FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

MODELADO DEL DESGASTE HÍDRICO DEL SUELO MEDIANTE PROCEDIMIENTO USLE, CUENCA DEL RÍO CAPLINA AL SUR DE PERÚ

Línea de investigación:
Biodiversidad, ecología y conservación

Trabajo de Suficiencia Profesional para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

Autor

Villanueva Fuentes, Juan de Dios

Asesor

Altez Rodríguez, José Félix

ORCID: 0009-0000-6714-8876

Jurado

Aylas Humareda, María del Carmen

Gonzales Alarcón, Angelino Oscar

Valdivia Orihuela, Braulio Armando

Lima - Perú

2026

RECONOCIMIENTO - NO COMERCIAL - SIN OBRA DERIVADA
(CC BY-NC-ND)

MODELADO DEL DESGASTE HÍDRICO DEL SUELO MEDIANTE PROCEDIMIENTO USLE, CUENCA DEL RÍO CAPLINA AL SUR DE PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

21%	20%	6%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	revistas.upt.edu.pe Fuente de Internet	10%
2	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	www.researchgate.net Fuente de Internet	1%
4	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
5	climatranquiloyfeliz.blogspot.com Fuente de Internet	1%
6	revistas.cientifica.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	www.mef.gob.pe Fuente de Internet	<1%
8	noticia.educacionenred.pe Fuente de Internet	<1%
9	www.congreso.gob.pe Fuente de Internet	<1%
10	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	<1%
11	www4.congreso.gob.pe Fuente de Internet	<1%

Universidad Nacional Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

MODELADO DEL DESGASTE HÍDRICO DEL SUELO MEDIANTE PROCEDIMIENTO USLE, CUENCA DEL RÍO CAPLINA AL SUR DE PERÚ

Línea de investigación:

Biodiversidad, ecología y conservación

Modalidad de Suficiencia Profesional para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

Autor:

Villanueva Fuentes, Juan de Dios

Asesor:

Altez Rodríguez, José Félix

ORCID: 0009-0000-6714-8876

Jurados:

Aylas Humareda, María del Carmen

Gonzales Alarcón, Angelino Oscar

Valdivia Orihuela, Braulio Armando

Lima – Perú

2026

Dedicatoria

Este reporte es dedicado a mis progenitores por el respaldo incondicional y las oportunidades que han proporcionado a lo largo de mi existencia. Agradezco a mi hermano y a mi familia por respaldarme e inspirarme durante mi trayectoria universitaria.

Agradecimiento

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a Dios por todo lo que me ha proporcionado hasta el momento. Debido a la educación y experiencia adquirida en mi institución educativa, la Universidad Nacional Federico Villarreal.

ÍNDICE

Resumen 7

Abstract 8

I INTRODUCCIÓN 9

1.1. Trayectoria del autor 10

1.2. Descripción de la empresa 12

1.3. Organigrama de la empresa 13

1.4. Áreas y funciones desempeñadas 13

II. DESCRIPCIÓN DE UNA ACTIVIDAD ESPECÍFICA 16

III. APORTES MÁS DESTACABLES EN LA EMPRESA 25

IV. CONCLUSIONES 27

V. RECOMENDACIONES 29

VI. REFERENCIAS 31

VII. ANEXOS 31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organigrama de la Empresa 13

Figura 2. Flujo de trabajo lógico 14

Figura 3. Ubicación de la zona de estudio 17

Figura 4. Ejemplo del flujo metodológico 18

Figura 5. Modelado del mapa de los factores R y LS 22

Figura 6. Modelado multitemporal del mapa de erosión del suelo. 24

Figura 7. Modelo de Contribución clave: Protocolo USLE – SIG, para la cuantificación de erosión hídrica en cuencas áridas. 26

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Mapa de ubicación de la cuenca del río Caplina 35

Anexo B. Mapa del factor R (Erosividad de la lluvia) 36

Anexo C. Mapa del factor LS (Pendiente y longitud de ladera) 37

Anexo D. Mapa del factor C (Cobertura vegetal) 38

Anexo E. Mapa de erosión hídrica 2023 39

Anexo F. Mapa de erosión hídrica 2024 40

Anexo G. Plano general de ubicación 41

Anexo H. Registro fotográfico de campo 41

RESUMEN

La investigación abordó la degradación edáfica inducida por la erosión hídrica, reconocida como un motor central del deterioro ambiental a escala mundial y particularmente intensa en contextos áridos y semiáridos. El propósito fue estimar y cartografiar la pérdida de suelo en la cuenca del río Caplina (Tacna, Perú) mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), integrando análisis espaciales con Sistemas de Información Geográfica (SIG). El marco de modelación incorporó la erosividad de las precipitaciones, la erodabilidad del sustrato, los rasgos topográficos, la condición de la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del terreno. Los resultados indican que el 55 % del territorio presenta erosión nula o leve, mientras que las categorías alta y crítica se concentran en laderas de gran inclinación con vegetación escasa. Las intervenciones de revegetación ejecutadas por GREEN LIFE S.A.C. redujeron parcialmente la vulnerabilidad en determinados sectores; sin embargo, los núcleos críticos mantuvieron niveles significativos de pérdida de suelo. En conjunto, los hallazgos respaldan la necesidad de estrategias integrales de conservación y restauración, el fortalecimiento del monitoreo continuo y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles para un manejo responsable del recurso edáfico en la cuenca del río Caplina.

Palabras clave: Erosión del Suelo, USLE, GIS

ABSTRACT

This research addressed soil degradation induced by water erosion, recognized as a central driver of environmental deterioration worldwide and particularly intense in arid and semi-arid contexts. The purpose was to estimate and map soil loss in the Caplina River basin (Tacna, Peru) using the Universal Soil Loss Equation (USLE), integrating spatial analysis with Geographic Information Systems (GIS). The modeling framework incorporated rainfall erosivity, substrate erodibility, topographic features, vegetation cover condition, and land management practices. The results indicate that 55% of the area presents no or mild erosion, while the high and critical categories are concentrated on steep slopes with sparse vegetation. Revegetation interventions implemented by GREEN LIFE S.A.C. partially reduced vulnerability in certain areas; however, critical areas maintained significant levels of soil loss. Taken together, the findings support the need for comprehensive conservation and restoration strategies, strengthening ongoing monitoring, and promoting agricultural practices.

Keywords: Soil Erosion, USLE, GIS

I. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo surge como resultado de la interacción entre factores naturales y actividades humanas. Entre los elementos biofísicos determinantes se incluyen las condiciones climáticas, la morfología del relieve y las propiedades intrínsecas del suelo; mientras que entre los factores antrópicos destacan la práctica intensiva de la agricultura, la tala indiscriminada, el crecimiento urbano descontrolado y la sobreexplotación de los recursos naturales. En este contexto, el cambio climático ha contribuido a intensificar los procesos erosivos asociados a las precipitaciones, las cuales presentan mayor energía e irregularidad, provocando la pérdida progresiva de suelo, la degradación de la calidad del agua y la disminución de la fertilidad edáfica. Estos efectos se acentúan en zonas donde la cobertura vegetal —fundamental para la protección del suelo— se encuentra deteriorada. Las repercusiones de esta problemática afectan la estabilidad ecológica, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del desarrollo en diferentes regiones del planeta.

En las zonas semiáridas, la erosión hídrica representa un desafío significativo originado por lluvias irregulares, terrenos con pendientes abruptas, escasa vegetación y un manejo inadecuado de las tierras agrícolas. La variabilidad geográfica y climática del territorio peruano agrava la situación, sobre todo en los espacios andinos y costeros, donde las intensas precipitaciones estacionales y las actividades agrícolas ineficientes favorecen la pérdida acelerada de suelo fértil. Este proceso no solo limita la productividad agropecuaria y pone en riesgo la seguridad alimentaria, sino que también incrementa la probabilidad de deslizamientos y la acumulación de sedimentos en ríos y embalses, afectando directamente la estabilidad ambiental y la disponibilidad de agua.

En este contexto, los modelos predictivos y las herramientas analíticas se constituyen en recursos indispensables para interpretar y gestionar los procesos de erosión hídrica. Entre ellos, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) destaca como un esquema empírico que estima la pérdida de suelo inducida por la precipitación a partir de cinco determinantes interrelacionados. La formulación canónica de la USLE, sistematizada por Wischmeier y Smith (1978), integra la erosividad de las lluvias (R), la erodabilidad del sustrato (K), los parámetros topográficos de longitud e inclinación de ladera (LS), la cobertura y manejo del terreno (C) y las prácticas de conservación (P). Aunque fue concebida inicialmente para contextos agrícolas específicos, su diseño operativo y flexible ha permitido su traslación a diversos ambientes y regímenes climáticos.

