

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el
modelo RUSLE en la microcuenca Paliza - Lucanamarca - Huanca
Sancos - Ayacucho, 2024**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:

Bach. Luis Lucas GARCIA ALLCCAHUAMAN

ASESOR:

M.Sc. César Vidal GUTIÉRREZ NINAHUAMÁN

AYACUCHO - PERÚ

2025

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi refugio y fortaleza en cada momento de este camino, por darme la sabiduría, la paciencia y la luz para no rendirme.

A mi madre, por su amor incondicional y su lucha incansable. Tu valentía frente a la enfermedad ha sido una inspiración constante en mi vida. A pesar del dolor y las dificultades, nunca dejaste de brindarme tu apoyo, tu ternura y tu fuerza. Esta tesis es también tuya, porque gran parte de lo que soy y de lo que hoy logro te lo debo a ti. Gracias por enseñarme a no rendirme, a tener fe y a seguir adelante con dignidad y amor.

A mi padre, por su presencia firme y su apoyo silencioso, por ser sostén en los momentos más difíciles y ejemplo de responsabilidad y compromiso.

A mis hermanos, por ser un pilar fundamental durante esta etapa, por su apoyo constante y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mi asesor, por su paciencia, guía y exigencia constante. Gracias por ayudarme a crecer no solo como estudiante, sino como profesional.

A mis amigos y docentes, quienes con su cariño, comprensión y apoyo fueron fundamentales en este camino académico.

Y finalmente, me dedico esta tesis a mí mismo, por no rendirme, por superar los días difíciles y por demostrarme que soy capaz.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios, por darme fuerzas, salud y claridad mental para enfrentar cada desafío.

A mi alma mater, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, por darme la oportunidad de pertenecer a ella, a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola y a todos mis valiosos docentes por sus consejos y enseñanzas impartidas durante mi formación universitaria.

A mi asesor, M.Sc. César Vidal Ninahuaman Gutiérrez, gracias por su compromiso, sus consejos y por guiarme con paciencia en cada etapa de esta investigación.

A los miembros del jurado de tesis al Dr. Eleazar Chuchón Ángulo, M.Sc. Alex Lázaro Tineo Bermúdez y a la presidenta de la comisión presidida por la Ph. D. Sandra Del Águila Ríos, por los comentarios y sugerencias a la presente investigación.

A mi familia, gracias por su amor incondicional, por su confianza en mí y por estar presente en cada etapa de mi vida académica. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de alguna forma, contribuyeron a la realización de esta tesis. Este trabajo es también reflejo del esfuerzo colectivo de quienes me rodean.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
CAPÍTULO I	3
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.1.1. <i>Mundial</i>	3
1.1.2. <i>Nacional y regional</i>	4
1.2. Cuenca hidrográfica.....	6
1.3. Erosión del suelo	8
1.3.1. <i>Factores que influyen en la erosión del suelo</i>	8
1.3.1.1. El suelo	8
1.3.1.2. La topografía	8
1.3.1.3. El clima.....	9
1.3.1.4. La vegetación	9
1.3.1.5. El hombre.....	9
1.3.2. <i>Tipos de erosión</i>	9
1.3.2.1. Erosión geológica, normal o natural	9
1.3.2.2. Erosión inducida o acelerada	10
1.3.2.3. Erosión eólica.....	10
1.3.2.4. Erosión hídrica	10
1.3.3. <i>Procesos de erosión</i>	11
1.3.3.1. Erosión	11
1.3.3.2. Transporte.....	11
1.3.3.3. Acumulación.....	11
1.3.4. <i>Formas de la erosión</i>	12

1.3.4.1.	Erosión por salpicaduras	12
1.3.4.2.	Erosión laminar	12
1.3.4.3.	Erosión en surcos.....	13
1.3.4.4.	Erosión en cárcavas	13
1.3.5.	<i>Erosión total</i>	14
1.3.6.	<i>Métodos para la estimación de la erosión</i>	14
1.3.6.1.	Cualitativa	15
1.3.6.2.	Cuantitativa	16
1.4.	Modelo de ecuación universal revisada de pérdida de suelo - RUSLE.....	18
1.5.	Factores de la ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE) ..	20
1.5.1.	<i>Factor de erosividad de la lluvia (R)</i>	20
1.5.2.	<i>Factor erosionabilidad del suelo (K)</i>	23
1.5.3.	<i>Factor longitud y ángulo de la pendiente (LS)</i>	27
1.5.4.	<i>Factor cobertura del suelo (C)</i>	30
1.5.5.	<i>Factor prácticas de retención del suelo (P)</i>	32
1.5.6.	<i>Perdida de suelo (A)</i>	33
1.6.	Precipitación	34
1.7.	Global Precipitation Measurement GPM	36
1.8.	SoilGrid (Malla del suelo).....	36
1.9.	Análisis estadístico de consistencia de datos observados	37
1.9.1.	<i>Análisis visual gráfico</i>	38
1.9.2.	<i>Análisis de doble masa</i>	38
1.9.3.	<i>Análisis estadístico</i>	39
1.10.	Corrección de los datos	43
1.11.	Completación y extensión de datos.....	43
1.11.1.	<i>Técnicas de completación de datos</i>	44
1.12.	Métodos de ajuste de valores predichos y observados	45
1.12.1.	<i>Coeficiente de corrección multiplicativa</i>	45
1.12.2.	<i>Método de ajuste con regresión lineal</i>	46

1.13.	Interpolaciones espaciales	47
1.13.1.	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	47
1.13.2.	<i>Kriging</i>	47
1.13.3.	<i>Spline</i>	48
1.14.	Características socioeconómicas y actores involucrados en prácticas conservación de los suelos	49
CAPÍTULO II		50
METODOLOGÍA		50
2.1.	Ubicación del proyecto de investigación	50
2.1.1.	<i>Ubicación política de la zona del estudio</i>	50
2.1.2.	<i>Ubicación geográfica de la microcuenca Paliza</i>	50
2.1.3.	<i>Ubicación hidrográfica de la microcuenca Paliza</i>	50
2.1.4.	<i>Punto de aforo</i>	50
2.2.	Acceso a la zona de estudio	51
2.3.	Variables climáticas	52
2.4.	Fisiografía.....	52
2.5.	Vegetales.....	53
2.6.	Materiales y equipos	54
2.6.1.	<i>Materiales</i>	54
2.6.2.	<i>Equipos</i>	54
2.7.	Metodología.....	55
2.7.1.	<i>Fase preliminar</i>	55
2.7.2.	<i>Fase de campo</i>	60
2.7.3.	<i>Fase de gabinete</i>	60
2.7.3.1	Delimitación de la microcuenca	61
2.7.3.2	Cálculo de factor R (Erosividad)	64
2.7.3.3	Cálculo de factor K (Erodabilidad)	85
2.7.3.4	Cálculo del factor LS	88
2.7.3.5	Cálculo del factor C (cobertura vegetal)	88

2.7.3.6	Cálculo de prácticas de conservación del suelo (P).....	91
2.7.3.7	Cálculo de la erosión hídrica potencial y real en la microcuenca	92
2.7.3.8	Generación de los mapas.....	93
CAPÍTULO III		94
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		94
3.1.	Resultados de la erosión hídrica con el modelo RUSLE	94
3.1.1.	<i>Delimitación de la microcuenca Paliza y cálculo de parámetros.....</i>	94
3.1.2.	<i>Análisis estadísticos, completación y cálculo del factor R observada...94</i>	
3.1.2.1.	Resultado de completación y extensión de datos faltantes.....	94
3.1.2.2.	Resultado del análisis estadístico de los datos históricos de lluvia 95	
3.1.2.3.	Resultado del cálculo del factor R_observada.....	97
3.1.3.	<i>Ajuste del factor R satelital con valores observados.....</i>	97
3.1.4.	<i>Resultados de los factores de RUSLE (R, K, LS, C y P).</i>	99
3.1.4.1.	Resultado del factor R_GPM ajustado.....	99
3.1.4.2.	Resultado del factor K de erodabilidad	100
3.1.4.3.	Resultado del factor LS (longitud y pendiente)	102
3.1.4.4.	Resultados del factor C (cobertura vegetal).....	104
3.1.4.5.	Resultado del factor P	106
3.1.5.	<i>Resultados de erosión hídrica potencial y real en la microcuenca.....</i>	107
3.1.6.	<i>Generación de los mapas temáticos de acuerdo a los resultados</i>	111
3.2.	Discusión de los resultados	112
CONCLUSIONES		119
RECOMENDACIONES		121
REFERENCIAS.....		122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 <i>Clasificación de la cuenca según su tamaño</i>	7
Tabla 1-2 <i>División de una cuenca hidrográfica</i>	7
Tabla 1-3 <i>Susceptibles a la erosión</i>	14
Tabla 1-4 <i>Clasificación de la erosión del suelo según la FAO</i>	14
Tabla 1-5 <i>Métodos – modelos de estimación de la erosión hídrica</i>	15
Tabla 1-6 <i>Interpretación del factor R de erosividad</i>	21
Tabla 1-7 <i>Interpretación del factor R de adaptado según SENAMHI</i>	21
Tabla 1-8 <i>Clasificación del Índice Modificado de Fournier</i>	22
Tabla 1-9 <i>Calificación del factor de materia orgánica</i>	25
Tabla 1-10 <i>Clasificación de los grados de erodabilidad según USDA (1962)</i>	26
Tabla 1-11 <i>Nomograma de Kirby y Morgan valores de K asociados a la textura y al contenido de materia orgánica</i>	26
Tabla 1-12 <i>Valores del factor LS en función de la pendiente</i>	30
Tabla 1-13 <i>Valores del factor de cobertura vegetal (C)</i>	30
Tabla 1-14 <i>Factor C por tipo de cobertura vegetal y uso de suelos</i>	31
Tabla 1-15 <i>Factor de prácticas de conservación (P)</i>	32
Tabla 1-16 <i>Valores de “P” para cultivos en contorno y su máxima longitud permitida entre obras</i>	33
Tabla 1-17 <i>Clasificación de los niveles de erosión de los suelos, y pérdidas tolerables</i>	34
Tabla 1-18 <i>Comparación de métodos de interpolación espacial</i>	48
Tabla 2-1 <i>Coordenadas geográficas de la microcuenca Paliza</i>	50
Tabla 2-2 <i>Coordenadas de punto de aforo</i>	51
Tabla 2-3 <i>Vías de acceso al lugar del proyecto de investigación</i>	51
Tabla 2-4 <i>Registro de serie de datos pluviométricas de 1998 al 2024</i>	65
Tabla 2-5 <i>Estaciones pluviométricas cercanas a la microcuenca Paliza</i>	65
Tabla 2-6 <i>Análisis estadístico de datos históricos de la estación Huanca Sancos</i>	67
Tabla 2-7 <i>Análisis de datos pluviométricas para su posterior corrección</i>	70

Tabla 2-8 <i>Precipitación mensual y anual de estación Huanca Sancos</i>	70
Tabla 2-9 <i>Precipitación mensual y anual de estación Vilcashuaman</i>	71
Tabla 2-10 <i>Precipitación mensual y anual de estación Huancapi</i>	73
Tabla 2-11 <i>Precipitación mensual y anual de estación Huac - Huas</i>	74
Tabla 2-12 <i>Precipitación mensual y anual de estación Pampa Cangallo</i>	75
Tabla 2-13 <i>Erosividad mensual de la estación Huanca Sancos</i>	77
Tabla 2-14 <i>Erosividad pluvial mensual para la estación Vilcashuaman</i>	78
Tabla 2-15 <i>Erosividad pluvial mensual para la estación Huancapi</i>	79
Tabla 2-16 <i>Erosividad pluvial mensual para la estación Huac - Huas</i>	80
Tabla 2-17 <i>Erosividad pluvial mensual para la estación Pampa Cangallo</i>	81
Tabla 2-18 <i>Ajuste de valores de R anual con datos observados</i>	82
Tabla 2-19 <i>Ajuste de datos de SoilGrid con datos observados</i>	85
Tabla 2-20 <i>Valores promediados de coeficientes de corrección multiplicativa</i>	86
Tabla 2-21 <i>Valores del factor C</i>	91
Tabla 2-22 <i>Valores del factor P dentro de la microcuenca Paliza</i>	91
Tabla 3-1 <i>Resultado de los análisis estadísticos y corrección de datos históricos</i>	96
Tabla 3-2 <i>Resultado del factor R de erosividad observada</i>	97
Tabla 3-3 <i>Resultado del ajuste del factor R de GPM con factor R observada</i>	98
Tabla 3-4 <i>Resultado de los valores de R anual según clasificación</i>	100
Tabla 3-5 <i>Resultado de los valores de K dentro de la microcuenca Paliza</i>	101
Tabla 3-6 <i>Resultado de los valores de LS en el área de la microcuenca</i>	102
Tabla 3-7 <i>Resultado de los valores de C en el área de la microcuenca Paliza</i>	104
Tabla 3-8 <i>Resultado de los valores de P en el área de la microcuenca</i>	106
Tabla 3-9 <i>Resultado de la estimación de erosión potencial del suelo</i>	107
Tabla 3-10 <i>Resultado de la estimación de erosión real del suelo</i>	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 <i>Etapas de erosión hídrica</i>	11
Figura 1-2 <i>Proceso de erosión hídrica del suelo</i>	12
Figura 1-3 <i>Grafica de serie de datos históricos para análisis de saltos</i>	38
Figura 1-4 <i>Gráfica de análisis de doble masa</i>	39
Figura 1-5 <i>Grafica de distribución normal</i>	41
Figura 2-1 <i>Cobertura vegetal en la cabecera de la microcuenca</i>	53
Figura 2-2 <i>Cobertura vegetal en la parte baja de la microcuenca</i>	54
Figura 2-3 <i>Proceso de selección del MED de ALOS PALSAR en la plataforma</i>	55
Figura 2-4 <i>Proceso de descarga de los valores de R en GEE</i>	56
Figura 2-5 <i>Proceso de conversión de TIFF a SHAPEFILE</i>	57
Figura 2-6 <i>Proceso de descarga de los datos de suelos desde la plataforma SoilGrid</i>	58
Figura 2-7 <i>Proceso de conversión de ráster de SoilGrid al formato shapefile</i>	59
Figura 2-8 <i>Proceso de relleno con la herramienta FILL</i>	62
Figura 2-9 <i>Proceso de cálculo de dirección del flujo</i>	62
Figura 2-10 <i>Proceso de cálculo de acumulación del flujo</i>	63
Figura 2-11 <i>Proceso de cálculo de punto de Aforo</i>	63
Figura 2-12 <i>Proceso de generación de la Microcuenca de estudio</i>	64
Figura 2-13 <i>Histograma de datos mensuales (datos observados originales)</i>	66
Figura 2-14 <i>Histograma de serie de tiempo mensual de estación Huanca Sancos</i>	67
Figura 2-15 <i>Ajuste de los resultados del factor R por regresión lineal</i>	83
Figura 2-16 <i>Proceso de ajuste de los valores del factor R de GPM</i>	84
Figura 2-17 <i>Proceso de ajuste de los valores SoilGrid</i>	87
Figura 2-18 <i>Acceso a la plataforma Copérnicus para el proceso de descarga de imagen Sentinel 2A</i>	89
Figura 2-19 <i>Preparación de la imagen en alta resolución para el proceso de descarga de Sentinel 2A</i>	89
Figura 2-20 <i>Ubicación de las coberturas vegetales mediante puntos</i>	90
Figura 2-21 <i>Criterios de cálculo de erosión hídrica potencial y real en la microcuenca</i>	92

Figura 3-1 <i>Delimitación de la microcuenca Paliza</i>	94
Figura 3-2 <i>Resultado de completación y extensión de datos faltantes</i>	95
Figura 3-3 <i>Diagrama de doble masa</i>	96
Figura 3-4 <i>Resultado de ajuste de los valores de R (GPM) con valores de R (obs)</i>	98
Figura 3-5 <i>Mapa del factor R de erosividad</i>	99
Figura 3-6 <i>Mapa de factor K de erodabilidad</i>	102
Figura 3-7 <i>Mapa del factor LS de longitud y pendiente</i>	103
Figura 3-8 <i>Mapa del factor C (cobertura Vegetal)</i>	105
Figura 3-9 <i>Mapa del factor P (prácticas de conservación)</i>	107
Figura 3-10 <i>Mapa de erosión hídrica potencial en la microcuenca Paliza</i>	109
Figura 3-11 <i>Mapa de erosión hídrica real en la microcuenca Paliza</i>	111

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo estimar la erosión hídrica en la microcuenca Paliza (98.48 km²), ubicada en el distrito de Lucanamarca, provincia de Huanca Sancos, región Ayacucho, aplicando la metodología RUSLE. Para ello, se empleó la plataforma Google Earth Engine (GEE) junto con el lenguaje de programación JavaScript, con el fin de descargar y procesar los valores del factor R obtenidos a partir de series temporales del satélite GPM, los cuales fueron ajustadas con datos de R observados calculados de los datos proporcionados por el SENAMHI. En cuanto al factor K de erodabilidad, se emplearon datos provenientes de SoilGrids, los cuales fueron ajustados con los datos obtenidos de las mediciones del campo. El factor R se calculó mediante la ecuación de Wischmeier y Smith (1978), clasificando la erosividad como muy alta. El factor K indicó suelos medianamente erodable. El factor LS mostró pendientes suaves en la mayor parte del área y mayores pendientes en zonas bajas. El factor C se derivó mediante clasificación supervisada de imágenes del satélite Sentinel 2A, identificando matorrales y pastizales como coberturas predominantes. El factor P se asignó según prácticas de conservación observadas en campo, como zanjas de infiltración y cultivos en terrazas. La erosión hídrica potencial promedio fue de 49.92 t/ha/año, clasificada como moderada. La erosión real promedio fue de 6.88 t/ha/año/, clasificada como ligera. Las mayores tasas de pérdida de suelo se registraron en la parte baja de la microcuenca, asociadas a pendientes más pronunciadas. Finalmente, se elaboraron mapas temáticos de pérdida de suelo y de cada uno de los factores RUSLE, siguiendo la clasificación de la FAO. Estos mapas constituyen herramientas clave para la planificación y gestión sostenible de los recursos edáficos en la microcuenca Paliza.

Palabras clave: Erosión hídrica, pérdida de suelos, prácticas de conservación, Google Earth Engine, Satélite GPM, SoilGrids, Sentinel-2^a, RUSLE.

ABSTRACT

The objective of this study was to estimate water erosion in the Paliza micro-watershed (98.48 km²), located in the district of Lucanamarca, province of Huanca Sancos, Ayacucho region, by applying the RUSLE methodology. To this end, the Google Earth Engine (GEE) platform was used in combination with the JavaScript programming language to download and process R factor values derived from GPM satellite time series. These values were calibrated with observed R values calculated using data provided by SENAMHI.

For the soil erodibility factor (K), data from the SoilGrids database were used and adjusted with field measurements. The R factor was calculated using the Wischmeier and Smith (1978) equation, classifying rainfall erosivity as very high. The K factor indicated moderately erodible soils. The LS factor revealed gentle slopes throughout most of the area, with steeper slopes in lower-lying zones. The C factor was derived through supervised classification of Sentinel-2A satellite imagery, identifying shrublands and grasslands as the predominant land covers. The P factor was assigned based on conservation practices observed in the field, such as infiltration ditches and terraced agriculture.

The average potential water erosion was estimated at 49.92 t·ha⁻¹·year⁻¹, classified as moderate, while the average actual erosion was 6.88 t·ha⁻¹·year⁻¹, classified as slight. The highest soil loss rates were recorded in the lower part of the micro-watershed, associated with steeper slopes. Finally, thematic maps of soil loss and each RUSLE factor were developed following FAO classification standards. These maps represent essential tools for the sustainable planning and management of soil resources in the Paliza micro-watershed..

Keywords: water erosion, soil loss, conservation practices, Google Earth Engine, GPM satellite, SoilGrids, Sentinel-2A, RUSLE.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación se desarrolló en la microcuenca Paliza, ubicada en el distrito de Santiago de Lucanamarca, provincia de Huanca Sancos, región Ayacucho. El estudio tuvo como objetivo estimar el nivel de erosión del suelo mediante la aplicación del modelo RUSLE, utilizando datos de precipitación obtenidos de la malla GPM (Global Precipitation Measurement) y ajustados con información del SENAMHI.

Se sabe que la erosión hídrica es un proceso complejo de preparación y separación del material en partículas individuales (arcilla, limo, arena y carbono orgánico) y pequeños agregados por acción del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo. Las partículas desprendidas son arrastradas a pendientes abajo por el escurrimiento superficial, lo cual produce, a su vez, el desprendimiento de nuevo material. Pueden distinguirse dentro de la escorrentía dos tipos de flujo: el flujo laminar que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo turbulento/concentrado o flujo en surcos (erosión en surcos) que se mueve con una velocidad mayor y es el responsable de la mayor parte de transporte de sedimentos. Por otro lado, en regiones montañosas, ambientes de altas pendientes, la sola acción de la gravedad es capaz de mover el suelo especialmente cuando esta mojado (Brea & Bolocche, 2016).

La aplicación del modelo RUSLE permite cuantificar la pérdida de suelo integrando cinco factores principales: la erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), la longitud y pendiente del terreno (LS), la cobertura vegetal (C) y las prácticas de conservación (P). Estos factores se obtienen a partir de datos temáticos y espaciales que serán procesados mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Asimismo, el uso de datos grillados del GPM representa una alternativa eficiente para la caracterización climática de zonas con escasa cobertura de estaciones meteorológicas, siempre que se validen adecuadamente con datos observados. Los resultados obtenidos permitirán generar mapas temáticos de pérdidas de suelo según la clasificación establecida por la FAO, constituyéndose en una herramienta útil para la gestión territorial y la implementación de prácticas de conservación orientadas a mitigar la erosión en la microcuenca Paliza.

Objetivo general

Estimar la erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE, con datos de precipitación de GPM en la microcuenca Paliza – Lucanamarca – Huanca Sancos - Ayacucho, 2024.

Objetivos específicos

1. Obtener los valores del factor de erosividad (R) del GPM y ajustar con valores observados de (SENAMHI).
2. Determinar los parámetros del modelo RUSLE para estimar la erosión hídrica en la microcuenca Paliza.
3. Estimar la pérdida del suelo mediante el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza.
4. Elaborar mapas de pérdidas de suelos en la microcuenca Paliza (según clasificación FAO).

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. *Mundial*

El modelo USLE (Universal Soil Loss Equation), desarrollado en 1965 por Wischmeier y Smith, y su versión revisada, RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), publicada en 1978, se han consolidado como herramientas fundamentales para la estimación y gestión de la pérdida de suelo por erosión hídrica. El modelo original USLE ofrecía una metodología empírica para cuantificar la pérdida media anual de suelo en función de factores como la lluvia, el tipo de suelo, la topografía, el uso del suelo y las prácticas de conservación (Wischmeier, W. H., and Smith, 1978).

El modelo RUSLE, representó un avance significativo respecto al modelo original USLE, mejorando su precisión y aplicabilidad en la estimación de la erosión del suelo. Estas mejoras son fundamentales para gestionar la erosión de manera más efectiva, permitiendo un enfoque más preciso en la planificación de la conservación y el manejo de los recursos naturales. En resumen, el aporte de Renard et al. fue crucial para refinar una herramienta clave en la gestión ambiental y la agricultura sostenible, contribuyendo significativamente a la lucha contra la degradación del suelo (Renard et al. 1997).

Morgan (2005), en su libro "Soil Erosion and Conservation" proporciona un análisis exhaustivo sobre la erosión del suelo, sus causas, efectos y las técnicas disponibles para la conservación del suelo. También aborda la erosión del suelo desde una perspectiva tanto teórica como práctica, basándose en investigaciones y estudios de casos globales. En el texto, el autor discute los diversos tipos de erosión (como la erosión hídrica, eólica, y la erosión por gravedad), explicando las causas naturales y antropogénicas de la pérdida de suelo. Se analiza el impacto de la erosión

en la productividad agrícola, el medio ambiente y los recursos hídricos. Además, se revisan los factores que influyen en la erosión del suelo, como la topografía, el tipo de suelo, la vegetación y el clima.

Una parte fundamental del libro es la discusión sobre estrategias de conservación, que incluyen métodos físicos, biológicos y de manejo. Se detallan técnicas como las terrazas, los muros de contención, la siembra de vegetación, el uso de barreras, y las prácticas de manejo del agua para prevenir la erosión (Morgan, 2005).

Morgan (2005), también examina el uso de modelos matemáticos, como el USLE (Universal Soil Loss Equation) y el RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), para predecir la tasa de erosión en diferentes condiciones y guiar la planificación de prácticas de conservación. A través de estos modelos, el autor ilustra cómo los datos geoespaciales y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden mejorar la predicción y manejo de la erosión del suelo.

1.1.2. Nacional y regional

Según Álvarez (2019), en su tesis ***“Análisis temporal del nivel de la erosión hídrica de la subcuenca del río Ichu 2013 y 2017”***, se enfoca en el análisis temporal de la erosión en la subcuenca del río Ichu, localizada en Perú, comparando los niveles de erosión en dos períodos distintos: 2013 y 2017. El principal objetivo es evaluar cómo ha cambiado la intensidad y extensión de la erosión hídrica en la región a lo largo de cuatro años, utilizando el modelo RUSLE (ecuación universal revisada de pérdida de suelo) y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS), donde los resultados mostraron un aumento significativo de la erosión hídrica en varias áreas de la subcuenca entre 2013 y 2017. Las zonas más afectadas fueron aquellas con pendientes pronunciadas y sin prácticas adecuadas de conservación del suelo, Se identificaron también los factores claves que contribuyeron a este aumento, como un cambio en el uso del suelo (más áreas agrícolas sin medidas de

conservación), mayores precipitaciones en ciertos años y una reducción de la cobertura vegetal debido a actividades humanas y deforestación, por otro lado también se identificó zonas críticas, donde la erosión es más severa, especialmente en área de cultivo y pastoreo y sin prácticas de manejo sostenible, como en las altas pendientes de la subcuenca, el autor recomienda para futuras investigaciones, realizar estudios adicionales para monitorear la erosión a lo largo del tiempo y evaluar la efectividad de las medidas de conservación implementada.

La tesis de ***“Estimación de la erosión hídrica mediante la aplicación de la metodología RUSLE en la cuenca del río Piura”*** se enfoca en la estimación de la erosión hídrica en la cuenca del río Piura utilizando la metodología RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo), una herramienta que permite estimar la pérdida de suelo debido a la erosión provocada por las lluvias y la escorrentía. El objetivo principal fue analizar las áreas más vulnerables a la erosión en esta cuenca y proporcionar recomendaciones para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la protección del suelo, donde los resultados indicaron que en la cuenca del río Piura, aproximadamente el 30% de la superficie presenta riesgo moderado a alto de erosión. Las áreas más afectadas por la erosión se localizan en las zonas de pendiente pronunciada, especialmente en las zonas altas de la cuenca y en áreas donde el uso agrícola es intensivo sin prácticas de conservación del suelo. Viendo los resultados obtenidos el autor propone algunas recomendaciones como: Adopción de prácticas adecuadas de conservación en las zonas más vulnerables a la erosión, como terraceo, siembra en contorno, cultivos de cobertura y reforestación en áreas críticas, capacitación y sensibilización de las comunidades locales especialmente los agricultores y los ganaderos. Estas prácticas ayudarían a reducir la escorrentía y mejorar la estructura del suelo, lo que reduciría significativamente la pérdida de suelo (Tapia & Gómez, 2018).

En su tesis titulada "***Determinación de la erosión hídrica de suelos en las zonas agrícolas del centro poblado de Pampa Gangallo – Ayacucho***", Joyo (2018), tuvo como objetivo estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE, obteniendo un factor R entre 151.64 y 167.07 MJ·mm/ha·h·año y un factor K entre 0.03 y 0.0418 t·ha·h/ha·MJ·mm; el factor LS se calculó a partir de un DEM de 12.5 m, encontrando pendientes de 0.3 a 28.5 m, mientras que el factor C se derivó de una zonificación de cobertura vegetal con valores de 0.0001 hasta 0.40. Los resultados indican que el 40% de la superficie de la microcuenca está en riesgo de degradación severa por erosión hídrica, con pérdidas que superan las 200 t/ha/año, por lo cual el autor recomienda concientizar a la población y fortalecer la gestión de los recursos hídricos para mitigar estos impactos.

1.2. Cuenca hidrográfica

Según Vásquez et al., (2017), una cuenca hidrográfica es "un sistema geomorfológico natural que funciona como una unidad de drenaje, en donde las aguas de precipitación se distribuyen a través de ríos, arroyos y otras formas de drenaje hasta llegar a un cuerpo receptor". Además, Vásquez destaca la importancia de entender a las cuencas como sistemas integrados que responden no solo a los fenómenos naturales, sino también a las actividades humanas (sociales, ambientales económicos, políticos e institucionales).

Por otra parte, el autor indica, que la cuenca hidrográfica es un sistema abierto a flujos, influencias y líneas de acción que atraviesan sus fronteras es decir que puede dar y recibir; pues la microcuenca es solo una parte ínfima de la tierra. Además, se debe tener en cuenta que no existe ningún punto de la tierra que no pertenezca a una cuenca hidrográfica (p.15).

Villón (2002), indica lo siguiente sobre la cuenca hidrográfica;

Es un área geográfica limitada por divisorias de aguas, donde el agua de precipitación y otras fuentes superficiales o subterráneas converge hacia un único punto de drenaje, como un río, lago o embalse. Esta cuenca actúa como un sistema dinámico en el que se desarrollan procesos hidrológicos como la escorrentía, infiltración y almacenamiento de agua, y es fundamental para entender los comportamientos del ciclo hidrológico y la gestión del recurso hídrico.

El autor enfatiza también que la cuenca no solo es una unidad de drenaje, sino un sistema integrado donde interactúan tanto los elementos naturales (precipitación, evaporación, vegetación, etc.) como las actividades humanas que pueden influir en el ciclo del agua (como el uso del suelo, la urbanización o la agricultura).

Tabla 1-1

Clasificación de la cuenca según su tamaño

Clasificación	Área (ha)	Área (km²)
Sistema hidrográfico	> de 300000	>de 3000
Cuencas	de 60000 a 300000	de 600 a 3000
Subcuencas	de 10000 a 60000	de 100 a 600
Microcuenca	< de 10000	<de 100

Nota: (Gámez, 2009)

Tabla 1-2

División de una cuenca hidrográfica

Unidad hidrográfica	Área (ha)	Área (km²)
Cuencas	>50000	>500
Subcuencas	De 5000 a 50000	De 50 a 500
Microcuenca	<5000	<50

Nota: (Vásquez et al., 2017).

1.3. Erosión del suelo

Se dice a la erosión hídrica a un proceso de desprendimiento, arrastre, descolmatación y la sedimentación de las partículas del suelo, este fenómeno es a causa de la acción de las gotas de la lluvia, viento y por el accionar del hombre, también cabe mencionar que la erosión puede ser de forma natural o erosión acelerada (Vásquez et al., 2017).

1.3.1. Factores que influyen en la erosión del suelo

Los principales factores que afectan directamente la tasa de erosión del suelo incluyen: la precipitación (lluvia), la escorrentía, la acción del viento, la textura del suelo, la pendiente de la cuenca, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación del suelo. Estos factores, junto con otros que inciden en la erosión, se clasifican en tres categorías: energía, resistencia y protección. La erosión es el proceso de desgaste de la superficie terrestre debido a las fuerzas naturales (fenómenos naturales) o a actividades humanas. Representa la pérdida de material del suelo, la cual implica la pérdida de nutrientes que son arrastrados y acumulados en áreas urbanas (Zavala-Cruz et al., 2001).

1.3.1.1. El suelo

Las características físicas del suelo influyen en su capacidad para resistir la separación y el transporte de los granos, dependiendo de la acción del agua sobre el suelo, así como de su capacidad para generar escorrentía y permitir la infiltración (Gamboa, 2023).

1.3.1.2. La topografía

La pendiente y la longitud de la inclinación son los factores principales que afectan la topografía del terreno, y también se consideran la forma y el tamaño del sistema de drenaje de la zona en cuestión (Gamboa, 2023).

1.3.1.3. El clima

Los factores climáticos juegan un papel crucial en el proceso de erosión, como la precipitación, el viento y la temperatura. Estos factores están interrelacionados, ya que el viento cambia su dirección, velocidad y ángulo durante las precipitaciones, lo que influye en su capacidad erosiva (Gamboa, 2023).

1.3.1.4. La vegetación

La vegetación actúa como una capa protectora sobre la superficie, reduciendo el impacto del agua proveniente de la lluvia o de la escorrentía superficial. La cobertura vegetal protege el suelo al disminuir la energía de las gotas de lluvia, reducir gradualmente la velocidad de la escorrentía, facilitar el paso vertical del agua gracias a las raíces y los restos de la vegetación, y al mismo tiempo, las raíces entrelazan las partículas del suelo, evitando su desplazamiento (Gamboa, 2023).

1.3.1.5. El hombre

El ser humano es el principal responsable de los procesos de erosión, especialmente debido a su papel y participación en la gestión y explotación de los recursos naturales (Gamboa, 2023).

1.3.2. Tipos de erosión

Según Silva (2023), La erosión del suelo se sabe que es un proceso físico que siempre se ha presentado en la tierra y a causa de ello la modelación de los relieves terrestres y es un proceso a largo plazo, pero sin embargo se presenta otro tipo de erosión a corto plazo, a continuación, se detalla los tipos de erosión natural y acelerada.

1.3.2.1. Erosión geológica, normal o natural

La erosión natural es aquella que resulta de las fuerzas de la naturaleza, este proceso ocurre a lo largo de muchos años, desarrollándose gradualmente en un entorno natural. También se le conoce como erosión geológica, en este tipo de erosión, el proceso es lento y puede extenderse durante millones de años, con la

intervención de factores como la lluvia, la nieve, las variaciones de temperatura y el viento, en zonas áridas, el calor provoca que el suelo se agriete al expandirse, y el viento transporta granos de arena que forman dunas y montículos de poca altura, los elementos que causan este tipo de erosión contribuyen a moldear el paisaje, dando lugar a formaciones naturales que pueden ser vistas como impresionantes y hermosas (Silva, 2023).

1.3.2.2. Erosión inducida o acelerada

Silva (2023), en su tesis indica que la erosión inducida o acelerada, es cuando a los agentes naturales se le agrega el accionar del hombre, por ende, este tipo de erosión es propiciada por el mal manejo de los suelos.

1.3.2.3. Erosión eólica

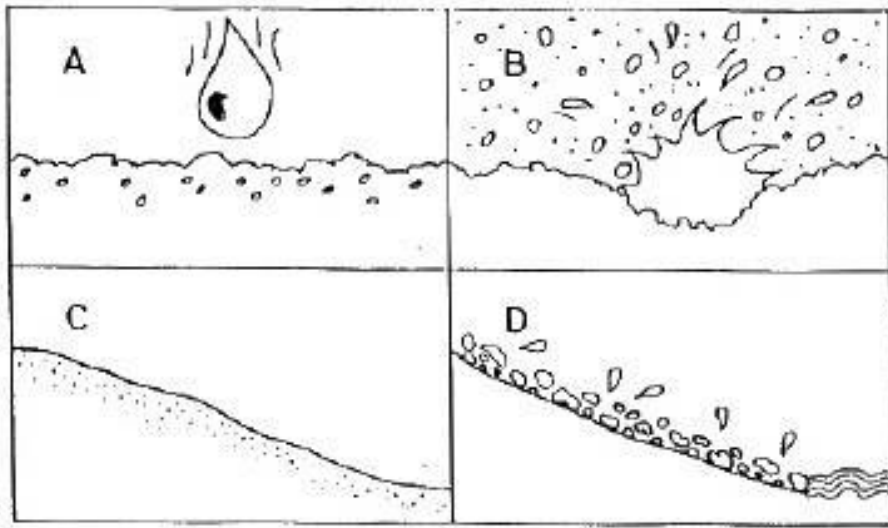
La erosión eólica es el proceso en el que las partículas superficiales del suelo son desplazadas y transportadas por el viento. Algunos estudiosos incluyen la abrasión, que ocurre cuando las partículas arrastradas por el viento impactan otras superficies, como parte de este fenómeno. La acumulación de los materiales transportados puede darse a diferentes distancias de su origen, dependiendo principalmente de la intensidad del viento y el tamaño de las partículas que han sido removidas (Silva, 2023, p. 23).

