones (R), erosión del suelo (K), relieve topográfico (LS), cobertura vegetal (C) y las prácticas de conservación (P). Al aplicar los parámetros del modelo USLE en la zona de estudio, los resultados indicaron que la erosión leve osciló entre 0,380 y 49,841 t/ha/año, afectando un total de 17,065.26 hectáreas. En contraste, la erosión muy alta presentó valores entre 699,896 y 1 802,164 t/ha/año, impactando un área de 19,01 hectáreas. Este último caso se explica principalmente por las pendientes pronunciadas ubicadas en la parte alta de la subcuenca y por las actividades agropecuarias desarrolladas.

El estudio realizado por Chili (2024), tuvo como objetivo poder determinar la erosión del suelo mediante la evaluación hídrica media anual en la cuenca del río Illpa. Para ello, se utilizó la metodología de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), complementada con herramientas de teledetección y SIG. Como resultado, se identificó la erosión por precipitaciones, sobre todo de cada factor tanto en la distribución geoespacial de la cuenca como en los resultados de las pruebas estadísticas. La erosión predominó en un rango de 0 a 11 536,30 t/ha/año, con un promedio de 58,93 t/ha/año, lo que la clasificó en nivel de erosión alto. Este valor superó las recomendaciones de erosión de 7 t/ha/año y de 11,2 t/ha/año. El valor máximo se da en las zonas más pequeñas de la cuenca, mientras que el mínimo se encuentra en áreas planas o cubiertas por cuerpos de agua.

La investigación realizada por Nuñez (2024), tuvo como propósito estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca Chacco, ubicada en Ayacucho,

mediante la aplicación de la metodología USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo). Para ello, se emplearon herramientas como los programas ArcMap y QGIS, así como imágenes satelitales del Sentinel 2A. Los resultados indicaron que la erosión potencial en la cuenca alcanza un valor de $0,5 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$, donde el 82,79% del área total presenta niveles de erosión normal, mientras que un 0,02% muestra una erosión muy severa, con una tasa de $70,15 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$. Esto permitió concluir que la cuenca no presenta un nivel elevado de erosión. En cuanto a la erosión actual, se estimó en $0,5 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ para el 83,48% del área total con erosión normal y $33,30 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ para el 0,35% del área, clasificada como varios. En consecuencia, se determina que la cuenca no está significativamente afectada por la erosión.

La investigación realizada por Cruz y Zurita (2021), tuvo como objetivo analizar los niveles de erosión hídrica en el distrito de Yanaoca, en Cusco, haciendo uso de herramientas de sistemas de información geográfica. El estudio se llevó a cabo bajo un diseño no experimental con enfoque longitudinal descriptivo y aplicó la metodología RUSLE para estimar la erosión hídrica utilizando el software GIS. Los resultados evidenciaron que el distrito de Yanaoca enfrenta problemas de erosión del suelo ocasionados por el impacto del agua. Se concluyó que esta zona no es adecuada para proyectos de desarrollo urbano, pero sí es apta para actividades agrícolas. Por esta razón, se recomienda implementar técnicas como la siembra directa, en función de las características del suelo. Además, se resaltó la relevancia de conservar la cobertura vegetal en el área estudiada.

2.1.3. Antecedentes Locales

La investigación realizada por Condori (2021), tuvo como objetivo analizar los factores que inciden en la erosión hídrica y la cantidad de suelo que se pierde anualmente, medida en toneladas por hectárea al año (t/ha/año), en la subcuenca Cairani-Camilaca. Para ello, se empleó la "Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)", con el propósito de estimar cuantitativamente dicha pérdida. Los hallazgos evidenciaron una relación directa, positiva y altamente significativa entre los factores de erosión definidos en el modelo USLE. Se determinaron que, en promedio, los niveles de erosión hídrica en esta área correspondían a un nivel moderado, lo cual afectaba negativamente la capacidad productiva de los suelos. Esto, a su vez, generaba consecuencias adversas en el ámbito socioeconómico, evidenciadas en la migración de habitantes debido a la falta de puerto.

La investigación realizada por Laqui (2019), tuvo como propósito determinar la tasa potencial de erosión hídrica y el volumen de sedimentos que serían transportados hacia el eje de la futura represa Callazas, localizada en la subcuenca del río Callazas, en Tacna. Para este análisis, se empleó la metodología de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) en combinación con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS). Los resultados obtenidos mostraron una tasa de erosión hídrica de 108,9 toneladas por hectárea al año (ton/ha.año), clasificada como moderada, mientras que el uso de GIS proporcionó un promedio de 64,3 ton/ha.año, indicando una erosión ligera. Estos datos evidencian que no se presenta erosión extrema en la zona analizada. Además, se concluyó de forma cualitativa que, durante la temporada de estiaje, no ocurre transporte de sedimentos ni en suspensión ni de fondo.

La investigación realizada por Calderón y Vizcarra (2024), tuvo como objetivo evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del Río Caplina mediante el modelo USLE apoyado en SIG, con el fin de estimar la pérdida de suelo y su distribución espacial considerando factores climáticos, edáficos y topográficos. Los resultados mostraron que predomina la erosión nula o ligera, con un leve incremento en el tiempo, mientras que la erosión moderada aumentó ligeramente y el alta disminuyó; las zonas críticas se ubicaron en áreas con fuertes pendientes y baja cobertura vegetal. En función de ello, se propusieron medidas de conservación como prácticas agrícolas sostenibles y revegetación, concluyéndose que el modelo permitió identificar áreas vulnerables clave para una adecuada gestión del suelo.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Erosión Hídrica

La erosión hídrica puede interpretarse como un proceso de desgaste del suelo impulsada por el agua implicando en la pérdida de la capacidad productiva de suelos agrícolas, el caudal del agua mueve partículas orgánicas e inorgánicas del suelo por la capa superficial del suelo, por lo que conlleva a una descomposición del nivel superficial, aplanándolo y degradándolo. De manera paralela, los sedimentos desprendidos son transportados y finalmente depositados en otras áreas, alterando tanto la calidad del suelo de origen como la dinámica ambiental de las zonas receptoras. (Cisneros, y otros, 2012)

La erosión hídrica puede entenderse como una manifestación de la dinámica hidrológica, en la cual la energía liberada por la lluvia al impactar sobre la superficie terrestre y por el desplazamiento del agua en forma de escorrentía ocasiona la

desintegración y movilización de las partículas del suelo. Dicho proceso, de naturaleza eminentemente física, no solo responde a la acción de agentes naturales como la precipitación y el relieve, sino que también se intensifica por la intervención humana, generando la pérdida gradual de la capa edáfica y comprometiendo la estabilidad estructural de los ecosistemas terrestres (Tayupanta, 1993).

Teniendo en cuenta la información anterior, la erosión causada por el agua impacta negativamente sobre los suelos, disminuyendo su fertilidad y afectando la producción agrícola. Además, puede representar un peligro para las comunidades cercanas al incrementar el posible riesgo frente a inundaciones y deslizamientos, de acuerdo con las condiciones del terreno. También genera daños en infraestructuras como carreteras y puentes, y contribuye a la pérdida de biodiversidad. Aunque es un proceso natural, su intensidad puede verse agravada por actividades humanas como la deforestación, el sobrepastoreo y prácticas agrícolas inadecuadas (Perez, 2023).

Tipos de Erosión Hídrica:

- Erosión por salpicadura: Se refiere a la desintegración de los agregados del suelo provocada por el impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie terrestre de manera que facilita el desplazamiento de estas partículas. La cantidad de suelo degradado por erosión varía factores como la composición del suelo, la presencia o falta de cobertura vegetal y la pendiente del terreno, ya que si la inclinación del terreno es considerable el escurrimiento superficial se ve intensificada, arrastrando consigo mayor cantidad de partículas y acelerando el proceso de degradación (Tayupanta, 1993).
- Erosión laminar: La erosión laminar es un proceso en el que la capa superficial del suelo se degrada de manera gradual y uniforme debido a la saturación del terreno y al escurrimiento provocado por la pendiente. Este proceso es más frecuente en suelos arenosos, ya que su baja capacidad de retención de agua los hace más susceptibles a la erosión, mientras que en suelos arcillosos ocurre con menor intensidad debido a su mayor cohesión. Sus efectos se observan en la aparición de manchas irregulares con tonalidades diferentes al suelo original y en la reducción de la capa fértil, lo que impacta negativamente en la productividad del suelo y contribuye a su degradación (Tayupanta, 1993).
- Erosión en canales o canalillos: Esta forma de erosión es frecuente en distintos tipos de suelo, pero suele pasar desapercibida por los agricultores, ya que sus efectos pueden atenuarse con las labores de cultivo. Ocurre cuando el agua de escorrentía se concentra en pequeñas irregularidades del terreno, ya sean naturales o provocadas por actividades humanas. A medida que el caudal y la

velocidad del agua aumentan, esta se desliza cuesta abajo, formando surcos y canales visibles en la superficie. Si no se implementan medidas de control, estos cortes pueden profundizarse con el tiempo, comprometiendo la estabilidad del suelo y reduciendo su capacidad de uso agrícola. (Tayupanta, 1993)

- Erosión en cárcavas y zanjas: Las cárcavas son depresiones profundas con paredes escarpadas que se desarrollan en suelos frágiles y de gran espesor debido a la pérdida de material causada por el flujo del agua y la inestabilidad de la pendiente. Cuando la escorrentía se concentra en determinadas zonas, estos surcos se amplían progresivamente en ancho y profundidad, fragmentando el terreno y dificultando las labores agrícolas. A medida que la cárcava se profundiza, adopta una apariencia similar a una cascada, generando turbulencias en su base. Como consecuencia, la parte superior sobresale y, debido a su propio peso, se desprenden bloques de suelo, lo que provoca que la cárcava avance en sentido ascendente. Este proceso es conocido como erosión en cárcavas o caída remontantes (Tayupanta, 1993).
- Movimientos de masa de suelo: Este tipo de erosión es poco frecuente y ocurre a lo largo de fallas geológicas naturales. Suele originarse durante tormentas intensas, cuando grandes volúmenes de agua se infiltran en el suelo. Esta acumulación hídrica, junto con el aumento de presión en los poros del terreno, puede provocar deslizamientos y desplazamientos masivos de tierra de diversa magnitud, como derrumbes, aluviones o aludes. Estos fenómenos pueden modificar drásticamente el paisaje, comprometer la estabilidad del suelo y representar un peligro para las infraestructuras y las comunidades cercanas (Tayupanta, 1993).

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

Walter H. Wischmeier ingeniero agrónomo y Dwight D. Smith ingeniero agrícola ambos especializados en conservación de suelos y erosión hídrica, en su labor en el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, desempeñaron un papel fundamental en la creación y desarrollo de modelos predictivos como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) que han sido fundamentales para el diseño de estrategias de conservación de suelos en todo el mundo, USLE es un modelo empírico desarrollado en Estados Unidos en la mitad del siglo XX, con el objetivo principal de crear una herramienta capaz de predecir la pérdida promedio de suelo causada por la erosión hídrica en terrenos con diferentes tipos de uso y manejo. Su desarrollo se fundamentó en el análisis de datos de parcelas que variaban en sus

características climáticas, de suelo, pendiente y cobertura vegetal. A partir de estos estudios, se formuló una ecuación matemática que incluye los factores clave para estimar la erosión del suelo, considerando tanto las precipitaciones como las prácticas de conservación (Universidad Politécnica de Valencia, 2012).

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo:

La ecuación (1), corresponde a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), la cual fue determinada por (Wischmeier & Smith, 1978).

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

Donde:

A : Pérdida de suelo (t/ha/año)

R : Factor de Erosividad por precipitación pluvial (MJ·mm/ha·h·año).

K : Factor de Erosión el suelo ((t/ha)/(MJ · mm/ha · h))

L : Factor de Longitud (adimensional).

S : Factor de Pendiente (adimensional).

C : Factor de Cobertura y manejo de la vegetación (adimencional).

P : Factor de Prácticas de conservación (adimensional).

A continuación, se procede a describir los factores:

Factor R - Erosividad de la lluvia

La ecuación (2), determinada por Roose en 1995, citado por (Ramos Taipe, 2001), calcula el factor R , considerando la intensidad y la energía cinética de las lluvias en una región específica, mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

P = Precipitación media anual

Factor K = Erodabilidad del suelo

Para obtener esta variable, nos dirigimos al portal oficial de la Food and Agriculture Organization of the United Nations, podemos descargamos en los shp de suelos del mundo y debemos de considerar la ecuación (3), que es la fórmula determinada por Williams (2000), presentada a continuación:

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

Dónde:

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

B : Tamaño del limo (0,002 - 0.05 mm de diámetro) en (%)

C : Tamaño de la arcilla (< 0,002 mm de diámetro) en (%)

D : Contenido de carbono orgánico (%)

Factor LS - Longitud y pendiente del terreno

La ecuación (4), determinada por Lee & Charman en 2005, citado por (De Freitas Amorim, 2010), calcula el factor LS, el cual corresponde a la combinación de dos factores: Longitud de la pendiente (*L*) y grado de la pendiente (*S*)

$$LS = \left(\frac{L}{22.13}\right)^m * (0,065 + 0,045S + 0,0065S^2) \quad (4)$$

Dónde:

L : Longitud de la pendiente (M)

S : Pendiente en (%)

m: Exponente que varía con la pendiente.

Factor C - Cobertura y manejo del suelo

El factor C puede calcularse utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y para su cálculo se aplica la ecuación (5), además de la descarga de imágenes satelitales.

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

Dónde:

B4 : Banda infrarroja cercana (NIR)

B5 : Banda roja (RED)

La tabla 1, presenta los rangos utilizados para interpretar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), indicador que permite estimar la presencia, densidad y vigor de la cobertura vegetal. Los valores comprendidos entre -1 y 0 se asocian principalmente con cuerpos de agua, mientras que los valores entre 0 y 0,2 corresponden a suelo desnudo o superficies sin vegetación. El intervalo de 0,2 a 0,4 indica vegetación escasa; los valores entre 0,4 y 0,6 representan una cobertura vegetal buena; y los valores superiores a 0,6 evidencian vegetación buena o abundante. En

términos generales, cuanto mayor es el valor del NDVI, mayor es la densidad y el vigor de la vegetación.

Tabla 1

Valores del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)

Valores	Descripción
-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

Nota. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. Los rangos presentados se emplean como criterios para interpretar la cobertura vegetal del área de estudio. Los valores negativos se relacionan principalmente con cuerpos de agua; los valores cercanos a cero, con superficies sin cobertura vegetal; y los valores positivos altos, con vegetación más densa y vigorosa.

Por último, el factor C se obtendrá mediante la aplicación de la ecuación (6), donde es necesario obtener el valor de NDVI.

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

Factor P - Practicas de conservación

Relación que refleja la pérdida de suelo en contraste con una práctica de conservación, la cual será determinada mediante el reconocimiento de prácticas específicas aplicadas en la zona. Cuando no es posible determinarlo, el factor es igual a 1.

La erosión hídrica y la metodología USLE están estrechamente relacionadas, ya que esta última se utiliza para predecir la pérdida de suelo causada por el agua. La ecuación USLE considera factores como la precipitación, la pendiente, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del suelo, los cuales influyen en la erosión hídrica. Al combinar estos elementos, la metodología permite estimar la tasa de erosión y ayudar en la toma de decisiones para mitigar su impacto y conservar el suelo (Corporación Autónoma Regional del Tolima, 2008).