Con base en estos fundamentos, el presente informe compila y analiza evidencias sobre la disminución de la cobertura edáfica asociada a la erosión pluvial, a partir de observaciones de campo realizadas por el autor a solicitud de la empresa GREEN LIFE S.A.C. El objetivo central fue estimar la reducción de la cobertura del suelo en relación con las intervenciones ejecutadas en la cuenca del río Caplina, en el sur del Perú. Esta aproximación busca aportar insumos técnicos para la formulación de estrategias y la toma de decisiones orientadas a disminuir la vulnerabilidad del territorio frente a los procesos erosivos y a consolidar una gestión sostenible de los recursos naturales.

1.1. Trayectoria del autor

El autor es estudiante de Ingeniería Geográfica, perteneciente a la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la Universidad Nacional Federico Villarreal (FIGAE-UNFV). Posee más de tres años de experiencia profesional tanto en el sector público como en el privado. Cuenta con el grado de bachiller en Ingeniería Geográfica

y ha desarrollado competencias operativas y de campo en proyectos relacionados con saneamiento, infraestructura y gestión ambiental.

Durante el año 2019, ejerció el cargo de residente de obra en el Consorcio Saneamiento Centro, donde participó en la reparación del sistema de abastecimiento de agua como parte de las labores de rehabilitación del saneamiento básico en la localidad de Huaquicha, distrito de Surco, provincia de Huarochirí, departamento de Lima (CUI 2427296). Este proyecto, financiado por la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios, se ejecutó entre mayo y agosto, con un presupuesto referencial de S/ 380 006,33. En el mismo año, entre los meses de septiembre y diciembre, asumió nuevamente el rol de residente de obra en el Consorcio San Cristóbal, interviniendo en la rehabilitación del sistema de saneamiento básico en San Cristóbal de Chatacancha, distrito de Maritana, provincia de Huarochirí, región Lima (CUI 2475173), con un contrato valorizado en S/ 717 858,11, también bajo la gestión de la RCC

Su trayectoria profesional incluye, además, labores de residencia en proyectos educativos desarrollados para el Centro Tecnológico Minero (CETEMIN), destacando la construcción de talleres para el Instituto Superior Tecnológico Privado “Alfonso Barrantes Lingán”, en San Miguel de Pallaques, Cajamarca (agosto–octubre de 2008), así como la ejecución de talleres del CEPTRO en Santa Cruz de Flores (noviembre–diciembre de 2008). En el ámbito de obras de defensa y control fluvial, trabajó como residente para la empresa Inversiones Geodesia S.A., participando en la protección ribereña del río Urubamba mediante la construcción de un muro de contención de concreto ciclópeo de 300 metros en el distrito de Churuja, provincia de Bongará, Amazonas (agosto–diciembre de 1997). Asimismo, supervisó la ejecución de un dique enrocado de 250 metros en el río Cañete, ubicado en el distrito de San Vicente de Cañete, provincia de Cañete, Lima (julio–diciembre de 1998).

De manera complementaria, colaboró como asistente en la supervisión de la construcción del albergue comunal del distrito de Carampoma, proyecto impulsado por la Comunidad Campesina Santiago de Carampoma (Huarochirí), entre junio y septiembre de 2015. En la actualidad, se desempeña como consultor para la empresa GREEN LIFE S.A.C., en el marco del proyecto "Mantenimiento ecológico y gestión en la cuenca del río Caplina".

1.2. Descripción de la empresa

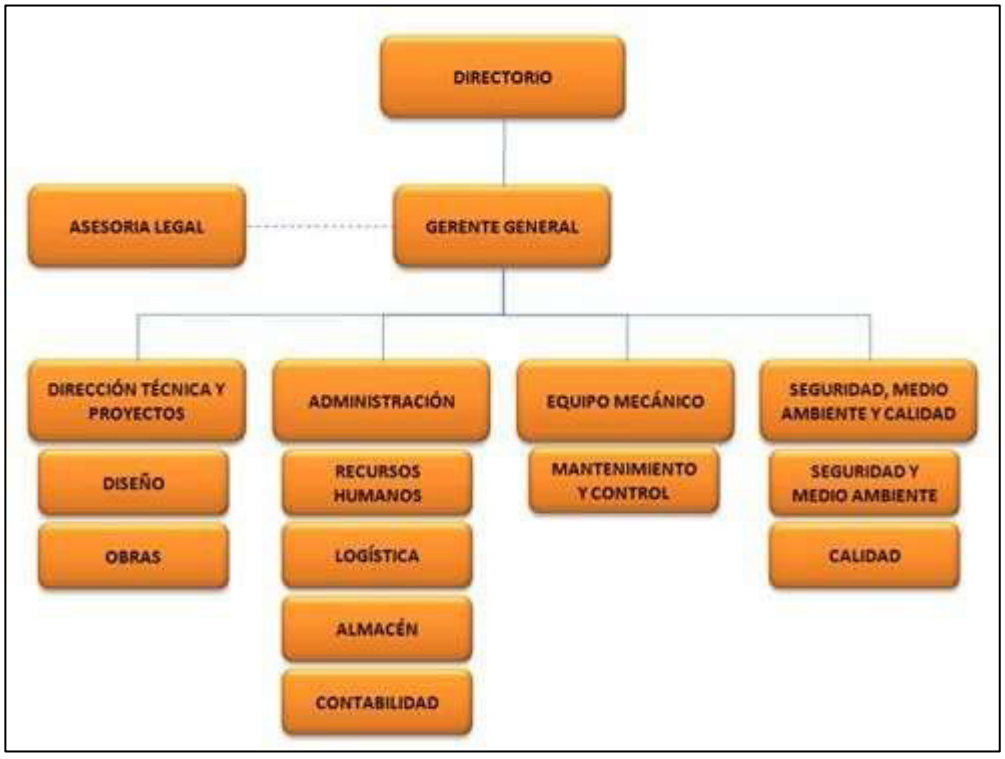
GREEN LIFE S.A.C. es una empresa peruana dedicada a brindar servicios de consultoría especializada en diversas áreas, entre las que destacan el medio ambiente, la seguridad industrial, la salud ocupacional, la responsabilidad social, la eficiencia energética, las energías renovables y la implementación de sistemas de gestión aplicables a distintos sectores productivos. La organización orienta su labor hacia la provisión de soluciones integrales y personalizadas, concebidas bajo criterios de alta calidad, eficacia operativa y sostenibilidad económica. Su propósito institucional se centra en optimizar los recursos y asegurar la factibilidad técnica de cada propuesta, respondiendo de manera precisa a las demandas y particularidades de las entidades que atiende.

1.3. Organigrama de la empresa

Estructura organizativa de GREEN LIFE S.A.C.

Figura 1

Organigrama de la Empresa



Nota. Organización estructural de la Empresa de Green Life.

1.4. Áreas y funciones desempeñadas

El desarrollo del trabajo abarcó actividades de consultoría en materia ambiental y de gestión de los recursos hídricos dentro de la cuenca del río Caplina. En condición de consultor del proyecto “Mantenimiento ecológico y gestión en la cuenca del río Caplina” (2023–2024), se participó activamente en la planificación y ejecución de acciones orientadas a la conservación y uso sostenible del agua. Además, se realizaron evaluaciones diagnósticas del entorno ambiental y se aplicaron herramientas geotecnológicas con el propósito de analizar las condiciones del sistema hídrico y diseñar estrategias de manejo sostenible. De forma complementaria, se estableció coordinación con las instituciones y actores locales involucrados, y se elaboraron informes técnicos destinados a respaldar la gestión ambiental en el área de

intervención. Las actividades se estructuraron en un orden metodológico secuencial (véase Figura 2), cuya explicación se detalla a continuación.

Figura 2

Flujo de trabajo lógico



Nota. Desarrollo del área GIS.

1.4.1. Recopilación de información

Para la ejecución del presente estudio se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) en conjunto con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El factor de erosividad de la lluvia (R) fue determinado a partir de registros de precipitación anual obtenidos en estaciones meteorológicas locales. Los parámetros edáficos se derivaron del mapa digital de suelos elaborado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Asimismo, mediante un Modelo Digital de Elevación (MDE) de alta resolución se estimaron la longitud y la inclinación del terreno, correspondientes al factor topográfico (LS).

Por otra parte, la información referente a la cobertura y el manejo del suelo (C) se generó a partir del procesamiento de imágenes Landsat 8 y 9, descargadas desde el portal Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Todo el procesamiento y análisis espacial de los datos se efectuó empleando la plataforma ArcMap, lo que permitió integrar las variables en un entorno geoespacial para la modelación de la perdida potencias del suelo.

II. DESCRIPCIÓN DE UNA ACTIVIDAD ESPECÍFICA

La cuenca del río Caplina, en la región de Tacna, combina una topografía abrupta, un régimen de lluvias torrenciales concentradas en cortos periodos y patrones de ocupación del territorio marcados por prácticas agropecuarias intensivas, lo que incrementa su vulnerabilidad a la pérdida de suelo por escorrentía. La vegetación rala y las laderas pronunciadas facilitan el desprendimiento y transporte de partículas, acelerando la degradación edáfica. Esta dinámica impacta de manera directa en los rendimientos agrícolas y en el funcionamiento de los ecosistemas, además de deteriorar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. En conjunto, estos factores comprometen la viabilidad ambiental del área y limitan sus perspectivas de desarrollo territorial sostenible.