1.3.2.4. Erosión hídrica

Se define como la erosión hídrica a la “disminución del espesor del suelo superficial (Horizonte A), debido a la remoción uniforme de los materiales del suelo, por la acción de las gotas de las lluvias y esorrentía”, el autor señala que la cantidad salpicada de las gotas de la lluvia es 50 a 90 veces más grande, que la cantidad de los suelos arrastrados por el flujo superficial, en un suelo desnudo, las fuertes lluvias salpican alrededor de 25 t/ha. (Zavala-Cruz et al., 2001, p.06).

Figura 1-1

Etapas de erosión hídrica



Nota: (Sabino et al., 2017)

1.3.3. Procesos de erosión

1.3.3.1. Erosión

Es el proceso de desgastar y consumir, lo que causa una pérdida significativa del relieve y genera un vacío, reduciendo el volumen (Sabino et al., 2017).

1.3.3.2. Transporte

La ablación y el movimiento de los materiales erosionados implican un proceso de transporte, que constituye la segunda fase de la erosión. Factores como la pendiente inclinada, la gravedad, el viento, entre otros, facilitan este desplazamiento (Sabino et al., 2017).

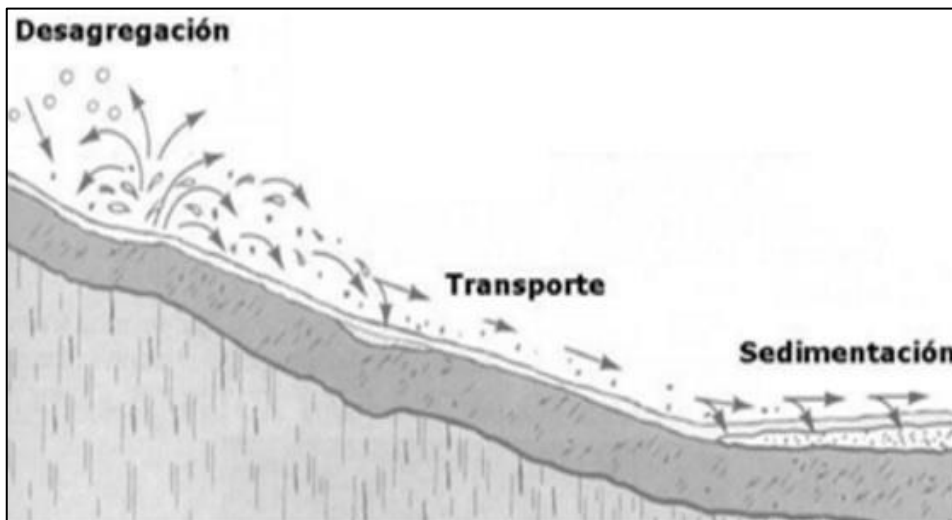
1.3.3.3. Acumulación

El transporte de materiales lleva inevitablemente a una acumulación. Cuando esta ocurre en el fondo de un lago o un océano, se denomina sedimentación, este proceso altera las formas del relieve terrestre, pero si la sedimentación ocurre al aire libre, como en un cono de deyección torrencial, en una duna o en los escombros, cambia el modelado del terreno. Se considera que estas tres fases erosión, transporte y acumulación están interrelacionadas y son inseparables, de modo que

comúnmente se les agrupa bajo el término "erosión" en su sentido más amplio (Sabino et al., 2017).

Figura 1-2

Proceso de erosión hídrica del suelo



Nota: (Sabino et al., 2017)

1.3.4. Formas de la erosión

1.3.4.1. Erosión por salpicaduras

El salpicado de suelo ocurre cuando las gotas de lluvia caen directamente sobre las partículas del suelo o en capas delgadas de suelo, causando que grandes cantidades de suelo sean dispersadas debido a la energía cinética del impacto. La cantidad de suelo salpicado puede ser entre 50 a 90 veces mayor que las pérdidas por socavación o arrastre. Se estima que, en un suelo descubierto, las lluvias frecuentes pueden salpicar al aire aproximadamente 224 mg/ha. Sin embargo, el salpicado generalmente no se transporta fuera de las áreas afectadas por el impacto directo. La relación entre la erosión y la energía de las gotas de lluvia depende de su masa, tamaño, forma, velocidad y dirección (Sabino et al., 2017).

1.3.4.2. Erosión laminar

La erosión laminar remueve el suelo en capas delgadas debido al flujo superficial que corre en capas finas sobre el terreno. El impacto de las gotas de lluvia,

combinado con el flujo superficial, crea pequeños riachuelos, la erosión causada por las gotas es significativa, ya que su velocidad de flujo es baja (entre 0.3 y 0.6 m/s), lo que provoca el desprendimiento de partículas de suelo. A medida que aumenta el sedimento, los poros de la capa superficial se llenan, reduciendo la tasa de infiltración. La fuerza abrasiva y de arrastre del flujo laminar depende de la profundidad y velocidad del escurrimiento, así como de las características del suelo (Sabino et al., 2017).

1.3.4.3. Erosión en surcos

Cuando el flujo superficial se concentra, el agua desprende el suelo, formando canales o surcos bien definidos. Estos canales se estabilizan y son fácilmente visibles, la erosión y el transporte son más intensos debido a las altas velocidades de escurrimiento, y el esfuerzo hidráulico aumenta con la pendiente y el tamaño del canal. El flujo concentrado remueve el suelo del perímetro del surco y transporta tanto este material como el arrastrado desde las áreas circundantes, donde ocurre erosión laminar y por salpicado. La erosión en surcos puede ser eliminada con maquinaria, la cantidad de suelo transportado depende de la capacidad de desprendimiento y transporte, y la carga de sedimentos, normalmente; la capacidad de desprendimiento disminuye con mayor carga de sedimentos y viceversa (Sabino et al., 2017).

1.3.4.4. Erosión en cárcavas

La erosión que forma cárcavas crea canales más grandes que los surcos, los cuales transportan agua durante o después de las lluvias. A diferencia de los surcos, el paso de maquinaria no elimina fácilmente las cárcavas, dejando depresiones permanentes. Esta erosión de cárcavas es una etapa avanzada de la erosión en surcos, que, a su vez, es una fase posterior de la erosión laminar. El grado de erosión depende de las características del suelo, el tamaño y forma de las zanjas, su alineamiento y la pendiente del canal (Sabino et al., 2017).

1.3.5. Erosión total

Es la cantidad total de material erosionado en la cuenca, abarcando las pérdidas de suelo y la erosión causada por: laminar, en surcos, cárcavas, salpicadura, socavaciones en el cauce y otros procesos (Morgan, 2005).

Tabla 1-3

Susceptibles a la erosión

Clase	Erosión potencial (t/año/h)
Muy ligera	< 2
Ligera	2 - 5
Moderada	5 - 10
Alta	10 - 50
Severa	50 - 100
Muy severa	100 - 500
Catastrófica	500 <

Nota: (Morgan, 2005)

Tabla 1-4

Clasificación de la erosión del suelo según la FAO

Nivel	Perdida de suelo t/ha/año	tipo de erosión
1	< 5	Baja Normal
2	5 - 25	Ligera
3	25 - 50	Moderada
4	50 - 100	Alta o Severa
5	100 - 200	Muy alta o muy severa
6	> 200	Crítica o catastrófica

Nota: (FAO, 2019) citado por (Ñahui, 2024).

1.3.6. Métodos para la estimación de la erosión

La estimación de la erosión hídrica se fundamenta en identificar los factores clave que afectan los mecanismos de erosión, utilizando observaciones, mediciones, experimentos y análisis estadísticos para establecer relaciones entre estos factores

y la pérdida de suelo. Además, las tecnologías actuales como los sensores remotos, los sistemas de información geográfica (SIG), el procesamiento de imágenes y modelos más complejos, permiten un enfoque integrado que considera tanto la hidrología como la producción de sedimentos. El análisis puede incluir la variación espacial y temporal de los parámetros, la corrección de entradas y salidas del sistema, la identificación de relaciones causa-efecto, o el uso de ecuaciones físicas que describen los procesos involucrados en la erosión (Almorox y otros, 2010). A continuación, se presenta el cuadro de los niveles de estimación de la erosión de carácter cualitativo o cuantitativo.

Tabla 1-5

Métodos – modelos de estimación de la erosión hídrica

CUALITATIVOS	FORMAS DE EROSION	
	GRADOS DE EROSION	
CUANTITATIVOS	ESTIMACION DIRECTA	CAJA NEGRA ESTADISTICOS (REGRESION)
	ESTIMACION INDIRECTA (MODELOS)	CAJA GRIS EMPÍRICOS (PARAMÉTRICOS)
		CAJA BLANCA CONCEPTUALES CON BASE FISICA

Nota: (Almorox et al., 2011) p.62

1.3.6.1. Cualitativa

La estimación cualitativa se centra en identificar unidades homogéneas mediante cartografía y en función de los principales parámetros que controlan el proceso de erosión. Dependiendo de los objetivos del estudio, se pueden definir diferentes formas o grados de erosión (Almorox et al., 2011).

a). Formas de erosión

Las formas de erosión se refieren a las manifestaciones físicas y geométricas que la erosión produce en el paisaje. Estas formas pueden ser identificadas y cartografiadas mediante observaciones directas en el campo. Algunas de las formas más comunes incluyen (Almorox et al., 2011).

- ✓ **Erosión laminar:** Pérdida uniforme de la capa superficial del suelo.
- ✓ **Erosión en surcos:** Formación de pequeños canales o surcos en la superficie del suelo.
- ✓ **Erosión en cárcavas:** Desarrollo de canales más profundos y anchos debido al flujo concentrado de agua.

b). Grados de erosión

Los grados de erosión se refieren a la intensidad o severidad de la erosión observada en un área específica. Esta clasificación se basa en la evaluación de indicadores visibles, como la profundidad de los surcos o cárcavas, la exposición de raíces, y la cantidad de suelo perdido. Generalmente, los grados de erosión se categorizan en (Almorox et al., 2011).

- ✓ **Ligera:** Evidencia mínima de erosión, con poca o ninguna pérdida de suelo.
- ✓ **Moderada:** Presencia de surcos o pequeñas cárcavas, indicando una erosión más pronunciada.
- ✓ **Severa:** Formación de cárcavas profundas y significativa pérdida de suelo, afectando la productividad del terreno.

1.3.6.2. Cuantitativa

La estimación cuantitativa permite obtener una medida numérica del proceso erosivo, ya sea a través de una estimación directa en el campo, ensayos o mediante la medición de parámetros relacionados con los sedimentos o el suelo. En el ámbito de la estimación indirecta (o modelos), se utilizan formulaciones basadas en principios físicos que describen los procesos mediante ecuaciones que consideran las leyes físicas que rigen la generación de sedimentos. También existen modelos

conceptuales que representan la cuenca de drenaje y sus procesos de transferencia y almacenamiento de sedimentos; métodos paramétricos o empíricos, que emplean formulaciones basadas en datos experimentales para interpretar los mecanismos de erosión y sus efectos; y métodos estadísticos que utilizan el análisis de regresión para correlacionar mediciones de degradación con parámetros asociados al proceso erosivo (Almorox et al., 2011).

a). Estimación directa:

- ✓ **Caja negra (estadísticos - regresión):** Estos modelos aplican técnicas estadísticas para establecer relaciones entre variables observables sin considerar los procesos internos. Por ejemplo, en estudios de erosión en taludes de infraestructuras, se aplicaron modelos estadísticos para predecir la erosión futura y diseñar medidas de control adecuadas.

b). Estimación indirecta (modelos):

- ✓ **Caja gris (empíricos - paramétricos):** Estos modelos combinan observaciones empíricas con una comprensión parcial de los procesos internos. Un ejemplo es la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE/RUSLE) para estimar la erosión en parcelas agrícolas, donde se consideran factores como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la longitud y pendiente de la ladera, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo.
- ✓ **Caja blanca (conceptuales con base física):** Estos modelos se basan en principios físicos para representar detalladamente los procesos de erosión. Por ejemplo, el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) simula procesos como la infiltración, el escurrimiento y el transporte de sedimentos, y ha sido aplicado en estudios de erosión en taludes de infraestructuras viarias.

1.4. Modelo de ecuación universal revisada de pérdida de suelo - RUSLE

Según Renard et al. (1997), RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) es un modelo empírico mejorado para la estimación de la erosión del suelo causada por la lluvia y el escurrimiento superficial. Representa una actualización de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) desarrollada por Wischmeier y Smith (1978), incorporando mejoras en la precisión de sus factores y en la aplicabilidad a diferentes condiciones climáticas, edáficas y topográficas.

Morgan (2005), destaca que RUSLE es un modelo diseñado para evaluar la pérdida de suelo a nivel de parcelas y cuencas hidrográficas, con énfasis en la influencia de la cobertura vegetal, la gestión del suelo y las prácticas de conservación. A diferencia de USLE, RUSLE introduce mejoras en la parametrización de los factores y en la integración con herramientas computacionales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En su interpretación, Morgan (2005) enfatiza que RUSLE sigue siendo un modelo empírico, es decir, basado en datos experimentales y observaciones, lo que lo diferencia de modelos más dinámicos que consideran procesos físicos detallados como la erosión en cárcavas o el transporte de sedimentos.

La ecuación de pérdida del suelo es:

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

Donde:

- **A:** Representa el valor promedio de las pérdidas de suelo anuales (t/ha/año), en función de un índice de erosividad de la lluvia **R**, la erosibilidad del suelo **K**, un factor de relieve **LS**, un factor de cubierta vegetal **C** y un factor de prácticas de conservación de suelo **P**.
- **R:** Es el índice de erosión pluvial y recoge la influencia que la erosión tiene la energía cinética de los aguaceros, disgregando las partículas del suelo y

compactando su superficie, y su intensidad máxima, determinando la aparición de escorrentía superficial cuando se supera la capacidad de infiltración, la medición de este parámetro es en: (MJ . mm/(ha.h.año)) de lluvia.

- **K:** Factor de erodabilidad (t. ha . h/(ha.MJ.mm)) del suelo, es la tasa de pérdida de suelo por unidad del índice de erosión para un suelo determinado.
- **LS:** El factor **L** de longitud de pendiente, el cual nos da la proporción de pérdida de suelo de la longitud de pendiente de la zona de estudio y el factor **S** que nos dice que tan escarpado se encuentra la pendiente, mide la relación de pérdida de suelo de la inclinación de la pendiente en la zona de estudio. En la ecuación se considera el factor **LS** (adimensional) como el factor topográfico que resulta de la multiplicación de los factores de L y S.
- **C:** El factor de cobertura vegetal de las relaciones de la pérdida de suelo de un área con cobertura y la gestión de pérdida de suelo específico (adimensional).
- **P:** el factor de prácticas de conservación o prácticas de apoyo de la pérdida de suelo con una práctica de apoyo, como el de contorno o pérdida de suelo de terrazas (adimensional).

Basándose en el modelo RUSLE, se calculan las pérdidas anuales de suelo como un valor promedio a lo largo de un período representativo de años. Estas pérdidas ocurren en la superficie del terreno debido a la erosión superficial, tanto laminar como en regueros, y están influenciadas por factores como el clima, el tipo de suelo, el relieve, la vegetación y el uso del suelo. La premisa fundamental del modelo RUSLE es que las precipitaciones actúan como el principal agente desencadenante de esta erosión.

1.5. Factores de la ecuación universal revisada de pérdida de suelo (RUSLE)

1.5.1. Factor de erosividad de la lluvia (R)

Se trata de un índice numérico conocido como índice de erosión (IE), el cual representa la capacidad de la lluvia para degradar el suelo (Wischmeier y Smith, 1978). En suelos sin cobertura, la erosión efectiva es proporcional al producto de la energía cinética de la lluvia y su intensidad máxima en un intervalo de 30 minutos. En este contexto, el valor corresponde al promedio de los factores R individuales registrados durante un periodo de entre 20 y 25 años (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2014).

El factor R, conocido también como factor de erosividad de la lluvia, representa numéricamente la capacidad de la precipitación para generar erosión en el suelo, este concepto fue desarrollado originalmente por Wischmeier y Smith (1978) en el marco del modelo Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Según su formulación, el valor de R se obtiene a partir del análisis de tormentas individuales, calculando entre la energía cinética total de la lluvia y su intensidad máxima durante un intervalo de 30 minutos. No obstante, en muchos países en desarrollo, como el Perú, no se cuenta con datos pluviógrafos de alta frecuencia (como intensidades en intervalos de 30 minutos), lo que limita la aplicación directa de este enfoque. Ante esta situación, se recurre a una fórmula alternativa también propuesta por Wischmeier y Smith (1978), que permite estimar el factor R utilizando únicamente información de precipitación mensuales y anuales. Esta ecuación empírica es especialmente útil en regiones donde los datos polimétricos son escasos o discontinuos (Sabino et al., 2017).

a). Método de Wischmeier y Smith, 1978

Esta fórmula permite calcular el valor de R con relativa precisión, incluso en condiciones de limitada disponibilidad de datos de intensidad de lluvia, lo cual la

convierte en una herramienta muy prácticas para estudios de erosión hídrica en zonas rurales o remotas.

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735x10^{\left(1.5 \log_{10}\left(\frac{Pi^2}{P}\right) - 0.08188\right)} \quad (2)$$

Donde:

R : factor erosividad de lluvias está en MJ mm / (ha.h.año);

Pi : Precipitación mensual en mm

P : Precipitación anual en mm.

Tabla 1-6

Interpretación del factor R de erosividad

Factor R (MJ·mm/ha·h·año)	Niveles de erosión de la lluvia	clasificación cualitativa	Observaciones
0 - 500	muy baja	Riesgo mínimo	Regiones áridas, vegetación natural o muy controlada
500 - 1000	baja	Riesgo bajo	Pastizales, agricultura de secano sin pendiente
1000 - 2000	moderada	Riesgo moderado	Zonas agrícolas en laderas suaves
2000 - 4000	alta	Riesgo alto	Regiones tropicales con lluvias intensas
> 4000	muy alta	Riesgo muy alto	Selva húmeda, montaña tropical, lluvias torrenciales

Nota: Roose (1977), FAO (1993) y Renard et al. (1997)

Tabla 1-7

Interpretación del factor R de adaptado según SENAMHI

Factor R (MJ·mm/ha·h·año)	Niveles de erosión de la lluvia	Descripción general del clima
------------------------------	------------------------------------	-------------------------------

< 200	muy baja	Climas áridos o semiáridos, escasa lluvia
200 - 500	baja	Lluvias poco intensas o mal distribuidas
500 - 800	moderada	Precipitaciones frecuentes, pero no extremas
800 - 1200	alta	Lluvias fuertes y bien distribuidas
> 1200	muy alta	Lluvias intensas, alta capacidad de erosión

Nota: elaboración propia, adaptado a los resultados del (Gutierrez & Sabino, 2022) de SENAMHI, para zonas de los Andes Occidentales Centro-Sur (ACS).

b). Método Índice Modificado de Fournier

El método de cálculo propuesto por Arnoldus (1978) ha sido reconocido por varios autores como una técnica práctica que emplea una fórmula derivada de regresión lineal. En este enfoque, se establece una correlación entre los valores conocidos del factor R y las precipitaciones medias anuales, permitiendo una estimación simplificada del mismo (Joyo, 2018).

$$R = \sum_{i=1}^{i=12} \frac{pi^2}{P} \quad (3)$$

Donde:

i = Número de meses

p = Precipitación mensual en mm.

P = Precipitación anual en mm.

Tabla 1-8

Clasificación del Índice Modificado de Fournier

Clasificación	IMF
Muy bajo	< 60
Bajo	60 a 90

Moderado	90 - 120
Alto	120 - 160
Muy Alto	> 160

Nota: Lobo y otros (2006), citado por (Joyo, 2018, p. 24)

1.5.2. Factor erosionabilidad del suelo (K)

El factor K mide la susceptibilidad del suelo a la erosión por agua según sus propiedades intrínsecas. Su escala va de 0 (baja erodabilidad) a 1 (alta erodabilidad). La ecuación de Wischmeier y Smith considera la humedad y la superficie del suelo, variando estacionalmente. Los suelos con mayor erosión suelen tener texturas intermedias, mientras que aquellos con más de 30% de arcilla son menos erosionables (Sabino et al., 2017).

La textura del suelo influye en su erodabilidad. Wischmeier y Smith (1978) proponen una ecuación que considera limo, arena, materia orgánica, estructura y permeabilidad.

El factor K contiene valores únicos para cada lugar de estudio y está expresado en T*ha*hr/MJ*mm*ha; además existen diferentes métodos para su cálculo, en este caso detallaremos uno de los métodos más resaltado para calcular el factor K:

A. Método Wischmeier y Smith (1978): Representado mediante la siguiente ecuación:

$$K = 0.1317 * \frac{[10^{-4} * 2.71 * M^{1.14} * (12 - MO) + 4.20 * (s - 2) + 3.23 * (p - 3)]}{100} \quad (4)$$

Donde.

K: Factor de erodabilidad del suelo (T. ha. año/Mj mm ha)

MO: Materia Orgánica (%)

s: Código de estructura del suelo

p: Código de permeabilidad

M: es el producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias o (%limo+%arena muy fina) *(100-%arcilla).

En ausencia de datos específicos, la FAO (1980) propone un método basado en la clasificación y textura del suelo. Para determinar el factor de erosionabilidad del suelo (K), se utilizó la información disponible en la página de la FAO, que incluye un archivo shapefile con los tipos y características del suelo. Esta capa contiene atributos como los porcentajes de limo, arena, arcilla y materia orgánica, elementos clave para calcular el factor K mediante la ecuación 4, basada en la fórmula de Williams, 1995, citado por (Guzmán, 2021).

$$K_{USLE} = 0.1317 * f_{csand} * f_{cl-si} * f_{org} * f_{hisand} \quad (5)$$

Donde:

f_{sand} : El indicador K se reduce en suelos que presentan arenas gruesas e incrementa en ellos que no contiene mucha arena.

f_{cl-si} : Brinda bajos factores de erosionabilidad a suelos arcillosos y limosos

f_{orgc} : El valor de K disminuye en aquellos suelos que presentan alto contenido de carbono orgánico.

f_{hisand} : El indicador K se reduce en suelos que presentan gran contenido de arena.

- Determinación del factor K (%arena)

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 * \exp \left[-0.256 * m_s * \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad (6)$$

- Determinación del factor K (%arcilla limosa)

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad (7)$$

- Determinación del factor K (% materia orgánica)

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 * orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 * orgC]} \right) \quad (8)$$

- Determinación del factor K (% alto de arena)

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \quad (9)$$

Donde:

m_s : % de arena (0.05 – 2 mm de diámetro)

m_{silt} : % de sedimento (0.002 – 0.05 mm de diámetro)

m_c : % de arcilla (< 0.002 mm de diámetro)

Corg: % de carbono orgánico (SOC)

En los siguientes cuadros se muestra algunos cuadros sobre las calificaciones.

Tabla 1-9

Calificación del factor de materia orgánica

Clases	%MO	Calificación
Muy bajo	< 1%	1
Bajo	1 - 1.5%	2
Medio	1.5 - 2.5 %	3
Alto	2.5 - 6 %	4
Muy Alto	> 6	5

Nota: Joyo (2018), p.25

Tabla 1-10*Clasificación de los grados de erodabilidad según USDA (1962)*

Valor de K	Clasificación
T ha. H/MJ MM ha.	
0.0000 - 0.0079	Muy poco erodable
0.0079 - 0.0171	Débilmente erodable
0.0171 - 0.0329	Medianamente erodable
0.0342 - 0.0684	Fuertemente erodable
0.0684 - 0.1027	Extremadamente erodable

*Nota: Joyo (2018), p.26***Tabla 1-11***Nomograma de Kirby y Morgan valores de K asociados a la textura y al contenido de materia orgánica*

Textura del suelo	< 0.5 %	2%	< 4%
Arena	0.007	0.004	0.003
Arena fina	0.0021	0.018	0.013
Arena muy fina	0.055	0.047	0.037
Arena franca	0.016	0.013	0.011
Arena fina franca	0.032	0.026	0.021
Arena muy fina franca	0.058	0.05	0.04
Franco arenoso	0.036	0.032	0.025
Franco arenoso fino	0.046	0.04	0.032
Franco arenoso muy fino	0.062	0.054	0.043
Franco	0.05	0.045	0.038
Limo franco	0.063	0.055	0.043
Limo	0.079	0.068	0.055
Franco arenoso arcilloso	0.036	0.033	0.028
Franco arcilloso	0.037	0.033	0.028

Franco arcilloso limoso	0.049	0.042	0.034
Arcilla arenosa	0.018	0.017	0.016
Arcilla limosa	0.033	0.03	0.025
Arcilla	0.017	0.038	

Nota: KIRKBY y MORGAN 1980, citado por Joyo, 2018, p.27

1.5.3. Factor longitud y ángulo de la pendiente (LS)

La longitud de la pendiente se refiere a la distancia que recorre el flujo desde su punto de inicio sobre la superficie hasta el lugar donde la inclinación disminuye lo suficiente para permitir la deposición de sedimentos o hasta el punto donde el escurrimiento ingresa a un canal bien definido. El gradiente de la pendiente se mide en porcentaje, representando la variación de altura por cada 100 metros de distancia horizontal. Para calcular el factor LS, que es adimensional, se combinan ambos valores.

El desarrollo de la EUPS tomó como referencia una parcela estándar con una longitud de 22,13 metros y una pendiente del 9 %, estableciendo así el factor de longitud de la pendiente (Guzmán, 2021).

a. Factor de longitud de la pendiente (L)

Para el cálculo del factor L, se utilizará las ecuaciones que se muestra a continuación.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (10)$$

Donde:

L : Factor longitud de la pendiente.

λ : Longitud de la pendiente, (m).

m : Exponente influenciado por la longitud y grado de pendiente.

22.13 : Valor que depende del tamaño estándar de una parcela de observación.

El exponente m se calcula como:

$$m = \left(\frac{F}{1 + F} \right) \quad (11)$$

El valor de F se calcula como:

$$F = \frac{\frac{\text{sen}\beta}{0.0896}}{3 * (\text{sen}\beta)^{0.8} + 0.56} \quad (12)$$

Donde:

β : Ángulo de la pendiente que debe transformarse de grados a radianes.

La longitud de la pendiente se calcula según Desmet y Govers (1996) citado por (Suárez, 2008).

$$L_{(i,j)} = \frac{(A(i,j) + D^2)^{m+1} - A(i,j)^{m+1}}{x^m \times D^{m+2} \times (22.13)^m} \quad (13)$$

Donde:

$A(i,j)$ (m) : Es el área de contribución aguas arriba en la entrada de una celda ráster con coordenadas (i,j)

D : Resolución de celda en metros

$x_{i,j}$, ($\text{sen } a_{i,j} + \text{cos } a_{i,j}$)

$a_{i,j}$, dirección de la orientación para la celda del ráster con coordenadas (i,j) .

b. Factor topográfico, inclinación de la pendiente (S)

El factor "S" de la inclinación es directamente proporcional a la intensidad de erosión pues este factor otorga velocidad al flujo generado. A mayor inclinación mayor pérdida de suelo" (Moreno & Suyo, 2020).

$$S = 0.065 + 0.045_{(s)} + 0.0065_{(s)^2} \quad (14)$$

$$S = (10.8 \sin\theta + 0.3) \text{ en pendiente } < 9.0 \% \quad (15)$$

$$S = (16.8 \sin\theta - 0.5) \text{ en pendiente } \geq 9.0 \% \quad (16)$$

Donde:

S: Factor de inclinación de la pendiente.

θ : Ángulo de la pendiente que debe transformarse de grados a radianes.

c. Factor LS

La longitud y la inclinación de la ladera influyen significativamente en las tasas de erosión del suelo, ya que el relieve es uno de los principales factores que determinan la producción de sedimentos en las cuencas vertientes. El factor de longitud de la ladera (L) es una variable adimensional que se define como el cociente entre la tasa de erosión anual de una parcela y la longitud específica de su ladera. Por su parte, el factor de pendiente (S) se establece como el cociente entre la tasa de erosión de una parcela con una pendiente determinada (Sabino et al., 2017).

En el método RUSLE, la topografía global influye en la erosión del suelo a través de dos factores: la longitud de la ladera (L) y la pendiente (S) (Renard et al., 1997). La combinación de ambos factores mediante su multiplicación permite obtener el factor LS. Para el estudio, el cálculo del factor LS se realizó utilizando la ecuación (18), desarrollada por Jiang y Zheng (2008).

$$LS = 1.07 * \left(\frac{\lambda}{20}\right)^{0.28} * \left(\frac{\alpha}{10}\right)^{1.45} \quad (17)$$

Siendo:

λ = Longitud de la pendiente

α = Es el Angulo de inclinación en grados

Las ecuaciones son ejecutadas desde la aplicación raster calculator que ofrece el software ArcGIS Pro y que exige la conversión de los valores de pendiente expresados en ángulo a Grados.

Tabla 1-12*Valores del factor LS en función de la pendiente*

Gradiente de Pendiente (%)	Factor LS
0-3	0.3
3-12	1.5
12-18	3.4
18-24	5.6
24-30	8.7
30-60	14.6
60-70	20.2
70-100	25.2
Más de 100	28.5

Nota: Método Mintegui (1983), citado por Garcia y (Valdez Tumi, 2014), p.29

1.5.4. Factor cobertura del suelo (C)

El factor C es adimensional representa la relación de pérdida del suelo a partir de una condición específica de cultivo o cobertura, con la pérdida del suelo a partir de un estado de barbecho continuo para el mismo suelo, pendiente y precipitación pluvial. La condición de barbecho desnudo, laboreado a favor de la pendiente toma el valor $C=1$ (Cisneros et al., 2012).

Tabla 1-13*Valores del factor de cobertura vegetal (C)*

Código	Tipo	Contenido	Factor C
10	Tierra Cultivada	Las tierras utilizadas para la agricultura, horticultura y jardines.	0.630
20	Bosques	Tierras cubiertas de arbole, con cubierta vegetal más de 30%.	0.003

30	Pradera	Terrenos cubiertos de césped natural con una cubierta más del 10%.	0.090
40	Matorral	Tierras cubiertas de arbustos con una cubierta de más 30 %.	0.220
50	Humedal	Tierras cubiertas de plantas de humedales y cuerpos de agua.	0.000
60	Cuerpos de agua	Las masas de agua en la superficie terrestre.	0.000
70	Tundra	Hierbas y arbustos en las regiones polares.	0.000
80	Las Superficies artificiales	Tierras modificadas por las actividades humanas.	0.090
90	Tierra Desolada	Tierras con cubierta vegetal inferior al 10%.	0.500
100	Nieve y hielo Permanente	Tierras cubiertas por la nieve permanente, y la capa de hielo.	0.000

Nota: (Sabino et al., 2017)

Tabla 1-14

Factor C por tipo de cobertura vegetal y uso de suelos)

Símbolo	cobertura vegetal y uso de suelos	factor (C)
Bf	Bofedales	0.050
Cp	Césped de Puna	0.028
Cer	Cultivos extensivos con riego	0.200
Ces	Cultivos extensivos en secano	0.400
Mh	Matorral Húmedo	0.076
Pj	Pajonales	0.038
Pf	Plantaciones forestales	0.014
Sv	Sin Vegetación	1.000

Nota: (Sabino et al., 2017)

1.5.5. Factor prácticas de retención del suelo (P)

Las prácticas mecánicas o el manejo del terreno ayudan a mitigar la erosión. Su propósito principal es regular el flujo de agua en la superficie para reducir la erosión hídrica en áreas con pendiente. Entre estas prácticas se incluyen los cultivos en contorno, las fajas y las terrazas. El valor de P depende de la inclinación del terreno y se determina mediante tablas, variando entre 0 y 1. En ausencia de medidas de conservación, P toma un valor de 1 (González & Tánago, 1991).

Este factor de la ecuación RUSLE refleja el impacto de las prácticas de conservación del suelo en las tasas de erosión. Consiste en llevar a cabo labores agrícolas o disponer la vegetación siguiendo las curvas de nivel, en fajas o terrazas, con el objetivo de interrumpir las líneas de escorrentía (Sabino et al., 2017).

Tabla 1-15

Factor de prácticas de conservación (P)

Pendiente (%)	Contorno	Cultivo en franjas	Terraza
0.0 - 7.0	0.55	0.27	0.1
7.0 - 11.3	0.6	0.3	0.12
11.3 - 17.6	0.8	0.4	0.16
17.6 - 26.8	0.9	0.45	0.18
26.8 >	1	0.5	0.2

Nota: (Sabino et al., 2017)

El factor P refleja el impacto de las prácticas óptimas de conservación del suelo, como los cultivos en contorno o en bandas. Su valor está determinado por la topografía del terreno y oscila entre 0 y 1, siendo estos valores el resultado de pruebas experimentales (ver tabla 2.8).

Tabla 1-16

Valores de "P" para cultivos en contorno y su máxima longitud permitida entre obras

Gradiente de pendiente (%)	Factor (P)	Máxima longitud de pendiente (m)
1-2	0.60	120-180
3-8	0.50	90-100
9-12	0.60	40
13-16	0.70	25
17-20	0.80	20
21-25	1.4	15

Nota: (Wischmeier, W. H., and Smith, 1978)

1.5.6. Pérdida de suelo (A)

Joyo (2018), en su tesis resalta que las pérdidas tolerables de los suelos son útiles para identificar problemas de erosión y elegir métodos de control adecuados. La cantidad de suelo que puede perderse sin afectar su productividad depende de sus características. En suelos profundos y fértiles, una pérdida de 25 mm en 30 años es menos preocupante que en suelos delgados sobre roca dura, donde el umbral suele ser inferior a 12,5 t/ha/año.

A nivel global, se considera aceptable una pérdida de 10 a 12 t/ha/año, aunque en zonas húmedas puede llegar a 25 t/ha/año. En Estados Unidos, los objetivos varían entre 2,5 y 12,5 t/ha/año, mientras que en la Federación Centroafricana el límite es de 10 t/ha/año para suelos arenosos y 12,5 t/ha/año para arcillosos. Superar estos valores pone en riesgo la conservación del suelo, ya que la erosión avanza más rápido de lo que el suelo puede regenerarse (Joyo, 2018).

Tabla 1-17*Clasificación de los niveles de erosión de los suelos, y pérdidas tolerables*

Intensidad de Amenaza	Pérdida de suelo (t/ha/año)
Baja	Menor a 5
Moderada	5 – 25
Media	25 – 50
Alta	50 – 100
Muy Alta	100 – 200
Crítica	Más de 200

Nota: Adaptado de FAO, UNESCO, PNUMA (1980), citado por Joyo (2018).

1.6. Precipitación

La precipitación se describe como cualquier tipo de humedad que se genera en las nubes y alcanza la superficie terrestre. Bajo esta definición, fenómenos como la lluvia, el granizo, la llovizna y la nieve son distintas manifestaciones del mismo proceso. En Estados Unidos, la lluvia se clasifica según su intensidad (Chereque, 2010).

- Ligera, para tasas de caída de hasta 2.5 mm/h
- Moderada, desde 2.5 hasta 7.6 mm/h
- Fuerte, por encima de 7.6 mm/h

La precipitación se refiere a cualquier forma de humedad que se origina en las nubes y desciende a la superficie terrestre en un período determinado. Se expresa en términos del nivel que alcanzaría sobre una superficie horizontal, con el propósito de que su medición represente fielmente la zona donde se registra. Las nubes están compuestas por diminutas gotas de agua, con un diámetro promedio de 0.01 mm, que, bajo ciertas condiciones, se agrupan formando gotas más grandes, superiores

a 0.5 mm de diámetro. Estas gotas adquieren una mayor velocidad de caída hasta llegar al suelo, lo que da lugar al fenómeno de la lluvia (Gómez & Gallo, 2022).