2.3. Definición de términos

2.3.1. Cuenca hidrográfica

Se define como una unidad territorial que transporta el flujo de agua hacia un receptor final que puede ser cuerpos como ríos, quebradas, lagos, lagunas, humedales, estuarios, embalses, acuíferos, manantiales o pantanos. Se caracteriza por ser una

zona deprimida rodeada de terrenos más elevados, donde el agua procede de lluvias o deshielos y estos convergen de manera natural (Bordino, 2024).

Según Cotler et al. (2013) pueden entenderse como unidades territoriales naturales donde se desarrollan procesos socio ecológicos, dichos espacios están delimitados principalmente por las zonas altas de montañas, donde se concentran los escurrimientos superficiales, los cuales confluyen y luego se dirigen a un punto de salida de la cuenca, este espacio se encuentra interrelacionada por factores como la biodiversidad, la estructura geomorfológica y las características geológicas, entre otros.

Se entiende por cuenca hidrográfica como un territorio delimitado por elevaciones del terreno que funcionan como divisores topográficos o líneas que dividen el agua, en este espacio se capta el agua de manera natural que proviene de precipitaciones, esta se conduce se filtra y se evacua mediante una red de drenaje que dirige este flujo desde la zona más alta hacia áreas de bajo relieve (Formaggio, 2023).

2.3.2. Distribución espacial de la erosión

Esto hace referencia al análisis y representación de cómo se manifiesta la pérdida de suelo en diferentes áreas geográficas dentro de un territorio determinado, considerando la variabilidad espacial de los factores influyentes en la erosión, este análisis es realizado a través de herramientas y técnicas, como los sistemas de información geográfica (SIG) y modelos predictivos Arnáez et al. (2009).

Según Pérez (2018) La distribución espacial de la erosión se refiere a la forma en que los procesos erosivos se manifiestan de manera desigual en un territorio, estos dependen de factores como pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal y usos de suelo.

La distribución espacial de la erosión hace referencia a que el espacio influye significativamente en la erosión, pues en China se mostró que la erosión no se desarrolló de manera uniforme, sino que las áreas con erosión severa se presentan en áreas montañosas y valles secos demostrando que la intensidad y la ubicación de la erosión varía según la zona en la que se encuentren (Rao et. al.,2014).

2.3.3. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

Es un modelo matemático creado por Wischmeier y Smith en los años de 1960, facilitando la estimación de la tasa de pérdida de suelo al integrar diversos factores que afectan la erosión, tales como las condiciones climáticas, las propiedades del suelo, la

topografía, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo. Se emplea ampliamente como una herramienta fundamental para el estudio y manejo de la erosión del suelo (Renard et al.,1997).

La ecuación universal de pérdida de suelo constituye una herramienta de carácter predictivo que permite calcular la pérdida de suelo ocasionada por la erosión en un periodo anual, este modelo se desarrolló a partir de investigaciones empíricas realizadas en múltiples parcelas de escurrimiento, lo que posibilitó identificar y cuantificar la influencia de diversos factores (Mancilla, 2008).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) se plantea como una herramienta cuantitativa destinada a estimar, de forma indirecta, la pérdida de suelo ocasionada por la erosión hídrica, este modelo trabaja a partir de la simulación del comportamiento del terreno cuando este se ve afectado por la precipitación pluvial (Ibáñez et. al.,2012).

2.3.4. Factor de erosividad (R)

Hace referencia al parámetro utilizado para estimar la erosión del suelo, considera tanto el impacto de las gotas de lluvia como la escorrentía. Evalúa la capacidad erosiva de las precipitaciones, considerando tanto tormentas fuertes como aquellas de menor intensidad, pero más frecuentes, R representa el potencial erosivo de las lluvias en una región específica (Wischmeier y Smith, 1978).

2.3.5. Factor de erodabilidad del suelo (K)

Es un valor cuantitativo obtenido de manera experimental, que indica la vulnerabilidad cuantitativa por erosión hídrica de un suelo. Este valor refleja la susceptibilidad de un suelo determinado a la erosión causada por la lluvia y la escorrentía, en ausencia de protección, considerando las propiedades del suelo que influyen en la susceptibilidad a la erosión (Rivera y Alguera, 2016).

2.3.6. Factor topográfico (LS)

Factor que analiza cómo la longitud y la pendiente del terreno afectan a la velocidad y cantidad de escurrimiento, incrementando así el riesgo de erosión. Con terrenos más largos y empinados, el agua circula más rápido y tiene una mayor capacidad de arrastrar partículas del suelo, lo que aumenta el potencial erosivo de esa zona (Geler et al., 2015).

2.3.7. Factor de cobertura vegetal (C)

Útil para modelar distintos escenarios y analizar el impacto de políticas agrícolas, mide la relación entre la pérdida de suelo en campos cultivados y un campo con labranza limpia. Este factor ajusta la estimación de erosión considerando la cobertura vegetal, las prácticas de manejo y la etapa de crecimiento de las plantas. La pérdida real de suelo suele ser menor, dependiendo de estas condiciones (Prasuhn, 2022).

2.3.8. Factor de prácticas de conservación (P)

Relación entre la pérdida de suelo y las prácticas agrícolas utilizadas para mitigarla, como la labranza adecuada, la rotación de cultivos y el uso de residuos de cultivos. Estas prácticas contribuyen significativamente al control de la erosión y la conservación del suelo. El factor P es clave para evaluar la efectividad de las estrategias de manejo del suelo en la agricultura (García, 2011).

2.3.9. Erosión Hídrica

Es la pérdida de suelo causada por el escurrimiento de agua de lluvia, riego o deshielo, que transporta partículas del suelo a niveles más bajos. Este proceso puede generar inundaciones y deteriorar la calidad del suelo, afectando la agricultura y los ecosistemas. Los sedimentos resultantes pueden acabar en cuerpos de agua cercanos, alterando su calidad (Sergieieva, 2024).

Según Novillo (2024) La erosión hídrica es un proceso mediante el cual el agua en movimiento desgasta progresivamente la superficie del suelo y transporta los sedimentos a zonas más bajas, movilizand así partículas muy finas como fragmentos rocosos de gran tamaño de manera que genera un cambio importante del relieve.

La erosión hídrica es un proceso que reduce la capacidad de productividad de los suelos agrícolas, este proceso es generado por acción del agua de lluvia o del escurrimiento superficial en áreas donde la cobertura vegetal es limitada y el terreno presenta baja resistencia (Ares y Varni, 2016).

2.3.10. Magnitud de pérdida de suelo

Cantidad de suelo eliminado de un área debido a procesos naturales como la erosión o actividades humanas como la deforestación y la agricultura intensiva. Este fenómeno afecta negativamente la fertilidad del suelo, la biodiversidad y la estabilidad de los

ecosistemas. Se mide en términos de volumen o masa de suelo perdido, y es un parámetro esencial en la evaluación y gestión de la degradación del suelo (Portuguez, 2014).

Hace referencia al impacto de la degradación de suelo, es decir de la cantidad de disminución de la capa superficial de la corteza terrestre disminuyendo su capacidad de producción a causa del agua, viento, influyendo en el ámbito ambiental, social, cultural y económica (Franco et. al., 2015).

La magnitud de pérdida de suelo hace referencia a la cantidad de material del terreno que es desplazado en la superficie como consecuencia de procesos de degradación este también es conocido como la erosión del suelo (Piscitelli, 2015).

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental, puesto que no se manipulan las variables asociadas a la erosión hídrica, sino que se analizan tal como ocurren en su ambiente natural. De acuerdo con Hernández et al. (2010), este tipo de diseño permite observar y describir fenómenos sin intervenir en ellos.

Asimismo, es un diseño transversal, porque la estimación de la pérdida de suelo mediante la USLE se realiza utilizando información correspondiente a un periodo específico, permitiendo analizar las variables en un momento determinado.

La integración del modelo USLE en un entorno SIG refuerza el enfoque analítico, permitiendo representar espacialmente la variabilidad del fenómeno y comprender su comportamiento sin alterar las condiciones naturales del territorio.

3.2. Acciones y actividades

Las acciones y actividades se basaron en los objetivos específicos propuestos.

3.2.1. Factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal

a. Información climática (Factor R)

Para caracterizar el factor climático asociado a la erosión hídrica, se midió la erosividad de la lluvia utilizando los registros de precipitación media mensual y anual proporcionados por el Gobierno Regional de Tacna y el SENAMHI. Estos datos fueron procesados para calcular la erosividad mediante la ecuación propuesta por Arnoldus (1980), la cual permitió estimar el índice R a partir del comportamiento de las precipitaciones. El procesamiento numérico inicial se realizó en Microsoft Excel y, posteriormente, se generó la superficie de erosividad utilizando métodos de interpolación espacial (IDW o Kriging) en entornos SIG. Con este procedimiento se obtuvo un mapa continuo del factor R que representó la variabilidad climática en toda la cuenca Locumba.

b. Información edáfica (Factor K)

La caracterización del factor edáfico se realizó midiendo la erodabilidad del suelo a partir de los porcentajes de arena, limo, arcilla y contenido de materia orgánica disponibles

en bases de datos edafológicas como FAO SoilGrids. Estos parámetros fueron procesados aplicando la fórmula de Wischmeier y Smith (1978) en Excel, obteniéndose el valor del factor K para cada tipo de suelo presente en la cuenca. Una vez calculados, dichos valores se asignaron espacialmente a las unidades edáficas utilizando ArcGIS/QGIS, generándose un mapa del factor K que permitió identificar las zonas con mayor susceptibilidad según sus características físicas.

c. Información topográfica (Factor LS)

El análisis del factor topográfico se basó en la derivación de la pendiente y la longitud de ladera utilizando el Modelo Digital de Elevación. A través de las herramientas hidrológicas de SIG se calcularon la acumulación de flujo, la pendiente y los parámetros necesarios para estimar el factor LS mediante el algoritmo de Desmet y Govers (1996). Este procedimiento permitió generar un raster que representó el efecto combinado de la pendiente y la longitud de la ladera en el proceso de erosión hídrica, identificando zonas críticas donde la morfología del terreno favoreció el transporte de sedimentos.

d. Uso y cobertura del suelo (Factor C)

Para evaluar la influencia de la cobertura vegetal en la protección del suelo, se procesaron imágenes satelitales Landsat 8/9 con el fin de obtener el índice de vegetación NDVI mediante SIG. A partir del NDVI se asignaron valores del factor C siguiendo rangos establecidos en la literatura, clasificándose las zonas de la cuenca según el nivel de cobertura vegetal y su capacidad para reducir la erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia. Esto permitió identificar sectores con mayor o menor protección natural frente a los procesos erosivos.

e. Prácticas de manejo agrícola (Factor P)

Se establece el valor de 1, al no existir prácticas de control de erosión, ni manejo de actividades productivas.

3.2.2. Tasa de pérdida de suelo, aplicando USLE

Procesamiento e integración de los factores

Una vez generados los mapas de los factores R, K, LS, C y P, se realizará la estandarización de unidades, formatos raster y proyección geográfica para asegurar la

correcta integración. El cálculo de la pérdida potencial de suelo se efectuará mediante álgebra de mapas en GIS, multiplicando los factores según la ecuación USLE:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Este proceso generará un mapa continuo que representa la tasa de pérdida de suelo en toneladas por hectárea por año en cada celda del territorio. Posteriormente, se realizará la reclasificación del raster final en intervalos de erosión muy baja, baja, moderada, alta y muy alta, permitiendo una interpretación clara y estandarizada de los niveles de erosión presentes.

3.2.3. Áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica

Análisis espacial e interpretación de resultados

Se aplicaron herramientas de estadísticas zonales y análisis espacial para identificar áreas prioritarias según su nivel de erosión. Se evaluará la relación del resultado USLE con las variables topográficas, climáticas y de cobertura, con el fin de identificar patrones territoriales que expliquen la susceptibilidad a la erosión. Asimismo, se elaborarán mapas temáticos de cada factor y del USLE final, acompañados de análisis descriptivos que permitan determinar las zonas más vulnerables y las causas asociadas a su comportamiento erosivo. Este análisis permitirá priorizar zonas de intervención para futuras estrategias de conservación del suelo y manejo sostenible del territorio.

3.3. Materiales e instrumentos

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron fuentes de información geoespacial, climática, edáfica y satelital, así como herramientas informáticas orientadas al procesamiento, análisis e integración de los factores considerados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

Las imágenes satelitales Landsat fueron utilizadas para el análisis de la cobertura vegetal de la cuenca Locumba. A partir de estas imágenes se calculará el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada —NDVI—, el cual permitió estimar el Factor C, relacionado con la cobertura y manejo del suelo. Este procedimiento fue necesario para identificar las zonas con mayor o menor protección vegetal frente a la erosión hídrica.

El Modelo Digital de Elevación —MDE— fue empleado para el análisis topográfico del área de estudio. Mediante este insumo se generaron los mapas de

pendiente, dirección de flujo y acumulación de flujo, los cuales permitieron calcular el Factor LS, correspondiente a la longitud y pendiente del terreno. Este factor fue fundamental para identificar sectores donde la morfología del relieve favorece el escurrimiento superficial y el transporte de sedimentos.

La información climática, correspondiente a registros de precipitación, fue utilizada para estimar el Factor R o erosividad de la lluvia. Estos datos fueron organizados y procesados inicialmente en hojas de cálculo, y posteriormente incorporados al entorno SIG para representar espacialmente la variabilidad de la erosividad en la cuenca Locumba.

La información edáfica fue empleada para determinar el Factor K o erodabilidad del suelo. Para ello, se consideraron características físicas del suelo, como textura, contenido de arena, limo, arcilla y materia orgánica. Estos valores fueron procesados y asignados espacialmente a las unidades de suelo presentes en el área de estudio, permitiendo identificar zonas con mayor susceptibilidad a la pérdida de suelo.

El software SIG fue utilizado como herramienta principal para el procesamiento espacial de la información. Mediante este software se realizaron procesos de georreferenciación, reproyección, recorte del área de estudio, interpolación, reclasificación, álgebra de mapas e integración de los factores R, K, LS, C y P. La integración de estos factores permitió estimar la pérdida potencial de suelo mediante la aplicación del modelo USLE.

Microsoft Excel fue utilizado para la organización de las bases de datos, el cálculo preliminar de algunos factores, la estructuración de tablas y la sistematización de los resultados obtenidos. Asimismo, la computadora portátil y la conexión a internet fueron medios operativos empleados para la descarga de información, procesamiento de datos, elaboración cartográfica y redacción del informe final.

De esta manera, los materiales, fuentes de información e instrumentos no fueron utilizados de forma aislada, sino integrados dentro del procedimiento metodológico para caracterizar los factores de erosión, calcular la tasa de pérdida de suelo e identificar las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca Locumba.

3.4. Población de estudio

La población de estudio estuvo conformada por la totalidad del territorio de la cuenca Locumba, ubicada en la región Tacna, debido a que esta constituye el ámbito espacial donde se evaluó la magnitud de la erosión hídrica mediante la aplicación de la Ecuación

Universal de Pérdida de Suelo —USLE—. En dicha cuenca se analizaron los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo que intervienen en la pérdida potencial de suelo.