2.1. Ubicación geográfica

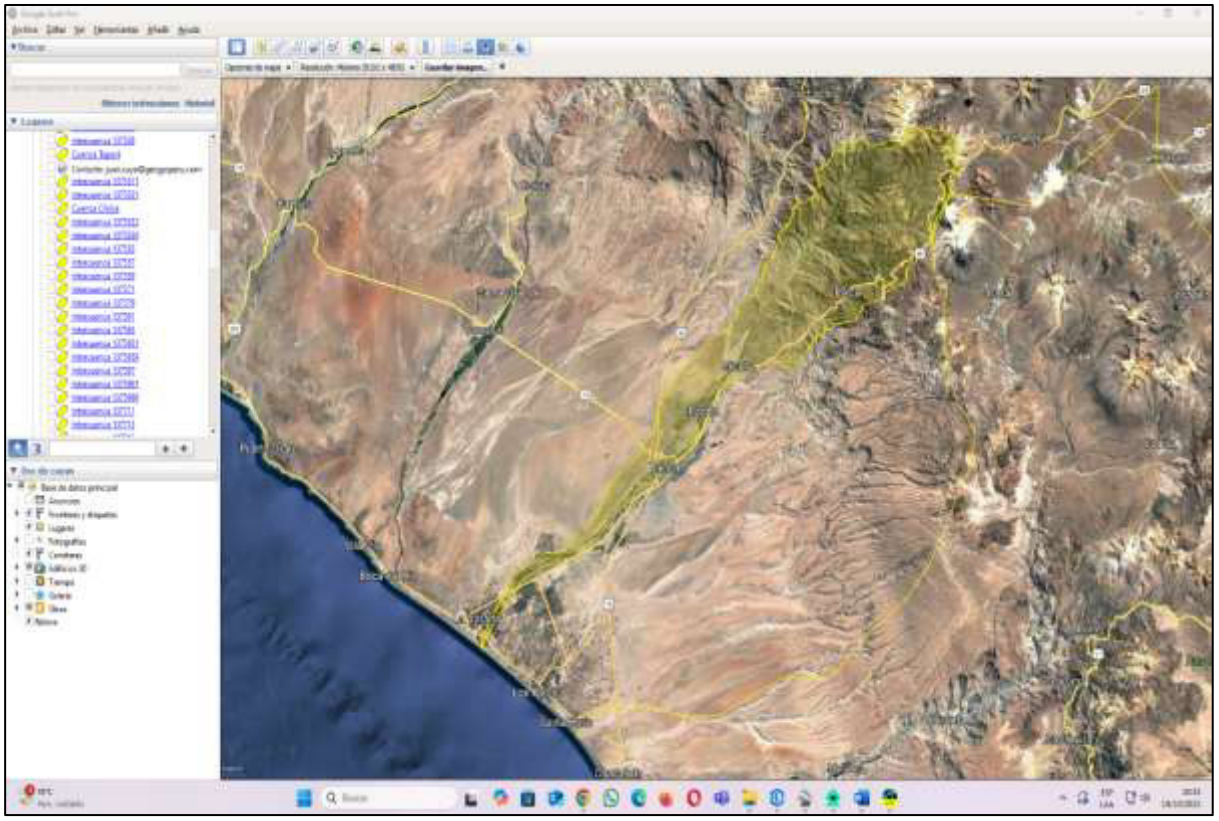
El territorio analizado corresponde a la cuenca del río Caplina, ubicada en el sur del Perú. Esta cuenca abarca 4 239,09 km² y su eje de drenaje principal se orienta de noreste a suroeste (Pino, 2013). Dentro de su red hidrográfica, el río Palca actúa como el tributario de mayor jerarquía, y el sistema fluvial atraviesa los distritos de Tacna, Gregorio Albarracín, Alto de la Alianza, Ciudad Nueva, Pocollay, Calana, Pachía y Palca, como se ilustra en la Figura 3.

El ámbito evaluado presenta un clima árido, un relieve marcadamente escarpado y sistemas de producción agropecuaria de alta intensidad, combinación que incrementa de manera sustantiva la propensión a la erosión por escorrentía. Además de garantizar el abastecimiento de agua para riego y uso doméstico, la cuenca sostiene comunidades biológicas cuya funcionalidad depende de la estabilidad del suelo y de la calidad del recurso hídrico. No obstante, la concurrencia de factores geomorfológicos desfavorables, presiones antrópicas sobre el uso del suelo y señales asociadas al cambio climático ha ampliado la exposición a procesos erosivos. En particular, los eventos pluviales de gran intensidad concentrados en temporadas específicas actúan como disparadores de pérdidas de suelo, aceleran la degradación de los recursos naturales y

comprometen la sostenibilidad de largo plazo del sistema cuenca.

Figura 3

Ubicación de la zona de estudio



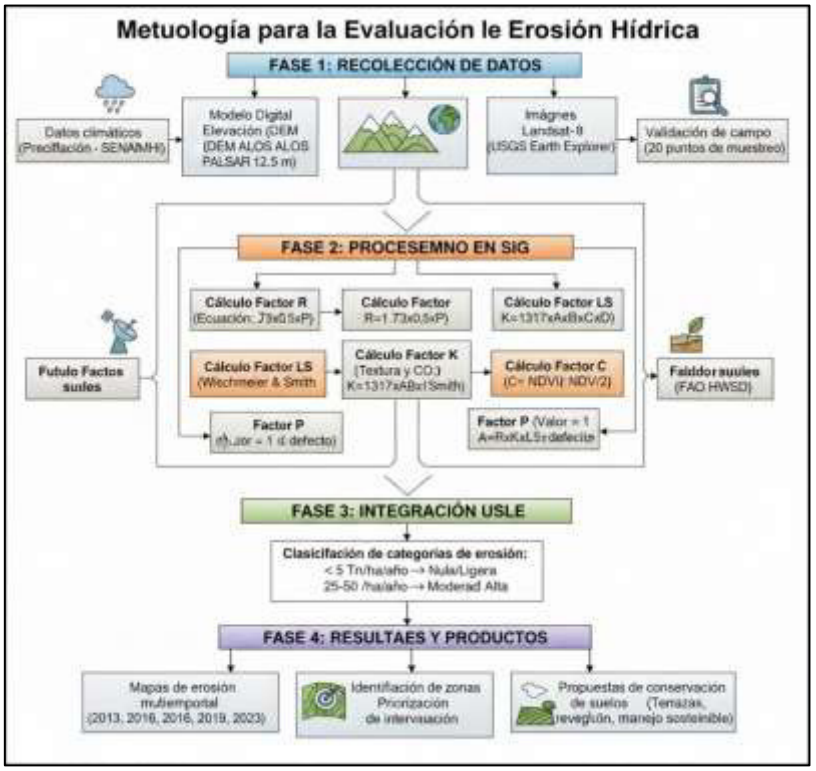
Nota. Determinado en Google Earth Pro 2024

2.2. Proceso de desarrollo del trabajo

Para el modelado espacial se recurrió al entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales se establecieron como la piedra angular del estudio de la erosión por acción hídrica. La estrategia metodológica adoptada produjo salidas coherentes y replicables para la caracterización de la cuenca, aportando un sustento técnico robusto para la planificación y la gestión del territorio.

Figura 4

Ejemplo del flujo metodológico



Nota. Desarrollo propio.

2.2.1. Cálculo de los factores de erosión

La magnitud de la erosividad pluvial (R) se estimó mediante la formulación propuesta por Rouse en 1974, cuya expresión matemática se consigna en la Ecuación 1:

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

En este estudio, P se definió como la precipitación media anual, expresada en milímetros. Con dicha variable se elaboró un mapa de isoerodientes que representa los patrones espaciales de la energía asociada a las precipitaciones dentro de la subcuenca; adicionalmente, se incorporaron la intensidad de lluvia y la recurrencia de eventos extremos. Las zonas con valores elevados del factor R

evidencian un mayor potencial de erosión vinculado a episodios pluviales de alta intensidad.