Según la tesis de Salas (2022), la precipitación desempeña un papel fundamental en el ciclo hidrológico, lo que hace necesaria la disponibilidad de instrumentos y dispositivos que permitan medir sus valores. Algunos de estos dispositivos incluyen los siguientes:

- Pluviómetros
- Pluviógrafos
- Satélites

a). Pluviómetros

Los pluviómetros son dispositivos compuestos por un recipiente graduado con un embudo en la parte superior, diseñado para captar la precipitación. Además, sus dimensiones varían según el lugar donde se ubiquen

b). Pluviógrafos

Los pluviógrafos, a diferencia de los pluviómetros, registran la precipitación de forma continua en lugar de cada 24 horas. Su mecanismo permite no solo medir la cantidad de lluvia acumulada, sino también analizar su distribución temporal (Salas, 2022).

c). Satélites

Otra forma de estimar la precipitación es mediante el uso de satélites. Aunque son una tecnología más reciente en comparación con los pluviómetros, pluviógrafos y radares, ofrecen la ventaja de cubrir amplias áreas, incluyendo los océanos (Salas, 2022).

En este sentido, un satélite puede definirse como una herramienta para la observación del clima y la atmósfera, permitiendo el monitoreo continuo de fenómenos atmosféricos. Estos dispositivos proporcionan información

actualizada de manera permanente sobre las condiciones climáticas a nivel global (Salas, 2022).

1.7. Global Precipitation Measurement GPM

El Mapeo Global de Precipitaciones por Satélite (GSMaP) proporciona una tasa de lluvia global por hora con una resolución de 0,1 x 0,1 grados. GSMaP es un producto de la misión Global Precipitation Measurement (GPM), que proporciona observaciones de precipitación global en intervalos de tres horas. Los valores se estiman utilizando radiómetros infrarrojos y de microondas pasivos multibanda del satélite GPM Core Observatory y con la ayuda de una constelación de otros satélites.

El algoritmo de recuperación de la tasa de precipitación de GPM se basa en un modelo de transferencia radiactiva. La tasa ajustada por medidor se calcula en base a la optimización de la acumulación de 24 horas de la tasa de lluvia por hora GSMaP a la precipitación diaria mediante la medición del medidor NOAA/CPC. Este conjunto de datos es procesado por el algoritmo GSMaP.

Los datos generados por el GPM están disponibles en un portal web oficial (<https://gpm.nasa.gov/>) y en diversas plataformas de búsqueda y acceso a información, como OpenDAP, GDS, WMS y WCS. Además, estos datos pueden descargarse en distintos formatos, incluidos NetCDF, CSV, HDF y KML. Asimismo, la plataforma GIOVANNI (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>) proporciona una interfaz interactiva que permite explorar, descargar y realizar análisis estadísticos de los productos del GPM, así como de otros. (NASA, 2025)

1.8. SoilGrid (Malla del suelo)

SoilGrids es una base de datos global de suelos que proporciona información detallada sobre las propiedades edáficas a través de mapas digitales de alta resolución. Esta plataforma es desarrollada por el ISRIC – World Soil Information y

se basa en el uso de modelos de aprendizaje automático para generar estimaciones espaciales de las características del suelo en todo el mundo.

Los datos de SoilGrids están organizados en una cuadrícula regular con resoluciones que van desde 250 metros hasta 1 kilómetro, permitiendo representar la variabilidad del suelo a diferentes escalas. La información proporcionada incluye parámetros esenciales del suelo a diversas profundidades, lo que la convierte en una herramienta fundamental para estudios en agricultura, hidrología, cambio climático y gestión ambiental.

SoilGrids está disponible de forma abierta y gratuita. Se puede acceder a sus datos a través de su sitio web oficial (<https://soilgrids.org/>) o mediante herramientas de análisis en R y Python, lo que permite su integración con otros estudios científicos y aplicaciones de modelado geoespacial.

Gracias a su enfoque basado en datos masivos y aprendizaje automático, SoilGrids representa una de las fuentes más completas y actualizadas de información sobre suelos a nivel global, siendo un recurso valioso para investigadores, ingenieros y tomadores de decisiones en el ámbito ambiental y agrícola (ISRIC – World Soil Information, 2025).

1.9. Análisis estadístico de consistencia de datos observados

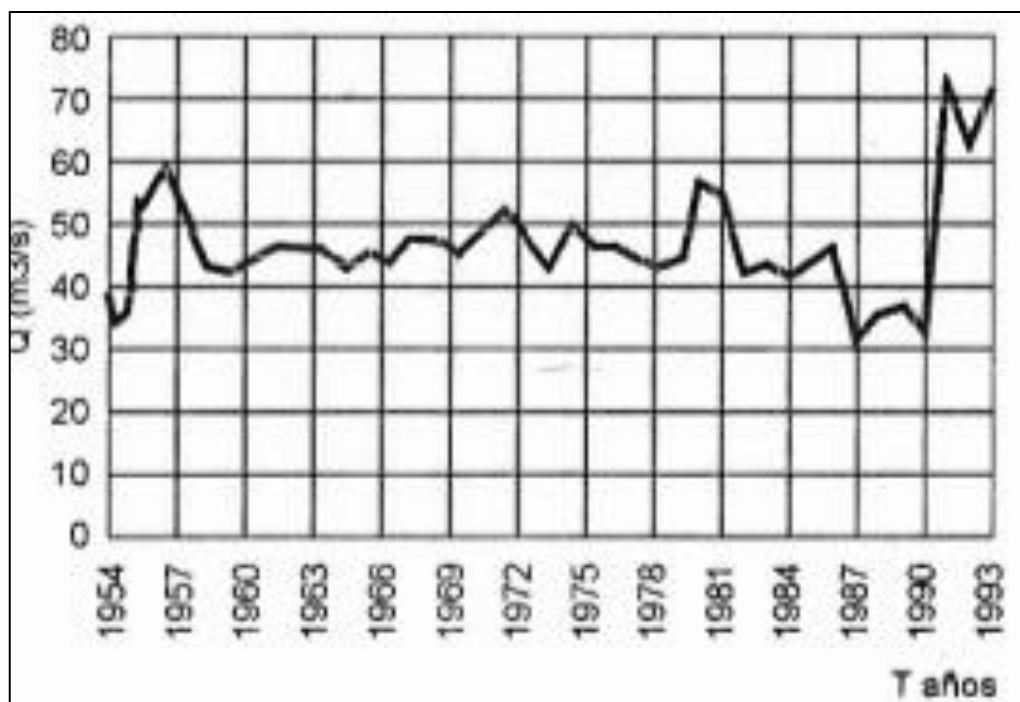
El análisis de consistencia de datos de precipitación es una etapa fundamental en el procesamiento de series temporales hidrometeorológicas. Su objetivo es verificar que los datos no contengan errores sistemáticos ni inconsistencias debido a cambios en el entorno de la estación, métodos de medición, errores humanos, etc. en los siguientes enunciados se muestran tipos de análisis de consistencia.

1.9.1. Análisis visual gráfico

Villón (2016), indica realizar una gráfica en coordenadas cartesianas dentro de ello plotear la información hidrológica histórica, ubicándose en las ordenadas, los valores de serie y en abscisas el tiempo (años, meses, días, etc.), el grafico siguiente sirve para analizar la consistencia de la información hidrológica en forma visual, e indicar el periodo o periodos en los cuales la información es dudosa, los cuales pueden reflejar como “picos” muy altos y valores muy bajos, saltos y/o tendencias, los mismos que deberán comprobarse, si son fenómenos naturales que efectivamente han ocurrido, o si son producto de errores sistemáticos.

Figura 1-3

Grafica de serie de datos históricos para análisis de saltos



Nota: (Villon, 2016, pág. 310)

1.9.2. Análisis de doble masa

Villón (2016), indica que es un método gráfico que relaciona acumulados de una variable hidrológica (como precipitación de una estación) con los acumulados de estaciones de referencia. Si los datos son consistentes, la gráfica tendrá una

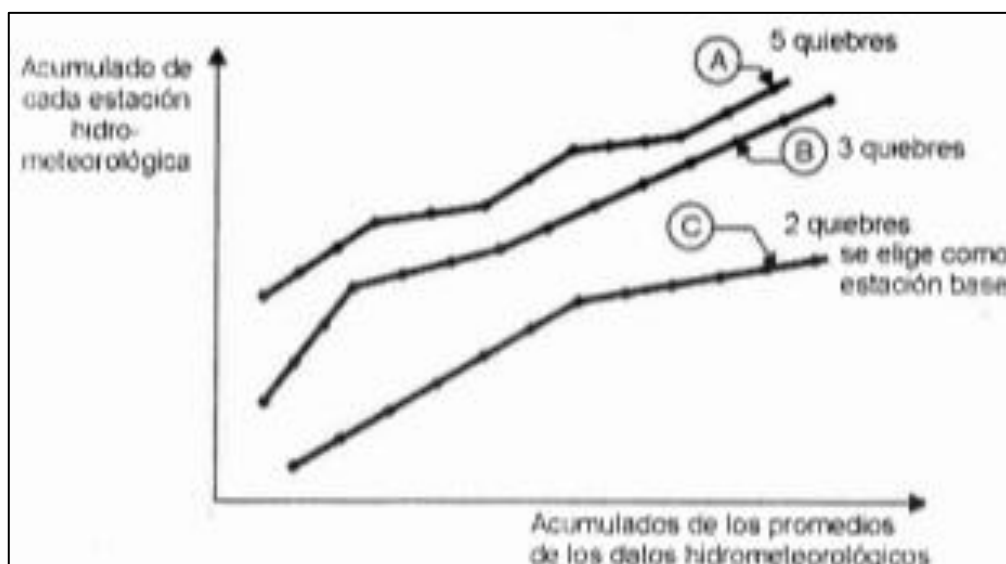
tendencia lineal. Un cambio en la pendiente indica un cambio en la consistencia de los datos, debido a:

- Cambio de instrumento
- Cambio de ubicación de la estación
- Urbanización cercana
- Fallas de medición

El análisis del diagrama de doble masa permite detectar posibles inconsistencias en los datos a través de los quiebres que se presentan en la gráfica. Cuando una estación muestra varios quiebres, esto sugiere que sus registros podrían no ser consistentes. Por ello, se selecciona una estación que exhiba un comportamiento más uniforme o con menor presencia de quiebres, y a partir de ella se realiza el análisis comparativo para evaluar y ajustar las demás estaciones que presentan irregularidades.

Figura 1-4

Gráfica de análisis de doble masa



Nota: (Villon, 2016, pág. 310)

1.9.3. Análisis estadístico

a). Consistencia de media

Este análisis consiste en probar, mediante la prueba de “t” (prueba de hipótesis), si los valores medios (\bar{x}_1, \bar{x}_2) de las sub muestras, son estadísticamente iguales o diferentes con una probabilidad del 95% o con 5% de nivel de significación, de la siguiente manera:

a.1). Cálculo de media y de la desviación estándar para las submuestras, según:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_i} x_i ; s_1(x) = \left[\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_i} (x_i - \bar{x}_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_j} x_j ; s_2(x) = \left[\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{j=1}^{n_j} (x_j - \bar{x}_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Donde:

x_i = Valores de la serie del periodo 1

x_j = Valores de la serie del periodo 2

(\bar{x}_1, \bar{x}_2) = Media de los periodos 1 y 2

$S_1(x), S_2(x)$ = Desviación estándar de los periodos 1 y 2

n = Tamaño de muestra

n_1 y n_2 = Tamaño de las submuestras

$n = n_1 + n_2$

a.2). Cálculo de t calculado (t_c) según:

$$t_c = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (u_1 - u_2)}{s_{\bar{d}}} \quad (20)$$

Donde: $u_1 - u_2 = 0$ (por hipótesis es que las medias son iguales)

Quedando:

$$t_c = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_{\bar{d}}} \quad (21)$$

$$s_p = \left[\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Donde:

$s_{\bar{d}}$ = Desviación de las diferencias de los promedios

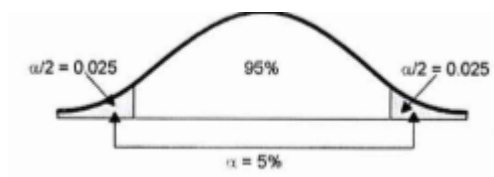
s_p = Desviación estándar ponderada

a.3). Cálculo de “t” tabular t_t

El valor de “t” crítico se obtiene con la ayuda de la tabla de t de Student (tabla A.5 del apéndice del libro “Hidrología Estadística” de (Villón, 2016), con una probabilidad al 95%, o con un nivel de significación del 5% es decir con $\alpha / 2 = 0,025$ y con grados de libertad $v = n_1 + n_2 - 2$.

Figura 1-5

Grafica de distribución normal



Fuente: (Villon, 2016, pág. 310)

4.- Comparación de los resultados del t_c con el t_t :

- ✓ Si $|t_c| \leq t_t(95\%) \rightarrow \bar{x}_1 = \bar{x}_2$ (estadísticamente), En este caso, siendo las medias las medias $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$ estadísticamente, no se deben corregir la información.
- ✓ Si $|t_c| > t_t(95\%) \rightarrow \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ (estadísticamente), en este caso, siendo las medias $\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$ estadísticamente, se debe corregir la información.

b). Consistencia de la desviación estándar

Este análisis consiste en probar, mediante la prueba de “F”, si los valores de desviación estándar de las submuestras son estadísticamente iguales o diferentes, con un 95 % de probabilidad o con un 5% de nivel de significación.

b.1). Cálculo de las varianzas de ambos periodos

$$S_1^2(x) = \left(\frac{1}{n_1 - 1}\right) \sum_{i=1}^{n_i} (x_i - \bar{x}_1)^2 \quad (23)$$

$$S_2^2(x) = \left(\frac{1}{n_2 - 1}\right) \sum_{j=1}^{n_j} (x_j - \bar{x}_1)^2 \quad (24)$$

b.1). Cálculo de F calculado (F_c):

$$F_c = \frac{s_1^2(x)}{s_2^2(x)}, \text{ si } s_1^2(x) > s_2^2(x) \quad (25)$$

$$F_c = \frac{s_2^2(x)}{s_1^2(x)}, \text{ si } s_2^2(x) > s_1^2(x) \quad (26)$$

b.3). Cálculo del F tabular (valor crítico de F ó F_t), se obtiene de las tablas de F (tabla A.4 de apéndice del libro de “Hidrología Estadística”, para una probabilidad al 95%, o con un nivel de significación del 5%, es decir con $\alpha / 2 = 0.025$ con un grado de libertad $v = n_1 + n_2 - 2$.

$$\left. \begin{array}{l} \text{G.L.N} = n_1 - 1 \\ \text{G.L.D} = n_2 - 1 \end{array} \right\} , \text{ Si } S_1^2(x) > S_2^2(x)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{G.L.N} = n_2 - 1 \\ \text{G.L.D} = n_1 - 1 \end{array} \right\} , \text{ Si } S_2^2(x) > S_1^2(x)$$

Donde:

G.L.N = grados de libertad del numerador

G.L.D = Grado de libertad del denominador

b.4). Comparación de los resultados F_c con el F_t .

- ✓ si $F_c \leq F_t(95\%) \rightarrow S_1(x) = S_2(x)$, estadísticamente
- ✓ si $F_c > F_t(95\%) \rightarrow S_1(x) \neq S_2(x)$, estadísticamente, por lo que se quiere corregir.

1.10. Corrección de los datos

En caso que los parámetros media y desviación estándar de las submuestras de las series de tiempo, resultan estadísticamente iguales, la información original no se corrige, por ser consistente con 95% de probabilidad, aun en la gráfica de doble masa pueda que presencia pequeños quiebres, en caso contrario se corrigen los valores de las submuestras con las siguientes ecuaciones (Villón, 2016).

$$x'_{(t)} = \frac{x_f - \bar{x}_1}{s_1(x)} \cdot s_2(x) + \bar{x}_2 \quad (27)$$

$$x'_{(t)} = \frac{x_f - \bar{x}_1}{s_2(x)} \cdot s_1(x) + \bar{x}_1 \quad (28)$$

Donde:

$x'_{(t)}$ = Valor corregido de los saltos

x_f = Valores originales (a ser corregidos)

1.11. Completación y extensión de datos

La extensión de datos consiste en trasladar información desde una estación con una larga serie histórica hacia otra cuya serie de registros es más corta. En cambio, la completación de datos se enfoca en rellenar los vacíos que puedan existir dentro de una serie de datos ya existente. Desde esta perspectiva, la completación puede entenderse como un caso específico dentro del proceso de extensión.

La extensión adquiere mayor relevancia frente a la completación, ya que puede influir considerablemente en los parámetros estadísticos representativos de la

población. Por ejemplo, la media calculada a partir de una serie corta puede diferir notablemente de aquella obtenida a partir de una serie extendida.

Ambos procedimientos completación y extensión se aplican con el propósito de contar con registros hidrometeorológicos más continuos, consistentes y comparables a lo largo del tiempo (Villón, 2016).

1.11.1. Técnicas de completación de datos

a). Regresión lineal Simple

El método de regresión lineal simple para la completación de datos de precipitación. Es uno de los métodos más usados cuando se tiene una estación base con datos faltantes y otra estación cercana con datos completos y alta correlación entre ambas.

La regresión lineal simple estima los datos faltantes en una estación X a partir de los datos de una estación Y, mediante una relación lineal:

$$P_X = a + b * P_Y \quad (29)$$

Donde:

P_X : Precipitación estimada en la estación con datos faltantes

P_Y : precipitación registrada en la estación auxiliar

a, b : Coeficientes obtenidos por regresión (Intercepto y pendiente)

b). Regresión lineal Múltiple

La completación de datos por regresión lineal múltiple, que es una extensión del método simple. Este método es muy útil cuando tienes una estación con datos faltantes y varias estaciones auxiliares cercanas con datos completos y correlación significativa.

La regresión lineal múltiple modela los valores faltantes de una estación X usando datos de varias estaciones auxiliares Y_1, Y_2, \dots, Y_n :

$$P_X = a + b_1 * P_{Y_1} + b_2 * P_{Y_2} + \dots + b_n * P_{Y_n} \quad (30)$$

c). Método Cutoff

La completación de datos faltantes en series de precipitación es una tarea esencial en hidrología, ya que la ausencia de información puede afectar negativamente el análisis estadístico, la modelación hidrológica y la toma de decisiones. Entre los diversos métodos disponibles, el método “Cutoff”, implementado en el paquete cutoffR de R, ofrece una alternativa automatizada y robusta basada en regresión lineal y correlación estadística entre estaciones.

1.12. Métodos de ajuste de valores predichos y observados

1.12.1. Coeficiente de corrección multiplicativa

Cuando se identifican errores sistemáticos en los datos meteorológicos debido a instrumentación, ubicación, mantenimiento o condiciones ambientales, la Organización Meteorológica Mundial (WMO) recomienda aplicar factores de corrección multiplicativa (WMO, 2008).

En el manual de FAO-56, sugieren que se deben corregir las variables meteorológicas antes de calcular la evapotranspiración de referencia (ET_0) mediante métodos como el de Penman-Monteith. Esta recomendación es especialmente importante cuando los piranómetros pueden subestimar la radiación solar debido a factores como la suciedad, una mala inclinación o sombras parciales. En este sentido, el autor aplicó dicho enfoque para ajustar los valores de radiación solar utilizados en el cálculo de la ET_0 (Allen et al., 1998).

$$C = \frac{\text{Media (Observada)}}{\text{Media (Predicho)}} \quad (31)$$

$$\text{Predicho ajustado} = C * \text{valor predicho} \quad (32)$$

1.12.2. Método de ajuste con regresión lineal

La calibración analítica es una de las técnicas más utilizadas para ajustar datos asimilados. Este proceso consiste en emplear tanto datos empíricos como conocimientos previos para establecer una manera de predecir cuantitativamente una variable dependiente (Y) desconocida, a partir de variables independientes conocidas (X), mediante una función matemática de transformación. De esta manera, la calibración implica el uso simultáneo de varias variables independientes ($x_1, x_2, x_3 \dots x_k$) para estimar determinadas variables dependientes (Y) (Rondinel, 2020).

La regresión lineal, por su parte, es una herramienta estadística que permite identificar la relación entre dos variables: una independiente (X) y otra dependiente (Y). Esta técnica traza una línea representativa dentro del conjunto de datos observados con el fin de describir dicha relación funcional (Rondinel, 2020).

$$y = a * x + b \quad (33)$$

Donde:

y: Valor calculado

a: pendiente de sesgo

b: Intercepto o intersección de la regresión

x: Valor asimilado

Ecuaciones para el cálculo de a y b.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (34)$$

$$b = \bar{y} - a * \bar{x} \quad (35)$$

Donde:

x_i : Datos asimilados

\bar{x} : promedio de datos asimilados

y_i : datos observados

\bar{y} : promedio de datos observados

1.13. Interpolaciones espaciales

1.13.1. Inverse Distance Weighting (IDW)

Método determinista que estima los valores de puntos desconocidos como un promedio ponderado de puntos conocidos, donde los pesos disminuyen con la distancia.

$$\hat{z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z(x_i)}{d(x_0, x_i)^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x_0, x_i)^p}} \quad (36)$$

$\hat{z}(x_0)$: Valor estimado en el punto x_0

$Z(x_i)$: valor en el punto de muestra x_i

$d(x_0, x_i)$: distancia entre x_0 y x_i

p : Parámetro de potencia (Usualmente $p = 2$)

1.13.2. Kriging

Método geoestadístico que modela la estructura espacial (autocorrelación) de los datos mediante un semivariograma. Proporciona una estimación óptima lineal e imparcial del valor en puntos no medidos.

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (37)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (38)$$

Donde los pesos λ_i se calculan resolviendo un sistema de ecuaciones basado en el Semivariograma

$$\gamma(x_i, x_j) = \text{var}(z(x_i) - z(x_j)) \quad (39)$$

$\hat{z}(x_0)$: Estimación en punto deseado

λ_i : Peso determinado por el Variograma (no solo la distancia)

$Z(x_i)$: Valores conocidos

γ : Función de Semivariograma

1.13.3. Spline

Método determinista que ajusta una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de muestreo. Minimiza la curvatura total para generar una superficie continua

$$\hat{z}(xy) = a + bx + cy + dxy + ex^2 + fy^2 + \dots \quad (40)$$

$$\hat{z}(xy) = \sum_{i=1}^n \lambda_i R(\|x - x_i\|) \quad (41)$$

$R(r)$ Es una función radial, por ejemplo $R(r) = r^2 \log r$

λ_i : Pesos calculados

$\|x - x_i\|$: Distancia euclidiana entre el punto de interes y el punto de muestra

Tabla 1-18

Comparación de métodos de interpolación espacial

Característica	IDW (Inverse Distance Weighting)	Kriging (geoestadístico)	Spline (ajuste suave)
Tipo de método	Determinista	Estocástico (Geoestadístico)	Determinista
Ecuación base	Promedio ponderado inversamente por distancia	Promedio ponderado con pesos basados en el variograma	Superficie suave que pasa por los puntos
Modelo de autocorrelación	No considera	Utiliza semivariograma	No considera
Requiere ajuste estadístico	No	Sí (modelo de variograma)	No
Error de estimación	No lo estima	Estima la varianza del error	No lo estima
Superficie resultante	Angular / Segmentada	Suave, con control geoestadístico	Muy suave / continua
Sensibilidad a valores extremos	Alta	Media (puede suavizar)	Alta (puede generar sobreajustes)
¿Requiere puntos regulares?	No	No	Recomendable, especialmente en Splines regulares

Computacionalmente complejo	Bajo	Medio a alto	Bajo a medio
Casos de uso	Precipitación, temperatura, nivel freático	Recursos naturales, suelos, contaminación	Elevación, temperatura, fenómenos suaves

Nota: (Chirinos & Mallqui, 2016)

1.14. Características socioeconómicas y actores involucrados en prácticas conservación de los suelos

Las zonas donde se han implementado terrazas y zanjas de infiltración suelen presentar características socioeconómicas marcadas por la ruralidad, con una ruralidad, con una alta dependencia de la agricultura de subsistencia y escasos niveles de ingreso per cápita. Las familias campesinas que habitan estas áreas enfrentan limitaciones en el acceso a servicios básicos, educación, salud y financiamiento agrícola. La degradación del suelo, la escasez de agua y la variabilidad climática agravan su vulnerabilidad económica ambiental. En este contexto, las practica de conservación de suelos y agua, como las terrazas y las zanjas de infiltración, han sido promovidas como estrategias clave para mejorar la productividad agrícola, mitigar la erosión hídrica ya aumentar la recarga hídrica en cuencas altoandinas. Diversas instituciones has participado activamente en el diseño, financiamiento y ejecución de estas obras, entre las cuales se destacan:

- **Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI):** a través de sus programas como “Sierra Azul” p “Agro Rural”, que han promovido la siembra y cosecha de agua mediante la construcción de zanjas, amunas y reservorio.
- **Gobiernos regionales y locales,** que han incorporado estas prácticas en sus planes de inversiones públicas y ordenamiento territorial.
- **Comunidades campesinas,** que no solo han participado activamente en la ejecución de estas prácticas mediante faenas comunales (minka), sino que también han recuperado saberes ancestrales relacionados con la gestión del agua y del suelo.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Ubicación del proyecto de investigación

La microcuenca Paliza se encuentra situada al sur de la capital de la región de Ayacucho, específicamente en la provincia de Huanca Sancos, distrito de Santiago de Lucanamarca.

2.1.1. Ubicación política de la zona del estudio

Región : Ayacucho
Provincia : Huanca Sancos
Distrito : Santiago de Lucanamarca
Lugar : Paliza

2.1.2. Ubicación geográfica de la microcuenca Paliza

Geográficamente, la microcuenca Paliza se encuentra entre los límites que se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 2-1

Coordenadas geográficas de la microcuenca Paliza

Este (max)	562431.12 m	Norte (max)	8459107.22 m	Altitud Media
Este (min)	558563.61 m	Norte (min)	8467267.77 m	4000 m.s.n.m
Zona	18S	Datum	WGS84	

Nota: Elaboración propia

2.1.3. Ubicación hidrográfica de la microcuenca Paliza

Cuenca : Pampas
Sub cuenca : Caracha
Microcuenca : Paliza

2.1.4. Punto de aforo

El punto de aforo para la delimitación de la microcuenca se detalla en la tabla siguiente.

Tabla 2-2*Coordenadas de punto de aforo*

Descripción	valor	Unidad
Norte	8469456.46	m
Este	569093.88	m
Altitud	3112	m.s.n.m.
Zona	18s	
Datum	WGS84	

Nota: Elaboración propia**2.2. Acceso a la zona de estudio**

La microcuenca Paliza se encuentra al sur de la capital Ayacucho y al norte de la capital provincial de Huanca Sancos. El acceso desde Ayacucho hasta la zona del proyecto (Paliza) sigue la ruta Huamanga - Huanca, Sancos - Paliza, con una distancia aproximada de 170.80 km y un tiempo de recorrido de 4 horas con 15 minutos. Los detalles se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2-3*Vías de acceso al lugar del proyecto de investigación*

Ruta	Distancia (km)	Tiempo (horas)	Tipo de vía
Ayacucho - Los Morochucos	66.50	1h: 40 min	Asfalto
Los Morochucos - Tincocc	29.50	1h: 00 min	Asfalto
Tincocc - San Martin de Tiopampa	30.30	1h: 20 min	Asfalto
San Martin de Tiopampa - Santiago de Lucanamarca	24.50	45 min	Afirmado
Lucanamarca - Paliza	20.00	30 min	Trocha

Nota: Elaboración propia

2.3. Variables climáticas

En muchas regiones del planeta, especialmente en países en vías de desarrollo, la investigación hidrológica se ve limitada por la escasez de series de datos confiables y de largo plazo, lo que dificulta tanto la aplicación como el desarrollo de modelos hidrológicos. En diversas zonas, las redes hidrometeorológicas son escasas o incluso inexistentes, debido, entre otras razones, al elevado costo asociado a la adquisición de equipos, su operación y el desarrollo de bases de datos.

La cuenca Pampas se caracteriza por una baja densidad de estaciones climáticas, con registros cortos e incompletos. Para mitigar este déficit de información, es posible recurrir a fuentes alternativas que proporcionan registros históricos de variables hidrológicas en áreas donde no existen estaciones “*in situ*”. Instituciones científicas de todo el mundo generan y distribuyen información climática georreferenciada, como es el caso de los satélites TRMM y GPM, o los modelos climáticos como el de la Climatic Research Unit (CRU).

En la subcuenca Caracha, las variables climáticas presentan una considerable variabilidad. La temperatura varía entre -3.2°C y 18°C ; la humedad relativa oscila entre 45.8 % y 83.2 %; la velocidad del viento se encuentra en el rango de 2.8 m/s a 4.7 m/s; y la evapotranspiración media mensual fluctúa entre 94.2 mm/mes y 120.6 mm/mes.

2.4. Fisiografía

Según la información proporcionada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en su estudio titulado “Evaluación de Recursos Hídricos”, la subcuenca Caracha presenta una fisiografía variable, caracterizada por pendientes suaves y una topografía no muy accidentada. La mayor parte del territorio está cubierto por pastizales y arbustos naturales.

En el caso específico de nuestra área de estudio, la microcuenca Paliza, también se observa una fisiografía diversa. En la parte alta predominan los pastos naturales, mientras que en la parte baja se evidencia una mayor presencia de actividades humanas, lo cual puede influir significativamente en la dinámica hidrológica de la cuenca.

2.5. Vegetales

En la zona de estudio, la cobertura vegetal está compuesta principalmente por plantas naturales en la parte alta de la microcuenca como las tolas, ichus, tastas, gramas naturales entre otras más. En contraste, en la parte baja se observan algunas especies introducidas, como eucaliptos y ceticios, las cuales han sido incorporadas por la actividad humana y pueden influir en el comportamiento hidrológico del área.

Figura 2-1

Cobertura vegetal en la cabecera de la microcuenca



Figura 2-2

Cobertura vegetal en la parte baja de la microcuenca



2.6. Materiales y equipos

El presente trabajo de investigación se ejecutó siguiendo un proceso, desde la obtención de datos, para ellos se utilizaron equipos y materiales, para así poder llegar a los resultados en los objetivos planteados.

2.6.1. Materiales

- ✓ Internet de alta velocidad
- ✓ Modelo de elevación digital (DEM), del servidor ALOS PALSAR 12.5 m.
- ✓ Datos de estaciones meteorológicas SENAMHI
- ✓ Datos de precipitación satelital de GPM.
- ✓ Muestras de suelos descargados de SoilGrid resolución de 250 m
- ✓ Muestras de suelos recopilados del campo

2.6.2. Equipos

- ✓ GPS Garmin
- ✓ Cámara
- ✓ Laptop Core i7

- ✓ Software ArcMap 10.5
- ✓ Software QGIS 3.28.11
- ✓ Software Rstudio
- ✓ Office 2024, Word, Excel
- ✓ Libreta de campo
- ✓ Herramientas manuales (para muestras de campo)
- ✓ Dron mavic Pro 2 DJI

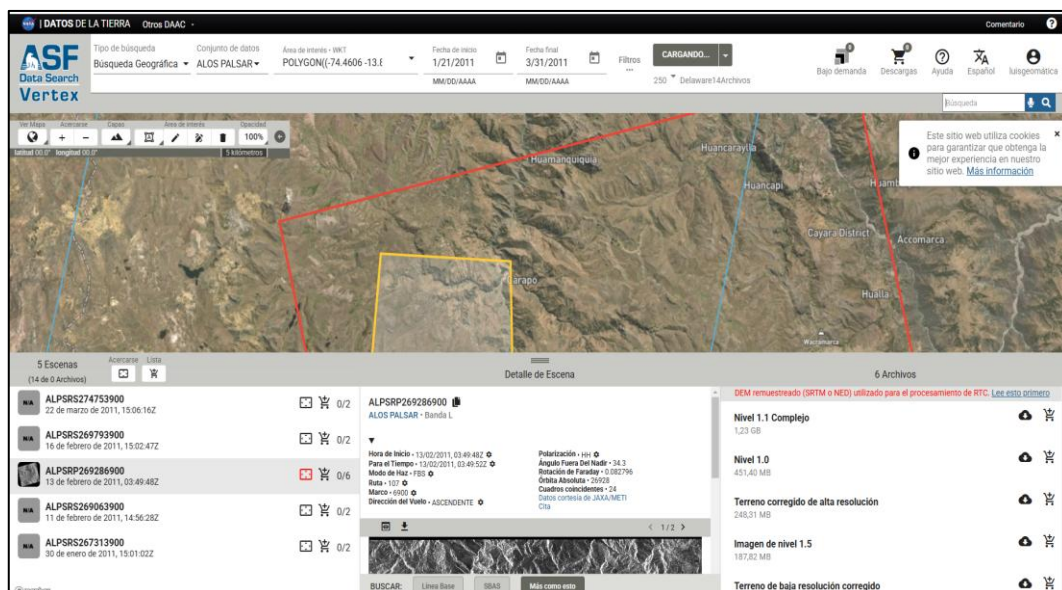
2.7. Metodología

2.7.1. Fase preliminar

Paso 1: A través del navegador Google Chrome se accede al sitio web de EARTHDATA (<https://search.asf.alaska.edu/#/>), donde es necesario registrarse como usuario para habilitar la descarga del Modelo de Elevación Digital (MED). Una vez completado el registro, se procede a seleccionar el producto ALOS PALSAR y a delimitar el área de interés mediante un polígono, para finalmente descargar el MED con una resolución de 12.5 metros.

Figura 2-3

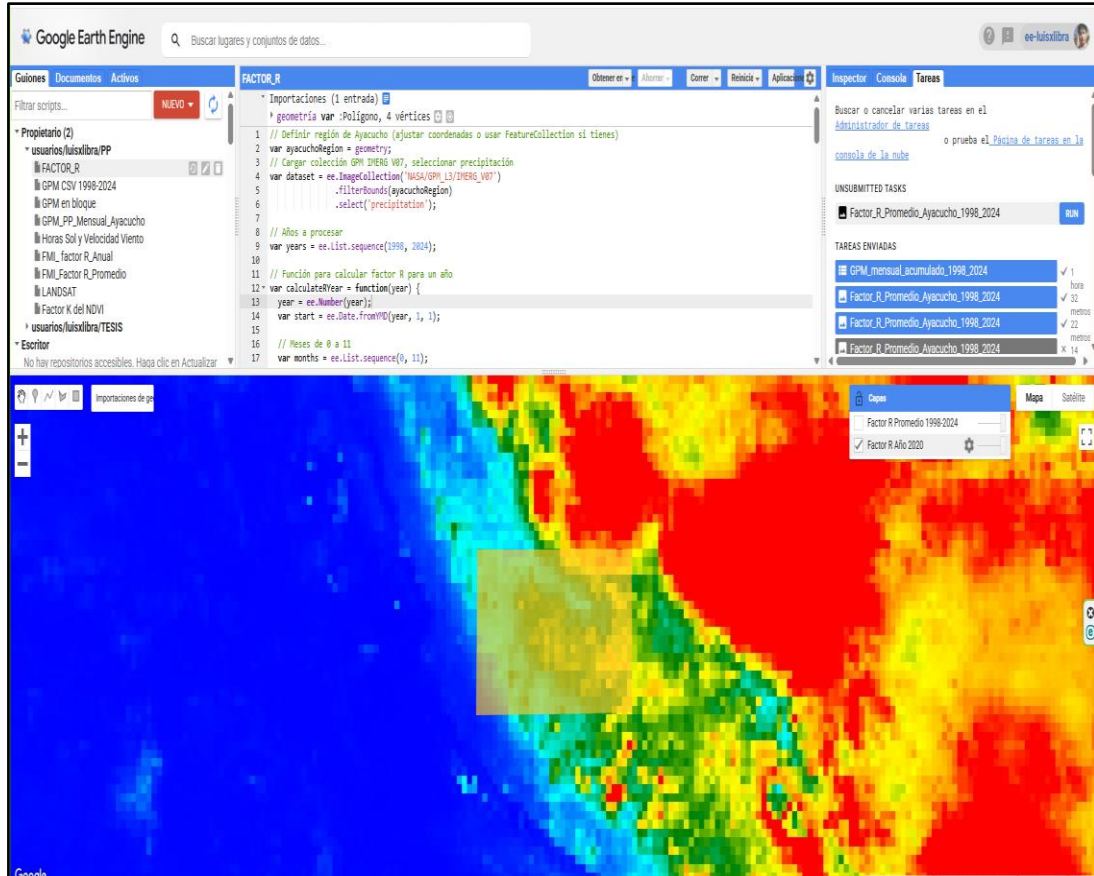
Proceso de selección del MED de ALOS PALSAR en la plataforma



Paso 2: A través de la plataforma Google Earth Engine (GEE) se realizó la descarga de los valores del factor R del modelo RUSLE. Para ello, se desarrolló un script en lenguaje JavaScript dentro del entorno de GEE, comenzando con la delimitación del polígono correspondiente al área de estudio. Posteriormente, se especificó la fuente de datos, seleccionando la versión más reciente del producto GPM, la cual (versión 7) contiene información de precipitación desde 1998 hasta la fecha. Para este análisis, se consideraron los datos mensuales desde el 1 de enero de 1998 hasta diciembre de 2024. Con la serie de precipitación seleccionada, se aplicó la ecuación (2) de Wischmeier y Smith, 1978. Es importante mencionar que es necesario contar con una cuenta registrada en Google Earth Engine para poder ejecutar y almacenar los scripts utilizados en esta plataforma.