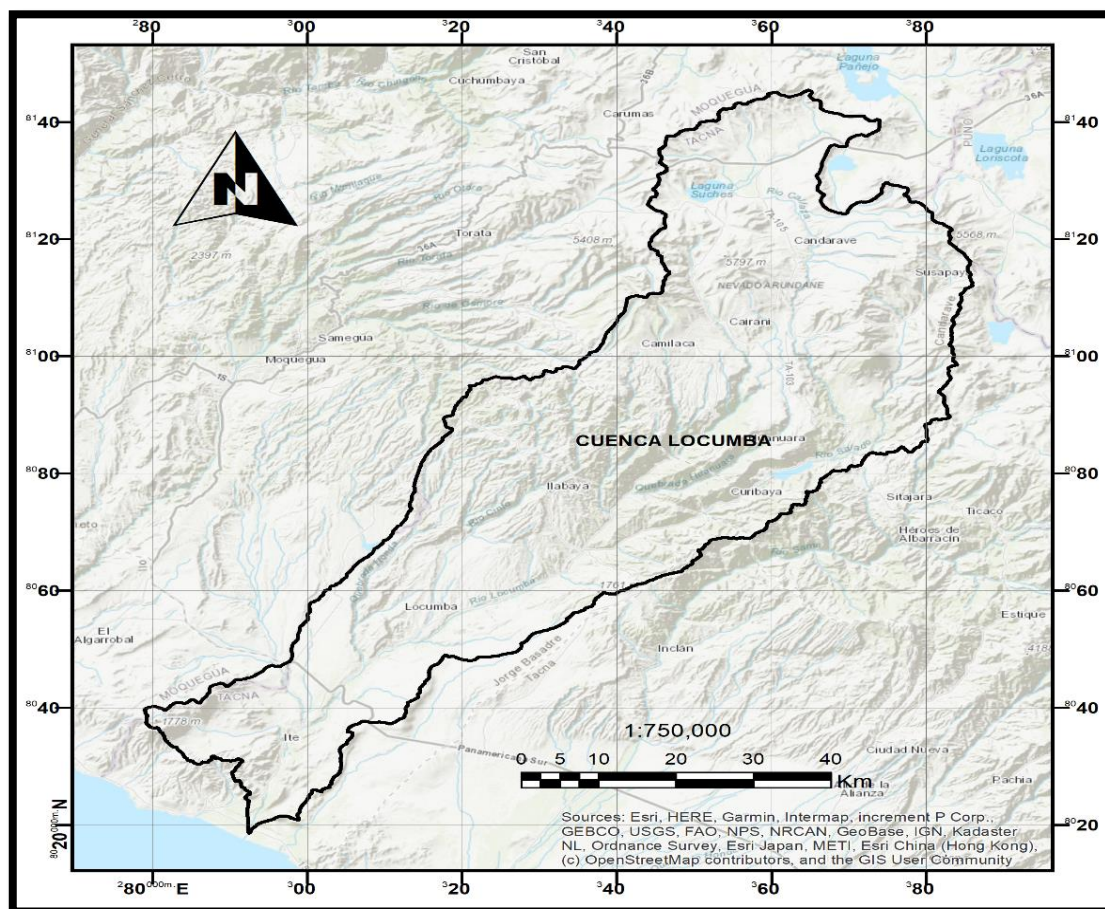
La unidad de análisis estuvo constituida por cada celda o píxel raster generado durante el procesamiento espacial de los factores R, K, LS, C y P. Cada celda representó una porción homogénea del territorio, en la cual se integraron los valores correspondientes a erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, pendiente y longitud de ladera, cobertura vegetal y prácticas de conservación. Esta unidad permitió estimar la pérdida de suelo en toneladas por hectárea por año para toda la superficie de la cuenca.

Debido a la naturaleza geoespacial de la investigación, no se empleó una muestra estadística convencional basada en encuestas, individuos o unidades poblacionales humanas. En su lugar, se trabajó con la totalidad del área de estudio, mediante el análisis integral de las celdas raster comprendidas dentro del límite de la cuenca Locumba. Por tanto, la muestra operativa correspondió al conjunto completo de píxeles procesados dentro del área delimitada, garantizando una cobertura espacial total del fenómeno evaluado.

Las áreas de intervención consideradas en el estudio correspondieron a los sectores de la cuenca Locumba clasificados con niveles de erosión moderada, alta y muy alta, según el mapa final de pérdida de suelo obtenido mediante la USLE. Estas áreas fueron identificadas como zonas prioritarias de atención debido a su mayor susceptibilidad a la erosión hídrica. Su delimitación permitió reconocer los espacios donde la pendiente, la erodabilidad del suelo, la erosividad de la lluvia y la reducción de la cobertura vegetal incrementan la pérdida potencial de suelo.

En consecuencia, el estudio no se limitó a una muestra parcial del territorio, sino que evaluó espacialmente toda la cuenca Locumba, identificando dentro de ella las áreas críticas donde se requiere mayor atención para la planificación de medidas de conservación, restauración y manejo sostenible del suelo.

La Figura 1 muestra la ubicación y delimitación espacial de la cuenca Locumba, seleccionada como zona de estudio. El mapa permite identificar su extensión, orientación y contexto geográfico, y constituye la base cartográfica para el análisis de los factores que intervienen en la estimación de la erosión hídrica.

Figura 1*Ubicación de la Zona de estudio*

3.5. Operacionalización de variables

La tabla 2 presenta la operacionalización de las variables consideradas para evaluar la erosión hídrica en el área de estudio. La erosión se analiza mediante la magnitud de la pérdida de suelo, expresada en toneladas por hectárea al año, y su distribución espacial, representada por la identificación de zonas con diferentes niveles de erosión. Para su estimación se emplea la metodología USLE, que integra los factores de erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud e inclinación de la pendiente (LS), cobertura vegetal (C) y prácticas de conservación del suelo (P). Estos factores son determinados mediante información meteorológica, cartográfica, modelos digitales de elevación, imágenes satelitales y herramientas de sistemas de información geográfica.

Tabla 2*Operacionalización de variables de investigación*

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicador	Escala	Técnicas o métodos
Variable 1 Erosión hídrica	Proceso de desprendimiento, transporte y depósito de partículas de suelo causado por el agua superficial (Tarbuck & Lutgens, 2005).	Magnitud de pérdida de suelo.	Tasa promedio de pérdida de suelo por unidad de área (t/ha/año)	Métrica (t/ha/año)	Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y análisis SIG.
		Distribución espacial de la erosión	Áreas críticas identificadas mediante mapeo geoespacial	Escala nominal (zonas críticas, moderada s, bajas)	Mapas temáticos generados con SIG.
Variable 2 Metodología USLE	Herramienta matemática utilizada para estimar la pérdida promedio anual de suelo en función de factores climáticos, topográficos, edáficos y de uso del suelo. (KINNEL, 2010)	Factor erosividad (R)	Energía cinética de las precipitaciones (MJ·mm/ha·h·año)	Métrica (MJ·mm/h a·h·año)	Datos meteorológicos y ecuaciones empíricas regionales.
		Factor erodabilidad (K)	Susceptibilidad del suelo a la erosión (t·ha·h/ha·MJ·mm)	Métrica (t·ha·h/ha·MJ·mm)	Datos cartográficos de suelos.
		Factor topográfico (LS)	Relación entre pendiente y longitud del terreno	Métrica (sin unidades)	Análisis de modelos digitales de elevación (MDE) en SIG.
		Factor cobertura vegetal (C)	Índice de reducción de erosión por cobertura vegetal	Escala relativa (0 a 1)	Análisis de uso y cobertura del suelo con imágenes satelitales.
		Factor de manejo del suelo (P)	Eficiencia de las prácticas de conservación del suelo	Escala relativa (0 a 1)	Identificación de prácticas agrícolas y evaluación SIG.

Nota. R = factor de erosividad de la lluvia; K = factor de erodabilidad del suelo; LS = factor de longitud e inclinación de la pendiente; C = factor de cobertura y manejo de la vegetación; P = factor de prácticas de conservación del suelo; MDE = modelo digital de elevación; SIG = sistema de información geográfica. Elaboración con base en Tarbuck y Lutgens (2005) y Kinnell (2010).

3.6. Técnicas de procesamiento y análisis estadístico

El primer paso por seguir será la búsqueda, revisión y descarga de información, luego se procederá a realizar el procesamiento de información y posteriormente se desarrollará el modelamiento y análisis de los datos obtenidos lo cual nos permitirá establecer una base técnica y proponer soluciones que mitiguen los impactos negativos de la erosión hídrica en la cuenca Locumba.

La información recopilada de la cuenca Locumba será procesada y analizada utilizando el software GIS, aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para calcular la tasa de erosión. Este proceso incluirá la integración de las variables de la USLE en GIS, lo que permitirá elaborar mapas temáticos de cada factor y su combinación final para identificar las tasas de erosión en la cuenca. Adicionalmente, se llevará a cabo un análisis estadístico descriptivo para determinar los promedios de pérdida de suelo, utilizando los datos generados a partir del procesamiento en GIS.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

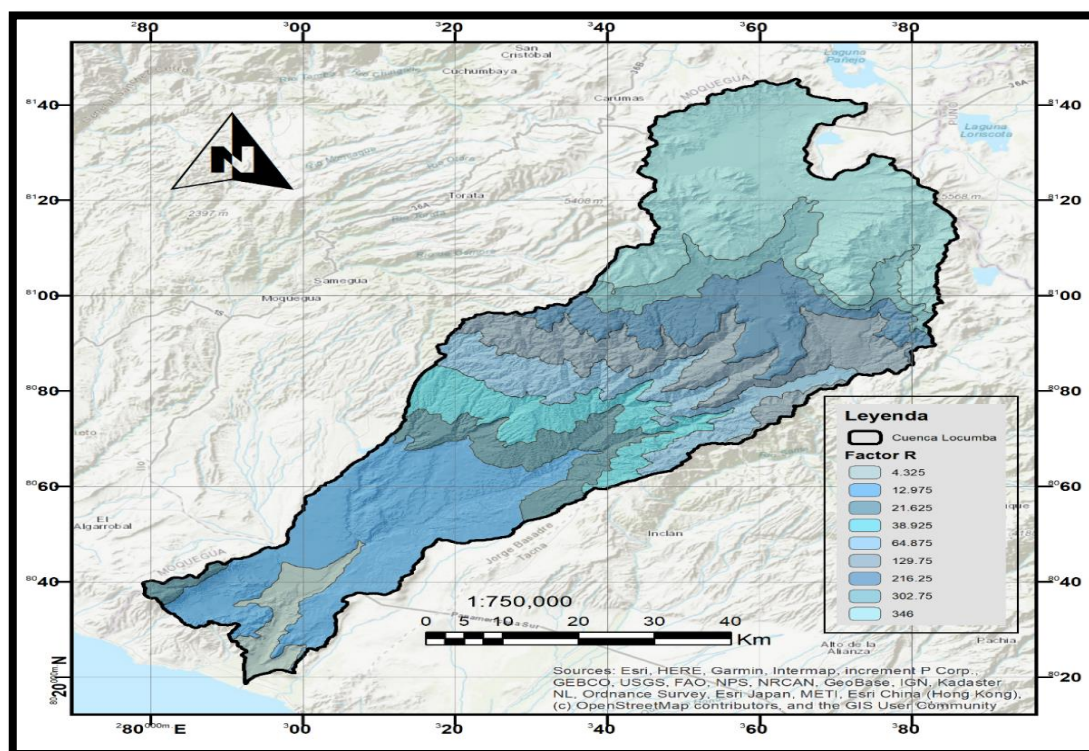
4.1. Factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal

4.1.1. Información climática (Factor R)

El mapa generado en la figura 2, evidenció un gradiente espacial bien definido en los valores de erosividad, registrándose los valores más bajos en la zona inferior de la cuenca y un incremento progresivo hacia las áreas medias y altas. Los valores obtenidos se agruparon en clases que oscilaron entre 4,325 y 346,00 $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, permitiendo distinguir con claridad las zonas donde la precipitación ejerce una mayor influencia en los procesos de erosión hídrica. Esta representación espacial constituyó la base climática fundamental para la integración del Factor R en el modelo USLE y para el análisis conjunto con los demás factores evaluados.

Figura 2

Distribución espacial del Factor R (erosividad de la lluvia)



Los valores clasificados en el mapa representan rangos crecientes de erosividad, tal como se muestra en la tabla 3:

- Valores bajos ($\approx 4,3 - 22,1$). Indican zonas donde la lluvia tiene bajo potencial erosivo, generalmente asociadas a áreas con menor precipitación anual y menor intensidad de lluvias. Suelen ubicarse en las partes bajas y áridas de la cuenca.
- Valores medios ($\approx 38,9 - 129,7$). Representan sectores con una erosividad moderada, donde la precipitación es más frecuente o ligeramente más intensa. Normalmente aparecen en las zonas medias de la cuenca.
- Valores altos a muy altos ($\approx 216,0 - 346,0$). Indican áreas donde la lluvia posee alta energía y por lo tanto mayor capacidad de iniciar procesos erosivos. Suelen coincidir con regiones altoandinas, donde las precipitaciones son más elevadas o intensas.

Tabla 3

Distribución del área por clases del Factor R en la cuenca Locumba

Factor R	Área (Km²)	Porcentaje de Área
129,750	97,493	0,644
21,625	38,678	0,255
346,000	2 656,106	17,540
302,750	565,750	3,736
216,250	951,516	6,284
129,750	1 441,471	9,519
64,875	1 292,452	8,535
38,925	1 000,605	6,608
21,625	1 063,209	7,021
12,975	3 497,500	23,097
4,325	2 538,016	16,761
Total	15 142,794	100,000

Nota. R = factor de erosividad de la lluvia. Elaboración mediante análisis SIG

La Tabla 3 presenta la distribución espacial de los valores del factor de erosividad de la lluvia (R) en la cuenca Locumba. Las clases de erosividad con mayor representación espacial fueron: 12,975 MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹·año⁻¹, que abarcó 3 497,50 km², equivalente al 23,097 % del área total de la cuenca, 4,325 MJ·mm⁻¹·ha⁻¹·h⁻¹·año⁻¹, con 2 538,016 km² (16,761 %), 346,000 MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹·año⁻¹, con 2656,106 Km² (17,540 %).

Estas tres clases en conjunto representaron más del 57,0 % del territorio evaluado, constituyéndose como las zonas predominantes de erosividad. Por otro lado, las clases de erosividad con menor extensión fueron: 21,625 MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹·año⁻¹, con áreas de 38,678 Km² (0,255 %) y 1063,209 Km² (7,021 %) en dos sectores

diferenciados, $129,750 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, que presentó zonas aisladas de $97,493 \text{ Km}^2$ (0,644 %) además de otra área mayor correspondiente a $1441,471 \text{ Km}^2$ (9,519 %).

En conjunto, estos valores reflejan que la cuenca Locumba presenta una variabilidad notable en su erosividad climática, con predominancia de rangos medios y altos, los cuales influyen significativamente en la dinámica erosiva del territorio y constituyen un insumo fundamental para la estimación de la pérdida de suelo mediante el modelo USLE.

4.1.2. Información edáfica (Factor K)

El Factor K fue calculado a partir de las características físicas y químicas del suelo correspondientes a cuatro unidades edáficas identificadas en la cuenca Locumba: I, G, TV y JE. Para cada una de ellas se emplearon los porcentajes de arena, limo, arcilla y el contenido de carbono orgánico, además de los coeficientes intermedios (FC sand, F cl-si, F OC y F hisand), tal como se muestran en la tabla 4, los cuales permiten obtener el valor final de erodabilidad según la ecuación USLE.