La erodabilidad del suelo (K) se determinó a partir de propiedades edáficas—entre ellas, la textura, el contenido de carbono orgánico y la estructura—. El valor de K se obtuvo aplicando la expresión correspondiente indicada en la Ecuación 2:

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

En la formulación empleada, las variables A, B, D y C designan, respectivamente, los porcentajes de arena (0,05–2 mm), limo (0,002–0,05 mm), arcilla (< 0,002 mm) y el contenido de carbono orgánico (%). Las estimaciones para cada parámetro se obtuvieron mediante el procesamiento de información espacial y posteriormente se representaron en un mapa temático. A su vez, el factor topográfico de longitud e inclinación de ladera (LS) se derivó integrando la longitud de pendiente (L) y la escabrosidad del terreno (S) a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE), siguiendo la formulación presentada en la Ecuación 3 por Wischmeier y Smith (1978).

$$LS = \left(\frac{L}{22{,}13}\right) m * (0{,}06 + 0{,}045 * S + 0{,}0065 * S^2)$$

En la presente formulación, L corresponde a la distancia de recorrido sobre la ladera medida en metros, mientras que S representa la inclinación expresada en porcentaje. El parámetro m actúa como exponente y adopta valores distintos según los rangos de pendiente definidos para las condiciones locales. Con estos insumos se generó una cartografía temática que clasifica el territorio en niveles de susceptibilidad a la erosión. Por su parte, el factor de cobertura y manejo del suelo (C) se obtuvo a partir del procesamiento de imágenes Landsat, calculando el Índice de Vegetación de

Diferencia Normalizada (NDVI) conforme a la Ecuación 4.

$$NVDI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

En esta formulación, NIR se refiere a la reflectancia medida en la banda del infrarrojo cercano, mientras que Red corresponde a la reflectancia en la porción roja del espectro visible. Los valores derivados de ambas bandas fueron posteriormente convertidos según lo establecido en la Ecuación 5.

$$C = \frac{1 - NDVI}{2}$$

Posteriormente, se elaboraron cartografías temáticas de tipo multitemporal para los años 2023 y 2024, con el propósito de evidenciar la dinámica y los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del periodo analizado. Finalmente, para el factor de prácticas de conservación (P) se asignó el valor unitario (P = 1), dado que en el ámbito de estudio no se verificó la implementación de medidas de manejo o conservación del suelo

$$A = R * K * LS * C * P$$

2.2.2. Fase de análisis espacial

Las variables incorporadas al modelo cartográfico se delimitaron y transformaron en indicadores operativos con base en los límites admisibles definidos para el ámbito de estudio. Dichos criterios de corte establecen las condiciones espaciales mínimas necesarias, lo que preserva la consistencia del análisis y facilita la comparabilidad de los resultados.

2.2.3. Integración, análisis y validación de resultados

La integración del modelo se ejecutó en el entorno SIG mediante álgebra de mapas a nivel de celda, superponiendo y combinando los valores de los cinco factores conforme a lo establecido en la Ecuación 6. Esta operación ráster célula a célula permitió obtener el índice compuesto de erosión para cada píxel del área de estudio.

A partir de la integración de factores se estimó la tasa de pérdida de suelo, expresada en toneladas por hectárea por año. Para cada periodo evaluado se elaboraron cartografías de la distribución espacial de la erosión y se estableció una clasificación ordinal con categorías nula, ligera, moderada y alta. La zonificación resultante permitió localizar áreas críticas y definir prioridades de intervención para la gestión del territorio.

2.2.4. Resultados técnicos esperados

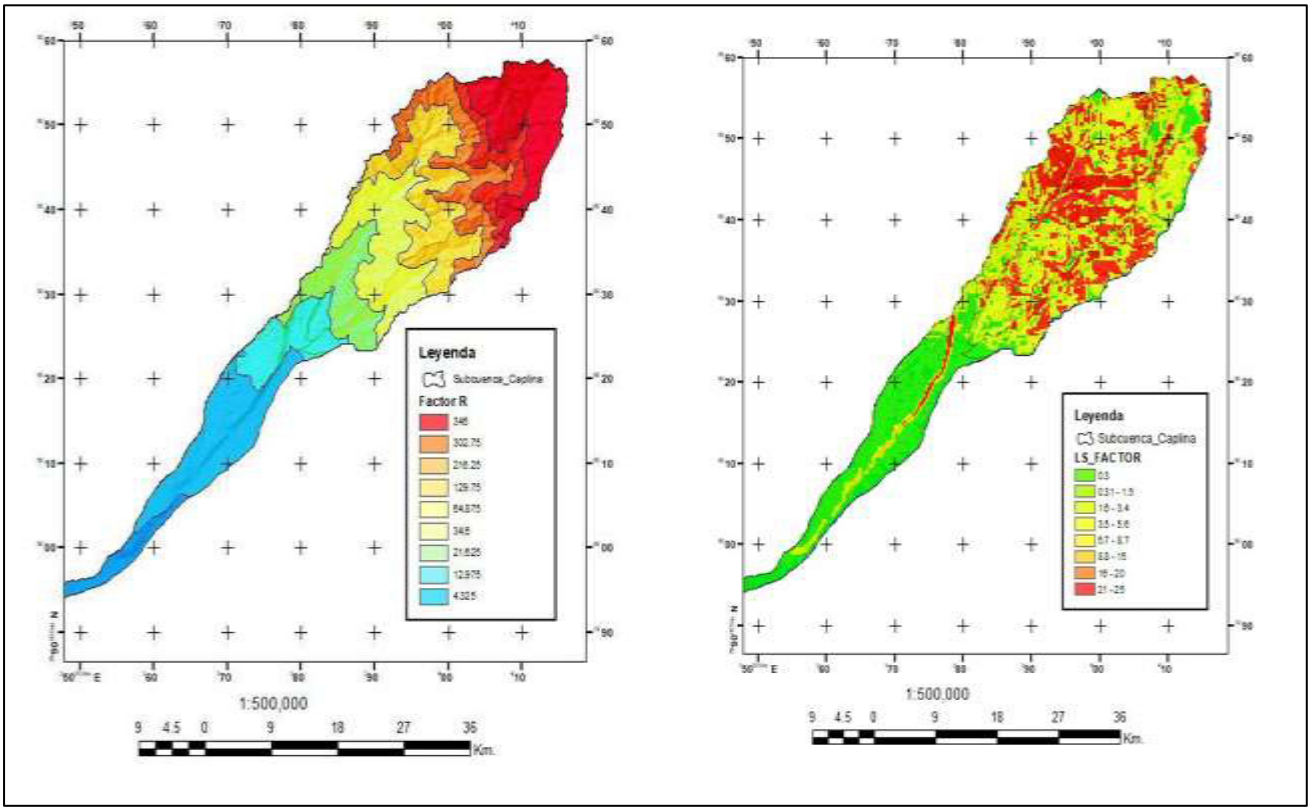
El análisis de los parámetros de la USLE en la subcuenca del río Caplina evidenció contrastes espaciales bien definidos que permiten distinguir sectores con distinta exposición a la erosión hídrica. La erosividad de la lluvia (R) varió entre 4,325 y 346; los valores más elevados se concentraron hacia el norte, donde las precipitaciones son más intensas y focalizadas, cubriendo el 12,8 % de la superficie (139 km²). En sentido opuesto, el sector sur registró valores inferiores a 34,6 y abarcó el 48 % del área total (520 km²) (véase Figura 5a).

En relación con la erodabilidad del suelo (K), los valores oscilaron entre 0,02247 y 0,02831, con mayor susceptibilidad asociada a suelos de textura limosa y bajo contenido de carbono orgánico, asentados en laderas de pendiente moderada a alta (18–30 %), que sumaron aproximadamente el 21 % del territorio (228 km²). El componente topográfico (LS) se incrementó conforme aumentó la inclinación, superando 25,2 en laderas mayores al 70 %; si bien estas superficies representan solo el 0,86 % de la subcuenca (9,8 km²), concentran las tasas más altas de pérdida de suelo (véase Figura 2b). Finalmente, el factor de cobertura y manejo (C) fluctuó entre 0,2 y 0,6 de acuerdo con la densidad

de vegetación: en 2023, las áreas con cobertura escasa (C > 0,5) ocuparon el 1,1 % (10,2 km²) y se situaron principalmente al noreste, mientras que las zonas dominadas por cultivos y matorrales (C ≈ 0,4) constituyeron el 96,9 % (885,5 km²).