Figura 2-4

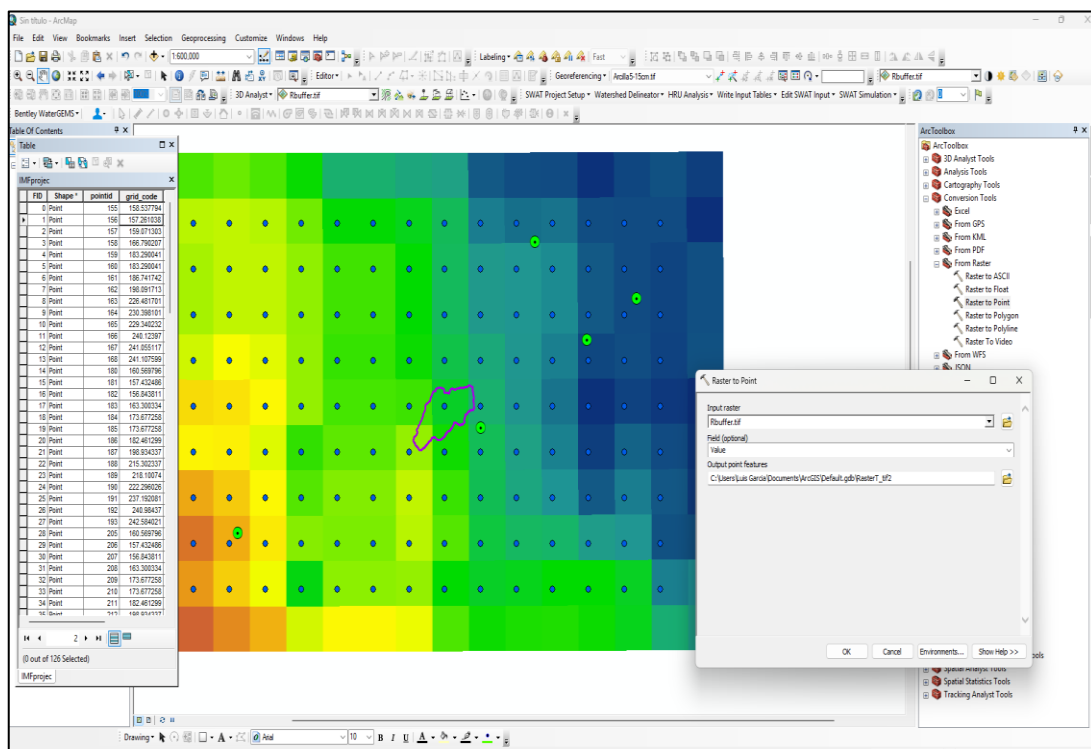
Proceso de descarga de los valores de R en GEE



La imagen anterior ilustra el proceso de programación realizado en lenguaje JavaScript dentro de la plataforma Google Earth Engine, así como la posterior descarga de los valores del factor R, ya promediados, en formato ráster con una resolución espacial de 10 km x 10 km. Una vez obtenidos estos datos, se procedió a su incorporación en el software ArcGIS, donde se llevó a cabo la conversión del formato ráster a formato vectorial con la herramienta *ArcToolbox (Conversion Tools y From Raster por último Raster to Point)*. Este procedimiento se evidencia en la figura siguiente.

Figura 2-5

Proceso de conversión de TIFF a SHAPEFILE



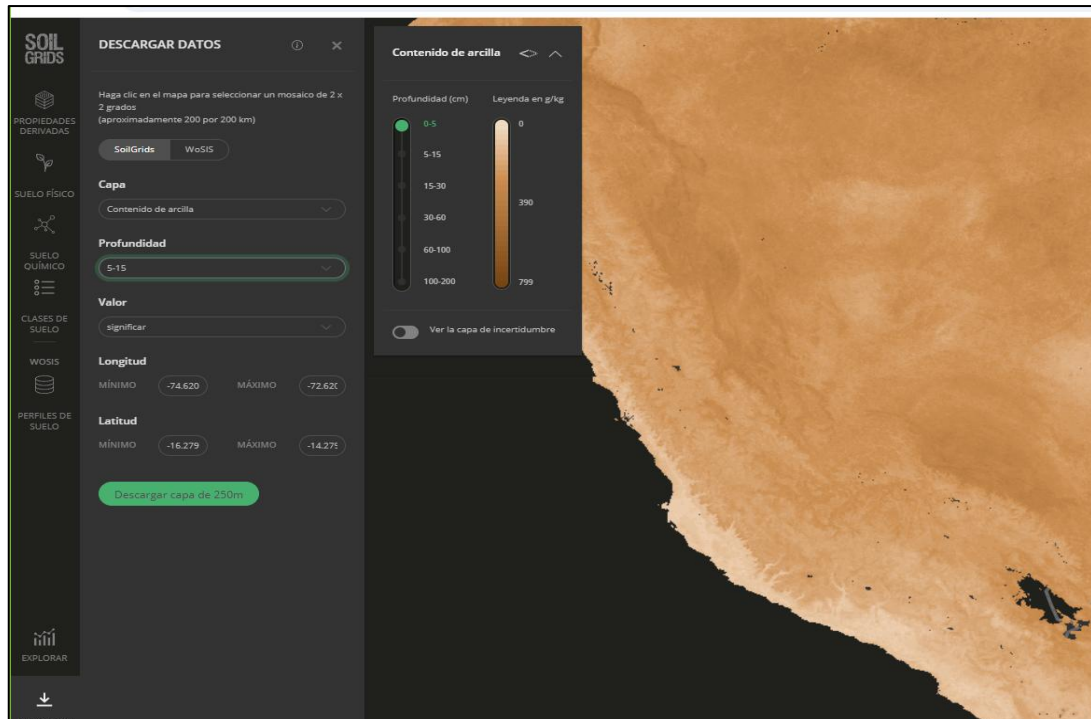
La figura anterior muestra los valores de R de GPM en formato shapefile, los puntos verdes corresponden a las estaciones de SENAMHI y los puntos azules corresponden a los valores del factor R de GPM.

Paso 3: Se descargaron los datos correspondientes a la clase textural de los suelos desde la plataforma SoilGrids en formato ráster. Para ello, se delimitó el área de

interés mediante la especificación de los valores de latitud y longitud máximos y mínimos, tal como se muestra en la imagen. Cabe señalar que, para realizar la descarga de esta información, no es necesario registrarse en la plataforma.

Figura 2-6

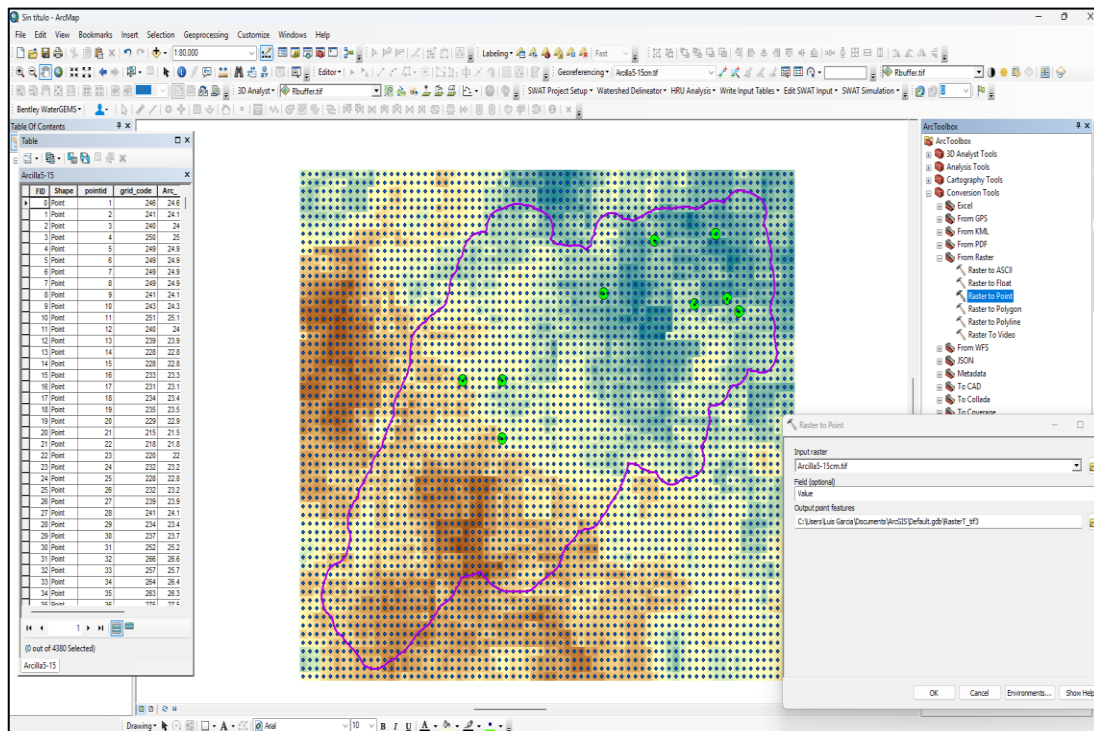
Proceso de descarga de los datos de suelos desde la plataforma SoilGrid



La figura anterior representa el procedimiento de descarga de los datos de suelos desde la plataforma SoilGrids. Una vez obtenida la información en formato ráster, se procedió a su conversión a formato shapefile para facilitar su análisis espacial. Es importante señalar que los datos de SoilGrids presentan una resolución espacial de 250 m x 250 m de una profundidad de 5 - 15 cm. Asimismo, los valores correspondientes a las fracciones texturales limo, arcilla y arena se expresan en unidades de g/kg, mientras que el contenido de carbono orgánico se encuentra en unidades de dg/kg. La figura siguiente ilustra el proceso de conversión y visualización.

Figura 2-7

Proceso de conversión de ráster de SoilGrid al formato shapefile



La figura muestra el proceso de conversión de los datos desde formato ráster a vectorial, realizado mediante la herramienta *ArcToolbox* (*Conversion Tools* y *From Raster por último Raster to Point*). Tools del software ArcGIS 10.5, en la visualización, los puntos verdes representan las ubicaciones de las muestras obtenidas en campo, mientras que los puntos azules corresponden a los valores derivados de la base de datos de SoilGrids.

Paso 4: Se realizó la recopilación de datos históricos de precipitación mensual a partir de los servidores web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Gobierno Regional de Ayacucho.

Paso 5: Se procedió a realizar la delimitación de la microcuenca Paliza para su posterior identificación y evaluación dentro de la zona de estudio.

Paso 6: Con la ayuda de un mapa satelital se procedió a ubicar las zonas para el muestreo del suelo seleccionando 9 puntos, en este caso se utilizó el Google Earth.

2.7.2. Fase de campo

- a). Se realizó el reconocimiento de la zona del estudio, paralelo a ello se realizaba el muestreo de los suelos, en este caso solamente la capa arable de 5 - 15 cm de profundidad.
- b). Con la ayuda de un dron se procedió a realizar el reconocimiento del campo y la identificación de las coberturas vegetales de la zona de estudio.
- c). Con la ayuda del dron se hizo en contraste de las zonas con mayor arrastre.

2.7.3. Fase de gabinete

1. Delimitación de la microcuenca y cálculo de los parámetros geomorfológicos con las fórmulas críticas.
2. Teniendo los datos pluviométricos de 5 estaciones cercanas a la microcuenca se procedió a realizar los análisis estadísticos, completación y corrección de saltos de los valores atípicos.
3. Con los datos de SENAMHI debidamente tratadas y completadas se procedió a calcular el factor R observada.
4. Teniendo los valores del factor R observada y de satélite para las 5 estaciones, se procedió a realizar la comparación y su ajuste de datos de GPM con observadas aplicando la metodología regresión lineal.
5. Sabiendo que existe una ecuación para realizar los ajustes para las 5 estaciones observadas y satelitales, esta misma se aplicó para todos los valores del factor R del GPM que se muestran en la figura 2.5.
6. Con los valores de la textura de los suelos muestreados en el campo y los valores de SoilGrid, se procedió a ajustar aplicando la metodología de coeficiente de corrección multiplicativa.
7. Teniendo información de las fotografías tomadas con el dron y con la ayuda de imagen satelital Sentinel-2A se procedió la delimitación de las coberturas

vegetales haciendo una clasificación Supervisada de cobertura vegetal en este caso hablamos del factor C.

8. Teniendo información vistas y fotografías en el campo se determinó el factor P de prácticas de conservación de los suelos.
9. Teniendo información del modelo de elevación se determinó las pendientes y la longitud de la microcuenca en este caso el factor LS.
10. Ya teniendo los resultados de los factores R, K, LS, C y P, se determinó la erosión potencial y real de la microcuenca Paliza, finalmente se elaboraron los mapas para cada factor y para la erosión del suelo.

2.7.3.1. Delimitación de la microcuenca

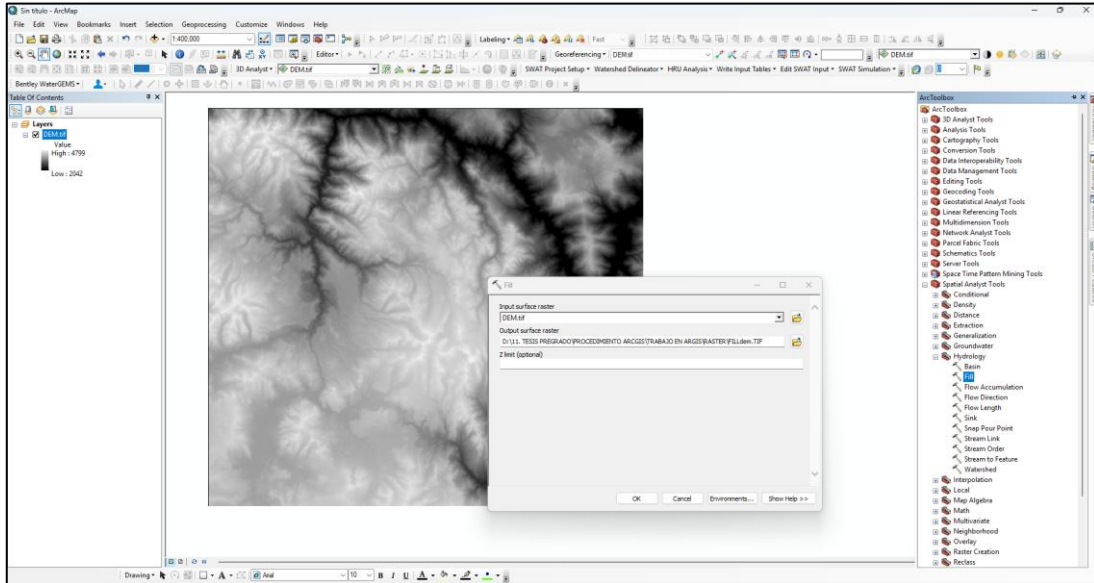
Con la ayuda de Software ArcGis 10.5 se procedió a delimitar y calcular los parámetros geomorfológicos de la microcuenca Paliza los procedimientos de los cálculos se muestra a continuación.

Paso 1: Para descargar el modelo de elevación digital de ALOS PALSAR de alta resolución de 12.5 m de pixel, se ubicó el área de interés del estudio y el punto de aforo de la microcuenca.

Paso 2: Ya teniendo el MED de ALOS PALSAR, se procedió a realizar la corrección de espacios con la herramienta FILL del ArcGis 10.5, para poder entrar a la herramienta FILL se sigue; abrimos caja de herramientas ARCTOOLBOX, luego ubicamos Spatial Analyst Tools, Hidrology y **FILL**.

Figura 2-8

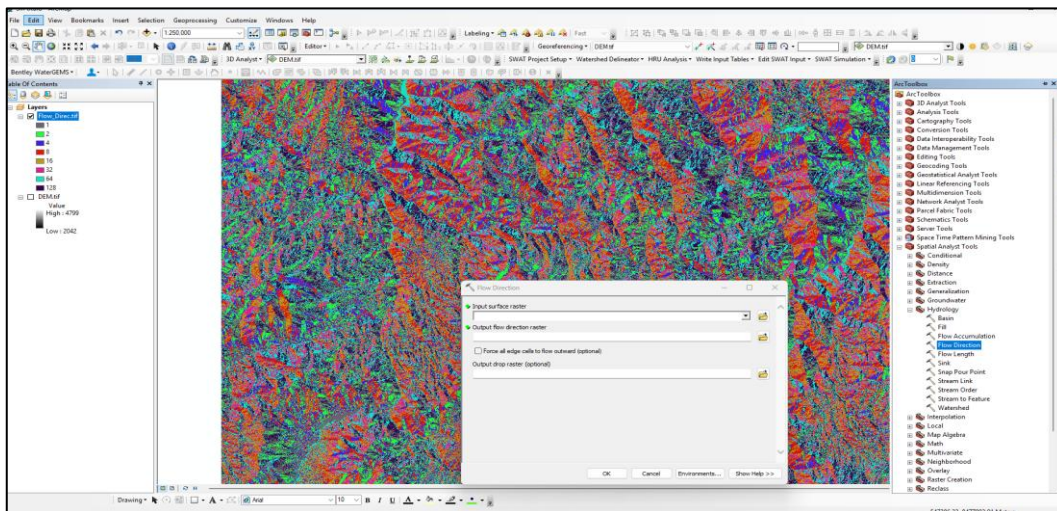
Proceso de relleno con la herramienta FILL



Paso 3: Con el MED corregido se procedió a generar la dirección del flujo para ello se ingresó a la caja de herramientas ARCTOOLBOX, luego a Spatial Analyst Tools, Hidrology y **Flow Direction**.

Figura 2-9

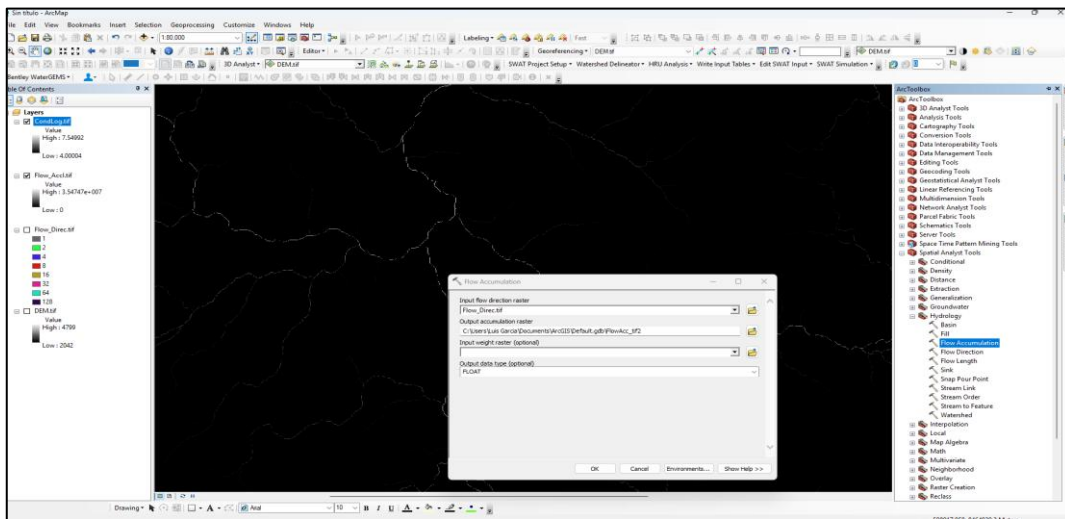
Proceso de cálculo de dirección del flujo



Paso 4: Se procedió a generar la acumulación de flujo, para ello se ingresó a la caja de herramientas ARCTOOLBOX, luego a Spatial Analyst Tools, Hidrology y **Flow Accumulation**.

Figura 2-10

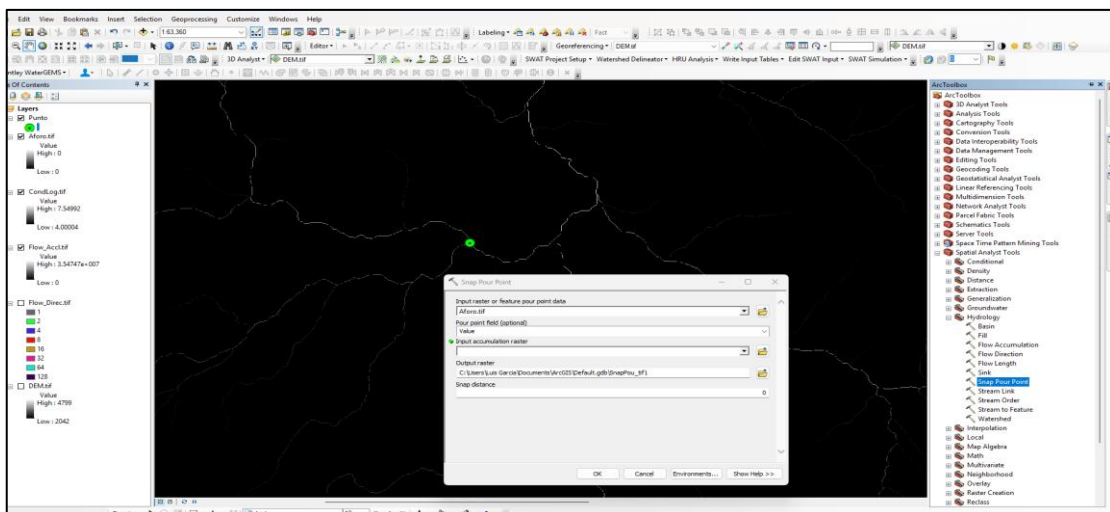
Proceso de cálculo de acumulación del flujo



Paso 5: Una vez generado la dirección del flujo y la acumulación de flujo, creamos el punto de aforo, para ello se generó un punto en formato *Shapefile* y luego ello rasterizar ingresando a la caja de herramienta ARCTOOLBOX, Spatial Analyst Tools, Hydrology y **Snap Pour Point**.

Figura 2-11

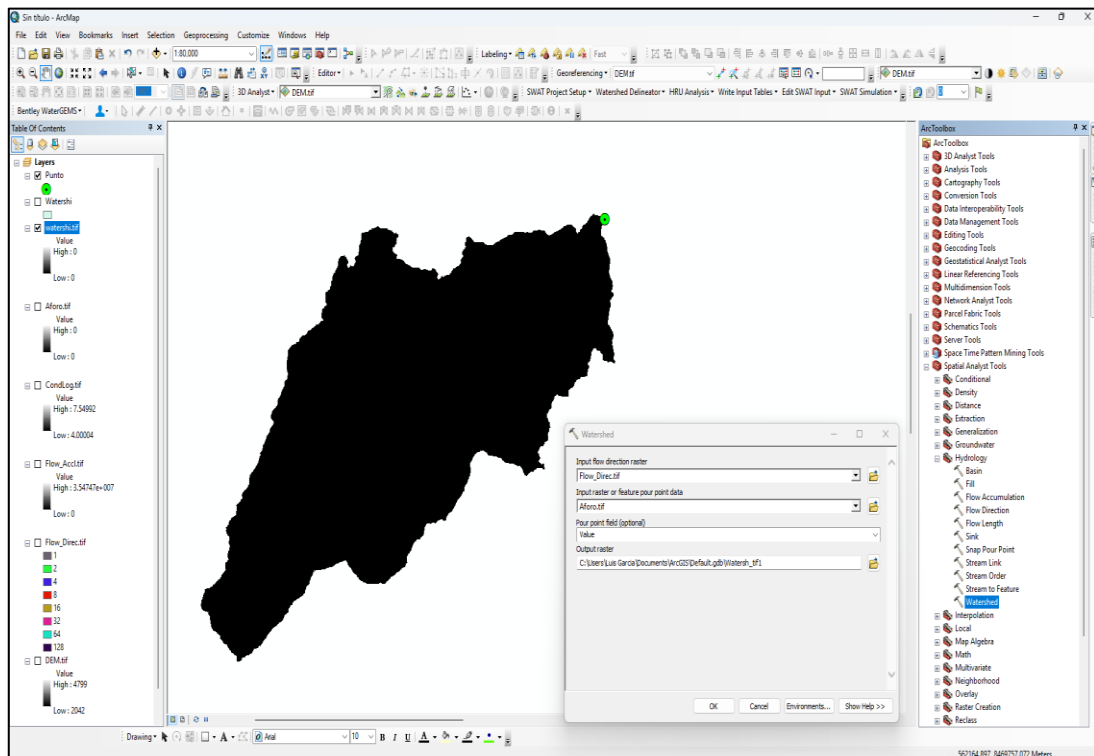
Proceso de cálculo de punto de Aforo



Paso 6: Ya teniendo generado los pasos anteriores se procedió a delimitar la microcuenca con la herramienta **Watershed**, que también se encuentra dentro la caja de herramientas mencionadas arriba.

Figura 2-12

Proceso de generación de la Microcuenca de estudio



Paso 7: Con la microcuenca generada se determinó algunos parámetros geomorfológicos de la microcuenca en estudio como: el área, el perímetro, factor de forma, la pendiente de la cuenca y redes hídricas.

2.7.3.2. Cálculo de factor R (Erosividad)

Paso 1: Análisis estadísticos e interpretación de los datos observados

a). Registro de datos históricos de las estaciones pluviométricas

Con los datos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la Autoridad Nacional del Agua y la Oficina de Operación y Mantenimiento Hidráulico de la presa Cuchoquera (OPEMAN), se realizó la selección de registros históricos. Este proceso estuvo determinado por la disponibilidad temporal de los datos del sensor satelital GPM, por lo que se tomó como periodo de referencia desde el 1 de enero de 1998 y el 31 de diciembre de 2024.

Tabla 2-4*Registro de serie de datos pluviométricas de 1998 al 2024*

N°	ESTACIÓN	FUENTE	ALTITUD	REGISTRO HISTÓRICO DE DATOS																										
			m.s.n.m	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1.00	HUANCA SANCOS	SENAMHI	3440																											
2.00	VILCASHUAMAN	SENAMHI	3518																											
3.00	HUANCAPI	ANA	3117																											
4.00	HUAC HUAS	SENAMHI	3180																											
5.00	PAMPA CANGALLO	OPEMAN	3315																											

	Registros completos
	Registros incompletos
	Registros vacíos

En tabla anterior se aprecia el registro de datos históricos desde 1998 al 2024, donde también se observa los datos faltantes e incompletos que posteriormente serán rellenados.

Tabla 2-5*Estaciones pluviométricas cercanas a la microcuenca Paliza*

N° EST.	Estación	Tipo	Longitud	Latitud	Altitud (m.s.n.m.)	Fuente	N° Reg.
1.00	Huanca Sancos	Convencional	74°20'1"W	13°55'1"S	3440	SENAMHI	27
2.00	Vilcashuaman	Convencional	73°57'8.6"W	13°40'7.7"S	3518	SENAMHI	27
3.00	Huancapi	Convencional	74°4'5.2"W	13°44'56.4"S	3117	ANA	27
4.00	Huac Huas	Convencional	74°56'27"S	14°56'49"S	3180	SENAMHI	27
5.00	Pampa Cangallo	Convencional	74°11'37"W	13°34'09"S	3315	OPEMAN	27

b). Completación y extensión de datos históricos observados SENHAMHI

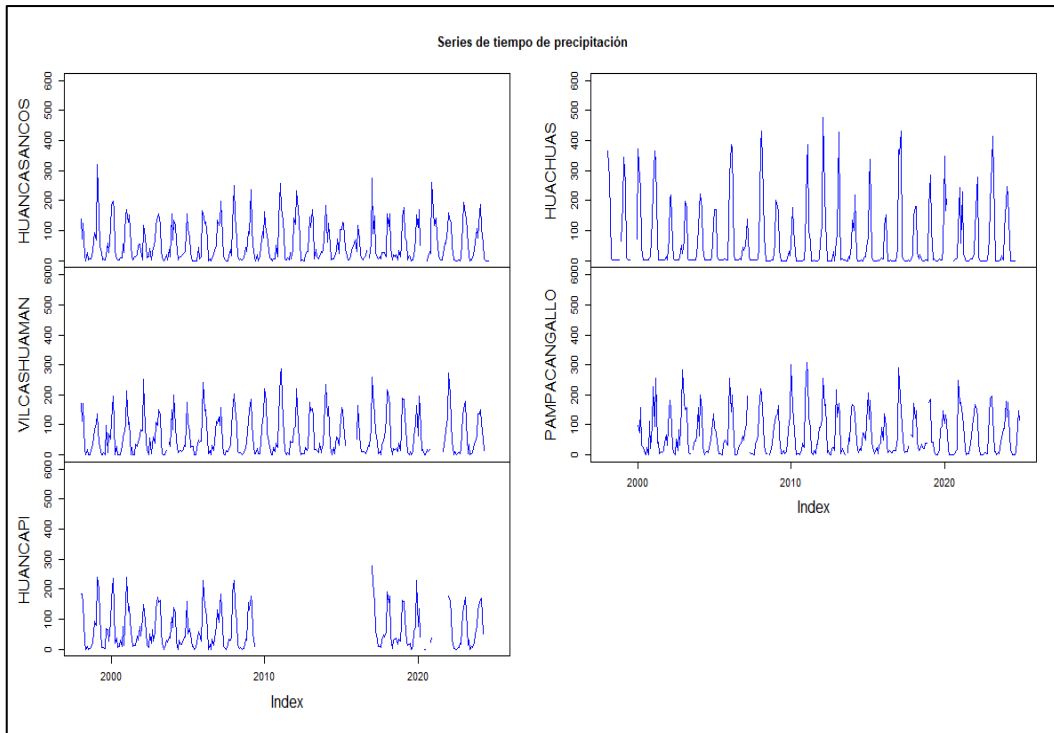
Una vez seleccionada los datos históricos, se procedió a la etapa de completación y extensión de datos faltantes. Esta tarea se realizó con el uso del software RStudio, mediante la aplicación del método de Cutoff, implementado a través del paquete cutoffR.

El método Cutoff se basa en la completación y extensión de datos faltantes en series temporales utilizando estaciones vecinas con alta correlación. Este enfoque

selecciona las estaciones más adecuadas en función de un umbral (cutoff) mínimo de correlación lineal, garantizando así que los valores imputados se basen en relaciones estadísticas significativas.

Figura 2-13

Histograma de datos mensuales (datos observados originales)



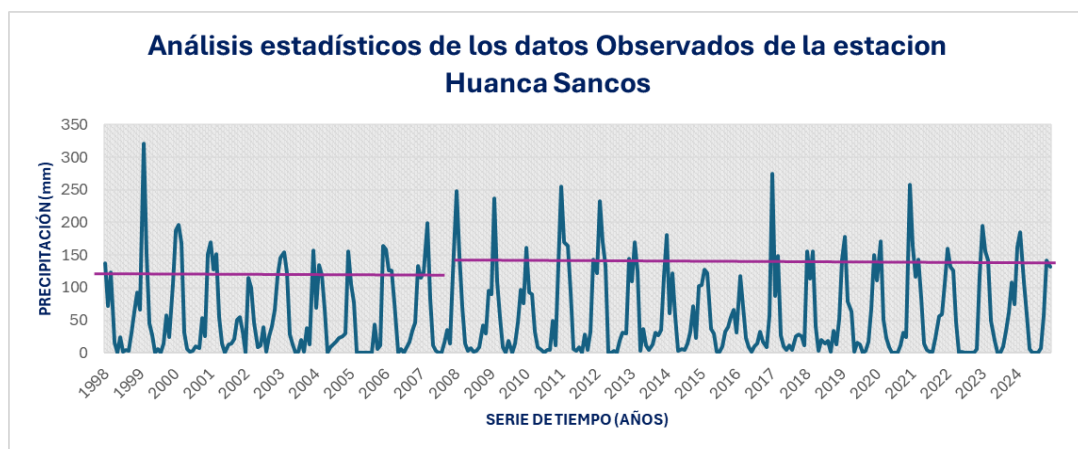
c). Análisis estadísticos de datos históricos observadas (SENAMHI)

Teniendo los datos históricos debidamente completadas y extendidas se procedió a realizar el análisis de homogeneidad y consistencia de las series temporales. Para ello, se generan histogramas individuales por estación con el fin de aplicar un análisis visual. Este método consiste en dividir la serie en dos partes, observando las diferencias en los picos, y trazando una línea horizontal que permite detectar posibles cambios estructurales en los datos. Posteriormente, se aplican la corrección de datos y luego las pruebas estadísticas de Student y Fisher para validar los resultados observados.

Este procedimiento se llevó a cabo para todas las estaciones en estudio. Como resultado de análisis, se identificó que la estación de Huanca Sancos presenta una mayor consistencia en sus datos históricos, mientras que las estaciones Huancapi, Vilcashuamán, Pampa Cangallo y Huac-Huas muestran irregularidades en sus registros.

Figura 2-14

Histograma de serie de tiempo mensual de estación Huanca Sancos



En la figura anterior, la serie de datos se ha dividido en dos segmentos, decisión que queda a criterio del investigador según las características del estudio. En este caso, se optó por dividir la serie en dos periodos: el primero abarca desde 1998 hasta 2007, y el segundo desde 2008 hasta 2024. Para el análisis se consideraron los criterios previamente mencionados, y el siguiente cuadro presenta de manera detallada el proceso de evaluación aplicado.

Tabla 2-6

Análisis estadístico de datos históricos de la estación Huanca Sancos

ANÁLISIS Y CORRECCIÓN DE LOS PERIODOS DE SALTOS			
PERIODO	1	PERIODO	2
Tamaño de la muestra (n_1)	120	Tamaño de la muestra (n_2)	204
Media de la muestra X_1	56.142	Media de la muestra X_2	58.737

Desviación Stand (S_1)	62.193	Desviación Stand (S_2)	64.551
Grados de Libertad (GL_1)	119	Grados de Libertad (GL_2)	203
RESULTADOS			
Desviación estándar ponderada		S_p	63.69
Desviación de las diferencias de los promedios		S_d	7.35
Cálculo del T, calculado T_c según		T_c	0.35
Grado de Libertad		$GL = GL_1 + GL_2$	322
Probabilidad al 95%, con un nivel de significación del 5%		α	5%
cálculo del valor crítico de t, tabular T_t		T_t	1.96
$T_c =$	0.35	\leq	$T_t =$ 1.96 HOMOGENEO
PRUEBA "F" DE FISHER			
Desviación Stand (S_1) 2	3867.92	Desviación Stand (S_2) 2	4166.78
RESULTADOS			
Cálculo de F calculado (F_c) según:			1.077
Cálculo del F tabular (valor crítico de F_t) F_t			1.252
$F_c =$	1.08	\leq	$F_t =$ 1.252 CONSISTENTE

Para la comparación del valor crítico de la prueba “t” de Student, se tomó como referencia las tablas contenidas en el apéndice del libro “Hidrología Estadística” de Villón (2016). Específicamente, se utilizó la Tabla A.5 para la prueba de Student y la Tabla A.4 para la prueba de Fisher.