La Tabla 4 presenta los parámetros edáficos empleados para calcular el factor de erodabilidad del suelo (K). Los valores obtenidos varían entre 0,0147 y 0,0196, siendo la unidad TV la de mayor susceptibilidad a la erosión y la unidad G la de menor susceptibilidad. Las unidades I y JE presentan valores intermedios de erodabilidad

Tabla 4

Parámetros edáficos y valores del Factor K calculados para las unidades de suelo

	sand % topsoil	silt % topsoil	clay % topsoil	OC % topsoil	FC sand	F cl - si	F OC	F hisand	K usle	K
I	58,9	16,2	24,9	0,97	0,2000	0,7563	0,9272	0,9942	0,1394	0,0184
G	32,9	23,7	43,4	2,02	0,2005	0,7318	0,7625	10,000	0,1119	0,0147
TV	64,5	26,2	9,3	1,4	0,2000	0,9129	0,8304	0,9824	0,1489	0,0196
JE	70,8	12,8	16,5	1,15	0,2000	0,7800	0,8867	0,9422	0,1303	0,0172

Nota. OC = carbono orgánico; K = factor de erodabilidad del suelo.

Los valores obtenidos para el Factor K mostraron variaciones entre 0,0147 y 0,0196, lo que indica diferencias en la susceptibilidad de los suelos a ser erosionados. Las unidades edáficas presentaron los siguientes resultados:

- Unidad G: registró el valor más bajo de erodabilidad ($K = 0,0147$), asociado a un mayor contenido de arcilla (43,4 %) y carbono orgánico (2,02 %), lo que

incrementa la cohesión del suelo y reduce su susceptibilidad al desprendimiento.

- Unidad JE: presentó un valor intermedio ($K = 0,0172$), influenciado por un balance moderado entre arena (70,8 %) y limo (12,8 %), así como un contenido medio de carbono orgánico (1,15 %).
- Unidad I: obtuvo un valor de $K = 0,0184$, caracterizado por un suelo con textura equilibrada (58,9 % arena, 16,2 % limo y 24,9 % arcilla) y bajo contenido de carbono orgánico (0,97 %).
- Unidad TV: presentó el valor más alto de erodabilidad ($K = 0,0196$), debido a su mayor porcentaje de arena (64,5 %) y menor contenido de arcilla (9,3%), lo que reduce la cohesión del suelo y aumenta su vulnerabilidad frente al arrastre por escorrentía.

Estos resultados evidencian que la unidad TV es la más susceptible a la erosión hídrica, mientras que la unidad G muestra la mayor resistencia. La variabilidad espacial de estos valores se representó cartográficamente, permitiendo identificar las zonas donde la erodabilidad contribuye con mayor peso al proceso erosivo en la cuenca. La tabla 5, muestra la extensión superficial de cada unidad, su porcentaje respecto al área total evaluada y el valor asignado de erodabilidad.

Tabla 5

Distribución del área por unidades de suelo y valores del Factor K

FAO SOIL	DOM SOI	Área (Km ²)	Porcentaje de área (%)	Factor K
I-Tv-c	I	3308,950	74,318	0,018
GL	GL	63,106	1,417	0,015
GL	GL	137,910	3,097	0,015
GL	GL	93,368	2,097	0,015
GL	GL	112,772	2,533	0,015
I-Re-c	I	349,816	7,857	0,018
Tv4-a	Tv	94,920	2,132	0,020
Je7-3a	Je	228,757	5,138	0,017
Tv4-a	Tv	62,799	1,410	0,020
Total		4452,397	100,000	

Nota. K = factor de erodabilidad del suelo. Elaboración mediante análisis SIG.

La unidad edáfica con mayor extensión correspondió a I-Tv-c, que cubrió 3308,950 km², representando 74,318 % del área total de la cuenca, con un valor de $K = 0,018$. Esta unidad constituyó la zona dominante en la distribución espacial del Factor K. Le siguió la unidad I-Re-c, con 349,816 Km² (7,857 %), también con un valor de $K =$

0,018. En conjunto, ambas unidades de dominio I abarcaron más del 82 % de la superficie analizada.

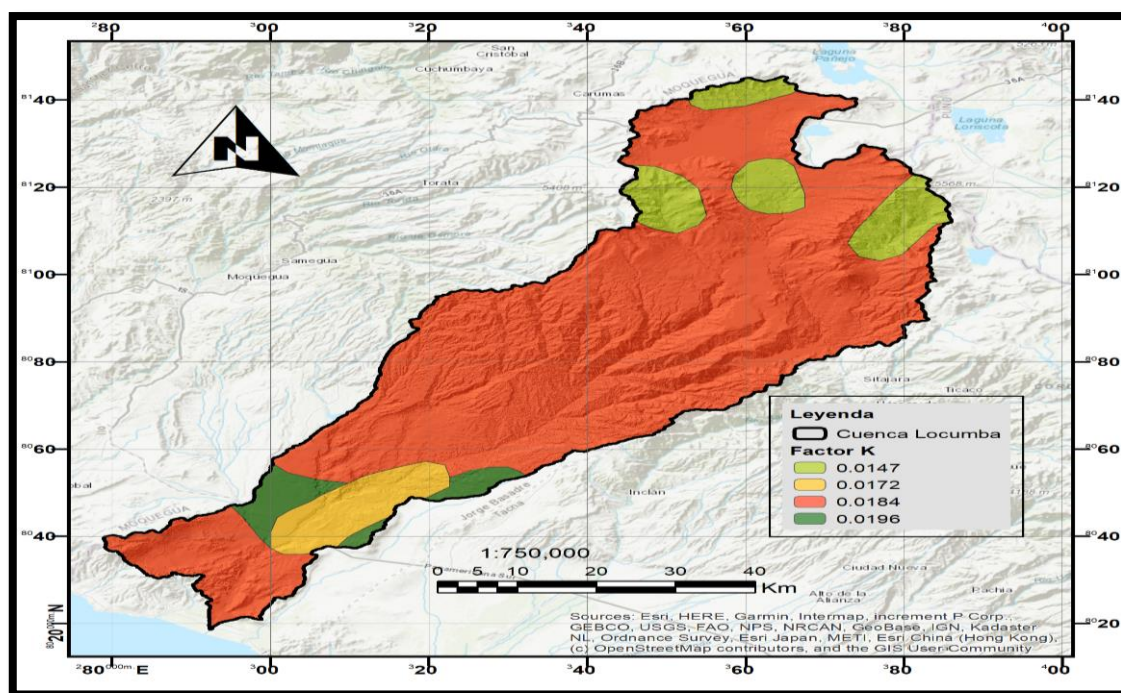
Las unidades clasificadas como GL presentaron valores uniformes de $K = 0,015$, distribuyéndose en cuatro áreas diferenciadas que oscilaron entre 63,106 Km² (1,417 %) y 137,910 km² (3,097 %). Por otro lado, las unidades Tv4-a, con valores de $K = 0,020$, representaron las áreas con mayor erodabilidad dentro de la cuenca, ocupando 94,920 Km² (2,132 %) y 62,799 Km² (1,410 %) respectivamente. Finalmente, la unidad Je7-3a registró un valor intermedio de $K = 0,017$, con una extensión de 228,757 Km², equivalente al 5,138 % del área total.

En conjunto, los resultados mostraron una predominancia de suelos con erodabilidad media ($K = 0,018$), seguidos por suelos de baja erodabilidad ($K = 0,015$) y, en menor proporción, suelos con el valor más alto de susceptibilidad a la erosión ($K = 0,020$).

El mapa del Factor K mostró la distribución espacial de la erodabilidad del suelo en la cuenca Locumba, clasificada en cuatro rangos comprendidos entre 0,0147 y 0,0196. La representación cartográfica permitió identificar con claridad las zonas donde los suelos presentaron mayor o menor susceptibilidad a la erosión hídrica, tal como se muestra en la figura 3.

Figura 3

Distribución espacial del Factor K (erodabilidad del suelo)



Las áreas con valores más altos ($K = 0,0196$) se ubicaron principalmente en la zona sur y en sectores puntuales de la parte media de la cuenca, coincidiendo con las unidades edáficas Tv4-a. Estas zonas estuvieron representadas por el color rojo en el mapa.

Los valores intermedios ($K = 0,0184$) abarcaron la mayor parte del territorio, ocupando extensas áreas continuas en el centro y sur de la cuenca, correspondientes principalmente a la unidad de suelo I-Tv-c. Estas zonas se visualizaron en color naranja.

Las unidades con valores moderados ($K = 0,0172$) se localizaron en sectores específicos del centro-norte de la cuenca, mostrados en color amarillo.

Finalmente, las áreas con los valores más bajos de erodabilidad ($K = 0,0147$) se encontraron en pequeños polígonos ubicados en la parte norte de la cuenca, identificados en color verde.

Esta distribución espacial reflejó la predominancia de suelos con erodabilidad media a alta en la cuenca Locumba, con sectores reducidos donde la susceptibilidad a la erosión fue menor.

4.1.3. Información topográfica (Factor LS)

El análisis del Factor LS se realizó a partir de la clasificación de la pendiente del terreno en seis rangos expresados en porcentaje. La distribución espacial de cada clase permitió identificar las zonas de la cuenca Locumba con mayor contribución topográfica al proceso de erosión hídrica. La Tabla correspondiente muestra el área ocupada por cada rango y su participación porcentual respecto al total de la cuenca analizada (1502,50 km²).

La tabla 6 presenta la distribución de las pendientes comprendidas entre 12 % y 18 % presentaron la mayor extensión dentro del área de estudio, con 442,00 km², lo que representa el 29,418 % del área total. Este rango se constituyó como la clase predominante del componente topográfico, evidenciando una importante presencia de relieves con inclinación media.

Por su parte, el rango de pendiente entre 18 % y 24 % ocupó una superficie de 425,60 km², equivalente al 28,326 % del territorio, posicionándose como la segunda clase más representativa. En conjunto, ambas categorías abarcaron cerca del 58 % del área total, lo que demuestra el predominio de pendientes medias a moderadamente pronunciadas en la cuenca.

Las pendientes entre 24–30 % cubrieron 278,40 km² (18.529 %), mientras que las pendientes más fuertes, clasificadas entre 30–60 %, abarcaron 248,20 km², lo que correspondió al 16.519 % del área.

Por otro lado, las pendientes bajas mostraron menor representatividad: el rango 3–12 % cubrió 84,00 km² (5.591 %) y el rango 0–3 % ocupó 24,30 km², equivalente al 1.617 % del área total.

Tabla 6

Distribución del área por rangos de pendiente para el cálculo del Factor LS

Pendiente (%)	Área (Km ²)	Porcentaje de área (%)
0–3	24,30	1,617
3–12	84,00	5,591
12–18	442,00	29,418
18–24	425,60	28,326
24–30	278,40	18,529
30–60	248,20	16,519
Total	1502,50	100,00

Nota. LS = factor de longitud e inclinación de la pendiente. Elaboración mediante análisis SIG.

La figura 4 muestra el mapa del Factor LS permitió representar la distribución espacial del efecto combinado entre la longitud de la pendiente y la inclinación del terreno en la cuenca Locumba. Los valores encontrados varían entre los 0,3 y 14,6, esto permitió reconocer las zonas donde las condiciones topográficas ejercen una mayor influencia sobre los procesos de erosión.

Las áreas con valores más elevados del Factor LS, representadas en color rojo intenso, se localizaron principalmente en el tercio central de la cuenca, siguiendo patrones asociados a los sistemas de drenaje y a sectores con pendientes pronunciadas. Estos espacios concentraron valores cercanos al máximo registrado, equivalente a $LS = 14,6$, lo que evidencia una mayor capacidad del relieve para favorecer la escorrentía superficial y el transporte de partículas del suelo.

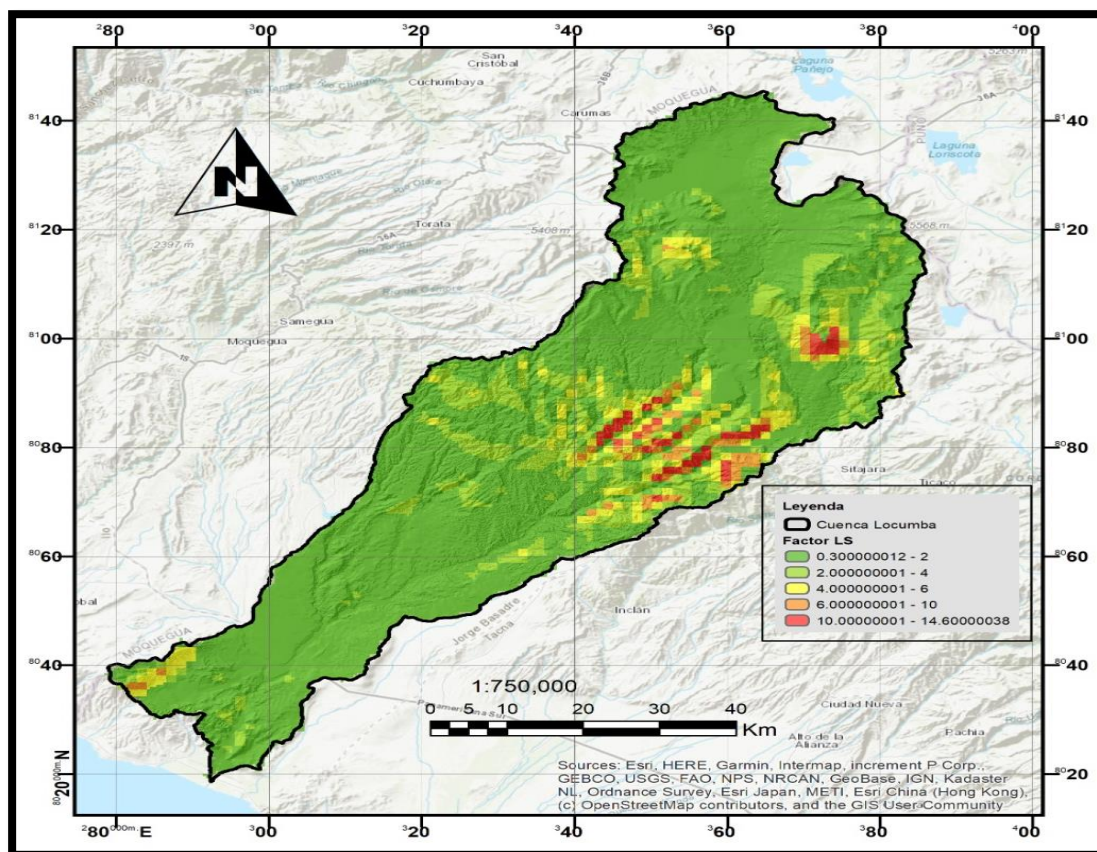
Los valores intermedios del Factor LS, representados en tonos amarillos, se distribuyeron en franjas asociadas a laderas con pendientes moderadas. Estas áreas ocuparon extensiones considerables dentro de la zona central y sur de la cuenca.