Figura 5

Modelado del mapa de los factores R y LS



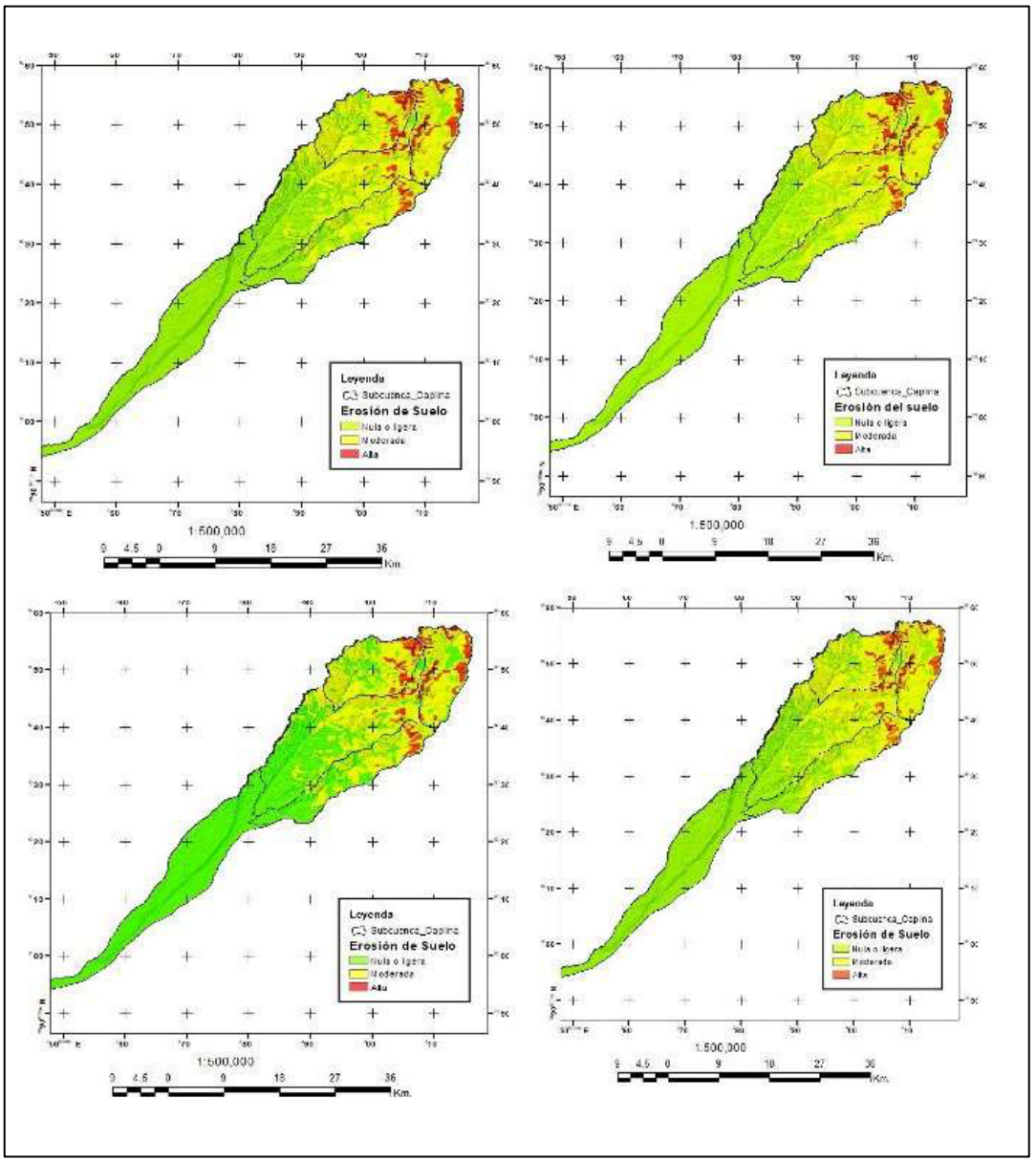
Nota. (a) y (b) se refieren a los mapas de la erosividad de las precipitaciones (R) y las características topográficas (LS).

La cuantificación de la pérdida de suelo mediante la USLE evidenció una marcada heterogeneidad espacial en la subcuenca del río Caplina y un claro predominio de las clases de erosión nula o ligera (Figura 6). Durante el periodo analizado, la categoría < 5 toneladas·ha^{-1}·año^{-1} concentró la mayor superficie: 55,85 % (485,8 km²) en 2023 y un leve incremento a 56,20 % (489,4 km²) en 2024. Estas zonas se ubicaron, principalmente, en los sectores central y meridional, donde prevalecen pendientes suaves (< 12 %) y coberturas vegetales suficientes, condiciones que limitan de manera efectiva la exportación de sedimentos.

La clase moderada (5–25 toneladas·ha^{-1}·año^{-1}) mostró variaciones menores en el tiempo, con 27,44 % (238,3 km²) en 2023 y 27,56 % (241,1 km²) en 2024. Su distribución se concentró sobre todo al noreste, asociada a laderas entre 12 % y 30 % y a una densidad de vegetación relativamente menor que la observada en áreas de erosión nula o ligera. En contraste, la categoría alta (25–50 toneladas·ha^{-1}·año^{-1}) redujo ligeramente su extensión, pasando de 16,71 % (145,3 km²) en 2023 a 16,24 % (141,5 km²) en 2024; estas superficies coinciden con relieves más escarpados (> 30 %) y coberturas vegetales exiguas, lo que incrementa su fragilidad. Finalmente, la erosión crítica (> 50 toneladas·ha^{-1}·año^{-1}) se mantuvo casi constante y en proporción mínima, cercana al 0,5 % del total (≈ 5,4 km²), localizada en pendientes extremas con vegetación muy rala, por lo que constituye un objetivo prioritario para medidas de conservación del suelo.

Figura 6

Modelado multitemporal del mapa de erosión del suelo.



Nota. (a), (b), (c) y (d) abarcan los periodos de tiempo de marzo 2023, abril 2023, marzo 2024 y abril 2024 respectivamente.

III. APORTES MÁS DESTACABLES EN LA EMPRESA

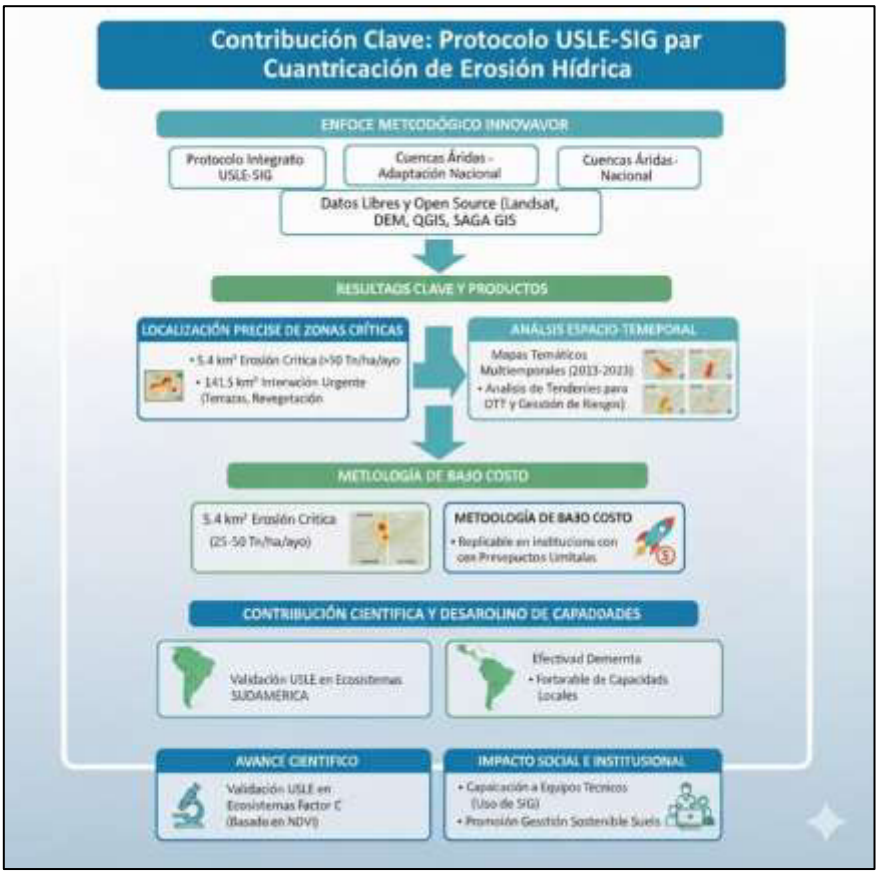
La contribución más destacable en la empresa, sería el desarrollo de un protocolo integrado USLE-GIS para la cuantificación de erosión hídrica en cuencas áridas, aplicable a nivel nacional con adaptaciones mínimas, utilizando datos de acceso libre y software de código abierto, la localización precisa de **5.4 km² con erosión crítica** (>50 Tn/ha/año) y **141.5 km² con erosión alta** (25-50 Tn/ha/año), priorizando áreas para intervención urgente con prácticas de conservación (terrazas, revegetación). Generación de mapas temáticos multitemporales (2013-2023) y análisis de tendencias, proporcionando insumos técnicos para planes de ordenamiento territorial y gestión de riesgos.

Demostración de la efectividad de metodologías de bajo costo mediante el uso de imágenes Landsat, DEM de acceso libre y herramientas GIS open-source (QGIS, SAGA GIS), replicable en instituciones con presupuestos limitados.

Validación de la ecuación USLE en ecosistemas áridos sudamericanos y propuesta de ajustes metodológicos para el factor C basado en NDVI, contribuyendo a la literatura científica regional. Capacitación de equipos técnicos en el uso de GIS para estudios de erosión, fortalecimiento de capacidades locales y promoción de la gestión sostenible de suelos.

Figura 7

Modelo de Contribución clave: Protocolo USLE – SIG, para la cuantificación de erosión hídrica en cuencas áridas.



IV. CONCLUSIONES

4.1. La evidencia del estudio indica que la integración de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) con los Sistemas de Información Geográfica (SIG/GIS) constituye un enfoque eficaz para detectar patrones espaciales y tendencias multitemporales de degradación edáfica. Este marco analítico brinda una base técnica sólida para comprender las dinámicas de la erosión y para orientar el diseño de medidas de conservación del suelo a escala regional. Dado que el fenómeno comporta repercusiones ambientales, económicas y sociales, se requiere de herramientas analíticas robustas que respalden su evaluación y gestión de manera integral y basada en evidencia.