En el caso de la prueba de Student, el valor crítico depende del número de muestras disponibles. Por ejemplo, en la estación Huanca Sancos se cuenta con 120 observaciones. Al no encontrarse este valor exacto en la tabla, se recurre al último dato disponible, considerando un nivel de significancia de 0.025, tal como se recomienda en el texto citado, obteniéndose un valor crítico de 1.96. Este mismo criterio se aplicó de manera uniforme a todas las estaciones analizadas en el estudio.

La interpretación de los resultados obtenidos mediante la prueba de **Student** se realiza comparando el valor calculado de “t” con el valor crítico obtenido de la

tabla. Si el valor absoluto de “t” calculado es mayor que el valor crítico (en este caso 1.96), se concluye que existe una diferencia significativa entre las dos partes de la serie analizada, lo que indicaría una posible inconsistencia o cambio estructural en los datos. Por el contrario, si el valor absoluto de “t” es menor que 1.96, se considera que no existe evidencia estadística suficiente para afirmar que hay una diferencia significativa entre los dos periodos, lo que sugiere homogeneidad en la serie.

Este mismo criterio se aplicó a todas las estaciones estudiadas, permitiendo así una evaluación objetiva y coherente de la consistencia temporal de los datos.

Para el análisis mediante la prueba de **Fisher**, se sigue el criterio propuesto en el libro Hidrología Estadística de Máximo Villón. La interpretación de la tabla de valores críticos depende de los grados de libertad correspondientes a los subconjuntos de datos analizados. En el caso específico de la estación Huanca Sancos, se cuenta con 203 muestras en el numerador y 119 en el denominador, lo cual permite ubicar el valor crítico de F (F_c) en la tabla respectiva.

La lectura de dicha tabla se realiza utilizando los grados de libertad del denominador en la columna vertical y los del numerador en la fila horizontal. El valor ubicado en la intersección de ambas referencias corresponde al valor crítico contra el cual se compara el estadístico F calculado.

Este procedimiento se aplica de forma sistemática a todas las estaciones analizadas. En caso de que los resultados indiquen que la serie es homogénea o presenta inconsistencias, se procede a la corrección de los datos, siguiendo los lineamientos establecidos en el marco teórico y en la guía metodológica del libro “Hidrología Estadística”.

Tabla 2-7*Análisis de datos pluviométricas para su posterior corrección*

Estación	Altitud	Fuente	Prueba "T" de STUDENT	Prueba "F" de FISHER
HUANCA SANCOS	3440	SENAMHI	Homogéneo	Consistente
VILCASHUAMAN	3518	SENAMHI	No homogéneo	Inconsistente
HUANCAPI	3117	ANA	Homogéneo	Inconsistente
HUAC HUAS	3180	SENAMHI	Homogéneo	Inconsistente
PAMPA CANGALLO	3315	OPEMAN	Homogéneo	Inconsistente

En la tabla anterior presenta en análisis de homogeneidad y consistencia para las estaciones de interés.

d). Prueba estadística (análisis de doble masa)

Con los datos completados, debidamente tratados y corregidos se realizó el análisis de datos históricos aplicando la prueba estadística de doble masa para corroborar la consistencia y la confiabilidad de los datos a trabajar.

e). Datos históricos fiables de precipitación mensual y anual

Una vez procesadas y validadas las series temporales correspondientes a los datos de precipitación mensual y anual, los resultados obtenidos se detallan en las tablas que se presentan a continuación.

Tabla 2-8*Precipitación mensual y anual de estación Huanca Sancos*

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ
REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ESTACION: HUANCA SANCOS LATITUD: 13°55'1"S REGION: AYACUCHO
TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°20'1"S PROVINCIA: HUANCA SANCOS
CODIGO: 100055 ALTITUD: 3440 DISTRITO: SANCOS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1998	138.30	72.40	124.10	16.40	0.00	24.80	1.60	4.50	3.80	30.70	63.90	93.20	573.70
1999	66.80	321.00	152.30	45.80	27.10	0.30	5.40	0.60	14.80	58.30	24.70	107.00	824.10
2000	187.50	197.10	167.80	30.90	5.30	1.80	2.90	9.60	7.20	53.60	25.20	151.40	840.30
2001	169.30	127.60	151.90	54.60	13.80	0.80	13.30	13.70	20.70	50.30	55.10	32.60	703.70
2002	1.00	115.80	100.10	46.00	8.40	12.20	38.90	1.30	24.90	40.90	66.00	118.40	573.90

2003	146.70	155.00	122.30	28.40	12.80	0.00	2.20	19.40	1.90	37.80	12.80	156.80	696.10
2004	68.40	135.50	119.50	66.40	0.80	9.30	12.30	16.50	22.50	25.10	29.50	156.20	662.00
2005	105.00	77.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.00	5.50	11.60	164.40	408.30
2006	159.00	125.80	125.90	75.90	0.00	6.00	0.00	8.70	17.60	34.20	46.00	133.50	732.60
2007	115.60	123.70	198.60	82.50	11.90	3.50	0.00	0.00	15.60	35.60	14.20	121.10	722.30
2008	249.00	149.40	70.70	13.90	2.90	6.70	1.50	3.60	9.10	42.40	30.10	96.00	675.30
2009	90.60	236.60	110.20	54.70	8.60	0.00	18.10	0.00	14.00	46.10	97.00	75.90	751.80
2010	161.40	93.10	90.30	31.90	8.50	4.10	0.00	4.00	3.90	49.30	11.50	136.50	594.50
2011	255.10	169.80	164.00	92.40	6.50	2.60	8.60	0.80	27.90	4.50	32.50	142.90	907.60
2012	121.90	232.30	169.20	133.10	0.00	0.60	2.50	0.00	18.30	31.30	30.40	144.30	883.90
2013	110.30	169.70	124.90	3.60	37.10	11.70	4.00	13.00	30.70	27.60	35.00	117.50	685.10
2014	181.70	60.60	122.50	54.90	2.70	5.80	4.80	13.90	33.00	71.70	22.20	102.60	676.40
2015	104.30	127.90	122.60	36.80	29.90	2.00	2.00	10.80	32.00	39.10	54.70	66.80	628.90
2016	30.80	117.80	70.90	22.90	8.80	1.20	10.20	14.60	32.00	17.80	8.60	57.40	393.00
2017	275.60	87.50	148.90	27.40	9.80	4.80	11.80	4.00	25.90	27.80	25.50	12.00	661.00
2018	155.40	113.40	155.60	40.60	3.20	19.80	13.80	18.10	2.00	33.70	12.90	51.70	620.20
2019	143.70	178.20	79.30	64.00	1.70	16.00	12.70	0.00	2.60	16.90	67.50	150.60	733.20
2020	111.70	170.60	51.10	22.52	9.12	0.47	0.00	0.00	12.20	31.40	24.00	258.60	691.71
2021	164.80	116.60	142.80	84.90	14.80	5.00	1.40	1.70	22.30	56.60	58.50	107.50	776.90
2022	160.60	131.80	126.00	46.70	0.60	1.80	0.00	0.00	0.20	0.00	5.60	118.10	591.40
2023	195.60	156.20	141.70	49.40	18.40	0.00	1.00	10.20	34.00	61.60	108.20	74.00	850.30
2024	163.00	185.20	107.70	59.10	6.40	0.00	0.00	0.00	6.92	58.24	141.90	132.50	861.07
Promedio	141.97	146.24	120.77	47.62	9.23	5.23	6.25	6.25	17.77	36.59	41.30	114.06	693.31
Ppmax	275.60	321.00	198.60	133.10	37.10	24.80	38.90	19.40	44.00	71.70	141.94	258.60	907.60

La tabla anterior presenta los valores de precipitación mensual y anual correspondientes a la estación Huanca Sancos, considerados estadísticamente confiables.

Tabla 2-9

Precipitación mensual y anual de estación Vilcashuaman

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ

REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ESTACION: VILCASHUAMAN LATITUD: 13°40'7.7"S REGION: AYACUCHO
TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 73°57'8.6"S PROVINCIA: VILCAS HUAMAN
CODIGO: 113100 ALTITUD: 3518 DISTRITO: VILCAHUAMAN

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1998	207.77	135.14	209.81	22.21	0.00	20.17	0.00	0.00	17.22	41.24	72.67	100.39	826.62

1999	129.59	164.89	44.94	32.00	2.19	0.00	10.01	0.00	119.61	8.71	84.86	65.64	662.46
2000	138.83	240.30	128.48	2.19	32.00	0.00	0.00	0.34	34.22	73.22	79.87	122.94	852.41
2001	259.90	124.97	131.44	0.00	28.31	2.19	1.51	43.65	33.30	50.49	75.44	100.39	851.57
2002	81.40	252.50	157.60	40.70	16.80	0.00	55.00	3.90	35.70	61.00	38.50	106.80	849.90
2003	98.20	149.70	137.50	42.10	2.70	0.00	0.00	14.50	0.00	40.50	27.60	151.00	663.80
2004	85.70	199.40	95.80	49.50	8.60	10.30	13.60	12.40	18.20	32.10	28.70	174.30	728.60
2005	103.80	80.20	28.70	28.70	28.70	0.00	1.90	20.40	47.70	42.90	45.30	127.90	556.20
2006	242.20	148.40	149.80	54.80	2.90	13.40	0.00	32.40	14.80	42.50	110.90	103.80	915.90
2007	126.20	99.50	158.70	39.70	4.40	0.00	14.10	10.00	17.20	35.40	88.90	141.70	735.80
2008	201.10	154.90	102.30	10.20	5.50	7.10	0.00	2.10	5.60	23.60	41.90	113.00	667.30
2009	150.40	183.70	104.30	58.00	3.50	2.00	22.80	2.10	2.40	46.50	122.50	127.60	825.80
2010	219.90	182.00	72.40	45.90	23.70	0.00	0.00	25.60	10.80	39.70	26.10	127.90	774.00
2011	264.30	288.00	180.30	62.60	10.40	0.00	8.10	0.00	43.90	43.50	42.60	87.90	1031.60
2012	78.86	179.77	82.54	36.17	0.00	4.31	2.63	3.44	20.32	11.29	16.59	142.27	578.19
2013	148.50	152.30	134.60	17.70	18.80	13.50	5.50	39.20	5.60	29.10	30.70	168.40	763.90
2014	235.60	129.70	161.80	27.80	10.80	0.00	25.10	2.50	60.30	55.80	33.20	84.70	827.30
2015	158.50	151.80	104.50	30.10	29.16	1.39	7.24	17.66	14.87	28.57	44.79	66.33	654.91
2016	52.70	163.70	66.70	33.20	12.30	11.20	9.10	4.60	11.00	30.30	26.50	86.00	507.30
2017	259.00	204.60	132.70	78.50	40.70	4.00	11.00	0.00	30.80	50.20	55.30	119.70	986.50
2018	216.30	193.80	165.70	32.00	1.20	22.20	17.10	21.30	11.50	39.30	14.80	75.50	810.70
2019	190.50	184.30	124.30	46.80	7.30	0.00	10.10	0.00	9.50	58.60	103.60	164.70	899.70
2020	64.80	196.20	150.40	15.30	17.60	1.20	0.00	19.20	10.00	16.10	23.72	199.54	714.05
2021	187.16	108.30	129.18	56.01	20.88	1.70	1.85	2.29	11.00	56.10	81.60	123.00	779.07
2022	271.20	198.50	104.90	45.50	1.70	12.40	0.00	4.70	6.40	4.20	16.10	131.30	796.90
2023	149.20	176.60	106.60	4.40	34.50	0.00	2.20	5.80	33.90	41.30	62.60	136.60	753.70
2024	137.40	149.70	108.10	52.90	13.90	0.51	3.70	0.00	8.72	57.77	207.60	139.04	879.34
Promedio	165.15	170.11	121.26	35.74	14.02	4.72	8.24	10.67	23.50	39.26	59.37	121.79	773.83
Ppmax	271.20	288.00	209.81	78.50	40.70	22.20	55.00	43.65	119.61	73.22	207.60	199.54	1031.60

En la tabla anterior se presentan los valores de precipitación mensual y anual de la estación Vilcashuaman desde la completación y extensión de los datos faltantes. Por otro lado, al realizar las pruebas estadísticas de homogeneidad y de consistencia, se obtuvo un resultado inconsistente en la prueba de Fisher, mientras que la prueba de Student indicó homogeneidad. Ante esta discrepancia, se procedió a realizar los ajustes necesarios hasta obtener una respuesta estadísticamente satisfactoria y consistente entre ambas pruebas.

Tabla 2-10

Precipitación mensual y anual de estación Huancapi

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ
REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ESTACION: HUANCAPI LATITUD: 13°44'56.4"S REGION: AYACUCHO
TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°4'5.2"S PROVINCIA: VICTOR FAJARDO
CODIGO: 113022 ALTITUD: 3117 DISTRITO: HUANCAPI

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1998	195.99	194.37	162.78	23.75	0.00	7.85	0.00	1.60	2.65	17.80	57.51	93.80	758.11
1999	80.60	239.60	200.10	106.30	4.10	6.10	4.40	3.50	69.10	63.80	24.80	89.00	891.40
2000	165.90	237.40	135.10	18.40	37.60	5.40	8.10	31.30	8.00	77.10	13.90	146.40	884.60
2001	239.90	126.60	140.70	58.30	34.40	10.10	14.10	13.90	43.20	30.60	74.40	42.70	828.90
2002	103.16	157.91	133.35	58.48	9.58	2.33	53.29	18.02	65.84	25.37	55.67	144.06	827.06
2003	182.36	165.27	173.27	64.22	16.72	0.00	4.28	29.38	19.75	41.06	37.06	112.36	845.72
2004	76.33	146.55	132.81	25.59	0.00	30.46	13.69	14.45	28.30	41.93	42.04	168.08	720.22
2005	50.26	72.33	6.87	6.87	6.87	0.00	2.11	20.40	59.78	51.45	26.78	122.75	426.48
2006	229.00	140.00	135.40	69.00	0.00	17.40	0.00	33.90	11.00	34.20	78.00	130.30	878.20
2007	88.70	143.90	184.10	85.10	7.80	0.60	0.00	14.00	33.40	30.80	40.70	187.20	816.30
2008	230.00	148.10	94.50	15.40	2.60	5.00	0.00	3.80	0.60	33.50	31.10	156.80	721.40
2009	129.90	176.00	152.00	53.80	10.80	1.07	26.19	1.16	10.91	48.22	103.45	94.41	807.92
2010	167.98	133.22	85.99	37.00	13.13	2.20	0.00	19.11	11.32	43.36	17.09	146.47	676.85
2011	267.11	241.14	216.96	20.99	9.20	1.39	13.77	2.89	44.02	28.08	47.53	112.49	1005.60
2012	48.64	251.00	95.20	75.52	2.06	10.71	3.35	2.78	30.23	35.24	19.90	133.13	707.75
2013	42.85	135.97	55.09	7.15	32.30	23.41	4.17	42.16	16.66	42.86	31.74	74.86	509.22
2014	174.95	100.81	147.55	37.08	11.19	7.48	23.12	18.50	71.14	73.18	31.92	100.41	797.33
2015	131.64	148.96	176.39	32.75	29.28	2.96	9.33	27.15	18.61	32.71	36.61	66.07	712.46
2016	32.38	120.89	90.03	38.78	10.15	14.71	13.31	15.78	23.66	20.23	13.57	68.29	461.79
2017	196.29	144.72	84.55	63.00	29.10	10.60	9.90	5.20	30.90	47.20	41.20	54.50	717.16
2018	190.50	154.10	176.90	41.50	3.00	29.30	33.20	37.40	16.00	35.00	26.20	83.50	826.60
2019	164.00	160.50	101.30	22.10	14.10	15.80	20.20	0.00	9.30	58.60	75.10	229.20	870.20
2020	76.40	134.30	39.70	20.29	13.15	0.00	0.00	14.70	11.68	22.75	21.80	38.60	393.37
2021	187.65	104.99	157.18	76.44	21.01	3.62	2.39	3.52	21.96	63.60	68.74	117.26	828.37
2022	176.50	158.50	112.50	34.70	1.10	1.90	0.00	2.20	5.40	19.90	17.20	120.10	650.00
2023	139.80	172.10	124.20	12.90	28.50	0.00	9.10	4.90	19.60	48.40	73.80	127.80	761.10
2024	160.40	163.30	170.10	52.10	14.65	1.08	1.56	0.00	10.91	66.04	169.11	138.34	947.60
Promedio	145.53	158.24	129.06	42.87	13.42	7.83	9.98	14.14	25.70	41.96	47.29	114.77	750.80
Ppmax	267.11	251.00	216.96	106.30	37.60	30.46	53.29	42.16	71.14	77.10	169.11	229.20	1005.60

En la tabla 2.10 se presentan los valores de precipitación mensual y anual desde su completación y extensión de los datos faltantes. Por otro lado, al realizar las pruebas estadísticas de homogeneidad y de consistencia, se obtuvo un resultado inconsistente en la prueba de Fisher, mientras que la prueba de Student indicó homogeneidad. Ante esta discrepancia, se procedió a realizar los ajustes necesarios hasta obtener una respuesta estadísticamente satisfactoria y consistente entre ambas pruebas.

Tabla 2-11

Precipitación mensual y anual de estación Huac - Huas

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ

REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ESTACION: HUAC HUAS LATITUD: 13°55'1"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°20'1"S PROVINCIA: LUCANAS
 CODIGO: 100055 ALTITUD: 3440 DISTRITO: HUAC HUAS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1998	345.40	245.20	213.20	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.84	48.60	867.24
1999	144.70	262.80	198.60	6.70	0.00	0.00	0.00	0.00	2.17	4.87	5.24	55.20	680.28
2000	285.20	209.00	188.90	34.50	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00	8.10	103.40	837.80
2001	185.40	484.20	291.90	54.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.20	8.30	0.00	1026.50
2002	88.33	257.49	269.33	70.65	1.55	1.20	0.00	0.00	0.00	6.09	58.32	23.77	776.74
2003	81.51	242.08	218.73	5.77	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	15.01	128.39	692.95
2004	211.43	273.22	213.05	51.83	0.00	0.00	0.09	0.00	0.25	0.09	5.77	151.74	907.49
2005	207.54	207.54	2.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	150.77	570.22
2006	347.99	477.75	466.88	19.23	0.00	0.00	0.00	0.00	3.34	0.90	51.83	38.86	1406.80
2007	58.48	107.30	170.07	16.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.69	50.05	404.90
2008	383.60	431.30	220.30	78.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.60	1.70	54.80	1173.00
2009	202.00	179.20	164.00	34.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.80	30.60	14.70	633.20
2010	53.10	176.00	103.30	26.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	54.60	414.40
2011	319.30	384.60	100.70	65.50	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00	4.80	59.70	935.80
2012	116.00	478.20	231.20	126.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.80	0.00	66.20	1047.70
2013	86.60	427.30	152.40	3.10	6.00	2.90	0.30	0.00	0.00	11.00	4.20	49.00	742.80
2014	136.00	98.40	216.70	10.50	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	9.40	11.90	45.00	528.60
2015	78.30	255.00	338.20	12.70	1.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	4.20	10.20	699.80
2016	6.90	118.10	153.50	50.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	35.80	364.50
2017	548.70	354.70	430.80	10.80	0.70	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.90	20.90	1368.20

2018	149.60	178.80	180.30	27.40	3.80	20.90	1.10	0.00	0.00	1.00	0.40	0.00	563.30
2019	180.00	284.80	102.00	2.10	4.70	0.00	0.00	0.00	5.20	2.10	0.70	39.90	621.50
2020	348.80	165.30	204.10	14.53	0.90	0.07	0.00	0.02	3.10	4.90	8.60	103.20	853.51
2021	242.10	56.60	228.20	23.00	6.50	0.00	0.00	0.00	3.00	5.60	5.80	23.70	594.50
2022	106.10	230.10	276.60	9.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.40	68.50	693.80
2023	192.00	327.30	414.30	139.40	0.00	0.00	0.00	0.00	2.30	15.60	0.90	101.80	1193.60
2024	192.50	246.00	218.20	64.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	5.42	24.67	49.45	801.22
Promedio	196.21	265.12	221.05	35.71	1.03	0.93	0.11	0.03	0.81	4.33	9.94	57.34	792.61
Ppmax	548.70	484.20	466.88	139.40	6.50	20.90	1.20	0.70	5.20	29.80	58.32	151.74	1406.80

En la tabla 2.11 anterior se presentan los valores de precipitación mensual y anual desde su completación y extensión de los datos faltantes. Al realizar las pruebas estadísticas de homogeneidad y de consistencia, se obtuvo un resultado inconsistente en la prueba de Fisher, mientras que la prueba de Student indicó homogeneidad. Ante esta discrepancia, se procedió a realizar los ajustes necesarios hasta obtener una respuesta estadísticamente satisfactoria y consistente entre ambas pruebas.

Tabla 2-12

Precipitación mensual y anual de estación Pampa Cangallo

GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO
GERENCIAREGIONAL DE INFRAESTRUCTURA SUB GERENCIA DE OBRAS
RED HIDROMETEOROLGICA - OPEMAN
REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ESTACION: PAMPA CANGALLO LATITUD: 13°34'09"S REGION: AYACUCHO
TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°11'37"S PROVINCIA: CANGALLO
CODIGO: 4 ALTITUD: 3350 DISTRITO: LOS MOROCHUCOS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1998	236.34	138.68	164.47	15.70	5.03	10.97	4.28	2.61	4.08	28.26	109.93	104.37	824.72
1999	104.18	228.04	156.01	57.39	7.98	3.08	2.91	2.84	96.24	74.58	62.70	103.13	899.08
2000	98.17	74.29	162.62	30.55	24.34	13.25	0.64	22.39	0.64	113.15	19.34	98.17	657.53
2001	232.67	94.63	261.91	40.17	43.46	3.75	9.47	4.84	14.10	43.46	67.83	29.94	846.25
2002	154.33	184.55	158.23	23.97	7.77	2.59	51.63	11.54	84.16	32.86	156.28	291.15	1159.10
2003	184.18	155.06	161.64	58.57	6.55	5.03	0.68	17.51	40.54	44.19	60.52	160.42	894.91
2004	64.18	202.70	154.70	28.23	1.62	6.91	8.25	5.21	40.17	48.70	79.89	141.05	781.62
2005	93.54	76.72	4.90	4.90	4.90	5.03	0.03	36.88	48.46	47.36	30.67	139.35	492.76

2006	263.74	146.41	203.92	45.29	2.47	1.01	5.03	22.75	35.18	40.05	64.42	51.02	881.28
2007	90.86	101.82	201.60	72.93	7.77	4.42	0.70	2.10	34.69	51.75	61.62	151.29	781.55
2008	227.19	208.43	107.18	28.84	3.38	0.82	4.33	0.28	10.93	35.79	75.38	115.22	817.78
2009	130.58	138.98	167.61	64.91	4.78	5.03	14.22	5.03	8.74	41.88	116.81	120.10	818.66
2010	258.60	136.50	107.30	31.70	2.90	0.00	0.00	3.30	14.00	36.50	23.60	170.20	784.60
2011	280.00	260.70	124.50	90.10	8.00	0.00	13.30	4.40	34.50	34.50	89.30	89.50	1028.80
2012	114.00	253.50	165.80	169.30	5.70	13.20	3.10	1.20	21.20	23.40	14.20	215.80	1000.40
2013	124.30	172.90	126.90	2.50	19.60	11.60	0.00	24.62	5.60	56.40	44.80	155.70	744.92
2014	167.20	159.40	128.40	42.60	16.60	7.80	20.70	14.80	71.90	68.90	48.00	108.30	854.60
2015	206.90	119.90	181.00	40.80	25.70	2.10	14.10	23.80	2.70	32.50	39.70	92.30	781.50
2016	43.36	115.10	85.63	33.43	9.30	15.21	12.91	10.86	17.18	15.95	16.27	49.27	424.44
2017	242.07	202.67	124.45	80.95	18.00	10.53	13.98	11.68	27.03	42.91	60.10	52.80	887.17
2018	170.80	121.10	147.00	43.40	14.60	18.90	35.00	23.80	20.90	39.20	39.90	64.36	738.96
2019	173.30	183.60	43.70	41.10	12.50	0.00	1.80	0.00	17.00	85.90	94.50	147.40	800.80
2020	103.30	133.50	108.50	22.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.30	14.80	16.60	249.70	652.70
2021	172.10	175.30	131.30	96.40	20.10	0.00	2.80	3.00	18.50	62.20	94.10	141.30	917.10
2022	168.30	154.80	123.90	35.10	0.00	0.00	0.00	2.20	5.90	2.40	5.00	130.60	628.20
2023	190.30	196.90	125.40	10.10	10.20	0.00	8.40	3.50	42.90	55.80	86.20	89.10	818.80
2024	179.20	125.60	173.30	66.20	18.70	1.50	0.00	0.00	6.80	47.60	146.80	116.40	882.10
Promedio	165.69	157.84	140.81	47.30	11.18	5.29	8.45	9.67	26.98	45.22	63.87	125.11	807.42
Ppmax	280.00	260.70	261.91	169.30	43.46	18.90	51.63	36.88	96.24	113.15	156.28	291.15	1159.10

En la tabla 2.12 se presentan los valores de precipitación mensual y anual desde su completación y extensión de los datos faltantes. Al realizar las pruebas estadísticas de homogeneidad y de consistencia, se obtuvo un resultado inconsistente en la prueba de Fisher, mientras que la prueba de Student indicó homogeneidad. Ante esta discrepancia, se procedió a realizar los ajustes necesarios hasta obtener una respuesta estadísticamente satisfactoria y consistente entre ambas pruebas.

Paso 2: Cálculo del factor R observada aplicando la ecuación de Wischmeier y Smith (1978)

a) Cálculo del factor de R de erosividad pluvial (Observada)

Con los datos de SENAMHI, ANA y OPEMAN debidamente tratadas se procedió a calcular el factor R, para ello en Excel se procedió a formar columnas de

datos, y aplicamos la ecuación (2) de Wischmeier y Smith (1978) para cada mes, este proceso se sigue en los cinco estaciones de interés.

Tabla 2-13

Erosividad mensual de la estación Huanca Sancos

CALCULO DE FACTOR DE EROSIVIDAD R MENSUAL (MJ.mm/(ha.h.año) PARA LA ESTACION HUANCA SANCOS

ESTACION: HUANCA SANCOS LATITUD: 13°55'1"S REGION: AYACUCHO
TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°20'1"W PROVINCIA: HUANCA SANCOS
CODIGO: 100055 ALTITUD: 3440 DISTRITO: SANCOS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ranual
1998	276.6	39.7	199.9	0.5	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	3.0	27.3	84.7	633.2
1999	18.1	2008.9	214.6	5.8	1.2	0.0	0.0	0.0	0.2	12.0	0.9	74.4	2336.2
2000	388.8	451.7	278.7	1.7	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	9.1	0.9	204.7	1335.8
2001	373.5	159.9	269.8	12.5	0.2	0.0	0.2	0.2	0.7	9.8	12.9	2.7	842.3
2002	0.0	162.3	104.8	10.2	0.1	0.2	6.2	0.0	1.6	7.2	30.0	173.5	496.0
2003	247.0	291.3	143.1	1.8	0.2	0.0	0.0	0.6	0.0	4.2	0.2	301.6	990.0
2004	27.0	209.9	144.0	24.7	0.0	0.1	0.2	0.4	1.0	1.3	2.2	321.5	732.1
2005	201.6	82.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.8	0.0	0.3	773.8	1072.6
2006	291.3	144.3	144.6	31.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	2.9	7.1	172.4	794.7
2007	114.3	140.1	579.8	41.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	0.2	131.5	1011.2
2008	1264.1	273.0	28.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	6.2	2.2	72.4	1647.3
2009	51.8	923.2	93.3	11.4	0.0	0.0	0.4	0.0	0.2	6.8	63.6	30.5	1181.3
2010	416.8	80.0	73.0	3.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	0.2	252.1	837.2
2011	872.4	257.3	231.8	41.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	1.8	153.3	1559.3
2012	99.0	685.4	264.9	128.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.7	1.5	164.3	1346.1
2013	107.5	391.6	156.1	0.0	4.1	0.1	0.0	0.2	2.3	1.7	3.4	130.0	797.1
2014	490.0	18.2	150.1	13.5	0.0	0.0	0.0	0.2	2.9	30.1	0.9	88.2	794.2
2015	103.4	190.6	167.9	4.5	2.4	0.0	0.0	0.1	3.0	5.4	14.9	27.2	519.5
2016	5.4	301.5	65.7	2.2	0.1	0.0	0.2	0.6	6.0	1.0	0.1	34.9	417.8
2017	1769.9	56.6	279.1	1.7	0.1	0.0	0.1	0.0	1.5	1.8	1.4	0.1	2112.5
2018	349.1	135.7	350.5	6.2	0.0	0.7	0.2	0.6	0.0	3.6	0.2	12.9	859.6
2019	214.8	409.6	36.1	19.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.3	22.3	247.2	949.6
2020	110.1	392.2	10.5	0.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	2.4	1.1	1365.9	1883.3
2021	297.0	105.2	193.2	40.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.7	12.0	13.3	82.4	744.7
2022	413.8	228.7	199.9	10.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	164.6	1017.2
2023	433.7	220.9	164.9	7.0	0.4	0.0	0.0	0.1	2.3	13.5	73.4	23.5	939.5
2024	246.3	361.2	71.0	11.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.2	162.6	132.4	996.6
Promedio	340.1	323.0	171.0	16.0	0.3	0.1	0.3	0.1	1.5	6.0	16.5	193.4	1068.4
Ppmax	1769.9	2008.9	579.8	128.9	4.1	1.6	6.2	0.6	14.8	30.1	162.6	1365.9	2336.2

Aplicando la ecuación de Wischmeier y Smith (1978) sería de la siguiente manera: $=SI(P_i > 0; 1.735 * 10^{(1.5 * LOG_{10}((P_i^2)/P_t) - 0.08188)}; 0)$ esto para el mes de enero del 1998, dando como resultado 276.6 MJ.mm/ha.h.año, este proceso se sigue

para todos los periodos mensuales, y el promedio mensual de los 27 periodos son los valores del factor R observada con la cual fueron ajustados los valores del factor R satelitales.

Tabla 2-14

Erosividad pluvial mensual para la estación Vilcashuaman

CALCULO DE FACTOR DE EROSIVIDAD R MENSUAL (MJ.mm/ha.h.año) PARA LA ESTACION VILCASHUAMAN

ESTACION: VILCASHUAMAN LATITUD: 13°40'7.7"S REGION: AYACUCHO
TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 73°57'8.6"W PROVINCIA: VILCAS HUAMAN
CODIGO: 113100 ALTITUD: 3440 DISTRITO: VILCAHUAMAN

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ranual
1998	542.3	149.2	558.4	0.7	0.0	0.5	0.0	0.0	0.3	4.2	23.2	61.2	1340.0
1999	183.4	377.8	7.6	2.8	0.0	0.0	0.1	0.0	144.2	0.1	51.5	23.8	791.3
2000	154.5	112.9	122.5	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	2.3	22.7	29.4	107.3	553.4
2001	1015.1	112.9	131.3	0.0	1.3	0.0	0.0	4.8	2.1	7.4	24.8	58.5	1358.2
2002	31.3	933.6	227.0	3.9	0.3	0.0	9.6	0.0	2.6	13.2	3.3	70.6	1295.5
2003	79.6	281.9	218.4	6.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	5.6	1.8	289.3	883.0
2004	46.0	579.2	64.2	8.9	0.0	0.1	0.2	0.1	0.4	2.4	1.7	386.9	1090.2
2005	122.5	56.5	2.6	2.6	2.6	0.0	0.0	0.9	11.9	8.6	10.2	229.2	447.6
2006	736.5	169.4	174.3	8.5	0.0	0.1	0.0	1.8	0.2	4.0	70.7	58.0	1223.4
2007	144.7	70.9	287.7	4.5	0.0	0.0	0.2	0.1	0.4	3.2	50.6	204.8	767.1
2008	677.9	309.8	89.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	6.1	120.3	1204.6
2009	206.0	375.3	68.7	11.8	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	6.1	111.3	125.8	905.8
2010	709.6	402.3	25.3	6.5	0.9	0.0	0.0	1.1	0.1	4.2	1.2	139.6	1290.7
2011	800.7	1035.9	254.2	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	3.6	3.4	29.5	2141.5
2012	50.7	600.4	58.1	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.1	0.5	297.6	1013.2
2013	222.9	240.4	166.0	0.4	0.5	0.2	0.0	4.1	0.0	1.7	2.0	325.0	963.0
2014	789.7	131.7	255.8	1.3	0.1	0.0	1.0	0.0	13.2	10.5	2.2	36.7	1242.2
2015	341.4	299.9	97.8	2.3	2.1	0.0	0.0	0.5	0.3	2.0	7.7	25.0	779.1
2016	18.4	551.7	37.3	4.6	0.2	0.2	0.1	0.0	0.2	3.5	2.3	80.0	698.5
2017	805.7	397.2	108.4	22.4	3.1	0.0	0.1	0.0	1.4	5.9	7.8	79.5	1431.5
2018	629.9	453.1	283.2	2.0	0.0	0.7	0.3	0.6	0.1	3.8	0.2	26.8	1400.7
2019	368.1	333.3	102.3	5.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	10.7	59.2	237.9	1117.0
2020	20.5	568.8	256.2	0.3	0.4	0.0	0.0	0.5	0.1	0.3	1.0	598.3	1446.3
2021	433.2	83.9	142.4	11.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.1	11.7	35.9	123.0	842.4
2022	1274.0	499.6	73.7	6.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	144.6	1998.4
2023	230.6	382.5	84.1	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	2.7	4.9	17.0	177.0	901.7
2024	142.9	184.9	69.6	8.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	10.6	493.0	148.1	1057.5
Promedio	399.2	359.1	146.9	5.1	0.6	0.1	0.5	0.5	6.9	5.6	37.7	155.7	1117.9
Ppmax	1274.0	1035.9	558.4	22.4	3.1	0.7	9.6	4.8	144.2	22.7	493.0	598.3	2141.5

En la tabla anterior se aprecia los resultados de los valores del factor R observada para la estación de Vilcashuaman.