Las zonas con los valores más bajos de LS, identificadas en tonos verdes, se ubicaron de manera aislada en sectores del extremo sur y en áreas puntuales del centro y norte. Estas correspondieron a superficies de pendiente baja y poca longitud de

escorrentía, donde los valores del Factor LS se aproximaron al mínimo calculado ($LS = 0,3$), tal como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Distribución espacial del Factor LS (longitud y pendiente del terreno)



4.1.4. Uso y cobertura del suelo (Factor C)

a. Resultados NDVI

La Tabla 7 presenta la reclasificación del NDVI y la asignación de valores del factor C. Se observa una relación inversa: los valores bajos de NDVI representan poca cobertura vegetal y valores elevados de C, asociados con mayor susceptibilidad a la erosión. Por el contrario, los valores altos de NDVI indican vegetación densa, valores bajos de C y una mayor protección del suelo. El Factor C fue estimado a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) calculado mediante imágenes satelitales Landsat. Para ello se utilizaron dos escenas correspondientes a los años de análisis seleccionados:

- Landsat 8 OLI/TIRS, Path 002, Row 072, adquirida el 5 de abril de 2013.

- Landsat 9 OLI/TIRS, Path 002, Row 072, adquirida el 16 de abril de 2024.

La tabla 7, presenta una clasificación de los valores de NDVI, en función del nivel de cobertura vegetal presente en el área de estudio. Esta clasificación permite relacionar la densidad de la vegetación con la susceptibilidad del suelo a la erosión y, a partir de ello, asignar valores sugeridos del factor C, utilizado para representar el efecto de la cobertura y manejo de la vegetación sobre la pérdida de suelo.

Tabla 7

Reclasificación de NDVI

Clase NDVI	Rango NDVI	Descripción	Interpretación ambiental	Factor C sugerido
1. Suelo desnudo/mínima vegetación	-1,00 a 0,10	Superficies con muy poca o nula cobertura vegetal	Alta susceptibilidad a la erosión	0,45–0,65
2. Vegetación muy rala	0,10 a 0,25	Matorrales dispersos y cultivos en descanso	Susceptibilidad moderada-alta a la erosión	0,25–0,45
3. Vegetación rala/intermedia	0,25 a 0,40	Pastizales y zonas agrícolas con cobertura moderada	Susceptibilidad moderada a la erosión	0,10–0,25
4. Vegetación densa	0,40 a 0,60	Cobertura vegetal consistente	Baja susceptibilidad a la erosión	0,02–0,10
5. Vegetación muy densa	> 0,60	Bosques, humedales, bofedales y zonas agrícolas intensivas	Muy baja susceptibilidad a la erosión	0,001–0,02

Nota. NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada; C = factor de cobertura y manejo del suelo.

El análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente al año 2013 evidenció una distribución heterogénea de la cobertura vegetal dentro de la cuenca Locumba. Los valores obtenidos variaron entre 0,30 y 0,55, lo que refleja desde áreas con ausencia total de vegetación hasta sectores con cobertura vegetal moderada.

En términos espaciales, la cuenca mostró un predominio de valores bajos (NDVI < 0,20), representados en tonos anaranjados y rojizos en el mapa. Estas zonas corresponden mayormente a áreas áridas y semiáridas características de la región de Tacna, donde la presencia de suelos desnudos es significativa y constituye superficies con mayor susceptibilidad a erosión.

Las áreas agrícolas irrigadas, vegas altoandinas y zonas con presencia de bofedales fueron identificadas por valores NDVI moderados a altos (0,30 – 0,55), mostrados en tonalidades verdes. Estas áreas se concentran principalmente en:

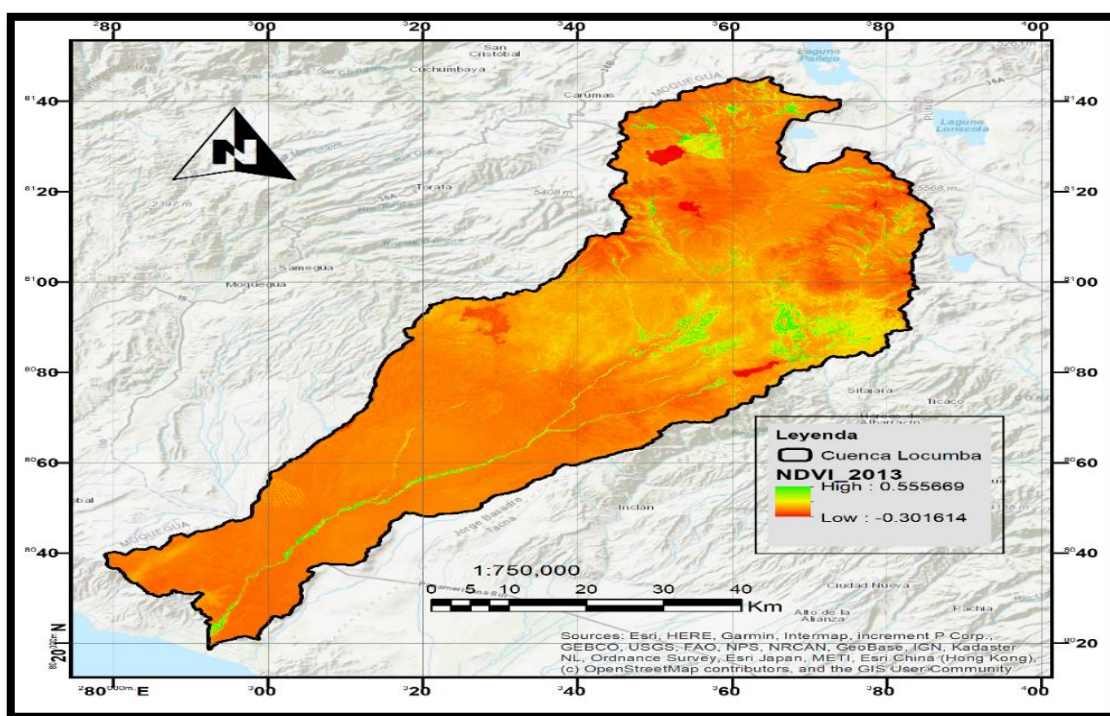
- Sectores cercanos al río Locumba.
- Áreas de cultivo del valle bajo y medio.
- Zonas altoandinas con vegetación natural estacional (puna húmeda).

Aunque representan un porcentaje mucho menor respecto al área total de la cuenca, estos sectores cumplen un rol importante en la reducción del riesgo de erosión, debido a la capacidad protectora de la vegetación frente al impacto directo de las gotas de lluvia y al escurrimiento superficial.

En la figura 5, el NDVI 2013 muestra que la cuenca Locumba presentaba una cobertura vegetal limitada, predominando condiciones de baja protección del suelo, lo cual repercute directamente en un Factor C elevado dentro del modelo USLE para amplias zonas de la cuenca. Este comportamiento es consistente con las características ecológicas de las regiones áridas del sur del Perú, donde la disponibilidad hídrica condiciona fuertemente el desarrollo vegetal.

Figura 5

NDVI año 2013

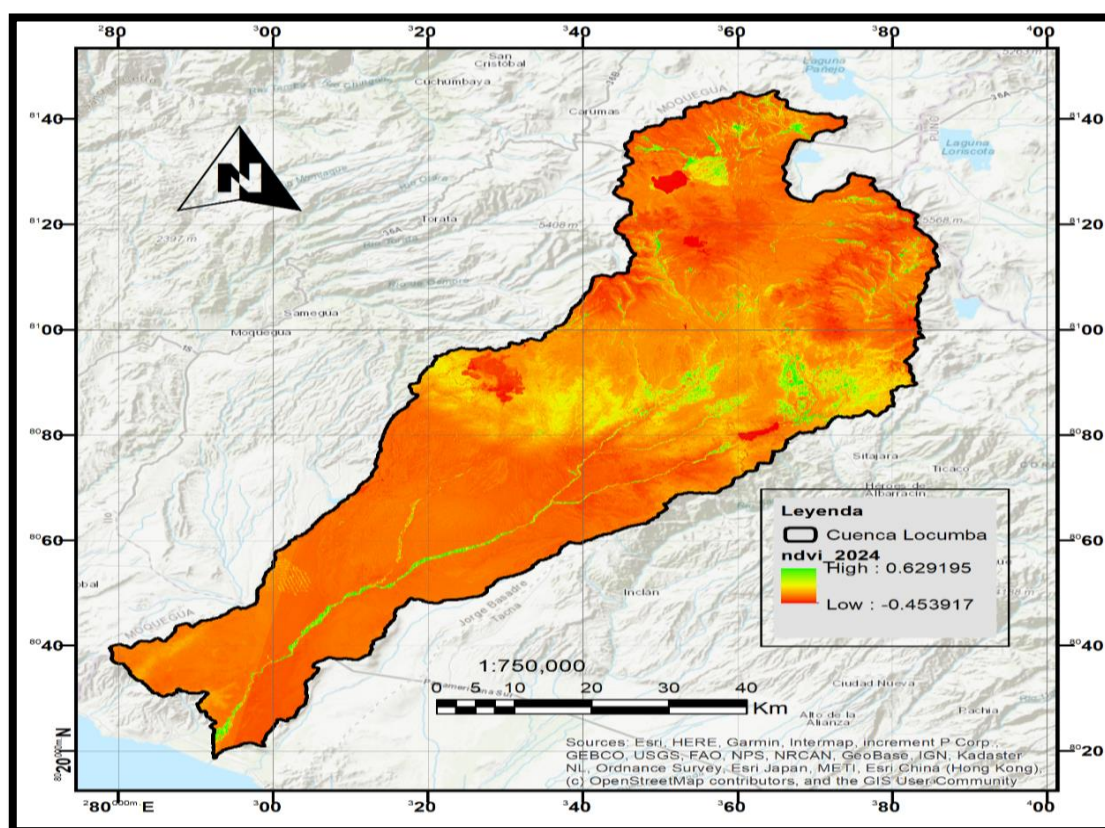


El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del año 2024 , que se muestra en la figura 6, evidenció una variabilidad similar a la registrada en el año 2013, aunque con ligeras diferencias en la distribución de la cobertura vegetal. Los valores obtenidos oscilaron entre 0,45 y 0,62, lo que permitió identificar desde superficies sin cobertura vegetal o con presencia de suelos erosionados, hasta sectores con vegetación moderada a alta.

Estas últimas áreas se asociaron principalmente con zonas agrícolas y espacios húmedos altoandinos, donde las condiciones ambientales favorecen una mayor actividad fotosintética y densidad de cobertura vegetal.

Figura 6

NDVI año 2024



Una gran parte de la cuenca registró valores bajos a muy bajos de NDVI ($\leq 0,20$), representados en tonos anaranjados y rojizos. Estas áreas, en la parte media y baja de la cuenca, corresponden a superficies áridas y semiáridas donde predominan suelos desnudos y cobertura vegetal escasa. Esta condición implica niveles reducidos de protección frente a la erosión hídrica, contribuyendo a valores relativamente altos del Factor C.

Por otro lado, se identificaron sectores con valores de NDVI moderados y altos (0,30 – 0,62), mostrados en tonalidades verdes y amarillo-verdosas. Estos se concentran en:

- Áreas agrícolas del valle bajo y medio del río Locumba.
- Zonas de bofedales, pajonales y humedales altoandinos.
- Sectores irrigados que mantienen actividad agrícola permanente.

En comparación con el año 2013, se observa un ligero incremento en áreas con NDVI moderado, lo que podría asociarse a expansión agrícola, mejores condiciones de humedad estacional o cambios en la fenología de la vegetación al momento de la captura. Sin embargo, estas zonas continúan representando un porcentaje pequeño respecto al total de la cuenca. En conjunto, el NDVI 2024 evidencia que la cuenca mantiene una dominancia de suelos desnudos o con vegetación escasa, reforzando la condición de vulnerabilidad a los procesos erosivos.

La Tabla 8 compara la distribución de las clases de NDVI entre los años 2013 y 2024 del NDVI, permitió evidenciar variaciones en la cobertura vegetal de la cuenca Locumba durante el periodo evaluado.

Tabla 8

Comparativa NDVI — Áreas estimadas por clase (Km²)

Clase NDVI	Rango NDVI	Descripción	Área 2013 (km²)	2013 (%)	Área 2024 (km²)	2024 (%)
Clase 1	-1,00–0,00	Suelo desnudo	6500	43,0	6100	40,4
Clase 2	0,00–0,20	Vegetación muy escasa	5400	35,7	5600	37,1
Clase 3	0,20–0,40	Vegetación rala–moderada	2000	13,2	2300	15,2
Clase 4	0,40–0,60	Vegetación moderada	1100	7,3	1250	8,2
Clase 5	> 0,60	Vegetación densa	142	0,8	192	1,3
Total	—	—	15 142	100,0	15 142	100,0

Nota. NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. Elaboración mediante imágenes satelitales.

En ambos años se observó una predominancia de valores bajos, condición coherente con las características áridas y semiáridas de la región. También se identificaron diferencias relevantes en cuanto a la extensión y distribución espacial de las áreas con mayor actividad vegetal.

En el año 2013, los valores de NDVI se concentraron principalmente entre 0,30 y 0,25, lo que refleja la presencia dominante de superficies con suelo desnudo, escasa cobertura vegetal y vegetación rala. Las zonas con valores moderados y altos, comprendidos aproximadamente entre 0,30 y 0,55, se localizaron de manera puntual en áreas agrícolas, bofedales altoandinos y sectores irrigados del valle medio y bajo. Esta distribución evidencia que las coberturas vegetales más densas tuvieron una presencia limitada dentro de la cuenca, reduciendo la capacidad natural del territorio para proteger el suelo frente al impacto de la lluvia y los procesos de erosión hídrica.

En el año 2024, aunque se mantiene la predominancia de valores bajos, se observó un ligero incremento en áreas con NDVI moderado, con valores máximos cercanos a 0.62.

b. Factor C

El mapa del Factor C correspondiente al año 2013 muestra la distribución espacial del grado de protección vegetal frente a los procesos de erosión hídrica en la cuenca Locumba. Los valores obtenidos oscilan entre 0,222 y 0,650, rango que evidencia condiciones de cobertura vegetal escasa a moderada, características de una cuenca predominantemente árida y semiárida.

Las zonas con valores menores de Factor C ($\approx 0,22 - 0,35$) se concentran principalmente en el valle bajo y medio, donde la cobertura vegetal asociada a áreas agrícolas, riberas y cultivos bajo riego proporciona una mayor protección del suelo. Estas zonas presentan una vegetación más continua o manejada, lo cual reduce la susceptibilidad a la erosión al disminuir la energía cinética de las gotas de lluvia.