4.2. La implementación de medidas específicas para disminuir la erosión de los suelos constituye un eje estratégico para salvaguardar los recursos naturales y sostener la resiliencia ecológica del territorio. Para asegurar su eficacia y capacidad de ajuste en el tiempo, resulta imprescindible el seguimiento sistemático del estado del suelo, complementado con procesos de capacitación continua en prácticas de manejo sostenible. De igual modo, las evaluaciones periódicas de la calidad del suelo y del agua, articuladas con incentivos financieros y esquemas de cooperación interinstitucional, se vuelven determinantes para robustecer el ordenamiento del territorio. En conjunto, estos componentes favorecen la ejecución sostenida y verificable de las estrategias de mitigación, consolidando su impacto a largo plazo y su alineación con objetivos de sostenibilidad integral.

4.3. Los resultados obtenidos refuerzan que la erosión hídrica en la cuenca del río Caplina no responde a un factor aislado, sino a la interacción entre la intensidad de las precipitaciones, la pendiente del terreno, la erodabilidad del suelo y el grado de cobertura vegetal. La concentración de las categorías alta y crítica en laderas escarpadas con

vegetación rala confirma la utilidad del modelamiento USLE-SIG para priorizar intervenciones y demuestra que las acciones de revegetación, aunque aportan mejoras localizadas, deben integrarse con obras de control de escorrentía, manejo sostenible del suelo y monitoreo multitemporal. En consecuencia, la discusión de los resultados evidencia que la gestión de la erosión debe abordarse mediante un enfoque preventivo, territorial y continuo, orientado a reducir la pérdida de suelo, proteger el recurso hídrico y fortalecer la sostenibilidad ambiental de la cuenca.

V. RECOMENDACIONES

5.1. Tras la identificación de las zonas con mayor susceptibilidad a los procesos erosivos, se recomienda llevar a cabo investigaciones complementarias de carácter más profundo y detallado en dichos sectores. Estas acciones deben incluir estudios de campo específicos que permitan validar los resultados obtenidos y proporcionar una comprensión más integral que favorezca la toma de decisiones informadas. Asimismo, se enfatiza la importancia de implementar un sistema de monitoreo permanente, orientado a disminuir progresivamente la vulnerabilidad del territorio frente a la erosión del suelo.

5.2. Se sugiere focalizar prioritariamente las intervenciones de conservación en las unidades con niveles altos o críticos de pérdida de suelo identificadas por el análisis. Entre las acciones de mayor eficacia se encuentran la construcción de terrazas o andenes, la revegetación y restauración de coberturas en áreas degradadas, así como la implementación de obras para el control de la escorrentía (por ejemplo, zanjas de infiltración, barreras vivas y diques de contención), orientadas a disminuir el arrastre de partículas y estabilizar las laderas. De forma complementaria, es indispensable promover prácticas agrícolas de manejo sostenible—como la rotación planificada de cultivos, la incorporación de cultivos de cobertura y la labranza mínima o de conservación—que preserven la estructura edáfica, mantengan la fertilidad y fortalezcan la resiliencia del suelo frente a los procesos erosivos.

5.3. Asimismo, se considera prioritario fortalecer las capacidades técnicas a nivel local mediante programas de formación avanzada dirigidos a los equipos responsables de aplicar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la evaluación, el monitoreo y la gestión de los procesos erosivos. La profesionalización de estas competencias contribuye a optimizar la planificación del uso del territorio y a consolidar un modelo de gestión

ambiental más sostenible. De manera complementaria, se propone implementar un geoportal interactivo que permita la visualización, consulta y descarga de información geoespacial actualizada, a fin de promover la transparencia y asegurar el acceso oportuno a datos confiables para la toma de decisiones ambientales.

VI. REFERENCIAS

Balabathina, V. N., Raju, R. P., Mulualem, W., y Tadele, G. (2020). Estimation of soil loss using remote sensing and GIS-based universal soil loss equation in northern catchment of Lake Tana Sub-basin, Upper Blue Nile Basin, Northwest Ethiopia. *Environmental Systems Research, 9*(1) https://doi.org/10.1186/s40068-020-00203-3

Carollo, F. G., Serio, M. A., Pampalone, V., y Ferro, V. (2024). The unit plot of the Universal soil loss equation (USLE): Myth or reality? *Journal of Hydrology, 632*(130880), 130880. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130880

Delgado, J. (2020). Estimación de la pérdida de suelos utilizando el modelo USLE y herramientas SIG, en la cuenca del río Chillón, Lima, Perú. *South Sustainability, 1*(1),1–11. https://doi.org/10.21142/ss-0101-2020-007

Escobar, J. S., y Soto, C. (2021). *Erosión hídrica mediante el modelo USLE para la sostenibilidad del suelo de la subcuenca Vilca a través de sistemas de información geográfica en la región Huancavelica 2020.* [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/64730

Etchevers-Barra, J. D., Cotler-Ávalos, H., y Hidalgo-Moreno, C. (2020). Salir de la invisibilidad: nuevos retos para la ciencia del suelo. *Terra Latinoamericana: organo científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C, 38*(4), 931–939. https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.867

Eurostat. (2020). *Agri-environmental indicator - soil erosion.* https://goo.su/L2p3

Gantulga, N., Iimaa, T., Batmunkh, M., Surenjav, U., Tserennadmin, E., Turmunkh, T.,Denchingungaa, D., y Dorjsuren, B. (2023). Impacts of natural and anthropogenic factors on soil erosion. *Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences, 63*(2), 3–18. https://doi.org/10.5564/pmas.v63i02.1416

Herrera-Castro, E., y Herrera-López, D. (2009). *Evaluación de los factores de la ecuación universal de perdida de suelo: Municipio San José de los Remates.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional UNA. https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/2076

Jaramillo, J. (2015). *Estudio del riesgo por erosión hídrica del suelo utilizando el modelo U.S.L.E. mediante herramientas S.I.G. aplicando en la subcuenca río Portoviejo, provincia de Manabí.* [Tesis de maestría, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Institucional UCE. http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/4235

Li, Z., y Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews, 163,* 94–117. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004

Pham, T. G., Degener, J., y Kappas, M. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research, 6*(2), 99–110. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001

Pino, C. A. (2013). *Caracterización hidro geomorfológica de la cuenca del rio Caplina – Tacna.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio Institucional UNJBG. https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/9422cda9-7fdc-439a-959f-72fd7f35104b

Ramos, B. A., y Sánchez, E. S. (2023). *Estimación de la pérdida de suelo utilizando el modelo USLE y herramientas SIG, en la microcuenca del río Puela, cantón Penipe* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio Institucional UNACH. http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10459

Rouse, J., Hass, R., Schell, J., y Deering, D. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Paper- A20.* [Technical Reports Server]. NASA. https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614

Shekar, P. R., y Mathew, A. (2024). GIS-based assessment of soil erosion and sediment yield using the revised universal soil loss equation (RUSLE) model in the Murredu Watershed, Telangana, India. *HydroResearch, 7,* 315–325. https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.05.003

Shojaeezadeh, S. A., Al-Wardy, M., Nikoo, M. R., Mooselu, M. G., Talebbeydokhti, N., Alamdari, N., y Gandomi, A. H. (2024). Historical hazard assessment of climate and land use–land cover effects on soil erosion using remote sensing: Case study of Oman. *Remote Sensing, 16*(16), 2976. https://doi.org/10.3390/rs16162976

Wischmeier, W., y Smith, D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to*

Conservation Planning. The U.S. Government Printing Office. Department of Agriculture, Agricultural Handbook. https://goo.su/FJgz