Tabla 2-15

Erosividad pluvial mensual para la estación Huancapi

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ

CALCULO DE FACTOR DE EROSIVIDAD R MENSUAL (MJ.mm/ha.h.año) PARA LA ESTACION HUANCAPI

ESTACION: HUANCAPI LATITUD: 13°44'56.4"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°4'5.2"S PROVINCIA: VICTOR FAJARDO
 CODIGO: 113022 ALTITUD: 3117 DISTRITO: HUANCAPI

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ranual
1998	518.3	505.5	296.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	13.1	56.8	1391.9
1999	28.3	742.6	432.6	64.9	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	14.0	0.8	38.1	1339.1
2000	249.4	730.7	134.7	0.3	2.9	0.0	0.0	1.7	0.0	25.0	0.1	171.4	1316.3
2001	831.3	122.2	167.7	11.9	2.5	0.1	0.2	0.2	4.9	1.7	24.8	4.7	1172.0
2002	66.3	237.9	143.2	12.1	0.1	0.0	9.1	0.4	17.2	1.0	10.4	180.6	678.3
2003	354.3	263.7	303.9	15.5	0.3	0.0	0.0	1.5	0.5	4.0	3.0	82.9	1029.5
2004	33.1	234.0	174.1	1.2	0.0	2.1	0.2	0.2	1.7	5.5	5.5	353.0	810.6
2005	20.7	61.7	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	1.4	34.9	22.2	3.1	301.7	445.9
2006	663.0	151.5	137.1	18.1	0.0	0.3	0.0	2.2	0.1	2.2	26.2	122.1	1122.8
2007	43.0	183.6	384.4	38.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.3	1.8	4.2	404.2	1061.6
2008	902.3	240.9	62.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	2.2	285.9	1496.9
2009	137.1	341.1	219.7	9.7	0.1	0.0	1.1	0.0	0.1	7.0	69.3	52.7	838.0
2010	386.8	192.9	51.9	4.1	0.2	0.0	0.0	0.6	0.1	6.7	0.4	256.4	900.0
2011	858.8	631.8	460.2	0.4	0.0	0.0	0.1	0.0	3.8	1.0	4.8	64.1	2025.2
2012	8.8	1206.7	65.8	32.9	0.0	0.1	0.0	0.0	2.1	3.3	0.6	180.1	1500.5
2013	9.8	314.3	20.9	0.0	4.2	1.6	0.0	9.4	0.6	9.8	4.0	52.4	427.2
2014	341.7	65.4	205.0	3.3	0.1	0.0	0.8	0.4	23.0	25.0	2.1	64.6	731.4
2015	172.4	249.7	414.7	2.7	1.9	0.0	0.1	1.5	0.5	2.6	3.7	21.8	871.5
2016	4.9	255.8	105.7	8.4	0.2	0.5	0.3	0.6	1.9	1.2	0.4	46.1	426.0
2017	565.9	226.8	45.2	18.7	1.8	0.1	0.1	0.0	2.2	7.9	5.2	12.1	886.0
2018	418.0	221.3	334.7	4.3	0.0	1.5	2.2	3.2	0.2	2.6	1.1	35.2	1024.3
2019	246.9	231.4	58.2	0.6	0.2	0.2	0.5	0.0	0.0	11.3	23.7	674.0	1246.9
2020	82.1	446.1	11.5	1.5	0.4	0.0	0.0	0.6	0.3	2.2	1.9	10.6	557.3
2021	398.2	69.8	234.0	26.9	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	15.5	19.6	97.2	862.4
2022	476.7	345.3	123.5	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.4	150.2	1100.4
2023	187.0	348.8	131.1	0.1	1.6	0.0	0.1	0.0	0.5	7.8	27.5	142.8	847.3
2024	203.3	214.5	242.4	7.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	14.2	238.2	130.4	1050.2
Promedio	304.0	327.3	183.8	10.7	0.6	0.2	0.5	0.9	4.3	7.4	18.4	147.9	1005.9
Ppmax	902.3	1206.7	460.2	64.9	4.2	2.1	9.1	9.4	34.9	25.0	238.2	674.0	2025.2

En la tabla 2.15 se aprecia los valores calculados del factor R aplicando la ecuación (2).

Tabla 2-16

Erosividad pluvial mensual para la estación Huac - Huas

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ

CALCULO DE FACTOR DE EROSIVIDAD R MENSUAL (MJ.mm/ha.h.año) PARA LA ESTACION HUAC HUAS

ESTACION: HUAC HUAS LATITUD: 14°56'49"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°56'27"S PROVINCIA: LUCANAS
 CODIGO: 100055 ALTITUD: 3180 DISTRITO: HUAC - HUAS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ranual
1998	2354.2	842.3	553.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	3756.7
1999	245.4	1469.8	634.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.6	2363.2
2000	1374.5	540.9	399.4	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	65.5	2382.9
2001	278.4	4959.7	1086.6	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6331.9
2002	45.7	1133.2	1296.8	23.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.2	0.9	2513.2
2003	42.7	1117.5	824.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	166.7	2151.4
2004	496.8	1072.0	508.3	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	183.6	2268.1
2005	943.3	943.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	361.7	2248.2
2006	1147.6	2969.4	2771.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	1.6	6894.0
2007	35.3	217.9	867.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.1	1143.5
2008	2018.9	2869.5	382.4	17.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	5294.1
2009	743.3	518.9	397.8	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.3	1666.8
2010	25.5	928.6	187.8	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.7	1172.6
2011	1634.0	2855.4	51.3	14.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.7	4565.4
2012	66.1	4633.3	523.6	85.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	12.3	5321.9
2013	46.1	5537.5	251.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	8.4	5843.2
2014	297.4	112.6	1203.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	10.8	1624.4
2015	37.3	1287.0	3002.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	4327.0
2016	0.1	340.1	746.8	25.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.5	1122.3
2017	4690.3	1267.0	2270.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	8227.6
2018	359.8	614.3	629.9	2.2	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1607.3
2019	540.8	2142.3	98.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	2787.5
2020	2445.3	260.3	489.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	63.3	3259.1
2021	1406.6	18.0	1178.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	2605.2
2022	93.9	957.9	1663.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.3	2741.0
2023	246.6	1221.7	2477.9	94.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	36.8	4077.5
2024	451.9	943.2	658.2	17.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	7.7	2079.1
Promedio	817.3	1547.2	931.7	11.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.8	38.8	3347.2
Ppmax	4690.3	5537.5	3002.5	94.4	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.1	13.2	361.7	8227.6

En la tabla 2.16 se aprecia los valores calculados del factor R observada para la estación de Huac-Huas, aplicando la ecuación de Wischmeier y Smith (1978).

Tabla 2-17

Erosividad pluvial mensual para la estación Pampa Cangallo

GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO

GERENCIAREGIONAL DE INFRAESTRUCTURA SUB GERENCIA DE OBRAS

RED HIDROMETEOROLGICA - OPEMAN

CALCULO DE FACTOR DE EROSIVIDAD R MENSUAL (MJ.mm/ha.h.año) PARA LA ESTACION PAMPA CANGALLO

PAMPA

ESTACION: CANGALLO LATITUD: 13°34'09"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°11'37"S PROVINCIA: CANGALLO
 CODIGO: 4 ALTITUD: 3350 DISTRITO: LOS MOROCHUCOS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ranual
1998	800.9	161.8	269.9	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	1.4	80.6	69.0	1383.9
1999	60.3	632.0	202.4	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	47.5	22.1	13.1	58.5	1046.0
2000	80.6	34.9	366.5	2.4	1.2	0.2	0.0	1.0	0.0	123.5	0.6	80.6	691.5
2001	735.2	49.5	1048.7	3.8	4.8	0.0	0.0	0.0	0.2	4.8	18.2	1.6	1866.7
2002	133.9	228.9	144.3	0.5	0.0	0.0	5.0	0.1	21.7	1.3	139.0	898.7	1573.3
2003	335.3	200.1	226.7	10.8	0.0	0.0	0.0	0.3	3.6	4.6	11.9	221.6	1014.9
2004	17.4	547.6	243.4	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	7.6	33.5	184.5	1039.9
2005	107.5	59.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	14.9	14.0	3.8	355.4	561.6
2006	1007.6	172.4	465.7	5.1	0.0	0.0	0.0	0.6	2.4	3.5	14.7	7.3	1679.3
2007	49.3	69.4	538.9	25.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	9.1	15.4	227.7	938.1
2008	720.5	556.3	75.7	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.8	26.3	94.0	1477.2
2009	136.6	164.7	288.9	16.8	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	4.5	97.8	106.3	815.6
2010	1130.7	166.3	80.8	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	3.2	0.9	322.3	1706.4
2011	955.9	771.5	84.0	31.8	0.0	0.0	0.1	0.0	1.8	1.8	31.0	31.2	1909.2
2012	67.3	739.8	207.0	220.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.4	0.6	0.1	456.4	1692.0
2013	135.7	365.3	144.4	0.0	0.5	0.1	0.0	1.1	0.0	12.7	6.4	266.8	933.0
2014	268.8	232.9	121.8	4.4	0.3	0.0	0.5	0.2	21.4	18.8	6.4	73.1	748.6
2015	582.5	113.4	390.0	4.5	1.1	0.0	0.2	0.9	0.0	2.3	4.1	51.7	1150.6
2016	13.4	250.5	103.2	6.1	0.1	0.6	0.4	0.2	0.8	0.7	0.7	19.7	396.4
2017	771.3	452.7	104.8	28.8	0.3	0.1	0.1	0.1	1.1	4.3	11.8	8.0	1383.5
2018	356.4	127.0	227.2	5.8	0.2	0.5	3.1	1.0	0.7	4.3	4.5	19.1	749.8
2019	330.0	392.4	5.3	4.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	40.2	53.5	203.1	1029.3
2020	95.0	205.0	110.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	1341.5	1753.2
2021	263.7	278.7	117.1	46.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.3	12.4	43.1	146.0	908.1
2022	435.0	338.5	173.6	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	203.3	1154.4
2023	422.6	468.2	120.9	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	4.8	10.7	39.3	43.4	1110.1
2024	315.6	108.7	285.5	15.9	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	173.5	86.5	991.9
Promedio	382.6	292.1	227.6	16.8	0.4	0.1	0.4	0.4	4.8	11.7	30.8	206.6	1174.2
Ppmax	1130.7	771.5	1048.7	220.4	4.8	0.6	5.0	6.6	47.5	123.5	173.5	1341.5	1909.2

La tabla anterior muestra los valores de factor R observada para la estación de Pampa Cangallo aplicando la ecuación de Wischmeier y Smith (1978).

b) Factor R de erosividad pluvial promedio multimensual

De una vez calculado los valores del factor R pluvial mensual, se procedió a calcular la erosividad pluvial promedio multimensual y anual

Paso 3: Ajuste de los valores del factor R (GPM y observada)

El ajuste de los valores del factor R de GPM con R observada se aplicó la metodología de regresión lineal simple, para este método es importante calcular el intercepto, la pendiente y el coeficiente de R² de los datos GPM y SENAMHI, cabe señalar que R² juega un papel importante porque un valor cercano a uno garantiza que los valores son correctamente ajustados, el caculo fue realizado de la siguiente manera:

- ✓ Intercepto (a) = valor del GPM y valor de observada
- ✓ Pendiente (b) = valor del GPM y valor de observada
- ✓ R² = coeficiente del R²

Ya teniendo los valores del intercepto y la pendiente se forma una ecuación de la siguiente manera:

$$GPM_{ajus} = a + b * gpm \tag{42}$$

Aplicando la ecuación se consigue a ajustar los valores del GPM precedido, también cabe mencionar que esta ecuación de ajuste será utilizada para todas estaciones virtuales de GPM de interés.

Tabla 2-18

Ajuste de valores de R anual con datos observados

Estación	Altitud	Erosividad	Erosividad (pred)
		Observada	GPM
		MJ.mm/(ha.h.año)	MJ.mm/(ha.h.año)
HUANCA SANCOS	3440	1068.41	2066.516
VILCASHUAMAN	3518	1117.92	2625.122
HUANCAPI	3117	1005.91	2611.503
HUAC HUAS	3180	3347.22	1057.314
PAMPA CANGALLO	3315	1174.25	2411.648

A partir de la tabla 2.18, que presenta los valores anuales obtenidos del producto satelital GPM y los datos observados, se procedió a calcular los coeficientes de la ecuación de regresión lineal simple.

Para ello, se utilizó Microsoft Excel, donde existen funciones específicas para calcular el intercepto (B_0) y la pendiente (B_1) de la recta, las funciones aplicadas fueron:

- = PENDIENTE (observada; gpm) para calcular la pendiente B_1 .
- = INTERCEPTO (observada; gpm) para obtener el intercepto B_0 .

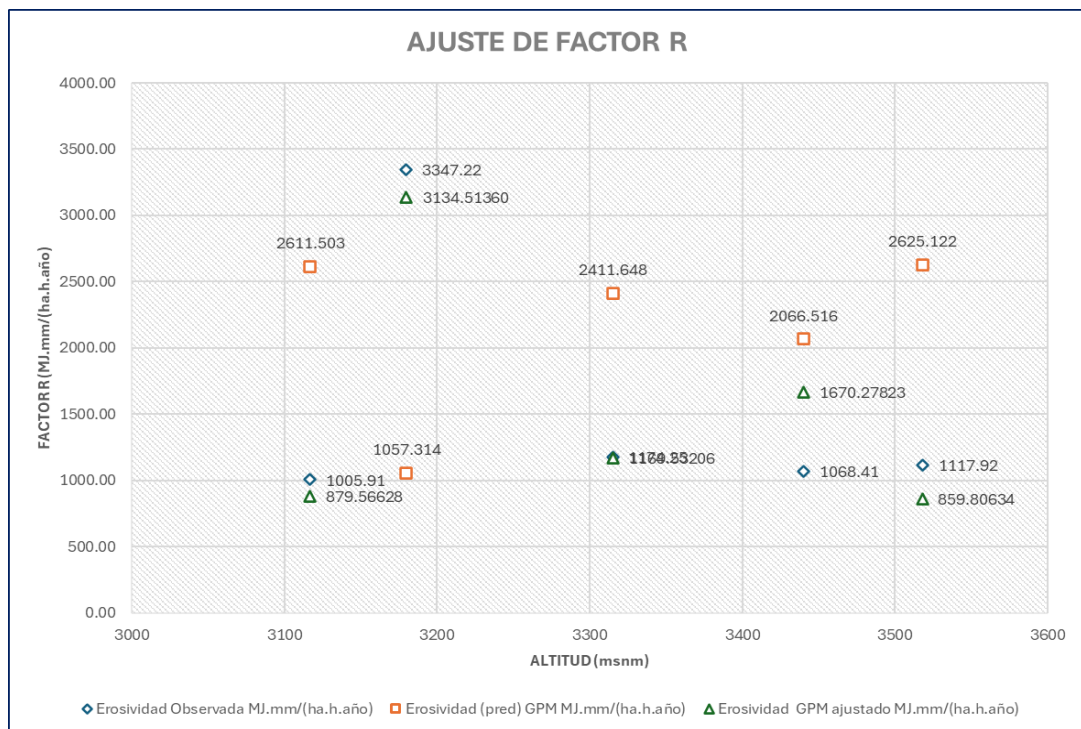
Una vez calculados estos parámetros, se obtuvo la siguiente ecuación de regresión lineal que relaciona los datos de GPM (variable independiente) con los datos de SENAMHI (variable dependiente).

Reemplazando con los valores obtenidos, la ecuación 42 queda expresada como:

$$P_{px} = 4668.552 + (-1.4509) * gpm \quad (43)$$

Figura 2-15

Ajuste de los resultados del factor R por regresión lineal

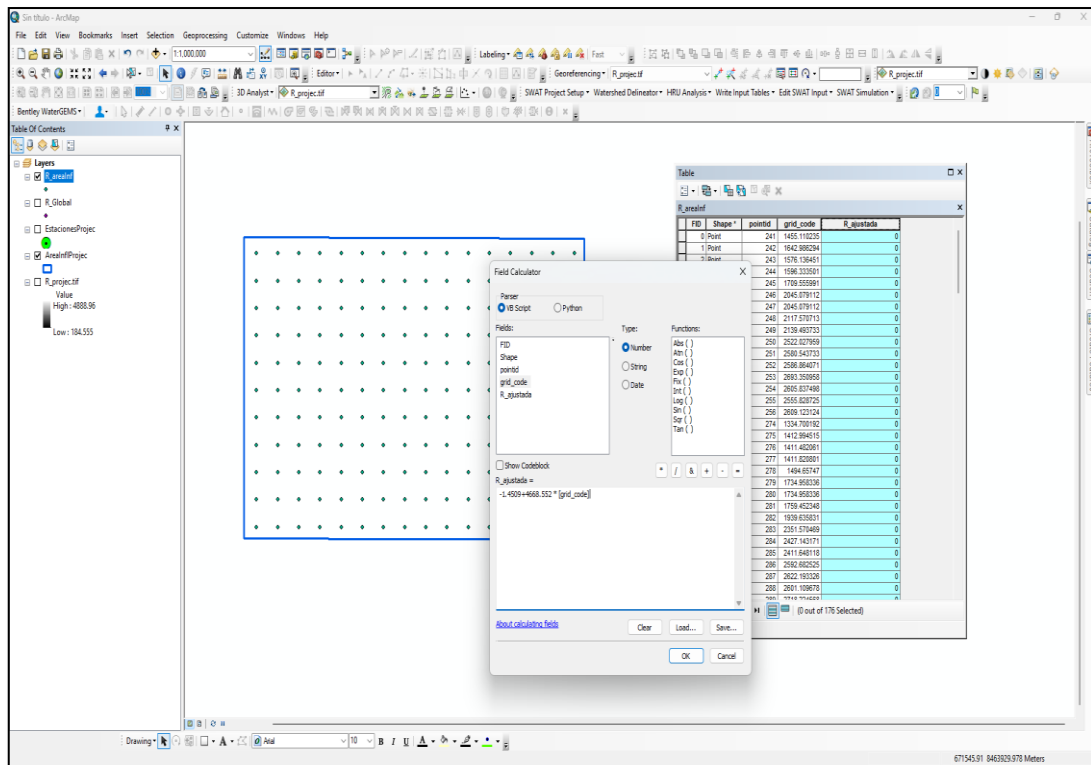


En la figura 2.15 se aprecia el ajuste de los valores de R provenientes de GPM con valores observados de SENAMHI, los puntos del color naranja indican valores virtuales en este caso valores de GPM, mientras los valores de color azul indica valores de R observado provenientes de SENAMHI y los puntos de color verde indican los valores de R ajustados.

Paso 4: Teniendo la ecuación 43 de ajuste, se procedió a realizar el ajuste para todos los valores de GPM de interés como muestra en la figura:

Figura 2-16

Proceso de ajuste de los valores del factor R de GPM



En la figura 2.16 se observa que los valores del factor R estimados a partir de los datos GPM se representan con puntos azules, mientras que los puntos verdes corresponden a las estaciones observadas del SENAMHI. Para realizar el ajuste, se utilizó la herramienta *Field Calculator* en la cual, ingresar la ecuación de regresión lineal, tal como se muestra en la figura anterior

Paso 5: Teniendo los valores del factor R ajustado, se procedió a crear un ráster utilizando el método de Kriging, a una resolución de 12.5 m de píxel. Para ello, se utilizó el programa ArcGIS 10.5, accediendo a la caja de herramientas **ARCTOOLBOX**, luego a Spatial Analyst Tools, Interpolation y seleccionando la opción Kriging.

2.7.3.3. Cálculo de factor K (Erodabilidad)

Paso 1: Con los resultados del laboratorio (observados) y los datos de SoilGrid (predichos), se calcularon los errores absolutos, los errores relativos y el coeficiente de corrección multiplicativa. Posteriormente, se promediaron los coeficientes de corrección por tipo de suelo, y con esto, se procedió a corregir los datos obtenidos de SoilGrid (predichos).

$$Factor\ de\ corrección = \frac{Valor\ Observado}{Valor\ Simulado} \quad (44)$$

$$Valor\ Ajustado = Valor\ Simulado * Factor\ de\ Corrección \quad (45)$$

Tabla 2-19

Ajuste de datos de SoilGrid con datos observados

Muestras	Altitud	Muestras (Obs)	SoilGrid (Prd)	Factor	SoilGrid Ajustado
		Arena %	Arena %	Corrección	Arena %
Calicata 01	3845	54.7	43.1	1.269	54.70
Calicata 02	3757	50.7	43.8	1.158	50.70
Calicata 03	3538	42.7	43.4	0.984	42.70
Calicata 04	4218	38.7	46.5	0.832	38.70
Calicata 05	4218	66.7	45.4	1.469	66.70
Calicata 06	4234	56.7	46.4	1.222	56.70
Calicata 07	3880	56.7	41.8	1.356	56.70
Calicata 08	3440	64.4	41.5	1.552	64.40
Calicata 09	3390	44.4	40	1.110	44.40
Promedio		52.86	43.54	1.217	52.86

La tabla anterior muestra el ajuste de los datos provenientes de SoilGrids frente a datos observados en campo. Para este proceso, se realizaron nueve

muestreos en el área de estudio, con ambas fuentes de información, se procedió al ajuste de los datos de SoilGrids para cada tipo de suelo, cabe indicar que la corrección se realizó para las 9 muestras.

A partir de este primer conjunto de datos, se calcularon factores de corrección específicos mediante la comparación entre los datos de SoilGrids y los observados. Posteriormente, se promediaron dichos factores por tipo de suelo con el propósito de aplicarlos a nuevas muestras o puntos adicionales que se extraigan de SoilGrids dentro del área de interés, permitiendo así un ajuste más representativa y precisa para el conjunto completo del estudio.

Tabla 2-20

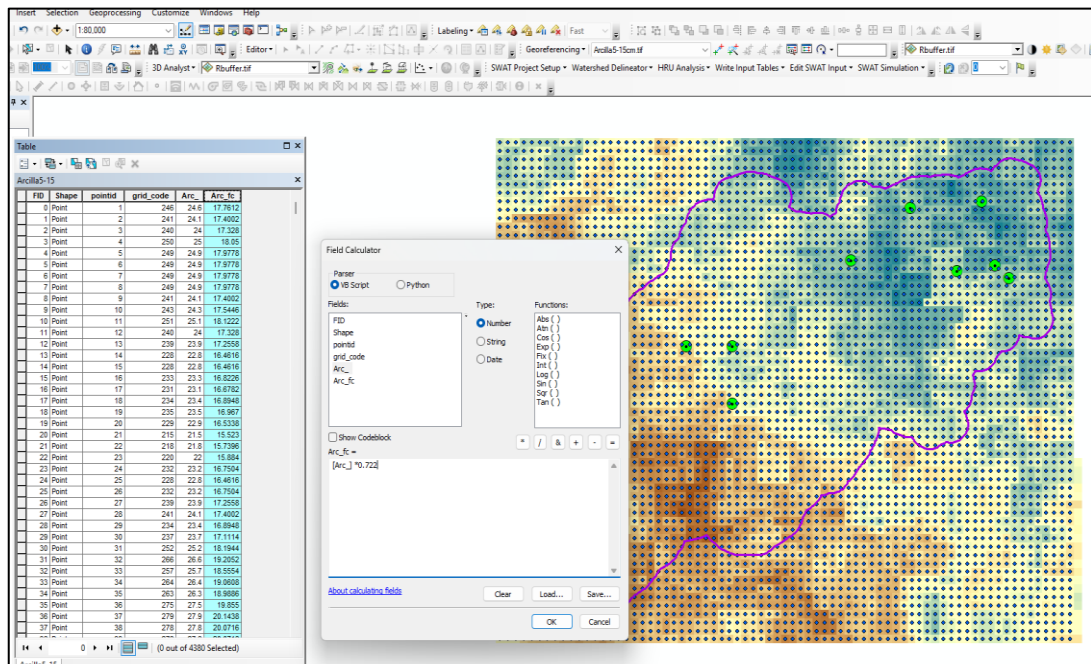
Valores promediados de coeficientes de corrección multiplicativa

Tipo Suelo	Promed Fc
Arena	1.217
Limo	0.928
Arcilla	0.722
Carb. Org	3.030

La tabla anterior presenta los valores promedio de los coeficientes de corrección multiplicativa determinados para cada tipo de suelo, los cuales fueron empleados para ajustar los datos obtenidos de SoilGrids. Es importante destacar que fue necesaria la conversión de los valores originales de SoilGrids a unidades porcentuales, a fin de asegurar la compatibilidad con los datos provenientes del análisis de laboratorio, que se expresan en dicho formato. Una vez determinados los coeficientes de corrección multiplicativos, se aplicaron a los valores de SoilGrids correspondientes a cada clase de suelo. Cabe resaltar que estos datos se encuentran en formato vectorial, diferenciados por tipo de suelo. La figura siguiente ilustra el procedimiento aplicado.

Figura 2-17

Proceso de ajuste de los valores SoilGrid



En la figura anterior se muestra el proceso de ajuste de datos de soliGrid para cada tipo de suelo en este caso de limo, arcilla, arena y carbono orgánico.

Paso 2: Ya una vez obtenidos los valores ajustados de las propiedades físicas provenientes de SoilGrids, expresados en unidades porcentuales, se procedió a generar superficies ráster para cada una de las variables: arena, limo, arcilla y carbono orgánico. Para ello, se empleó el método de interpolación Kriging con una resolución espacial de 12.5 metros por píxel. El procedimiento se llevó a cabo en el software ArcGIS 10.5, accediendo a la caja de herramientas ArcToolbox, específicamente a Spatial Analyst Tools > Interpolation, y seleccionando la herramienta Kriging. Esta metodología fue aplicada de forma individual para cada una de las cuatro propiedades del suelo mencionadas.

Paso 3: Con los ráster obtenidos en el paso 2, se procedió al cálculo del factor K utilizando el método propuesto por Williams. Para ello, se organizaron los ráster según las siguientes variables: porcentaje de arena (ms%), limo (msilt%), arcilla

(mc%) y carbono orgánico (orgC%). Posteriormente, se aplicaron las siguientes fórmulas para calcular los factores intermedios:

- $f_{\text{sand}} = 0.2 + 0.3 * \text{Exp}(-0.256 * \text{"ms.tif"} * (1 - \text{"msilt.tif"} / 100))$
- $f_{\text{cl-si}} = \text{Power}(\text{"msilt.tif"} / (\text{"mc.tif"} + \text{"msilt.tif"}), 0.3)$
- $f_{\text{orgc}} = 1 - (0.25 * \text{"orgC.tif"}) / (\text{"orgC.tif"} + \text{Exp}(3.72 - 2.95 * \text{"orgC.tif"}))$
- $f_{\text{hisand}} = 1 - (0.7 * (1 - \text{"ms.tif"} / 100)) / ((1 - \text{"ms.tif"} / 100) + \text{Exp}(-5.51 + 22.9 * (1 - \text{"ms.tif"} / 100)))$

Finalmente, el valor del factor K se calculó mediante la fórmula:

- $K = 0.1317 * \text{"fcsand.tif"} * \text{"fcl_si.tif"} * \text{"forgc.tif"} * \text{"fhisand.tif"}$

Todos los cálculos se realizaron utilizando el software ArcGIS, a través de la herramienta ArcToolbox. En ella, se accedió a *Spatial Analyst Tools*, seleccionando *Map Algebra* y posteriormente *Raster Calculator*.

2.7.3.4. Cálculo del factor LS

Paso 1: Con el modelo de elevación digital (DEM) obtenido del ALOS PALSAR, con una resolución de 12.5 metros por píxel, se procedió al cálculo del factor LS. Para ello, con ArcGIS abierto, se accedió a la caja de herramientas *ArcToolbox*, luego a la sección *Spatial Analyst Tools*, seleccionando *Map Algebra* y finalmente *Raster Calculator*.

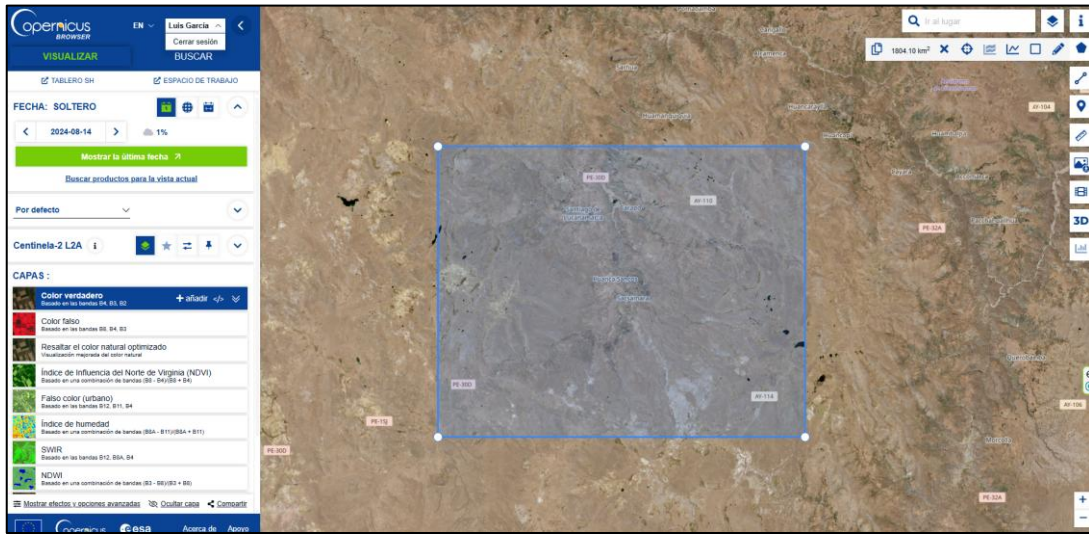
Paso 2: Estando en Raster Calculator ingresamos la fórmula siguiente $(1.07^{\text{power}(12.5/20, 0.28)} * \text{power}(\text{slope_grados}/10, 1.45))$.

2.7.3.5. Cálculo del factor C (cobertura vegetal)

Paso 1: Contando con imágenes satelitales del Sentinel-2A y fotografías capturadas mediante dron, se procedió a georreferenciar las coberturas vegetales presentes en la microcuenca en estudio mediante puntos de ubicación. Para la descarga de las imágenes satelitales, se accedió al portal <https://dataspace.copernicus.eu>, siendo el primer paso el registro obligatorio en la plataforma para habilitar la descarga de los archivos.

Figura 2-18

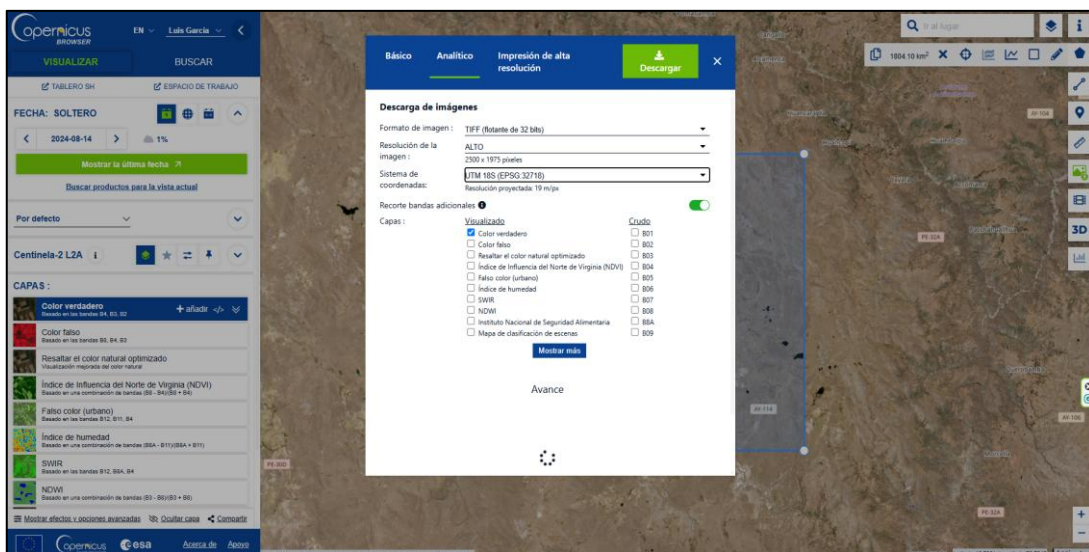
Acceso a la plataforma Copérnicus para el proceso de descarga de imagen Sentinel 2A



Paso 2: Una vez completado el registro, se delimitó el área de interés mediante un rectángulo sobre la zona de estudio y se seleccionó la fecha de adquisición de la imagen según criterios propios. Para el presente análisis, se eligió una imagen satelital correspondiente al 14 de agosto de 2024, caracterizada por la ausencia de nubosidad. Tras la selección, se procedió a su descarga en alta resolución, tal como se muestra en la imagen a continuación.

Figura 2-19

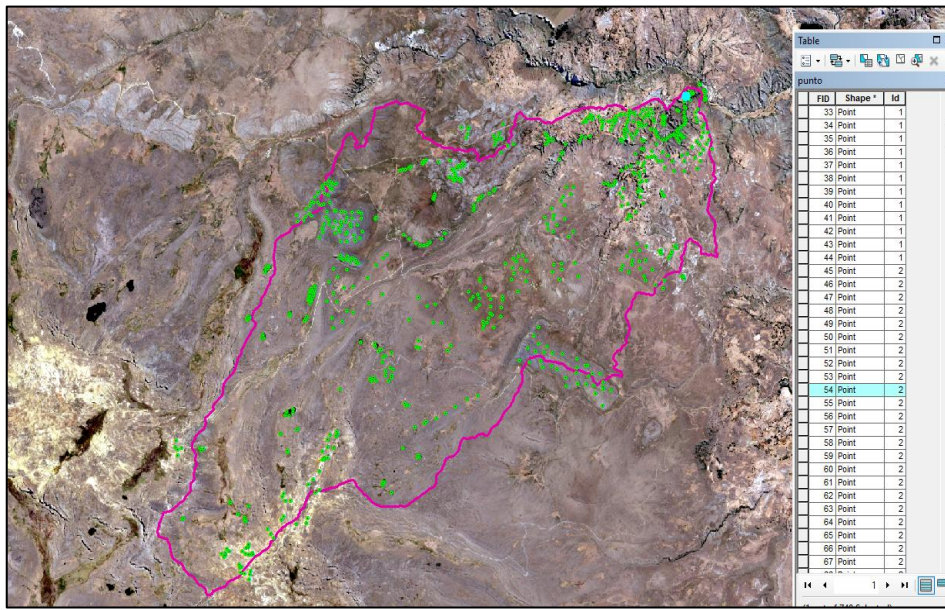
Preparación de la imagen en alta resolución para el proceso de descarga de Sentinel 2A



Paso 3: Con la ayuda de las fotografías tomadas con el dron, Ubicamos los puntos donde presentan tipos de coberturas vegetales.

Figura 2-20

Ubicación de las coberturas vegetales mediante puntos



Paso 4: Con la información proveniente de la imagen satelital Sentinel-2A y los puntos georreferenciados de coberturas vegetales dentro de la microcuenca Paliza, se trabajó en el entorno de ArcGis 10.5 accediendo a la caja de herramientas *ArcToolbox*, dentro de *Spatial Analyst Tools*, en la sección *Multivariate*, donde se utilizó la herramienta *Create Signatures* para generar las firmas espectrales. Estas firmas espectrales representan las respuestas características de diferentes tipos de cobertura vegetal frente a distintas bandas del espectro electromagnético, lo que permite diferenciarlas en el análisis de imágenes.

Una vez obtenidas las firmas, se procedió a la clasificación supervisada de la imagen utilizando la herramienta *Maximum Likelihood*. Este método se basa en el algoritmo de Máxima Verosimilitud, el cual asume que las estadísticas de cada clase (espectros de cobertura) tienen una distribución normal multivariada, y asigna cada píxel a la clase con la mayor probabilidad estadística de pertenencia. Este enfoque es

ampliamente utilizado por su precisión en la diferenciación de coberturas con características espectrales similares.