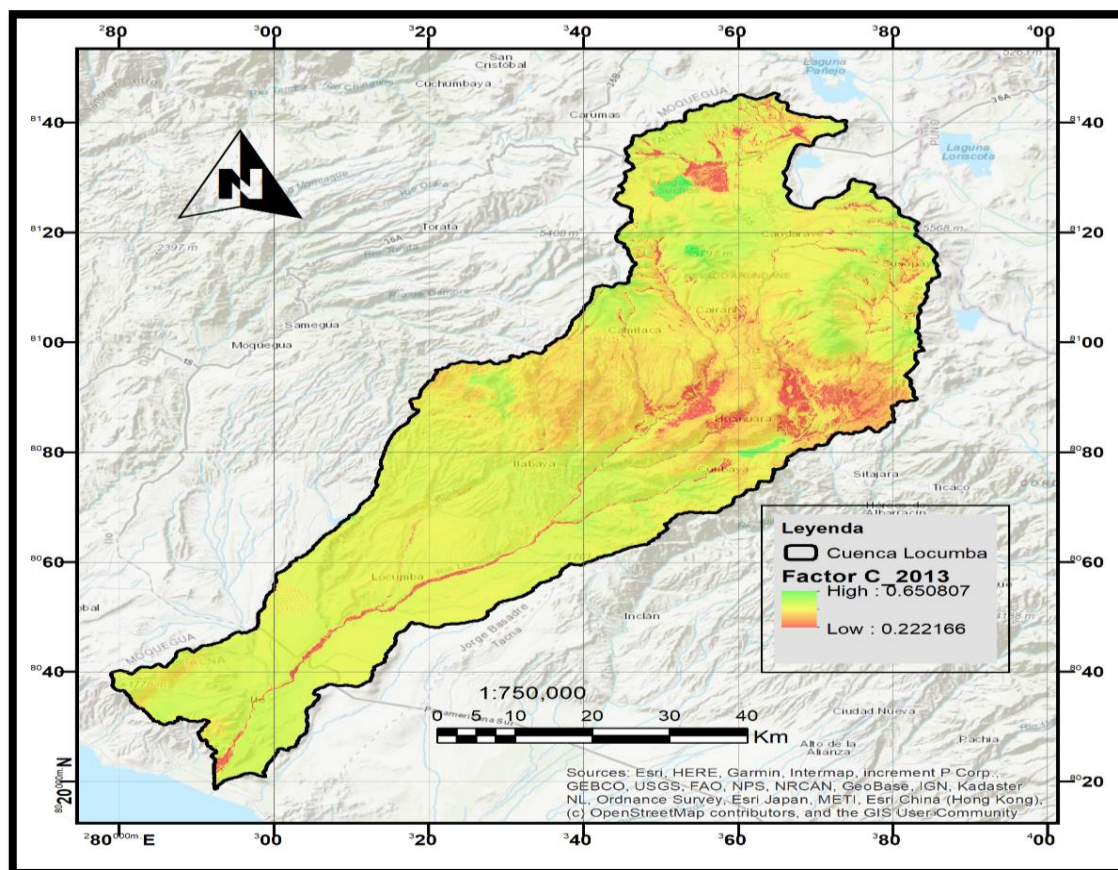
Por otro lado, las áreas con valores altos de Factor C ($\approx 0,50 - 0,65$) se distribuyen principalmente en los sectores medios y altos de la cuenca, donde predominan suelos expuestos, matorrales dispersos, vegetación herbácea muy rala y superficies erosionadas naturalmente. Estas zonas, caracterizadas por bajos niveles de NDVI en el año 2013, presentan condiciones que favorecen la pérdida de suelo, especialmente en pendientes medias y altas, donde la escasa cobertura no amortigua el impacto de la lluvia.

El patrón espacial del Factor C en 2013 refleja una cuenca con limitada cobertura vegetal protectora, donde predominan superficies vulnerables a la erosión hídrica, que se evidencia en la figura 7. Estas condiciones definen un escenario de mayor exposición del suelo, especialmente en los sectores altoandinos y en la franja central de la cuenca,

contribuyendo significativamente al balance erosivo estimado mediante el modelo USLE.

Figura 7

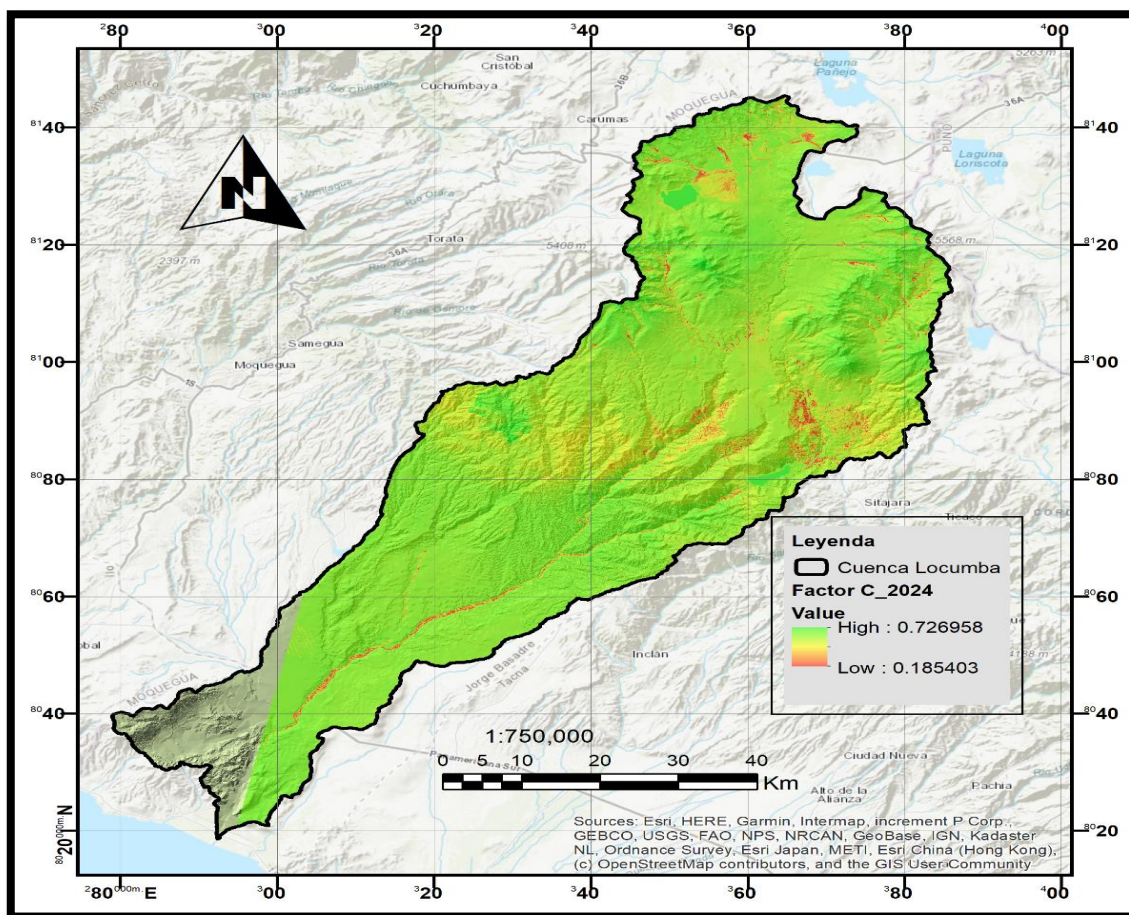
Distribución espacial del Factor C derivado del NDVI para el año 2013



En la figura 8 se muestra el Factor C correspondiente al año 2024, que se muestra en la figura 8 fue obtenido a partir del NDVI de la imagen Landsat 9 (OLI/TIRS) del 16 de abril de 2024, permitió evaluar la condición de la cobertura vegetal en la cuenca Locumba durante dicho periodo. Los valores obtenidos oscilaron entre 0,185403 (baja susceptibilidad a la erosión) y 0,726958 (alta susceptibilidad), evidenciando una marcada variabilidad espacial en la densidad y estado de la vegetación durante el año analizado.

Figura 8

Distribución espacial del Factor C derivado del NDVI para el año 2024



4.1.5. Prácticas de manejo agrícola (Factor P)

Debido a la ausencia de estas prácticas, el valor del Factor P fue establecido en 1.0 para toda la extensión de la cuenca. Este valor representa condiciones sin intervención antrópica orientada al control de la erosión, por lo que el factor no introdujo variaciones espaciales en el cálculo de la pérdida de suelo mediante el modelo USLE.

4.2. Tasa de pérdida de suelo aplicando USLE

La figura 9, la distribución espacial de la pérdida de suelo estimada con la ecuación USLE para el año 2013 muestra una cuenca Locumba predominantemente caracterizada por niveles muy bajos y bajos de erosión, representados en color verde. Estos valores corresponden a la mayor parte del territorio, evidenciando que, en términos generales, las condiciones de pendiente, cobertura vegetal y uso del suelo para dicho año favorecerían una protección relativa del recurso suelo frente a procesos erosivos intensos.

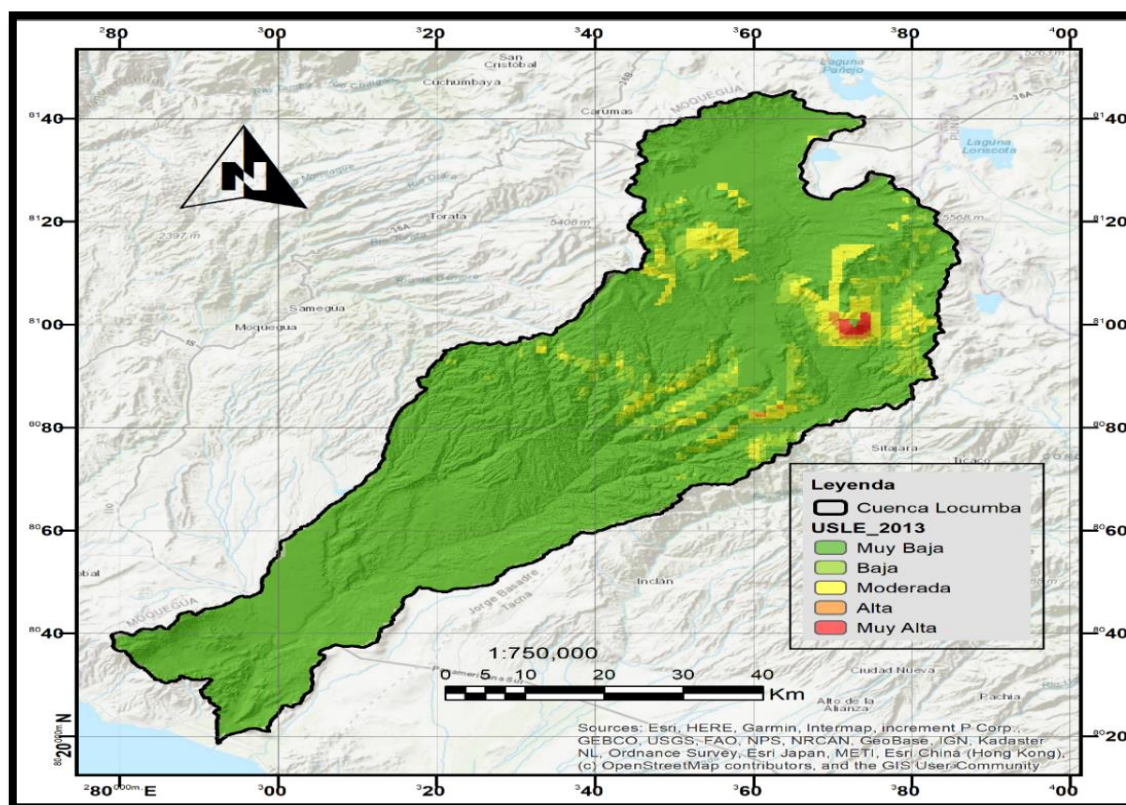
Sin embargo, el mapa, revela zonas focalizadas con niveles moderados, altos y muy altos de erosión, principalmente localizadas en la parte media-alta de la cuenca, al este del ámbito de estudio. Estas áreas coinciden con sectores de pendientes más pronunciadas, suelos de mayor erodabilidad y menor cobertura vegetal, lo cual incrementa significativamente la vulnerabilidad del terreno frente a la acción de las precipitaciones y escorrentía superficial.

Las zonas clasificadas como alta y muy alta erosión aparecen representadas en tonalidades anaranjadas y rojas, concentrándose en laderas expuestas y áreas intervenidas por actividades antrópicas. La presencia de estos focos críticos sugiere una combinación de factores predisponentes, entre ellos: degradación de la cobertura vegetal, suelos con poca cohesión, prácticas agrícolas sin medidas de conservación y pendientes abruptas que favorecen la acumulación de energía erosiva.

En contraste, los sectores con erosión muy baja, además de ocupar la mayor parte de la cuenca, se distribuyen especialmente en zonas de menor pendiente y áreas donde la vegetación natural o agrícola proporcionaba en 2013 un efecto protector sobre el suelo. Esto resalta la importancia de la cobertura vegetal como factor clave para mitigar los procesos erosivos.

Figura 9

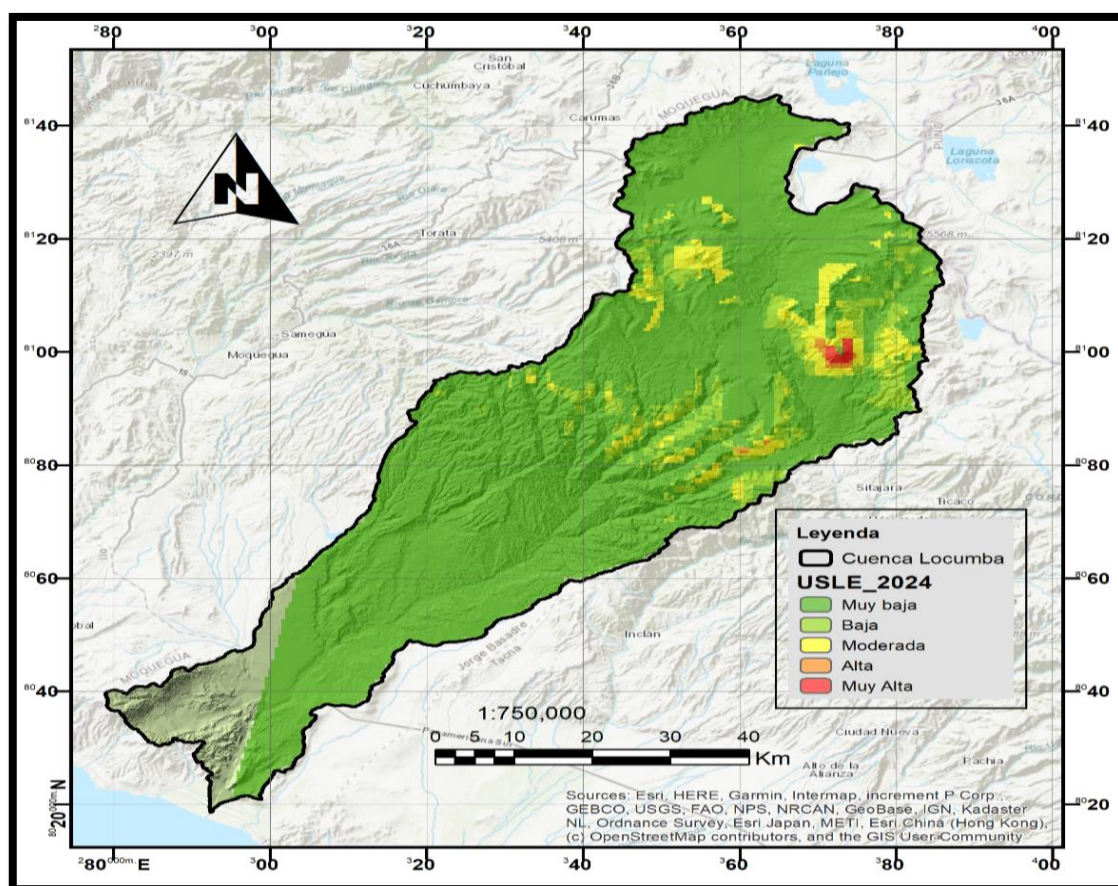
Distribución espacial de la pérdida de suelo para el año 2013



El mapa de pérdida de suelo estimada mediante la ecuación USLE para el año 2024 que se muestra en la figura 10, evidencia un patrón espacial claramente diferenciable dentro de la cuenca Locumba, donde predominan las categorías de erosión muy baja y baja, especialmente en los sectores medios y bajos de la cuenca. Estas zonas, representadas en tonalidades verdes, abarcan la mayor extensión territorial y se asocian principalmente a áreas con pendientes suaves, mayor cobertura vegetal estacional y menor concentración de actividades agrícolas intensivas.