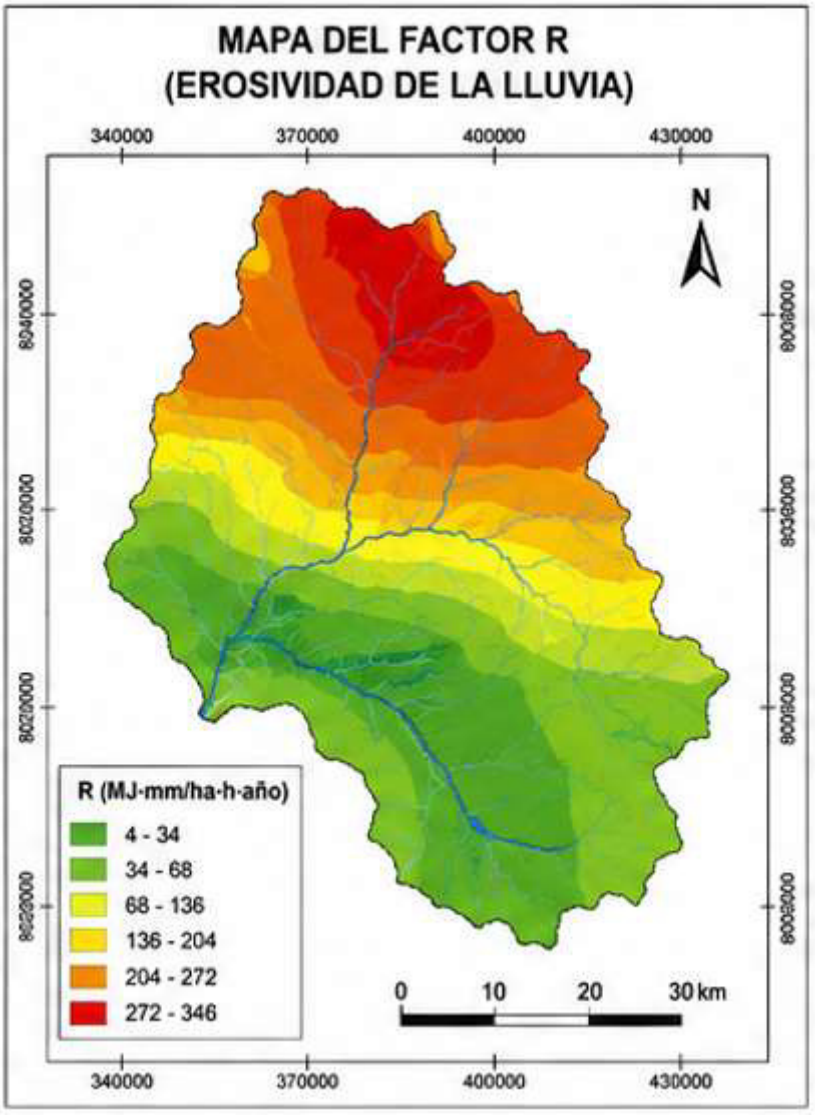
Wondrade, N. (2023). Integrated use of GIS, RS and USLE model for LULC change analysis and soil erosion risk mapping in the Lake Hawassa Watershed, Southern Ethiopia. *Geocarto International, 38*(1), 1-26. https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2210106

VII. ANEXOS

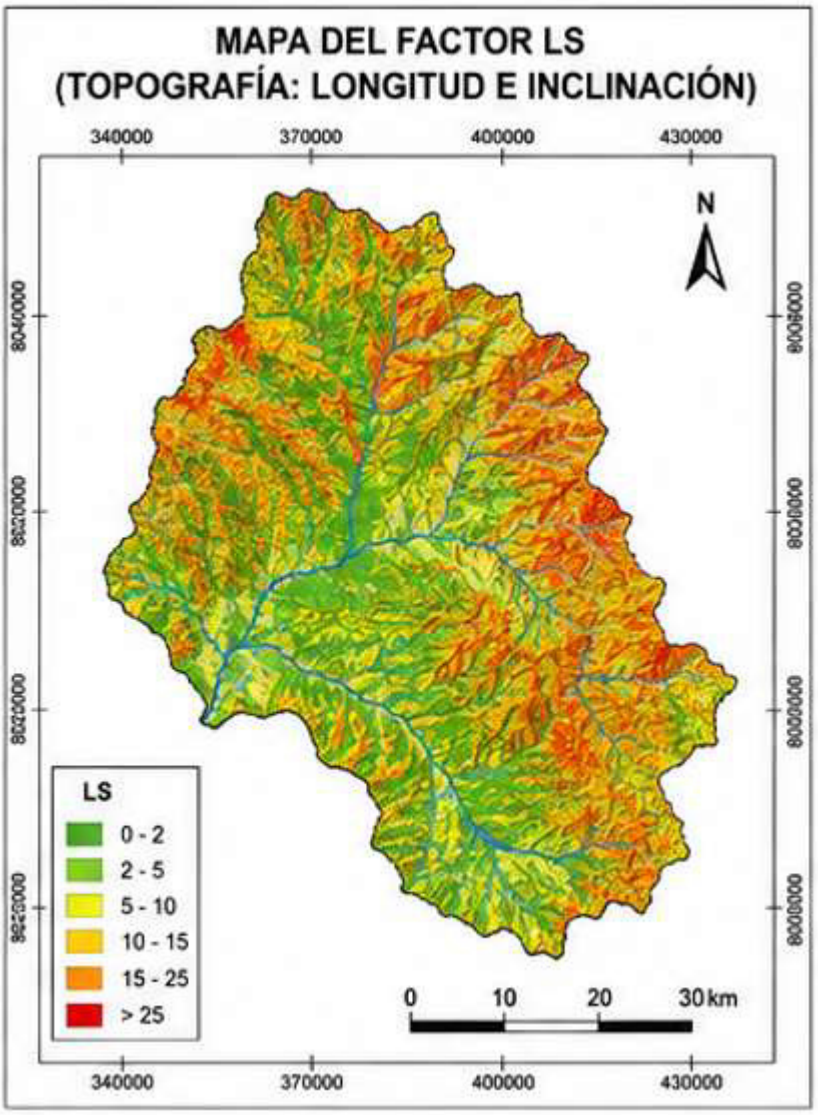
ANEXO A
Mapa de ubicación de la cuenca del río Caplina



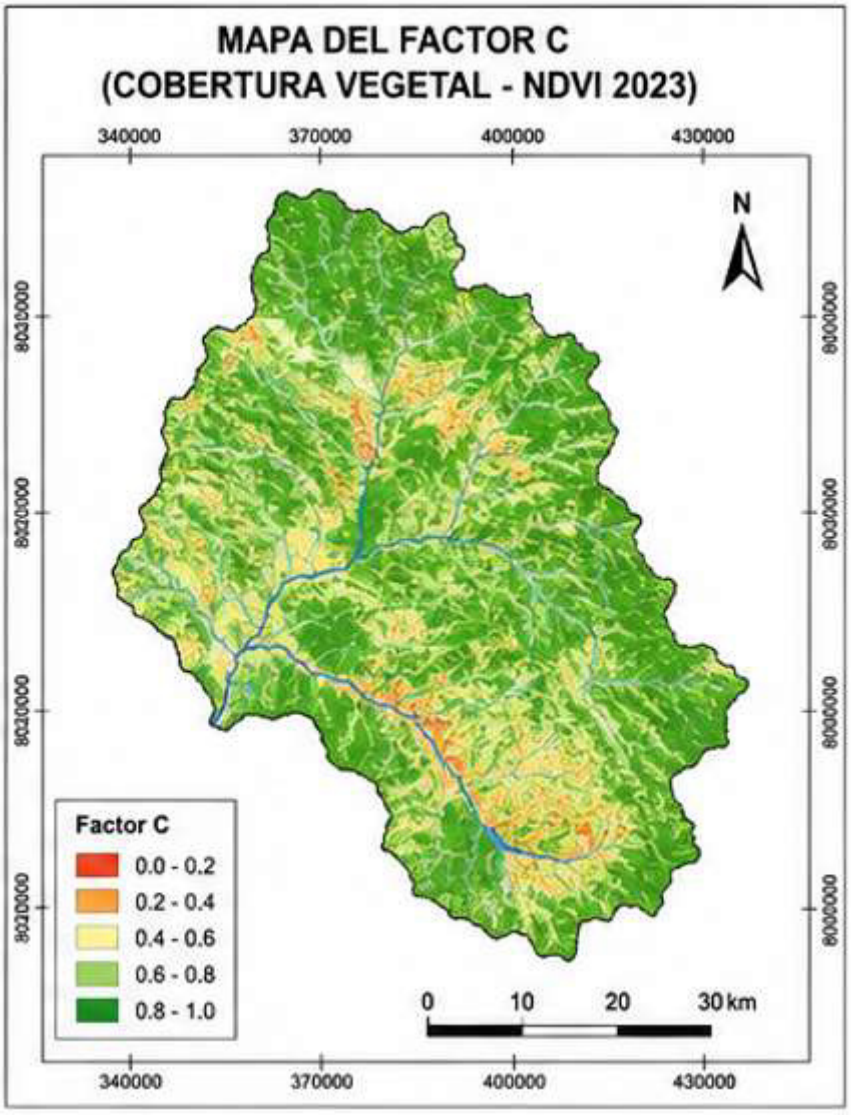
ANEXO B
Mapa del factor R (Erosividad de la lluvia)