Tabla 2-21

Valores del factor C

N°	Cobertura Vegetal	C
1	Cuerpos del agua	0.000
2	Bofedales	0.050
3	Matorrales y pastizales	0.220
4	Bosques, cultivos y pastizales	0.630
5	Pastoreo y cultivos	0.400
6	Pradera	0.090
7	Suelos desnudos	1.000

Nota: (Sabino et al., 2017)

2.7.3.6. Cálculo de prácticas de conservación del suelo (P)

Las prácticas de conservación de suelos fueron verificadas mediante el análisis de imágenes fotográficas obtenidas con dron. En estas imágenes se identificaron algunas prácticas de conservación, como zanjas de infiltración y cultivos en andenerías, principalmente ubicadas en la parte media y baja de la microcuenca. En contraste, en la parte alta no se observaron prácticas de manejo o conservación del suelo. En base a esta observación, se asignaron valores al factor P del modelo RUSLE: un valor de 1 para las áreas sin prácticas de conservación y un valor de 0.2 para las zonas donde se identificaron cultivos en andenerías (terrazas) y 0.4 zanjas de infiltración con una pendiente aproximada

Tabla 2-22

Valores del factor P dentro de la microcuenca Paliza

Pendiente %	Practicas	P
-------------	-----------	---

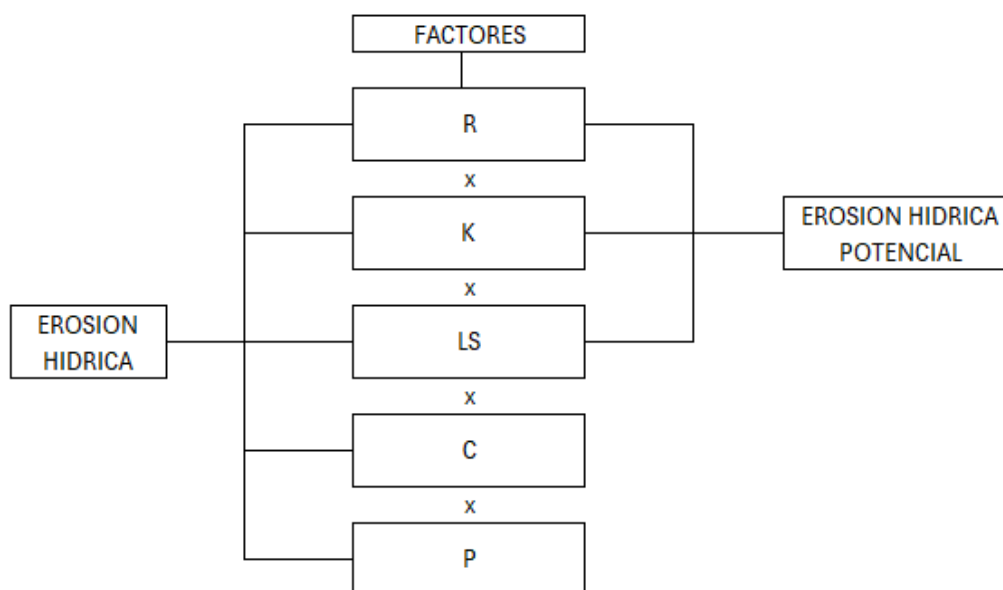
11.3 - 17.6	Zanja de infiltración	0.40
20.0 - 26.8	Cultivo terrazas (Andenerías)	0.20
-	Sin prácticas de conservación	1.00

2.7.3.7. Cálculo de la erosión hídrica potencial y real en la microcuenca

Para estimar la pérdida de suelo real se aplicó la ecuación RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), la cual se basa en la multiplicación de cinco factores clave: erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), topografía (LS), cobertura del suelo (C) y prácticas de conservación (P). mientras para la estimación de erosión hídrica potencial solamente se aplica los tres factores como: la erosividad (R), erodabilidad (K) y el factor LS de pendiente y longitud de terreno, cada uno de estos factores fue representado mediante mapas ráster y procesado en el entorno de ArcGis utilizando la herramienta **Raster Calculator**, ubicada en **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra**.

Figura 2-21

Criterios de cálculo de erosión hídrica potencial y real en la microcuenca



2.7.3.8. Generación de los mapas

En esta última etapa, con el apoyo del software ArcGis 10.5, se procedió a la generación de mapas temáticos correspondientes a cada uno de los factores que conforman el modelo RUSLE (R, K, LS, C y P), así como del resultado final de la ecuación, representado por el valor "A", que expresa la tasa de pérdida de suelo por erosión hídrica (t/ha·año). Para ello, se utilizaron herramientas del módulo Spatial Analyst, lo que permitió visualizar espacialmente la variabilidad de cada parámetro y facilitar la interpretación de las zonas con mayor susceptibilidad a la erosión dentro de la microcuenca.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

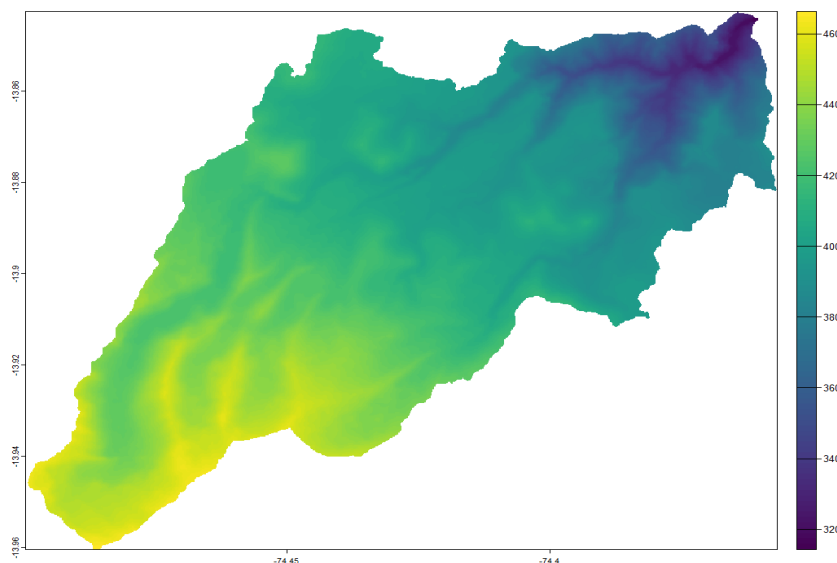
3.1. Resultados de la erosión hídrica con el modelo RUSLE

3.1.1. Delimitación de la microcuenca Paliza y cálculo de parámetros

La microcuenca Paliza se encuentra ubicada en la localidad de Santiago de Lucanamarca, perteneciente a la provincia de Huanca Sancos, en la región Ayacucho. Esta microcuenca forma parte de la unidad hidrográfica del Pampas, específicamente en la subcuenca del río Caracha, posee una extensión superficial de aproximadamente 98.48 km² y un perímetro de 55.83 km.

Figura 3-1

Delimitación de la microcuenca Paliza



Según la clasificación de las cuencas por tamaño, la microcuenca el estudio se considera como una microcuenca por tener un área de 98.48 km².

3.1.2. Análisis estadísticos, completación y cálculo del factor *R* observada

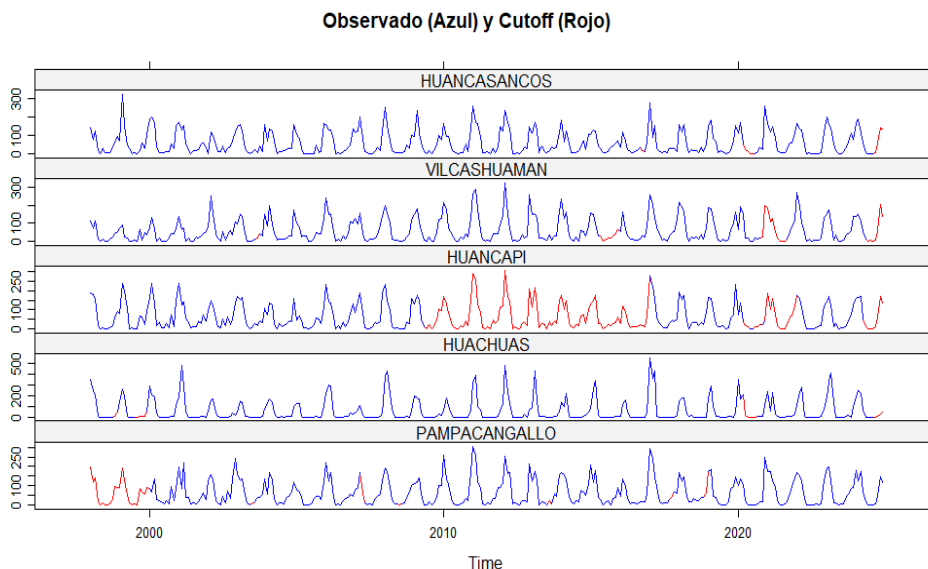
3.1.2.1. Resultado de completación y extensión de datos faltantes

Este proceso consistió en la completación y extensión de los datos históricos faltantes, aplicando la metodología de Cutoff en R studios, para ello se creó una

matriz de correlación con un umbral 0.70 y luego proceder con el cálculo de completación, cabe señalar que la metodología Cutoff es método de imputación también una herramienta de control de calidad previa, que mejora sustancialmente los resultados al eliminar el sesgo introducido por datos inadecuados en las estaciones de referencia. Combinado con regresión lineal o múltiple, ofrece una solución potente y más confiable.

Figura 3-2

Resultado de completación y extensión de datos faltantes



El gráfico precedente representa los datos completados (en rojo) y los datos originales (en azul). La alta concordancia visual entre ambas series sugiere una correlación significativa, lo cual evidencia la eficacia de la metodología de completación empleada mediante el algoritmo Cutoff.

3.1.2.2. Resultado del análisis estadístico de los datos históricos de lluvia

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los análisis de homogeneidad y consistencia realizados para cada estación pluviométrica. Con base en estos resultados, se puede afirmar que los datos analizados son en su mayoría confiables, dado que las estaciones que presentaron alguna inconsistencia fueron corregidas conforme a los procedimientos estadísticos establecidos. Esta validación

garantiza que los datos utilizados en el estudio poseen la calidad necesaria para el análisis hidrológico posterior.

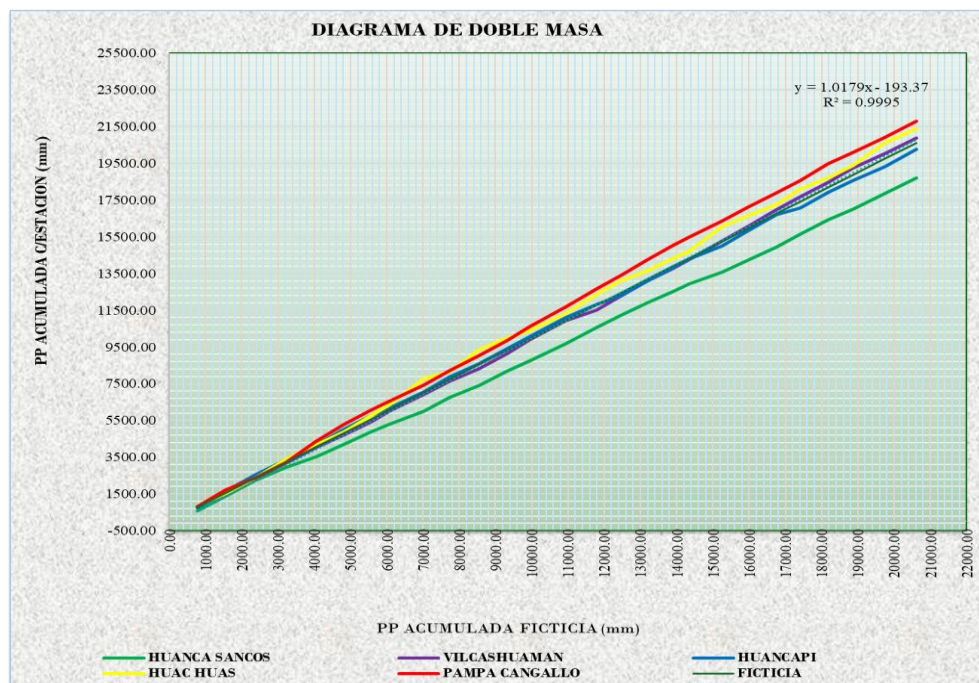
Tabla 3-1

Resultado de los análisis estadísticos y corrección de datos históricos

Estación	Longitud	Latitud	Altitud	Fuente	Prueba "T" de STUDENT	Prueba "F" de FISHER
HUANCA SANCOS	74°20'1"W	13°55'1"S	3440	SENAMHI	Homogéneo	Consistente
VILCASHUAMAN	73°57'8.6"W	13°40'7.7"S	3518	SENAMHI	Homogéneo	Consistente
HUANCAPI	74°4'5.2"W	13°44'56.4"S	3117	ANA	Homogéneo	Consistente
HUAC HUAS	74°20'1"W	13°55'1"S	3180	SENAMHI	Homogéneo	Consistente
PAMPA CANGALLO	74°11'37"W	13°34'09"S	3315	OPEMAN	Homogéneo	Consistente

Figura 3-3

Diagrama de doble masa



La figura anterior presenta el análisis de doble masa aplicado a las estaciones en estudio. Los resultados evidencian la ausencia de quiebres significativos en las

curvas, lo cual sugiere una alta consistencia interna de los datos y, por ende, un nivel aceptable de confiabilidad en los registros analizados.

3.1.2.3. Resultado del cálculo del factor $R_{\text{observada}}$

El factor $R_{\text{observada}}$ fue calculado con los datos históricos completadas y debidamente corregidas, para ello se utilizó la ecuación (2), en el cuadro siguiente muestra el resultado de los valores del factor R mensual y anual.

Tabla 3-2

Resultado del factor R de erosividad observada

ESTACIÓN	REGISTROS DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA MEDIA MENSUAL Y ANUAL (MJ.mm/ha.h.año)												R _{anual}	
	ALTITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV		DIC
HUANCA SANCOS	3440	340.12	323.00	170.97	16.05	0.34	0.11	0.28	0.11	1.47	6.03	16.48	193.43	1068.41
VILCASHUAMAN	3518	399.19	359.07	146.90	5.06	0.63	0.07	0.46	0.55	6.93	5.63	37.72	155.71	1117.92
HUANCAPI	3117	304.01	327.26	183.77	10.65	0.63	0.24	0.55	0.88	4.28	7.39	18.39	147.86	1005.91
HUAC HUAS	3180	817.33	1547.18	931.66	11.34	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.06	0.78	38.83	3347.22
PAMPA CANGALLO	3315	382.56	292.15	227.65	16.81	0.36	0.06	0.36	0.44	4.79	11.75	30.76	206.56	1174.25
PROMEDIO		448.64	569.73	332.19	11.98	0.40	0.11	0.33	0.40	3.49	6.17	20.83	148.48	1542.74

En la tabla anterior 3.2 se aprecia los resultados de los valores del factor $R_{\text{observada}}$ anual la cual será usada para el respectivo ajuste de los valores de R_{virtual} (GPM).

3.1.3. Ajuste del factor R satelital con valores observados

a). Ajuste de los valores de R_{GPM} con $R_{\text{observadas}}$

Los valores del factor R_{GPM} obtenidos a partir de datos satelitales fueron descargados mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando scripts desarrollados en lenguaje de programación JavaScript. Estos datos fueron exportados en formato ráster y posteriormente convertidos a formato vectorial (shapefile) para su análisis espacial. Dado que las estaciones pluviométricas del SENAMHI se encuentran ubicadas dentro de las grillas del producto GPM las cuales poseen una resolución espacial de 10 km × 10 km, se procedió a ajustar los valores satelitales con los datos observados en dichas estaciones. Este ajuste se realizó

mediante la aplicación de regresión lineal simple, con el objetivo de mejorar la representatividad de los datos satelitales (factor R_GPM) en función de las estaciones pluviométricas (factor R_observada).

Tabla 3-3

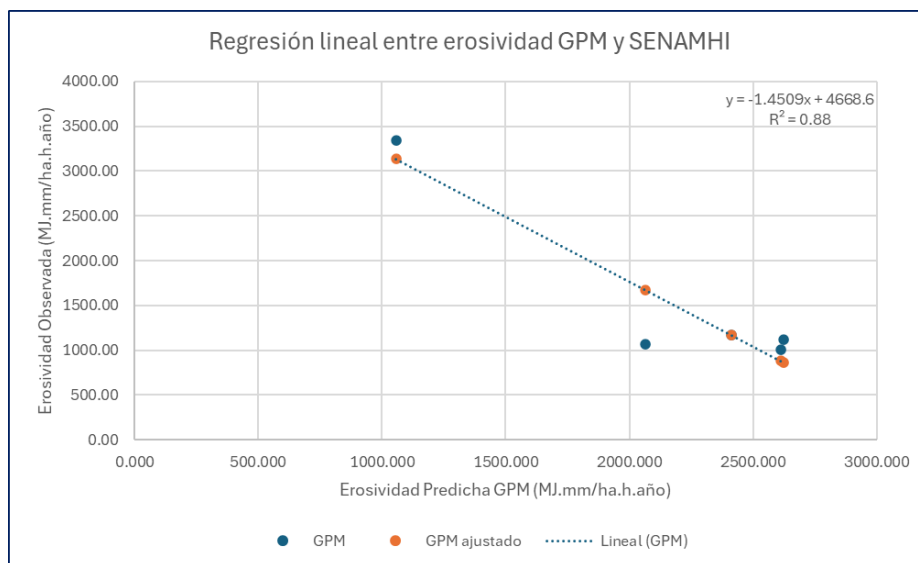
Resultado del ajuste del factor R de GPM con factor R observada

Estación	Altitud	Erosividad	Erosividad (pred)	Erosividad
		Observada	GPM	GPM ajustado
		MJ.mm/ (ha.h. año)	MJ.mm/(ha.h.año)	MJ.mm/(ha.h.año)
HUANCA SANCOS	3440	1 068,41	2 066,52	1 670,28
VILCASHUAMAN	3518	1 117,92	2 625,12	859,81
HUANCAPI	3117	1 005,91	2 611,50	879,57
HUAC HUAS	3180	3 347,22	1 057,31	3 134,51
PAMPA CANGALLO	3315	1 174,25	2 411,65	1 169,53

La tabla anterior presenta los valores del factor R_GPM ajustada, y cabe indicar que el ajuste se llevó a cabo con la ecuación de regresión lineal, esta misma metodología se aplicó para el ajuste de los demás valores del factor R_GPM que fueron descargados del GEE y convertidos en vectorial.

Figura 3-4

Resultado de ajuste de los valores de R (GPM) con valores de R (obs)



En la figura anterior se presentan los resultados del ajuste entre los valores de R virtual y los valores de R observado. Asimismo, se muestra la ecuación de regresión utilizada para el ajuste de los valores de R contenidos en el formato shapefile. Es importante destacar que el coeficiente de determinación (R^2) obtenido fue de 0.88. Este valor de $R^2 = 0.88$ indica que el 88% de la variabilidad de los valores observados de R puede ser explicada por el modelo de regresión aplicado, lo cual representa un ajuste significativo y aceptable en estudios hidrológicos. En otras palabras, existe una alta correlación entre los datos simulados y los observados, lo que respalda la validez del modelo empleado para ajustar y corregir los valores de R.

3.1.4. Resultados de los factores de RUSLE (R, K, LS, C y P).

3.1.4.1. Resultado del factor R_GPM ajustado

Tras ajustar adecuadamente los valores del factor R_GPM, se llevó a cabo la interpolación mediante el método geostatístico de Kriging, con una resolución espacial de 12,5 metros. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente figura.

Figura 3-5

Mapa del factor R de erosividad

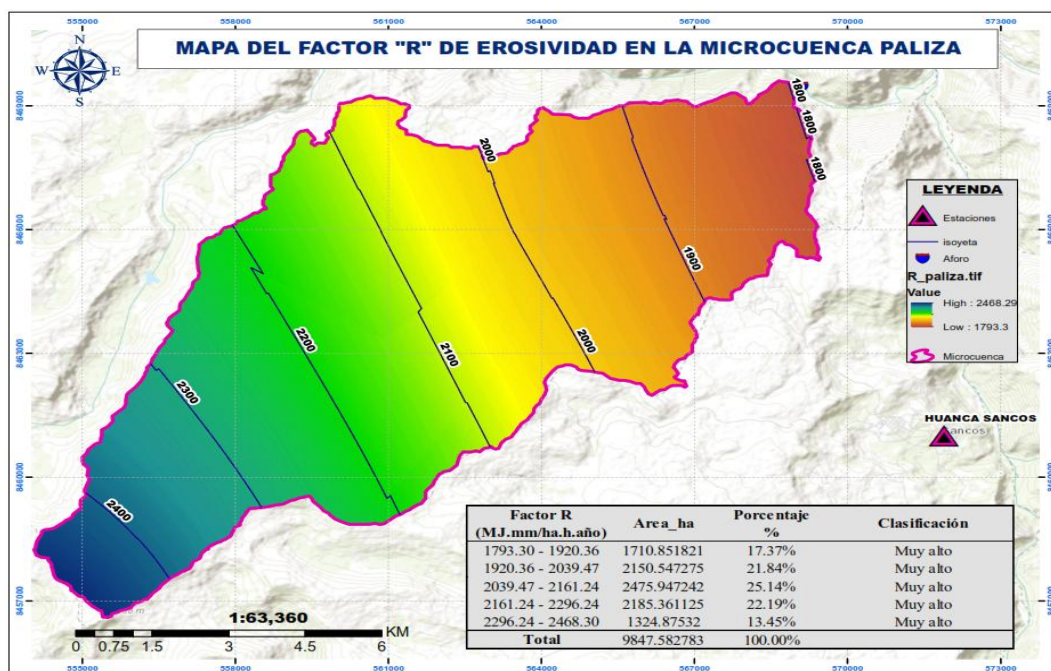


Tabla 3-4*Resultado de los valores de R anual según clasificación*

Factor R (MJ.mm/ha.h.año)	Área Ha	Porcentaje %	Clasificación
1 793.30 – 1 920.36	1 710.85	17.37%	Muy alto
1 920.36 – 2 039.47	2 150.55	21.84%	Muy alto
2 039.47 – 2 161.24	2 475.95	25.14%	Muy alto
2 161.24 – 2 296.24	2 185.36	22.19%	Muy alto
2 296.24 – 2 468.30	1 324.88	13.45%	Muy alto
Total	9 847.53	100.00%	

Análisis

En la tabla anterior se presentan los resultados del factor R, que mide la intensidad y frecuencia de la lluvia y su capacidad para generar erosión en la microcuenca. Este factor se clasifica en diferentes rangos de precipitación (MJ-mm/ha-h-año), y refleja la potencialidad erosiva derivada de la acción de las lluvias. En general, el 100% del área presenta un factor R muy alto, lo que implica que la cuenca está expuesta a una erosión significativa debido a la precipitación, particularmente en los sectores con valores más altos. Este análisis resalta la necesidad de manejar y proteger el suelo en áreas con factor R alto, ya que presentan mayor riesgo de pérdida de suelo por erosión hídrica.

3.1.4.2. Resultado del factor K de erodabilidad

Una vez ajustados los datos de SoilGrids con los valores obtenidos mediante muestreo en campo, se procedió a la rasterización de las propiedades del suelo (limo, arcilla, arena y carbono orgánico). Para ello, se aplicó la metodología de Kriging, disponible en la caja de herramientas de ArcGIS (ArcToolbox), específicamente en el módulo *Spatial Analyst Tools*, dentro de la opción *Interpolation > Kriging*, utilizando

una resolución espacial de 12.5 metros, y por último aplicando el método de Williams para el cálculo de K.

Tabla 3-5

Resultado de los valores de K dentro de la microcuenca Paliza

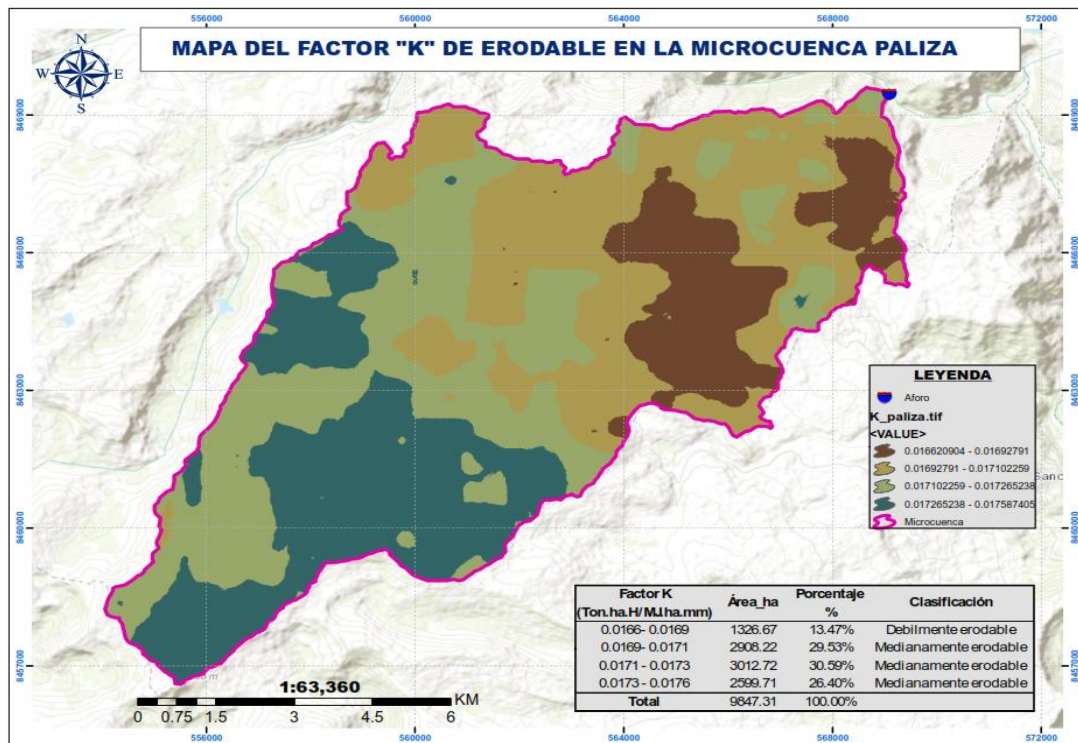
Factor K (t. ha.H/MJ.ha.mm)	Área Ha	Porcentaje %	Clasificación
0.0166- 0.0169	1 326.67	13,47%	Débilmente erodable
0.0169- 0.0171	2 908.22	29,53%	Medianamente erodable
0.0171 - 0.0173	3 012.72	30,59%	Medianamente erodable
0.0173 - 0.0176	2 599.71	26,40%	Medianamente erodable
Total	9 847.31	100,00%	

Análisis

En la tabla anterior se muestran los resultados del factor K, que representa la erodabilidad del suelo según la intensidad de la precipitación y otras características del terreno. Este factor es esencial para evaluar la susceptibilidad a la erosión de los suelos en la microcuenca. El 13.47 % del área presenta factores K débilmente erodable (con valores 0.0166 – 0.0169 T. ha.H/MJ.ha.mm), lo que indica que la menor parte del terreno es débilmente erodable. Las categorías con valores de K entre 0.0171 a 0.0176 t. ha.h/MJ.ha.mm son las más representativas, abarcando el 86.52% del área, que forma un terreno medianamente erodable.

Figura 3-6

Mapa de factor K de erodabilidad



3.1.4.3. Resultado del factor LS (longitud y pendiente)

Para la microcuenca Paliza, de acuerdo a los resultados se hizo una clasificación según los grupos de pendientes.

Tabla 3-6

Resultado de los valores de LS en el área de la microcuenca

Grupo	Área	porcentaje	factor LS
De pendientes en %	Ha	%	
0 - 0.91	4 965.42	50.42%	0.3
0.91 - 2.21	2 556.99	25.96%	0.3
2.21 - 3.97	1 426.89	14.49%	0.3
3.97 - 6.51	752.99	7.65%	0.3
6.51 - 16.58	145.72	1.48%	3.4
Total	9 848,005	100.00%	

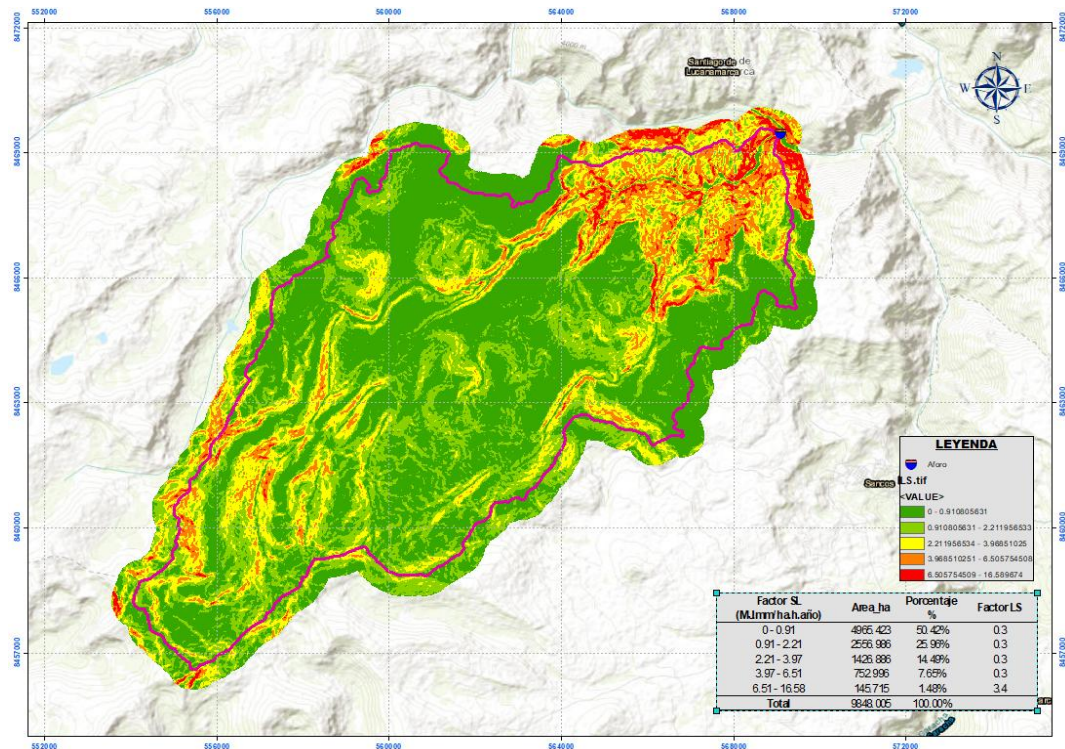
Análisis

En la tabla anterior se presentan los resultados del análisis de pendiente clasificados por rangos, junto con el respectivo valor del factor LS, componente clave en la estimación de la pérdida de suelo. Se observa que la mayor parte del área de la microcuenca específicamente el 90.87% corresponde a pendientes suaves, con valores menores al 3.97% asociadas a un factor LS de 0.3, estas zonas, por lo general, presentan menor susceptibilidad a la erosión por escorrentía superficial.

En contraste, solo el 1.48% del área presenta pendientes más pronunciadas, mayores al 6.51%, con un factor LS elevado de 3.4, lo cual indica una mayor capacidad erosiva. Este comportamiento puede observarse claramente en la Figura 3.7, donde se visualiza que las pendientes más abruptas se concentran en la parte baja de la microcuenca, mientras que la cabecera y la zona media presentan una topografía suave y ondulada.

Figura 3-7

Mapa del factor LS de longitud y pendiente



3.1.4.4. Resultados del factor C (cobertura vegetal)

La clasificación de las coberturas vegetales se obtuvo a partir de imágenes satelitales del sensor Sentinel 2A, aplicando una metodología de clasificación supervisada. Los resultados de este proceso se detallan en el cuadro siguiente.

Tabla 3-7

Resultado de los valores de C en el área de la microcuenca Paliza

Descripción	Área	Porcentaje	Factor C
Cobertura Vegetal	ha	%	
Cuerpos del agua	5.13	0.05%	0.000
Bofedales	3 112.49	31.61%	0.050
Matorrales y pastizales	2 489.21	25.28%	0.220
Bosques, cultivos y pastizales	840.66	8.54%	0.630
Pastoreo y cultivos	161.36	1.64%	0.400
Pradera	3 230.98	32.81%	0.090
Suelos desnudos	7.03	0.07%	1.000
Total	9 846.86	100,00%	

Análisis

En la Tabla 3.7 se presentan las diferentes categorías de cobertura vegetal en la microcuenca, incluyendo su respectiva superficie (en hectáreas), porcentaje de cobertura y el valor del factor C, que representa el efecto de la vegetación sobre la erosión del suelo.

Se observa que las praderas constituyen la categoría más extensa, con una cobertura del 32.81% y un valor de $C = 0.09$, lo que refleja una buena protección contra la erosión. Le siguen los bofedales, con 31.61% del área y un factor C de 0.05, y los matorrales y pastizales, que cubren el 25.28%, con un $C = 0.22$, indicando una protección moderada.

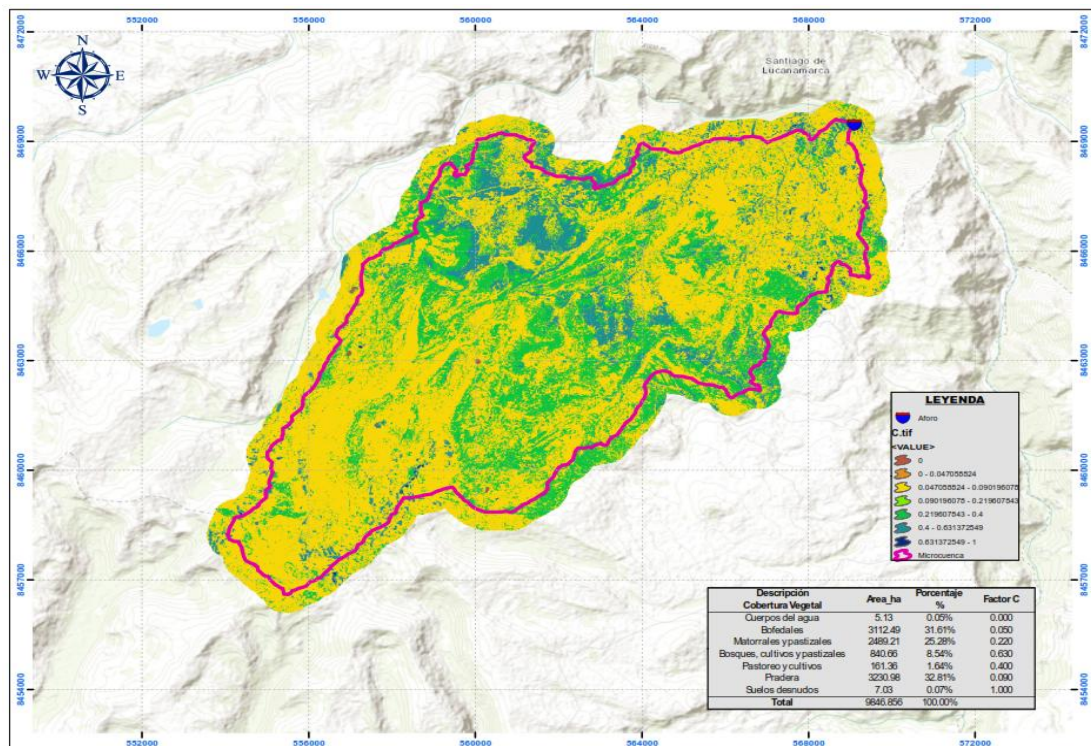
En contraste, las zonas con mayor vulnerabilidad a la erosión son los suelos desnudos, aunque ocupan solo el 0.07% del área, presentan un factor C máximo de 1.00, lo que indica ausencia total de cobertura protectora. Asimismo, la categoría de bosques, cultivos y pastizales, con 8.54% del total y un $C = 0.63$, refleja una situación de riesgo elevado de pérdida de suelo.

Las áreas destinadas a pastoreo y cultivos abarcan el 1.64% del territorio, con un valor de $C = 0.40$, mientras que los cuerpos de agua, al no participar en procesos erosivos, tienen un valor de $C = 0.00$ y cubren el 0.05% del área.

Este análisis evidencia que, si bien una buena parte del territorio presenta coberturas que ayudan a mitigar la erosión, existen áreas específicas, como los suelos desnudos y las zonas con cobertura vegetal degradada o intervenida, que requieren ser priorizadas para la implementación de prácticas de conservación y restauración.

Figura 3-8

Mapa del factor C (cobertura Vegetal)



3.1.4.5. Resultado del factor P

En la microcuenca Paliza se detectaron a menos dos tipos de prácticas de conservación de los suelos y estos son: Zanjas de infiltración, cultivos en andenerías, a continuación, se muestra los resultados obtenidos del valor P.