Figura 10

Mapa de distribución espacial de la pérdida de suelo para el año 2024



Las categorías de erosión moderada, alta y muy alta, identificadas en tonos amarillo, naranja y rojo, presentan una distribución más focalizada y se concentran en la zona altoandina del sector noreste de la cuenca. Estas áreas coinciden con pendientes marcadas, presencia de suelos frágiles y menor cobertura vegetal, características que incrementan significativamente la susceptibilidad a la erosión hídrica. Dentro de estas zonas destacan áreas donde la erosión supera los 40

$t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, lo cual indica procesos críticos de pérdida de suelo que requieren intervención prioritaria.

4.3. Áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica

El análisis de la pérdida de suelo mediante la ecuación USLE permitió identificar patrones territoriales de susceptibilidad a la erosión hídrica dentro de la cuenca Locumba. Se aplicaron herramientas de estadísticas zonales, reclasificación y superposición temática, lo cual permitió relacionar los valores de erosión con las principales variables condicionantes: pendiente (LS), erodabilidad del suelo (K), erosividad de la lluvia (R), cobertura vegetal (C) y prácticas de manejo (P).

Los resultados mostraron que las áreas con susceptibilidad muy baja y baja dominan la mayor parte de la cuenca, especialmente en la zona media y baja de la cuenca. Estas áreas se caracterizan por pendientes suaves a moderadas, suelos más profundos y presencia de cultivos o vegetación estacional, lo que contribuye a disminuir el efecto de la escorrentía superficial. La predominancia de tonalidades verdes en el mapa USLE refleja que, en términos generales, la cuenca mantiene condiciones de estabilidad relativa frente a la erosión hídrica en la mayor parte de su extensión.

Las áreas clasificadas con susceptibilidad moderada, alta y muy alta presentan una distribución espacial más focalizada y se concentran principalmente en el sector noreste de la cuenca, donde predominan los terrenos de ladera con fuertes pendientes, suelos de textura fina y cobertura vegetal reducida. Estas zonas, representadas en tonalidades amarillas, naranjas y rojas, coinciden con áreas donde la acción combinada de la topografía, la erosividad de las precipitaciones y la escasa cobertura vegetal incrementan de manera significativa la vulnerabilidad del terreno.

El análisis integrado de los factores USLE muestra que las áreas de mayor susceptibilidad se ubican en sectores donde el factor LS alcanza valores elevados, asociados a pendientes pronunciadas y altas longitudes de vertiente, lo cual favorece la concentración de la escorrentía. Asimismo, se identifican zonas donde el factor C presenta valores altos, lo que indica ausencia o pérdida de cobertura vegetal, situación común en áreas de sobrepastoreo, terrenos abandonados o zonas agrícolas en condiciones de degradación. El factor K también influye localmente, especialmente donde se presentan suelos con alta erodabilidad asociados a materiales finos o alterados.

Los valores de erosión muy alta registrados en zonas puntuales están vinculados con dinámicas climáticas estacionales, especialmente en áreas que reciben precipitaciones más intensas durante el periodo húmedo. La interacción entre la erosividad de la lluvia (R) y los factores de uso del suelo permite inferir que, en años con condiciones climáticas extremas, estas zonas podrían experimentar incrementos aún mayores en la pérdida de suelo.

Los patrones espaciales identificados permiten determinar las áreas prioritarias para intervención, donde se recomienda implementar prácticas de conservación de suelos como terrazas de formación lenta, revegetación con especies nativas, barreras vivas, manejo ganadero sostenible y prácticas de control de escorrentía. La identificación de estas zonas vulnerables constituye un insumo fundamental para la gestión sostenible del territorio y la planificación de medidas de mitigación orientadas a reducir la degradación del suelo en la cuenca Locumba.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

La discusión responde de manera directa a cada uno de los objetivos específicos planteados, articulando los resultados obtenidos con la evidencia científica.

5.1. Caracterización de los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal

La caracterización de los factores USLE permitió comprender que la erosión hídrica en la cuenca Locumba está fuertemente condicionada por la interacción de variables fisiográficas y ambientales, siendo la topografía (LS) y la cobertura vegetal (C) los elementos de mayor influencia. Este comportamiento coincide con los hallazgos de Ke-xin Y Ying-xian (2021), quienes identificaron que las pendientes pronunciadas contribuyen significativamente al incremento del potencial erosivo, y con lo reportado por Valdebenito (2019) y Zaragoza (2021), quienes demostraron que la reducción de cobertura vegetal aumenta directamente la degradación del suelo.

La distribución del factor K evidenció suelos con erodabilidad moderada en sectores específicos, lo que concuerda con lo encontrado por estudios nacionales como Chili (2024) y Alarcón y SánchezAltamirano (2023), donde los suelos finos y de baja cohesión favorecieron el desprendimiento por impacto pluvial. El análisis del factor R mostró que la energía de la precipitación influye localmente en el incremento de la erosión, en concordancia con estudios realizados en cuencas áridas de México (García, 2021), donde la variabilidad de la lluvia intensifica los procesos erosivos.

La caracterización confirma que la erosión hídrica en Locumba responde a un sistema donde la pendiente, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y la intensificación de las lluvias actúan de forma integrada, validando ampliamente el primer objetivo específico.

5.2. Cálculo de la tasa de pérdida de suelo aplicando el modelo USLE

La pérdida de suelo mediante USLE permitió identificar una marcada diferencia espacial entre áreas estables y sectores críticos. Las tasas más altas se presentaron en zonas de ladera con pendientes elevadas y valores altos del factor C, donde la cobertura vegetal es insuficiente para amortiguar el impacto de las gotas de lluvia.

Los valores estimados son consistentes con lo reportado en investigaciones nacionales como Álvarez (2020), que encontró tasas elevadas en zonas con pérdida de vegetación, y con los resultados de Nuñez (2024), donde incluso pequeñas áreas pueden concentrar pérdidas elevadas cuando coinciden factores desfavorables. A nivel internacional, el estudio de Pighini et al. (2022) sobre cuencas similares demuestra que la sustitución de vegetación por actividades agrícolas triplica la vulnerabilidad erosiva, lo que coincide con los patrones identificados en algunos sectores de Locumba.

Como señaló García (2021), el modelo USLE tiende a sobreestimar valores absolutos, especialmente en zonas agrícolas o perturbadas, por lo que los resultados deben interpretarse como susceptibilidad potencial, más que como pérdida exacta. A pesar de ello, la distribución espacial generada refleja con precisión las condiciones reales de degradación, validando la pertinencia científica del uso del modelo en esta cuenca.

5.3. Identificación de las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica

La unión espacial de los factores permitió determinar que las zonas de mayor susceptibilidad se ubican principalmente en el sector noreste de la cuenca, donde convergen condiciones topográficas adversas, suelos erosionables, baja cobertura vegetal y energía pluvial suficiente para desencadenar procesos erosivos intensos. Esta convergencia confirma lo planteado en el objetivo y coincide plenamente con estudios locales desarrollados en Tacna, como el de Condori (2021) y Laqui (2019), quienes identificaron dinámicas similares en cuencas de características fisiográficas casi equivalentes.

Los resultados verifican lo expuesto por Zaragoza (2021) y Pighini et al. (2022), quienes demostraron que la cobertura vegetal es un factor clave y que su degradación genera un incremento espacial de áreas vulnerables. La comparación del NDVI entre 2013 y 2024 respalda esta afirmación, mostrando zonas donde la disminución de vegetación coincide con incrementos en la susceptibilidad erosiva.

El análisis confirma que la identificación de zonas críticas es sólida y científicamente respaldada, cumpliendo con el tercer objetivo específico y ofreciendo insumos concretos para la toma de decisiones ambientales y la planificación territorial.

CONCLUSIONES

El primer objetivo específico, se analizaron los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo sobre la erosión hídrica de la cuenca. En el caso del Factor R se encontró valores entre 4,325 y 346 $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$; el Factor K varió entre 0,0147 y 0,0196; el Factor LS registró valores de 0.3 a 14.6; y el Factor C mostró valores entre 0.222 y 0.650 para el año 2013, y entre 0,185403 y 0,726958 para el año 2024. Por su parte, el Factor P fue establecido en 1,0, debido a que no se identificaron prácticas de conservación en la zona de estudio.

En el segundo objetivo específico, se calculó la tasa de pérdida de suelo mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, identificándose niveles de erosión que van desde valores menores a $1\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ hasta valores superiores a $40\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. En la mayor parte de la cuenca predominaron las categorías de erosión muy baja y baja, mientras que las categorías moderada, alta y muy alta se presentaron en áreas específicas del territorio.

El tercer objetivo específico, se identificaron las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica, las cuales se localizaron principalmente en el sector noreste de la cuenca Locumba. Estas zonas se caracterizaron por presentar pendientes pronunciadas, valores elevados del Factor LS, suelos con mayor erodabilidad y cobertura vegetal reducida, condiciones que favorecen el incremento de la pérdida de suelo.

Se concluye que la aplicación del modelo USLE permitió evaluar la magnitud y distribución espacial de la erosión hídrica en la cuenca Locumba, evidenciando que el proceso erosivo no se distribuye de forma uniforme, sino que se concentra en sectores específicos asociados principalmente a la pendiente, la erodabilidad del suelo y la limitada cobertura vegetal.

RECOMENDACIONES

Se puede incorporar campañas de aforo de sedimentos, mediciones directas de escorrentía y caracterización in situ de perfiles de suelo. Esto permitirán validar empíricamente las estimaciones obtenidas con USLE y reducir posibles sesgos asociados al modelo, tal como señalan investigaciones recientes sobre su tendencia a sobreestimar valores absolutos.

Se plantea complementar el análisis con modelos como RUSLE, MUSLE o WEPP, los cuales incorporan dinámicas temporales, intensidad de tormentas y procesos hidrológicos más detallados. El uso combinado de estos modelos ofrecería una caracterización más robusta de la erosión actual y potencial en la cuenca Locumba.

Como se ve que la erosividad está estrechamente asociada a la variabilidad estacional y a eventos extremos, se recomienda utilizar series históricas de precipitación con resolución diaria o subdiaria. Esto permitirá evaluar escenarios de erosión bajo condiciones de cambio climático y anomalías hidrometeorológicas.

Se sugiere repetir el análisis del factor C utilizando imágenes satelitales de diferentes épocas (p. ej., cada 5 años), con el fin de evaluar tendencias de degradación de la vegetación y su relación con la intensificación de la erosión hídrica en el tiempo.

Se recomienda que instituciones como el Gobierno Regional de Tacna, el Ministerio del Ambiente, el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, la Autoridad Nacional del Agua y los gobiernos locales, implementen un monitoreo continuo de los recursos suelo y agua, con el propósito de evaluar su estado, prevenir procesos de degradación, identificar zonas críticas de erosión y generar información actualizada que respalde la toma de decisiones para una adecuada gestión y conservación del territorio.

.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad Shah, A., Gong, Z., Ali, M., Sun, R., Ali Naqvi, S. A., & Arif, M. (Noviembre de 2020). *Looking through the Lens of schools: Children perception, knowledge, and preparedness of flood disaster risk management in Pakistan*. Obtenido de Science Direct:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212420920314096?via%3DiHub>
- 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*. Obtenido de
https://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14095/2101/TESIS_CRISTIAN%20ALEX%20ALARCON%20LINARES%20Y%20BEDITH%20SANCHEZ%20ALTAMIRANO_FIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Alvarez Ticllasuca , A. (Setiembre de 2020). *Estimación de la perdida de suelo por erosión hídrica mediante la aplicación de la metodología USLE en la subcuenca del río Ichu*. doi:<https://doi.org/10.46908/riect.v3i2.97>
- Alzola, P. (27 de Noviembre de 2020). *¿Qué es una brigada de emergencia?* Obtenido de Alerta de Prevención de Riesgos:
<https://alertaprevencion.cl/2020/11/27/que-es-una-brigada-de-emergencia/>
- Ares, M., & Varni, M. (30 de Agosto de 2016). *¿Qué es la erosión hídrica y cómo la estudiamos en el IHLLA?* Argentina: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Obtenido de
<https://www.unicen.edu.ar/content/%C2%BFqu%C3%A9-es-la-erosi%C3%B3n-h%C3%ADdrica-y-c%C3%B3mo-la-estudiamos-en-el-ihlla>
- Arnáez, J., Ortigosa, L., Ruiz-Flaño, P., Llorente, J., & Lasanta, T. (25 de Septiembre de 2009). *Modelos de distribución espacial de la erosión en laderas cultivadas con viñedos*. España. Obtenido de
<https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/97841/1/Modelos%20de%20distribuci%C3%B3n%20espacial%20de%20la%20erosi%C3%B3n%20en%20laderas%20....pdf>
- Bembibre, C. (2022). *Definición de Amenaza » Concepto en DefinicionABC*. Obtenido de Definición ABC: <https://www.definicionabc.com/general/amenaza.php>

- Bordino, J. (08 de Julio de 2024). *Ecología verde*. Obtenido de Cuencas hidrográficas: qué son, tipos e importancia: <https://www.ecologiaverde.com/cuencas-hidrograficas-que-son-tipos-e-importancia-3334.html>
- Cabello, V., Véliz, K., Moncada, A., Irarrázaval, M., & Juillerat, F. (1 de Octubre de 2021). *Disaster Risk Reduction Education: Tensions and Connections with Sustainable Development Goals*. Obtenido de Repositorio UCHILE: <https://repositorio.uchile.cl/xmlui/bitstream/handle/2250/186032/Disaster-Risk.pdf?sequence=1>
- Calderón Cárdenas, J. M., & Vizcarra Soto, S. D. (12 de JULIO de 2024). *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*. Tacna, peru. Obtenido de <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/3551/Calderon-Cardenas-Vizcarra-Soto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Campos, H. (Marzo de 2019). *Journal of Global Education Sciences Disaster risk management in secondary education teachers in Chíncha Province, Peru*. Obtenido de Repositorio institucional Universidad Autónoma de Ica: <http://repositorio.autonomaica.edu.pe/bitstream/autonomaica/449/1/Disaster%20risk%20management%20in%20secondary%20education%20teachers%20in%20Chíncha%20Province%2C%20Peru.pdf>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2016). *Lineamientos para incorporar la gestión prospectiva y gestión correctiva en los presupuestos participativos*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/cenepred/informes-publicaciones/1867454-lineamientos-para-incorporar-la-gestion-prospectiva-y-gestion-correctiva-en-los-presupuestos-participativos>
- Chili Luque, J. I. (31 de Enero de 2024). *Determinación de la erosión hídrica media anual en la cuenca del río Illpa mediante el método USLE aplicando teledetección y SIG*. Obtenido de <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/21600>
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental la observación de la Tierra desde el espacio*. España: Ariel Ciencia. Obtenido de https://books.google.com.pe/books?id=aKsNXCVctcQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero Gutiérrez, A., Gonzáles, J., Reynero, M., Díez, A., & Bergesio, L. (24 de Octubre de 2012). *Erosión Hídrica Principios y técnicas de manejo*. 290. (U. editora, Ed.) Río Cuarto, Argentina. Obtenido de