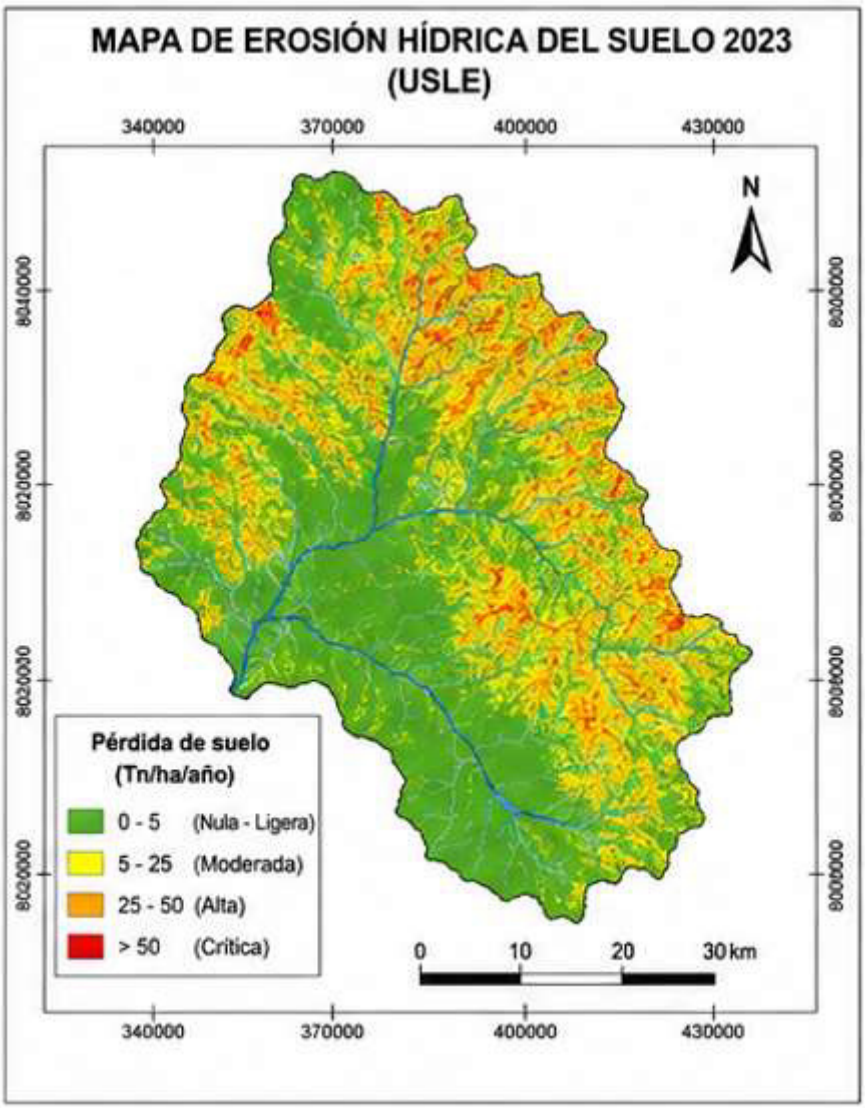
ANEXO C
Mapa del factor LS (Pendiente y longitud de ladera)



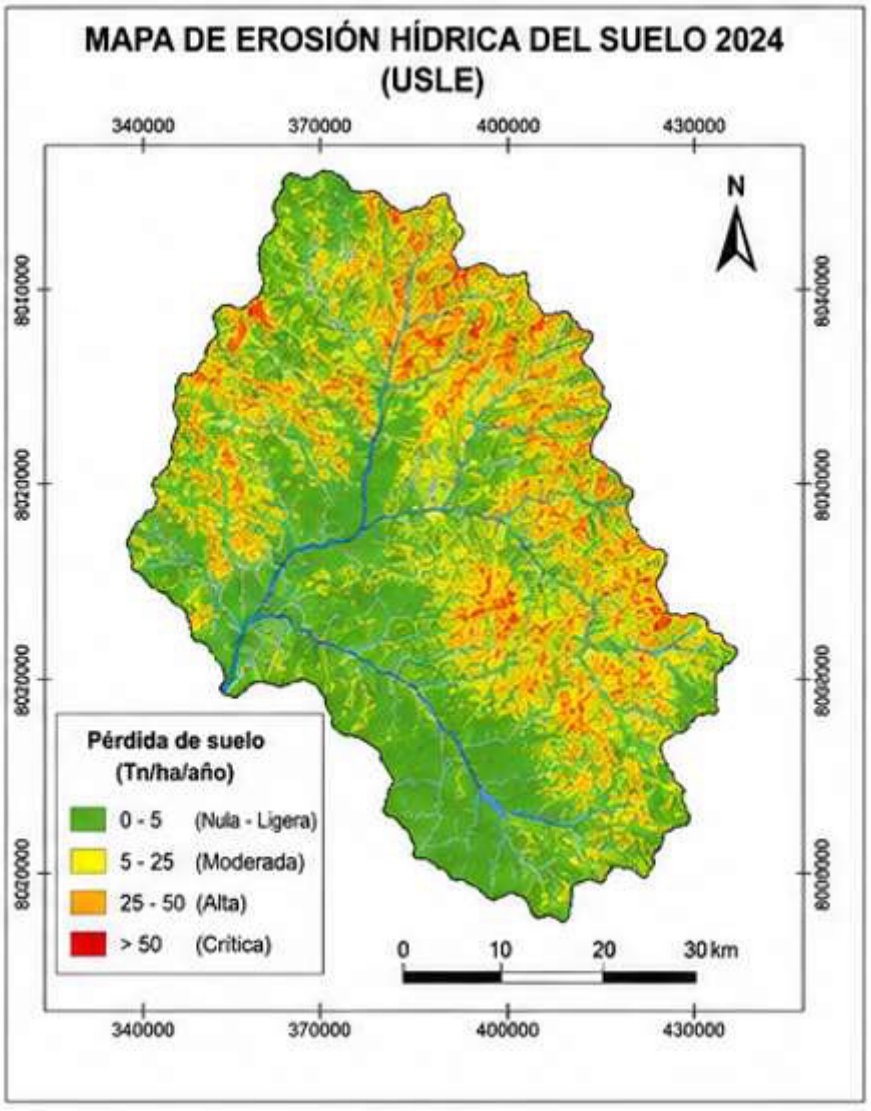
ANEXO D
Mapa del factor C (Cobertura vegetal)



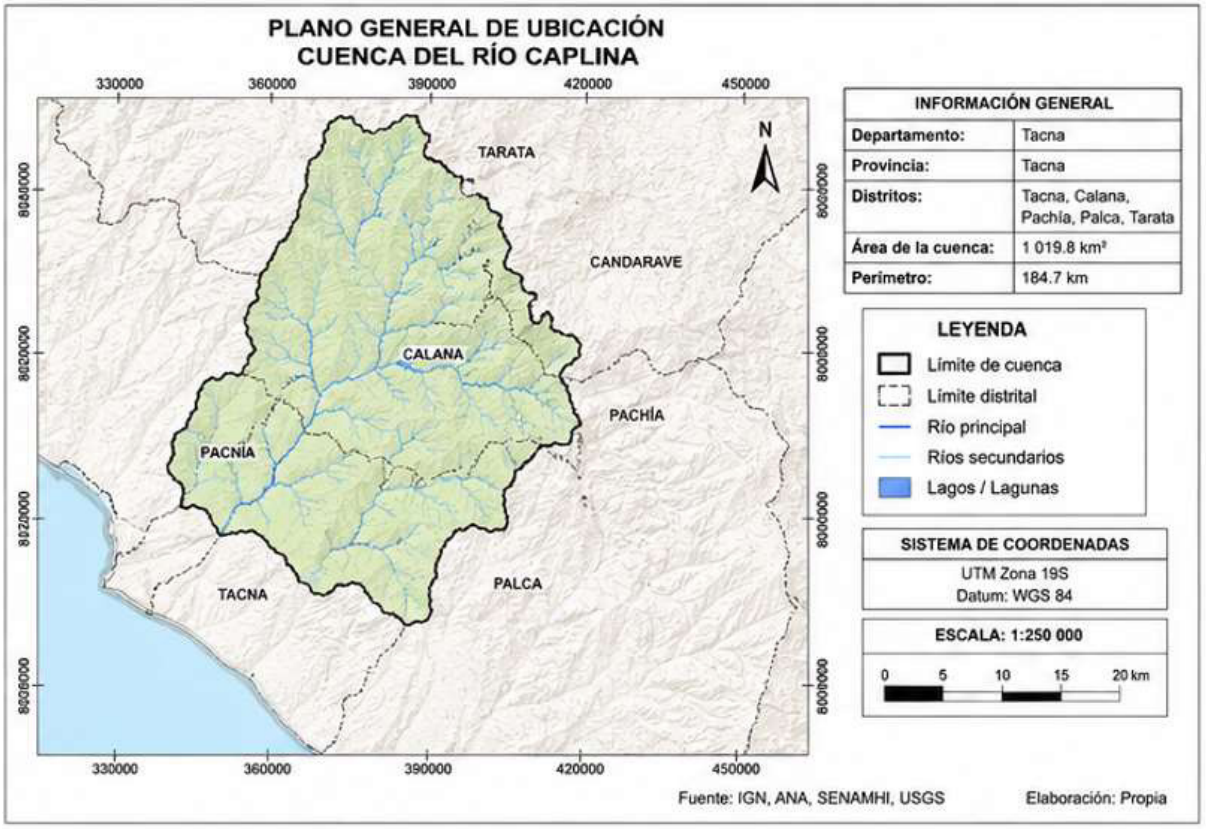
ANEXO E
Mapa de erosión hídrica 2023



ANEXO F
Mapa de erosión hídrica 2024



ANEXO G
Plano general de ubicación



ANEXO H
Registro fotográfico de campo