- https://www.researchgate.net/profile/Jos-Cisneros/publication/261950035_Erosion_Hidrica_Principios_y_Tecnicas_de_Manejo/links/0deec5360142db3b03000000/Erosion-Hidrica-Principios-y-Tecnicas-de-Manejo.pdf
- Condori Tintaya, F. T. (25 de Junio de 2021). *Pérdida de suelos por erosión hídrica en laderas semiáridas de la sub cuenca Cairani-Camilaca*. Tacna, Tacna, Perú. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000200007>
- Corporación Autónoma Regional del Tolima. (7 de Noviembre de 2008). *Perdida de suelos*. Tolima, Colombia. Obtenido de https://cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/m_212perdida_de_suelos_totare.pdf
- Cotler, H., Galindo, A., González, I., Pineda, R., & Ríos, E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectiva para su manejo y gestión. *Primera Edición*. Mexico: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/tvm_-_cuencas_final_2014.pdf
- Cruz, N., & Zurita, S. (2021). Niveles de erosión hídrica aplicando el sistema de información geográfica en el distrito de Yanaoca-Cusco 2020. Universidad Privada del Norte. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/30561/Tesis.pdf;jsessionid=A13D4E9EF176FD3F3C205AF41B63867C?sequence=1>
- De Freitas Amorim, R. (2010). *Potencialidade à degradação na microbacia riacho passagem/rn*. Brasil. Obtenido de <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/18207/1/RodrigoFA DISSERT.pdf>
- Dominguez, J. (2000). Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geografica (SIG). España: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Javier-Dominguez-12/publication/237467702_Breve_Introduccion_a_la_Cartografia_y_a_los_Sistemas_de_Informacion_Geografica_SIG/links/0deec52724b3d7dcc4000000/Breve-Introduccion-a-la-Cartografia-y-a-los-Sistemas-de-Informacion-Geografica-SIG/links/0deec52724b3d7dcc4000000/Breve-Introduccion-a-la-Cartografia-y-a-los-Sistemas-de-Informacion-Geografica-SIG
- Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas. (2009). *Terminología sobre Reducción de riesgo de desastres*. Obtenido de Reducción del Riesgo de Desastres: https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf

- Evers, J. (5 de Junio de 2025). SIG (Sistema de Información Geografica). National Geographic. Obtenido de https://education.nationalgeographic.org/resource/geographic-information-system-gis/?utm_source=chatgpt.com
- FAO. (2019). State of the world's land and water resources for food and agriculture. *Food and agriculture organization of the united nations*. Obtenido de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/11f9288f-dc78-4171-8d02-92235b8d7dc7/content>
- Formaggio, L. (13 de Marzo de 2023). ¿Qué es una cuenca hidrográfica? Revista Ciencias de la Tierra. Obtenido de <https://revistacienciasdelatierra.com/geociencias/que-es-una-cuenca-hidrografica/10500/>
- Franco, O., Sánchez, R., Gómez, C., Otero, J., & Salamanca, J. (2015). Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia. Colombia: Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientales. Obtenido de <https://observatorio.epacartagena.gov.co/ftp-uploads/pub-estudio-nacional-degradacion-de-suelos-por-erosion.pdf>
- García Ruiz, J., Beguería, S., Nadal Romero, E., Gonzales Hidalgo, J., Lana Renault, N., & Sanjuan, Y. (2017). Geoderma. *A meta-analysis of soil erosion rates across the world*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- García, J. M. (Junio de 2021). Evaluación de la erosión hídrica mediante diferentes técnicas de medición en dos condiciones de manejo en el centro de México. Durango, Mexico: Univerisdad Autónoma Chapingo. Obtenido de <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/b99dfde9-ad50-46fe-b5fd-15b18ed73389/content>
- García, J. R. (Agosto de 2011). Curso Básico de Hidráulica Fluvial, Procesos erosivos primera parte. Mexico: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de https://imta.gob.mx/potamologia/images/stories/ponencias_tercer_seminario/dr_jose_garcia_procesos_erosivos/Procesos%20Erosivos%20Primera%20Parte.pdf
- Geler Roff, T., Penteado Crósta, A., & Perez Filho, A. (15 de Octubre de 2015). *Análisis del factor-Is en diferentes modelos de predicción de la erosión hídrica del suelo*. Obtenido de <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal15/Nuevastecnologias/Sig/18.pdf>
- Guerrero, C. (2020). Journal Systems. *Open Journal Systems*. Obtenido de <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/1947/3851>

- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2012). La ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE). España: Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/bbcb2e00-26ad-4e51-9e97-a27573c50815/content>
- Instituto Geográfico Nacional. (5 de Febrero de 2020). *Teledetección*. Madrid, España. Obtenido de <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf#:~:text=La%20teledetecci%C3%B3n%20es%20la%20t%C3%A9cnica,informaci%C3%B3n%20interpretable%20de%20la%20Tierra.>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2020). *VIII Glosario de términos y siglas utilizadas*. Obtenido de INDECI: <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2021/02/CAPITULO-VIII-Glosario-de-T%C3%A9rminos.pdf>
- Jove, S. L., & Ramos, O. F. (22 de Febrero de 2022). Evaluación de la eficacia de la implementación de un Plan de Contingencias frente a sismos, determinado a través de la metodología de análisis de riesgo por colores en la Institución Educativa Manuel Gonzales Prada de Alto Selva Alegre - Arequipa. Arequipa, Perú. Obtenido de https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/5345/S.Jove_O.Ramos_Tesis_Titulo_Profesional_2021.pdf?sequence=1
- Ke-xin, G., & Ying-xian, C. (12 de Mayo de 2021). *Establishment and application of soil hydraulic erosion model based on GIS and USLE model*. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125703056>
- KINNEL, P. (2010). *Érdua de suelo por eventos, escorrentía y la familia de modelos de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo: Una revisión*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169410000739>
- Lal, R. (mayo de 2015). *Restauración de la calidad del suelo para mitigar su degradación*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/5/5875>
- Laqui Calizaya, F. R. (04 de Setiembre de 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. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/626410>
- Mancilla, G. (2008). Uso y conservación de suelos. Chile: Universidad de Chile facultad de ciencias forestales departamento de silvicultura. Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120400/Apuntes_docentes_USLE.pdf
- Mariscal Sucre Unidad Educativa. (2018). *Glosario de términos*. Obtenido de glosario de terminos Emergencia. Amenaza. Riesgo. Vulnerabilidad. Daño.:

https://mariscalsucre.edu.ec/images/documentos/formularios_uems/glosario_basico.pdf

- Morgan, R. (2005). *Erosión del suelo y conservación.*, 3ª edición. Obtenido de <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2883146>
- Municipalidad de La Molina. (2020). *Gestión reactiva*. Obtenido de <https://www.munimolina.gob.pe/gestion-reactiva/>
- Naciones Unidas - EIRD. (2016). *Glosario*. Obtenido de <https://www.eird.org/gestion-del-riesgo/glosario.pdf>
- Novillo, C. (25 de junio de 2024). Erosión hídrica: definición, tipos, causas y consecuencias. Ecología verde. Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/erosion-hidrica-definicion-tipos-causas-y-consecuencias-2172.html>
- Núñez Cuadros, M. K. (5 de Abril de 2024). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando la metodología USLE en la cuenca Chacco - Ayacucho, 2023*. Obtenido de <https://repositorio.unsch.edu.pe/bitstreams/71489fca-b170-48c8-b1a7-f8ed8aa7559b/download>
- Pérez, I. (2018). Análisis espacial de susceptibilidad de erosión en una cuenca hidrográfica del tropico húmedo de Costa Rica. Ciencias Ambientales, Tropical Journal of Environmental Sciences. doi: <http://dx.doi.org/10.15359/rca.52-1.1>
- Perez, J. (03 de Julio de 2023). *Definición.de*. Obtenido de <https://definicion.de/erosion-hidrica/>
- Pérez, J., & Merino, M. (30 de Agosto de 2018). *Inundación - Qué es, definición y concepto*. Obtenido de Definición.de: <https://definicion.de/inundacion/>
- Pighini, R., Wingeyer, A., Rodríguez, L., Wilson, M., Gabioud, E., & Van Opstal, N. (2022). Relación cartográfica entre variables hidrológicas y de degradacion por pérdida de suelo superficial: sitio piloto A° estacas, Entre Ríos. Argentina: Ciencia del Suelo, Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Obtenido de <https://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v40n2/1850-2067-cds-40-02-167.pdf>
- Piscitelli, M. (2015). Degradación de suelos. Argentina: Universidad Nacional del Centro de la provincia Buenos Aires. Obtenido de <https://www.unicen.edu.ar/content/degradaci%C3%B3n-de-suelos>
- Portuguez, D. (06 de Noviembre de 2014). *Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del río siguas utilizando geoinformatica*. Lima, Perú. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6171154.pdf>

- Prasuhn, V. (Enero de 2022). Experiencia en la evaluación del factor de gestión de la cobertura USLE para tierras cultivables en comparación con la pérdida de suelo medida a largo plazo en la meseta Suiza. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198721002725?via%3Dihub>
- Ramos Taipe, C. L. (Julio de 2001). *Modelamiento ambiental para analisis de susceptibilidad erosiva en la cuenca media y alta del rio cañete y determinación del mapa de erosión*. Obtenido de <http://tarwi.lamolina.edu.pe/~cramost/MODELO%20DE%20EROSION%20HIDRICA%20-%20SIG.pdf>
- Rao, M., Xiao, Y., Ouyang, Z., & Yu, X. (2014). Evaluación nacional de la erosión del suelo y sus patrones espaciales en China. *Ecosystem Health and Sustainability*. Obtenido de <https://spj.science.org/doi/10.1890/EHS14-0011.1>
- 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)*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Obtenido de <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/ruslech2.pdf>
- Rivera Ocampo, C. E., & Alguera Ruiz, S. E. (Noviembre de 2016). *Estimación del factor de erodabilidad (factor K) del suelo en el Centro Experimental Agrícola CEA-UNI, Municipio de Tisma, Departamento de Masaya*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/336876922.pdf>
- Sergieieva, K. (31 de Junio de 2024). *Erosión Hídrica En La Agricultura: Causas Y Prevención*. Obtenido de [https://eos.com/es/blog/erosion-hidrica/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20Es%20La%20Erosi%C3%B3n%20H%C3%ADdrica,%2C%20arroyos%2C%20etc.\)](https://eos.com/es/blog/erosion-hidrica/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20Es%20La%20Erosi%C3%B3n%20H%C3%ADdrica,%2C%20arroyos%2C%20etc.))
- Servicio Geológico Mexicano. (22 de Marzo de 2017). *Sistemas de información geográfica*. Mexico. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>
- Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (24 de Mayo de 2014). *Plan nacional de gestion del riesgo de desastres*. Obtenido de https://cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/PLANAGERD%202014-2021.pdf
- Soria, M., & Matar, M. (2016). *Nociones sobre Teledetección*. Argentina: Universidad Nacional de San Juan. Obtenido de <https://www.unpa.edu.ar/sites/default/files/descargas/Coberturas%20NODOCENTES/4.%20Materiales/2023/UARG/436-T124-S/436-T124->

S/TEORIA%20TELEDETECCION/Apuntes-de-c%C3%A1tedra-para-Cartograf%C3%ADa-Aplicada.pdf

Tarbuck, E., & Lutgens, F. (23 de Enero de 2005). *Ciencias de la Tierra* (8 ed.).

Madrid: Pearson Educación. Obtenido de

<http://www.xeologosdelmundo.org/wp-content/uploads/2016/03/TARBUCK-y-LUTGENS-Ciencias-de-la-Tierra-8va-ed.-1.pdf>

Tayupanta, J. (Febrero de 1993). Erosión hídrica: proceso factores y formas. 11-14.

Ecuador: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias.

Obtenido de

https://books.google.es/books?id=a7EzAQAAMAAJ&pg=PA8&dq=tipos+de+erosi%C3%B3n+hídrica&lr=&hl=es&source=gb_s_selected_pages&cad=1#v=onepage&q&f=false

Universidad Politecnica de Valencia. (1 de Junio de 2012). Ecuación Universal de

Perdidas de Suelo (USLE). Valencia, España. Obtenido de

https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16849/ad%20usle.pdf?sequence=1&utm_source

Valdebenito, D. I. (2019). Estimación de la erosión hídrica en zona semiárida del norte chileno mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE): el caso de

Pinitaqui (IV región de Coquimbo). Santiago, Chile. Obtenido de

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/173350/estimacion-erosion-hidrica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wischmeier, W., & Smith, D. (Diciembre de 1978). *Predicting rainfall erosion losses. a guide to conservation planning*. Obtenido de

https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/RUSLE/AH_537%20Predicting%20Rainfall%20Soil%20Losses.pdf

Zaragoza Pulido, E. D. (2021). *Análisis multitemporal de la cobertura del terreno y su asociación con las tasas de erosión hídrica en Acoculco, Puebla*. Obtenido de

https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3597/1/tesis_Edgar%20Daniel%20Zaragoza%20Pulido_23%20ago%202021.pdf

ANEXOS

ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADOR	METODOLOGÍA
Problema general ¿Cuál es la magnitud de la erosión hídrica en la cuenca Locumba, Tacna, y cómo puede ser estimada mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)?	Objetivo general Estimar la magnitud de la erosión hídrica en la cuenca Locumba, Tacna, mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)	Hipótesis general La erosión hídrica en la cuenca Locumba, Tacna, presenta una magnitud diferenciada espacialmente, determinada por la interacción de los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo considerados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo	Variable 1 - Erosión hídrica	- Tasa promedio de pérdida de suelo por unidad de área (t/ha/año) - Áreas críticas identificadas mediante mapeo geoespacial	Tipo de investigación : - Investigación básica Nivel de investigación : - Descriptivo y explicativo
Problemas específicos a. ¿Cuáles son los factores climáticos, topográficos, de uso del suelo y manejo agrícola que influyen en la erosión hídrica en la cuenca Locumba? b. ¿Cuál es la tasa de pérdida de suelo en las diferentes zonas de la cuenca Locumba, calculada mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)? c. ¿Cuáles son las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca Locumba, identificadas a partir de la integración de los factores climáticos, topográficos, de uso del suelo y manejo agrícola?	Objetivos específicos a. Caracterizar los factores que influyen en la erosión hídrica en la cuenca Locumba, considerando aspectos climáticos, topográficos, de uso del suelo y manejo agrícola. b. Aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para calcular la tasa de pérdida de suelo en las diferentes zonas de la cuenca Locumba. c. Identificar las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca Locumba mediante la integración de los factores evaluados.	Hipótesis específicas a. Los factores climáticos, edáficos, topográficos, de cobertura vegetal y de manejo presentan variaciones espaciales dentro de la cuenca Locumba, influyendo en la magnitud de la erosión hídrica estimada mediante la USLE. b. La tasa de pérdida de suelo en la cuenca Locumba presenta diferentes niveles de erosión, expresados en toneladas por hectárea por año, como resultado de la integración de los factores R, K, LS, C y P del modelo USLE. c. Las áreas de mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca Locumba se localizan principalmente en zonas con mayor pendiente, menor cobertura vegetal y condiciones edáficas más vulnerables a la pérdida de suelo.	Variable 2 - Metodología USLE	- Energía cinética de las precipitaciones (MJ·mm/ha·h·año) - Susceptibilidad del suelo a la erosión (t·ha·h/ha·MJ·mm) - Relación entre pendiente y longitud del terreno - Índice de reducción de erosión por cobertura vegetal - Eficiencia de las prácticas de conservación del suelo	Diseño de investigación - No experimental