Tabla 3-8

Resultado de los valores de P en el área de la microcuenca

Prácticas de conservación	Área Ha	porcentaje %	factor P
Zanjas de infiltración	230.94	2.35%	0.4
Cultivo en andenerías (Terrazas)	75.770	0.77%	0.2
Sin prácticas de conservación	9 540.15	96.89%	1.00
Total	9 846.86	100.00%	

Análisis

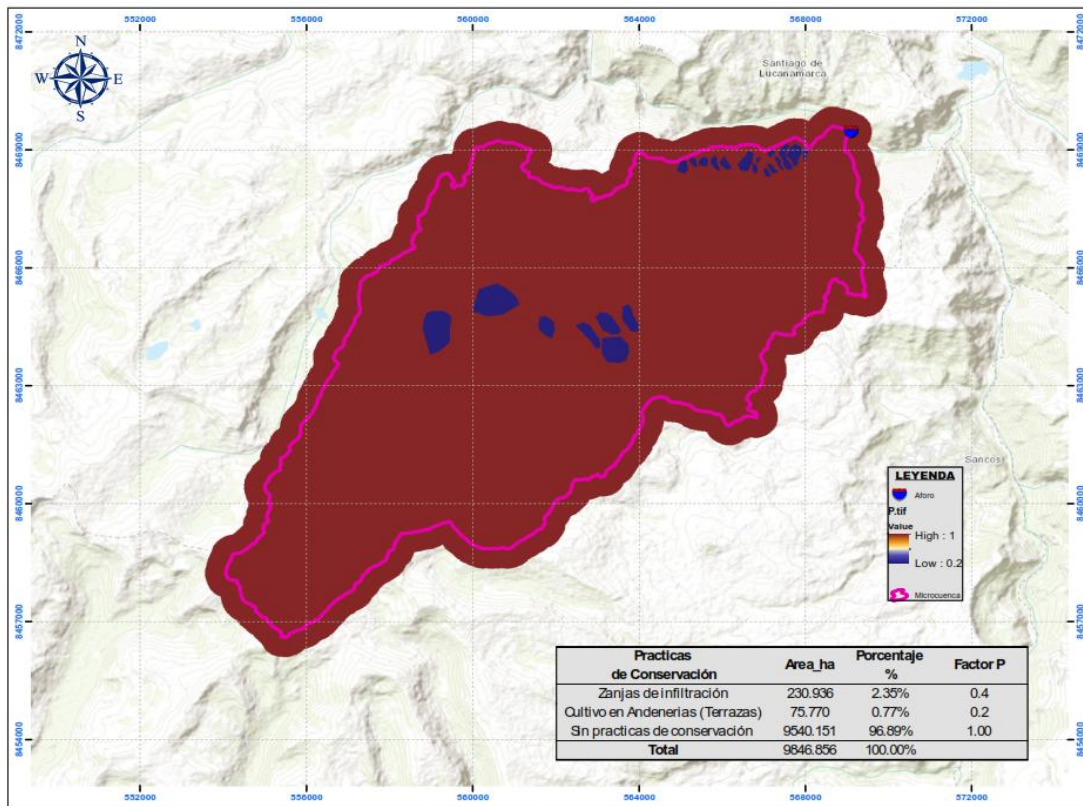
En la tabla anterior se presenta el análisis de las prácticas de conservación aplicadas en la microcuenca, junto con las áreas correspondientes y sus factores P. El factor P refleja la eficacia de las prácticas de conservación para reducir la erosión del suelo.

Se observa dos tipos de prácticas de conservación del suelo, uno de ellos son las zanjas de infiltración y la segunda es cultivos en andenerías, con factores P de 0.40 y 0.2 lo que indica una efectiva reducción de la erosión en esas zonas. Sin embargo, la gran mayoría del área, 96.89%, no cuenta con ninguna práctica de conservación, presentando un factor P de 1.00, lo que implica una alta vulnerabilidad a la erosión.

Este análisis subraya la importancia de expandir y aplicar prácticas de conservación a lo largo de la microcuenca para mitigar la erosión, especialmente en las áreas más susceptibles.

Figura 3-9

Mapa del factor P (prácticas de conservación)



3.1.5. Resultados de erosión hídrica potencial y real en la microcuenca

a). - Erosión hídrica potencial

La erosión hídrica potencial fue estimada siguiendo la metodología propuesta por la FAO (2019), identificándose zonas con diferentes niveles de susceptibilidad a la erosión. Esta estimación considera como factores principales la longitud y el gradiente de la pendiente, la intensidad de la precipitación y el tipo de suelo.

Tabla 3-9

Resultado de la estimación de erosión potencial del suelo

Erosión Potencial Actual (t/ha/año)	Área Ha	Porcentaje %	Tipo de Erosión
0 – 18.88	3 463.75	35.17%	Ligera
18.88 – 44.05	2 499.95	25.39%	Moderada
44.05 – 71.32	1 457.12	14.80%	Alta
71.32 – 100.68	959.11	9.74%	Alta

100.68 – 130.05	680.60	6.91%	Alta
130.05 – 161.51	431.43	4.38%	Alta
161.51 – 197.17	219.21	2.23%	Alta
197.17 – 241.21	98.20	1.00%	Alta
241.21 – 308.33	32.91	0.33%	Alta
308.33 – 534.86	5.72	0.06%	Muy severa
Total	9 848.01	100.00%	

Análisis

La tabla muestra la distribución espacial de la erosión potencial en la microcuenca, expresada en toneladas por hectárea por año (t/ha/año), lo cual permite evaluar el grado de susceptibilidad del terreno a la pérdida de suelo en ausencia de medidas de conservación.

Se observa que la mayor proporción del área corresponde a niveles de erosión ligera, comprendiendo el rango de 0 a 18.88 t/ha/año, que abarca una superficie de 3 463.75 ha, equivalente al 35.17% del total. Le sigue la categoría de erosión moderada (18.88 a 44.05 t/ha/año), que representa 2 499.95 ha, es decir, 25.39% del área de estudio. En conjunto, estas dos clases (ligera y moderada) comprenden aproximadamente 60.56% de la microcuenca, indicando condiciones relativamente estables en más de la mitad del territorio.

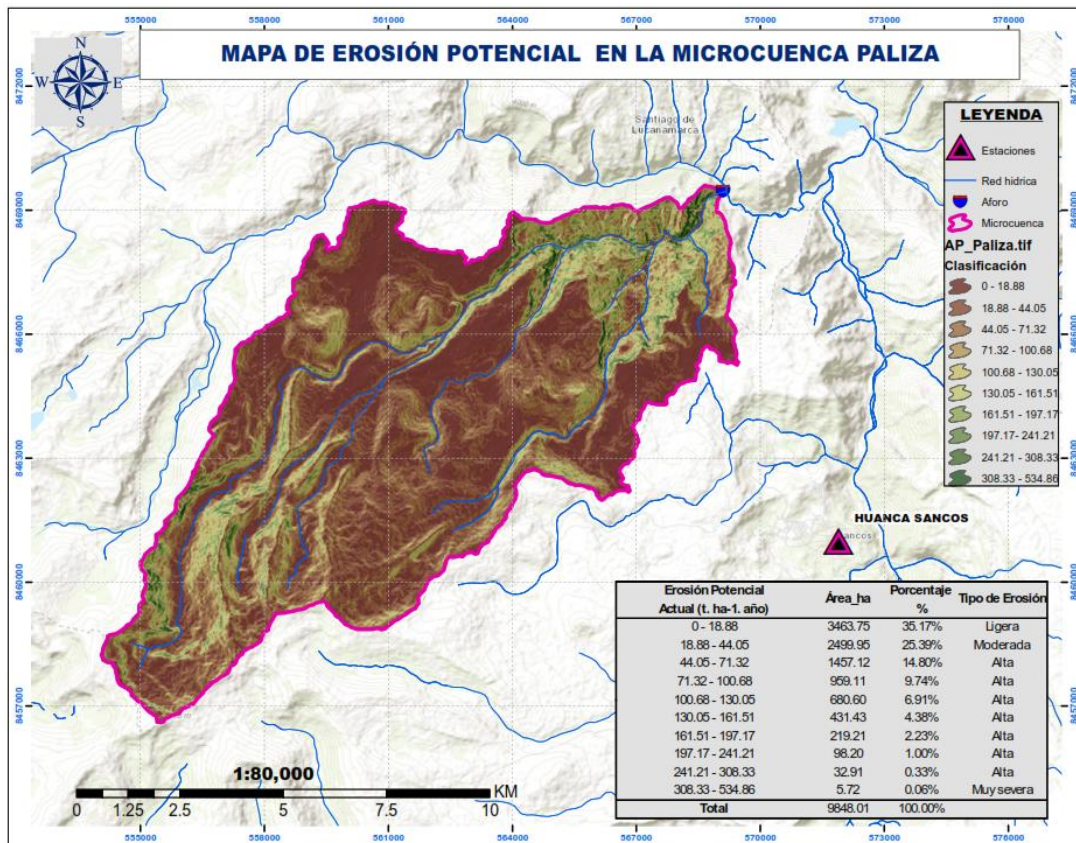
Sin embargo, un 39.39% del área restante se encuentra bajo condiciones de erosión alta (más de 44.05 hasta 308.33 t/ha/año), distribuida en siete rangos sucesivos. Esta fracción representa zonas con alta vulnerabilidad a la degradación, posiblemente asociadas a pendientes pronunciadas, escasa cobertura vegetal o actividades agrícolas intensivas. Destacan dentro de este grupo las áreas con tasas entre 44.05 y 130.05 t/ha/año, que en conjunto suman más de 3 000 ha, lo que sugiere la necesidad de intervención prioritaria.

Finalmente, un grupo muy reducido de áreas 5.72 ha (0.06%) presenta valores de erosión muy severa, superando los 308.33 t/ha/año. Aunque su extensión

es mínima, estas zonas son críticas por el alto riesgo de pérdida irreversible del suelo, especialmente si coinciden con uso agropecuario sin manejo adecuado.

Figura 3-10

Mapa de erosión hídrica potencial en la microcuenca Paliza



b). - Erosión hídrica real

La erosión hídrica real fue clasificada con base en los rangos establecidos en la tabla adoptada de la FAO (2019), lo que permitió identificar las zonas con mayor y menor susceptibilidad a la erosión real. Para esta estimación se utilizó el modelo RUSLE, considerando los parámetros necesarios: el factor de erosividad de la lluvia (R), el factor de erodabilidad del suelo (K), la longitud y pendiente del terreno (LS), el factor de cobertura vegetal (C) y el factor de prácticas de conservación (P).

Tabla 3-10*Resultado de la estimación de erosión real del suelo*

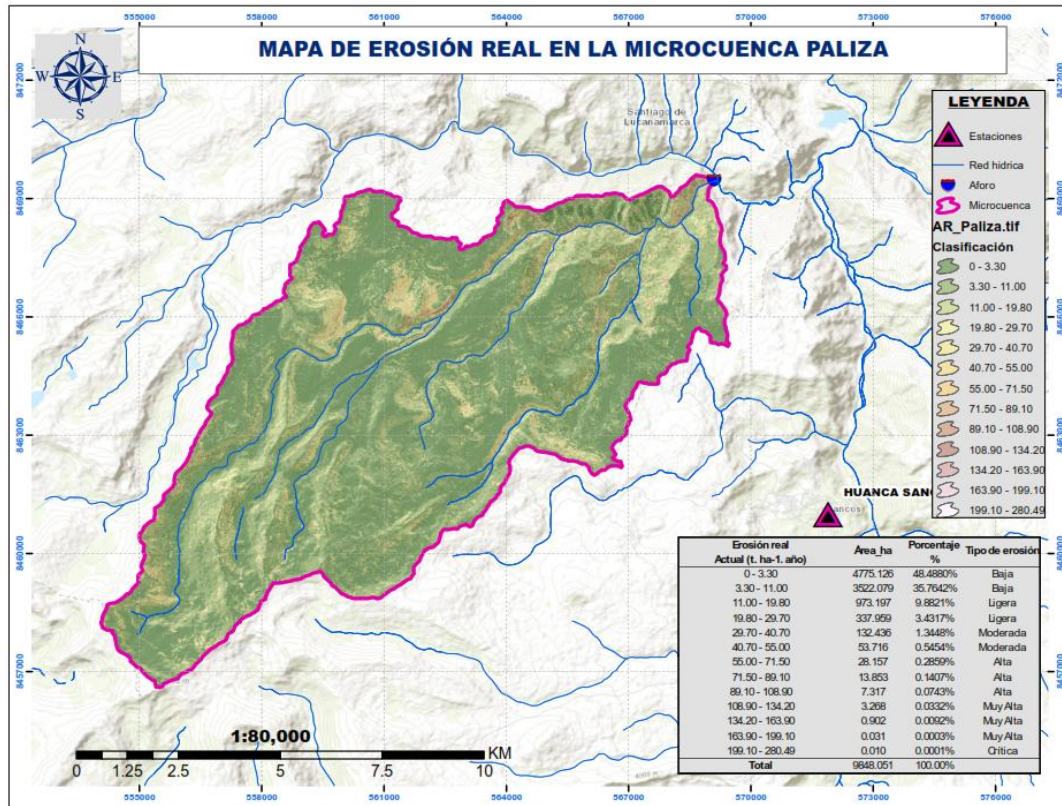
Erosión real Actual (t/ha/año)	Área Ha	Porcentaje %	Tipo de erosión
0 – 3.30	4 775.13	48.4880%	Baja
3.30 – 11.00	3 522.08	35.7642%	Baja
11.00 – 19.80	973.20	9.8821%	Ligera
19.80 – 29.70	337.96	3.4317%	Ligera
29.70 – 40.70	132.44	1.3448%	Moderada
40.70 – 55.00	53.72	0.5454%	Moderada
55.00 – 71.50	28.16	0.2859%	Alta
71.50 – 89.10	13.85	0.1407%	Alta
89.10 – 108.90	7.32	0.0743%	Alta
108.90 – 134.20	3.27	0.0332%	Muy Alta
134.20 – 163.90	0.90	0.0092%	Muy Alta
163.90 – 199.10	0.031	0.0003%	Muy Alta
199.10 – 280.49	0.010	0.0001%	Crítica
Total	9 848.051	100.00%	

Análisis

La tabla muestra la distribución espacial de la erosión real en la microcuenca, expresada en toneladas por hectárea por año (t/ha/año), lo que permite evaluar la pérdida de suelo según el uso actual del territorio. La mayor parte del área (84.25 %, equivalente a 8 297.21 ha) presenta erosión baja (0 – 11.00), indicando buena estabilidad edáfica. Un 13.31 % (1 311.16 ha) corresponde a erosión ligera (11.00 – 29.70), con signos iniciales de degradación. Las áreas con erosión moderada (29.70 – 71.50) representan el 1.89 % (186.15 ha) y requieren medidas preventivas. Finalmente, los sectores con erosión alta a crítica (>71.50) abarcan solo el 0.50 % (49.33 ha), pero concentran el mayor riesgo de pérdida irreversible de suelo, siendo prioritarios para la intervención. En conjunto, el 98 % del territorio presenta niveles de erosión bajos a ligeros, lo que facilita la focalización de medidas en zonas críticas sin descuidar el monitoreo general.

Figura 3-11

Mapa de erosión hídrica real en la microcuenca Paliza



3.1.6. Generación de los mapas temáticos de acuerdo a los resultados

Después de obtener los valores para cada uno de los factores que componen la ecuación RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), se procedió a la generación de mapas temáticos para cada uno de estos factores, así como para el área de erosión hídrica de los suelos. Los factores de la ecuación RUSLE, tales como el factor R (precipitación), el factor K (erodabilidad del suelo), el factor LS (pendiente), el factor C (cobertura vegetal) y el factor P (prácticas de conservación) fueron mapeados a través de una serie de análisis espaciales, lo que permitió visualizar de manera detallada la distribución de la erosión hídrica en la microcuenca.

El proceso de mapeo facilitó la identificación de áreas vulnerables y protegidas, permitiendo una mejor planificación y gestión de recursos naturales. Estos mapas temáticos también brindan una representación clara de cómo cada

factor contribuye a la erosión en distintas zonas del territorio, lo cual es fundamental para la toma de decisiones sobre las prácticas de conservación del suelo.

3.2. Discusión de los resultados

La geomorfología de la microcuenca Paliza presenta una configuración alargada, con pendientes variables a lo largo de su extensión. En la zona alta y media predominan pendientes suaves, mientras que en la parte baja se evidencian pendientes pronunciadas, lo que influye en la dinámica del escurrimiento superficial. La microcuenca presenta un coeficiente de compacidad de 1.58 y una relación de elongación (R_e) de 0.59, valores que indican una forma alargada, propensa a una rápida concentración del escurrimiento y, por lo tanto, a una mayor susceptibilidad a procesos de erosión hídrica, especialmente en eventos de lluvia intensa. Estos resultados coinciden con lo señalado por Damián et al., (2017) en su estudio "Priorización de microcuencas en los Andes Ecuatorianos", donde se concluye que la forma de la cuenca y la pendiente del terreno son factores determinantes en los procesos erosivos, particularmente cuando se combinan con cambios en el uso del suelo. La interpretación conjunta de las características morfológicas y de las actividades antrópicas presentes en la microcuenca Paliza resalta la necesidad de implementar un manejo integral del territorio, orientado a la conservación de suelos y a la reducción del riesgo de degradación.

Los resultados obtenidos para el **factor R** en la microcuenca Paliza reflejan una elevada erosividad de las precipitaciones, con valores comprendidos entre 1793.30 y 2468.30 MJ·mm/ha·h·año. Esta situación pone en evidencia que la intensidad y energía de las lluvias juegan un papel determinante en los procesos de erosión hídrica que afectan a la zona. De acuerdo con Camargo et al., (2017), un alto grado de erosividad está estrechamente relacionado con la energía cinética que poseen las gotas de lluvia, lo que incrementa el impacto sobre el suelo, sobre todo

en regiones con eventos pluviales intensos. De manera similar Ñahui (2025), destaca que las áreas que registran mayores acumulaciones de lluvia a lo largo del año tienden a experimentar una mayor agresividad hídrica, lo que incrementa la pérdida de suelo cuando no existen medidas de protección adecuadas. En ese contexto, los valores elevados del factor R en la microcuenca Paliza justifican la necesidad de aplicar estrategias de conservación de suelos en zonas vulnerables, especialmente donde las pendientes son pronunciadas y la cobertura vegetal es limitada.

Respecto al **factor de erodabilidad K**, los valores obtenidos para la microcuenca en estudio oscilan entre 0.0166 y 0.0176 T·ha·h/MJ·ha·mm, lo que, según la clasificación propuesta por la USDA (1962), se ubica mayormente en la categoría de “Medianamente erodable”, con una pequeña proporción en la categoría “Débilmente erodable”. Este patrón de distribución indica una susceptibilidad moderada a la erosión hídrica, lo cual se relaciona directamente con las características físicas del suelo predominante.

Estos valores concuerdan con los reportados por Chipana (2022) en su estudio sobre la microcuenca Chumbao (Apurímac), donde los valores de K variaron entre 0.0170 y 0.0180 T·ha·h/MJ·ha·mm, siendo los suelos de textura franco-limosa los más representativos. El autor señaló que la estructura granular débil y el bajo contenido de materia orgánica influyen directamente en la vulnerabilidad del suelo a la erosión.

Del mismo modo, estudios como los de Camargo et al., (2017) y Piscitelli et al., (2010) respaldan que los suelos de textura fina (como los limosos o arcillosos) tienden a ser más erosionables debido a su menor permeabilidad y mayor escorrentía superficial, mientras que los suelos de textura gruesa (francos arenosos) presentan valores más bajos de K al permitir una mayor infiltración, lo que reduce el arrastre de partículas por lluvia. En el área evaluada, los valores más bajos de K se localizan en

sectores con suelos de mayor contenido arenoso, mientras que los valores más altos se concentran en zonas con suelos de textura intermedia y poca cobertura vegetal.

Este análisis subraya la importancia de considerar las características texturales y estructurales del suelo al momento de definir estrategias de conservación y manejo sostenible, especialmente en aquellas áreas donde el factor K refleja una vulnerabilidad mayor. La aplicación de prácticas como la reforestación, el establecimiento de barreras vivas y el manejo de coberturas permanentes se torna esencial para mitigar la erosión hídrica en zonas agrícolas y de pendiente moderada.

Respecto al **factor LS**, Los resultados muestran que el 90.87 % del área de la microcuenca presenta pendientes suaves ($< 3.97\%$), con valores bajos de factor LS (~ 0.3), lo que indica baja contribución de la topografía a la erosión. Estas condiciones favorecen la infiltración y reducen el transporte de sedimentos, como también observaron Arias-Muñoz et al., (2023) en Ecuador y Joyo (2018) en Ayacucho, donde zonas con $LS < 0.5$ mostraron menores tasas de erosión.

En contraste, solo el 1,48 % del área presenta pendientes fuertes ($> 6.51\%$) y LS de hasta 3.4, asociadas a mayor vulnerabilidad erosiva. Estudios como los de Ñahui (2024) y Gamboa (2023) también reportan que pendientes superiores al 10 % y laderas extensas incrementan notablemente el factor LS, especialmente en terrenos agrícolas o sin cobertura vegetal adecuada.

Esta evidencia subraya la necesidad de aplicar medidas diferenciadas según la pendiente, priorizando prácticas estructurales (terrazas, zanjas, cercos vivos) en zonas de alta pendiente, y estrategias conservacionistas en áreas con topografía suave.

Respecto al **factor C**, revela que la mayor parte de la microcuenca presenta coberturas vegetales protectoras, como praderas (32.81 %, $C = 0.090$) y bofedales (31.61 %, $C = 0.050$), lo que indica baja vulnerabilidad a la erosión. Este patrón

coincide con Ñahui (2024) en la cuenca Chonta, quien reportó valores bajos de C en coberturas herbáceas altoandinas.

Los matorrales y pastizales (25.28 %, C = 0.220) ofrecen una protección intermedia, afectada por el pastoreo y la densidad vegetal, similar a lo descrito por Gamboa (2023) en zonas semidegradadas del río Tumbes.

En contraste, los suelos desnudos (0.07 %, C = 1.00) y áreas agrícolas degradadas (1.64 %, C = 0.40) presentan la máxima susceptibilidad a la erosión, situación también observada por Joyo (2018) en su estudio en Pampa Cangallo, donde la falta de cobertura vegetal elevó significativamente la pérdida de suelo.

Estos resultados destacan la necesidad de priorizar la restauración de coberturas degradadas, promoviendo prácticas como revegetación, rotación de cultivos y barreras vivas, especialmente en zonas de uso agrícola intensivo o con pendientes marcadas.

Del análisis del **factor P** evidencia que el 96.89 % del área no cuenta con prácticas de conservación, manteniendo un valor de P = 1.00, lo que refleja una alta vulnerabilidad a la erosión hídrica, especialmente en zonas de pendiente y cobertura vegetal degradada.

Solo una pequeña parte del territorio aplica medidas efectivas, como zanjas de infiltración (P = 0.40) y cultivos en andenes (P = 0.20), que han demostrado ser útiles para reducir la escorrentía, como también lo reportan Joyo (2018) en Pampa Cangallo y Ñahui (2024) en la cuenca Chonta.

De forma similar, Gamboa (2023) halló que los terrenos sin manejo adecuado mantenían P = 1.00 mientras que las prácticas conservacionistas podían reducir la erosión en más del 50 %.

Estos resultados subrayan la necesidad de expandir prácticas como terrazas, zanjas o barreras vivas, especialmente en zonas agrícolas y con pendiente, para mitigar la erosión y mejorar la sostenibilidad del uso del suelo.

Del análisis de la **erosión potencial** se revela que la microcuenca presenta predominantemente una baja susceptibilidad a la pérdida de suelo, con el 60.56 % del área (5 963.70 ha) registrando valores inferiores a 44.05 t/ha/año, los cuales incluyen los rangos clasificados como “Ligera” (0 – 18.88 t/ha/año) y “Moderada” (18.88 – 44.05 t/ha/año). Aunque estos valores superan el umbral de tolerancia recomendado por la FAO (2019), que se sitúa en torno a 5.75 t/ha/año, siguen considerándose relativamente manejables bajo condiciones biofísicas favorables como pendientes suaves y cobertura vegetal densa.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Ñahui (2024) en la cuenca Chonta y por Joyo (2018) en Pampa Cangallo, donde también se observó baja erosión en áreas con vegetación natural y pastoreo extensivo, lo cual contribuye eficazmente a la protección del suelo frente a procesos erosivos.

No obstante, un 39.38 % del territorio (3 884.00 ha) se encuentra bajo la categoría de erosión “Alta”, con valores que oscilan entre 44.05 y 308.33 t/ha/año, lo cual evidencia una situación preocupante en sectores de pendientes pronunciadas, cobertura vegetal degradada y prácticas agrícolas inapropiadas. Según Gamboa (2023), este tipo de condiciones incrementa significativamente el riesgo de erosión, especialmente en áreas sin manejo conservacionista. En adición, un pequeño pero importante 0.06 % del área (5.72 ha) presenta erosión “Muy severa” (>308.33 t/ha/año), lo cual demanda intervención urgente, ya que en estos sectores la pérdida de suelo puede volverse irreversible.

El uso del modelo RUSLE y el análisis espacial asociado permite identificar y priorizar estas zonas vulnerables, facilitando la planificación e implementación de prácticas estructurales (como terrazas, zanjas de infiltración) y biológicas (como barreras vivas, revegetación o reforestación) orientadas a mitigar la erosión y conservar los recursos edáficos en la microcuenca.

Del análisis de la **erosión real** en la microcuenca se observa una clara predominancia de niveles bajos de pérdida de suelo. En conjunto, las categorías “Baja” (0 - 11.00 t/ha/año) abarcan el 84.25 % del territorio (8 297.2 ha), lo cual evidencia que la mayoría del área presenta condiciones edáficas y de cobertura vegetal que limitan la erosión. Estos valores se encuentran por debajo del umbral de tolerancia establecido por la FAO (2019), que considera pérdidas menores a 5.75 t/ha/año como sostenibles a largo plazo. Esta situación sugiere un paisaje con predominancia de pendientes suaves, cobertura natural o sistemas de uso del suelo con bajo impacto erosivo.

Hallazgos similares fueron reportados por Ñahui (2024) en la cuenca Chonta y Joyo (2018) en Pampa Cangallo, donde se determinó que áreas cubiertas por vegetación natural o pasturas extensivas presentan menores tasas de erosión, debido a la capacidad de estas coberturas para reducir la energía de impacto de las gotas de lluvia y limitar la escorrentía superficial.

En contraste, un 13.31 % del área (1 443.6 ha) se encuentra bajo las categorías “Ligera” a “Moderada” (11.00 - 55.00 t/ha/año), indicando procesos erosivos activos, pero aún manejables, especialmente en zonas con disturbios en la cobertura vegetal o uso agrícola intensivo sin prácticas conservacionistas. Según Gamboa (2023), este tipo de degradación puede agravarse rápidamente si no se implementan medidas correctivas.

Adicionalmente, un 2.43 % del territorio (239.20 ha) muestra niveles de erosión “Alta” a “Crítica” (>55.00 t/ha/año), representando zonas de degradación severa donde la pérdida de suelo puede ser irreversible si no se actúa con prontitud. En estas áreas, es urgente aplicar estrategias integradas de manejo del suelo, como terrazas, zanjas de infiltración, barreras vivas o reforestación, para reducir la escorrentía y recuperar la estabilidad edáfica.

El modelo RUSLE, en combinación con el análisis espacial, ha permitido identificar con precisión estas zonas vulnerables, lo cual facilita la priorización de intervenciones para garantizar la sostenibilidad de los recursos edáficos y prevenir procesos avanzados de degradación.

CONCLUSIONES

1. Se logró estimar la erosión hídrica en la microcuenca Paliza, aplicando el modelo RUSLE con datos de precipitación del satélite GPM, lo que permitió una evaluación especialmente detallada de la pérdida de suelo en el año 2024. La integración de información satelital, datos de campo y herramientas SIG permitió una estimación confiable de la erosión potencial y real, proporcionando insumos valiosos para la gestión del recurso suelo.
2. Se obtuvieron los valores del factor de erosividad R mediante la ecuación (2) aplicando a los datos mensuales de precipitación del producto GPM. Estos valores fueron ajustados con datos observados de SENAMHI mediante una ecuación de regresión lineal, mejorando la precisión del factor R estimado en cada celda de análisis.
3. Se determinaron los parámetros de la ecuación RUSLE para estimar la erosión hídrica. El factor R de erosividad fue calculado por la ecuación propuesta por Wischmeier & Smith (1978), obteniéndose valores en el rango de 1793.30 a 2468.30 MJ.mm/ha.h.año año, lo cual corresponde a una clasificación de erosividad muy alta.

Para el cálculo del factor de erodabilidad del suelo (K), se realizó una juste de los datos obtenidos de SoilGrids utilizando datos muestreados en campo. Esta corrección se llevó a cabo mediante la determinación de un coeficiente de corrección, así como del error absoluto y relativo. Como resultado, se ajustaron los datos de SoilGrids, identificando que, en la mayor parte del área de estudio, los suelos presentan una moderada susceptibilidad a la erosión, con valores de K que varían entre 0.0116 y 0.0176 T·ha·H/MJ·ha·mm.

En cuanto al factor topográfico LS, se determinó que la mayor parte del área presenta pendientes suaves, con un valor promedio de LS de 0.3. Sin

embargo, en la parte baja de la microcuenca se identificaron pendientes pronunciadas, entre 6% y 16%, alcanzando un valor de LS de hasta 3.4.

El factor C de cobertura vegetal fue calculado a partir de una clasificación supervisada de imagen satelital Sentinel 2A, identificando valores de factor C en rangos de (0 - 1), cabe señalar los valores de 0 son cuerpos de agua y los valores de 1 suelos desnudos.

Finalmente, el factor P, correspondiente a las prácticas de conservación, fue estimado con base en observaciones de campo. En la parte media de la microcuenca se identificaron siete zonas con implementación de zanjas de infiltración, a las cuales se asignó un valor de $P = 0.40$. Asimismo, en la parte baja de la microcuenca se registraron prácticas de conservación asociadas al uso de terrazas o andenerías, que abarcan el 0.77 % del área total de la microcuenca Paliza, para las cuales se utilizó un valor de $P = 0.20$. En el resto del territorio, donde no se observaron prácticas de conservación del suelo, se aplicó un valor de $P = 1$.

4. La estimación de la erosión hídrica potencial y real en la microcuenca Paliza se realizó aplicando la metodología RUSLE. Obteniendo los resultados como, la erosión hídrica potencial promedio es de 49.92 t/ha/año, lo que corresponde a un nivel de erosión potencial moderada. Por otro lado, la erosión hídrica real promedio es de 6.88 t/ha/año, lo cual se clasifica como erosión ligera.
5. Se elaboraron mapas temáticos de los factores de RUSLE y de la pérdida de suelo, empleando la clasificación FAO. Estos mapas permitieron identificar las zonas críticas dentro de la microcuenca, sirviendo como herramienta clave para la planificación de medidas de conservación de suelos y ordenamiento territorial.

RECOMENDACIONES

1. Aumentar la cobertura espacial de estaciones pluviométricas en la microcuenca para mejorar la calibración de datos satelitales y reducir la incertidumbre en zonas con alta variabilidad topográfica y climática.
2. Dado que una parte significativa del área presenta suelos con alta erodabilidad, se sugiere ampliar las prácticas de conservación como zanjas de infiltración, terrazas y barreras vivas, especialmente en zonas con pendientes medias y altas.
3. Establecer un sistema de monitoreo permanente de la erosión para evaluar la evolución de las pérdidas de suelo y la efectividad de las prácticas de conservación aplicadas.
4. Actualizar regularmente los datos del factor K mediante nuevas campañas de muestreo en campo, para garantizar que los valores usados en modelos como RUSLE reflejen las condiciones reales del suelo.
5. Los mapas temáticos generados deben ser integrados en planes de ordenamiento territorial y de manejo de cuencas, como base técnica para priorizar intervenciones en áreas vulnerables a la erosión.
6. Implementar programas de formación dirigidos a técnicos, autoridades y pobladores locales sobre el uso sostenible del suelo, interpretación de mapas de erosión y aplicación de prácticas conservacionistas.
7. Implementar las prácticas de conservación de suelos en las zonas identificadas como vulnerables a la erosión hídrica. Entre las medidas sugeridas se incluyen: la construcción de canales de desvío y drenaje, la rotación de potreros y el control de la carga animal para evitar el sobrepastoreo, así como la reforestación y revegetación de áreas críticas.

REFERENCIAS

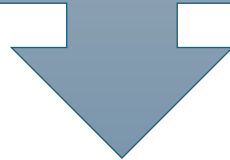
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Guidelines for computing crop water requirements (Irrigation and Drainage Paper 56)*. FAO. https://www.cse.iitb.ac.in/~pocra/References/FAO_Paper56_Irrigation_Drainage.pdf
- Almorox, A. J., López, B. F., & Rafaelli, S. (2011). *La degradación de los suelos por erosión hídrica: Métodos de estimación*. En Universidad de Mauricia (Vol. 7). https://books.google.com.pe/books?id=bSpiNY_nwOIC&pg=PA51
- Álvarez, A. (2019). *Análisis temporal del nivel de la erosión hídrica de la subcuenca del río Ichu 2013 y 2017*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Huancavelica]. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2603>
- Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2023). Estimation of soil erosion through the RUSLE model. Case study: upper-middle basin of Mira River in Andean-Ecuador. *Investigaciones Geográficas*. <https://doi.org/10.14198/INGEO.22390>
- Brea, D., & Bolocche, F. (2016). *Proceso de erosión-sedimentación en cauces y cuencas* (Vol. 01). UNESCO Programa Hidrológico Internacional. https://www.cuhs.atalca.cl/ex-ctha/Docs/pdf/Publicaciones/libros/erosion_y_sedimentacion_vol1.pdf
- Camargo, C., Pacheco, C., & López, R. (2017). Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Gestión y Ambiente*. <https://doi.org/10.15446/ga.v20n2.63917>
- CENEPRED. (2014). Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales. *Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, Versión 2*. https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf
- Chereque, M. W. (2010). *Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Chipana, O. (2022). *Estimación de la pérdida de suelo media anual mediante la ecuación universal de pérdida de suelo revisada, en la cuenca del río Chumbao, Provincias de Andahuaylas y Chincheros - Apurímac - 2019*. <https://hdl.handle.net/20.500.14512/384>
- Chirinos, L. R., & Mallqui, C. G. (2016). Comparación entre interpoladores espaciales en el estudio de distribución de partículas sedimentables insolubles en la cuenca atmosférica de Lima y Callao. *Informacion Tecnologica*, 27.

- <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000400012>
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero, A., Jorge, G., Diez, A., & Bergesio, L. (2012). *Erosión hídrica: Principios y técnicas de manejo* (UniRio). Universidad Nacional de Río Cuarto. <http://www.unrc.edu.ar/unrc/comunicacion/editorial/>
- Damián, D., Recalde, C., Carmen, O., Marcos, V., Víctor, J., & Johana, E. (2017). Priorización de microcuencas en los Andes ecuatorianos usando parámetros morfométricos, WSA y GIS. *Revista Geografica Venezolana*. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347753792004.pdf>
- FAO. (2019). Soil erosion: The greatest challenge for sustainable soil management. En E. . (D. Pennock (Ed.), *Australian Surveyor* (University, Vol. 8). <https://doi.org/10.1080/00050326.1940.10436672>
- Gamboa, C. A. O. (2023). Estimación de la erosión hídrica aplicando la metodología RUSLE con técnicas de teledetección en la cuenca del río Tumbes 2000-2022. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Tumbes]. <https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/64161>
- Gámez, W. R. (2009). *Universidad Nacional Agraria (Texto Básico de Hidrología)* (Editronic,).
- Gómez, J. W., & Gallo, V. H. (2022). *Guía de hidrología (Capítulo 7: Precipitación)*. 116-198.
- González, M., & Tánago, D. (1991). La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro. *Ecología*, 5, 13-50.
- Gutierrez Lope, L. F., & Sabino Rojas, E. D. (2022). Erosividad de la lluvia en el Perú para el periodo 2000-2020. *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, (2022). Estudio Final*. https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-104.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Guzmán, C. J. A. (2021). Análisis de la erosión potencial y efectiva del suelo por medio de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) en el área de jurisdicción de la CAR. [Tesis de maestría, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/38973/GuzmánCañónJulianaAlejandra2021.pdf>
- Joyo, R. A. (2018). Determinación de la erosión hídrica de suelos en las zonas agrícolas del centro poblado de Pampa Cangallo, Ayacucho. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2785%0A%0A>

- Moreno Avalos, L. M., & Suyo Solorzano, N. D. (2020). Determinación del nivel de erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la cuenca Jequetepeque, periodo 1997-2017. *Universidad Privada Del Norte*. <https://hdl.handle.net/11537/29407>
- Morgan, R. (2005). *Soil erosion and conservation (3.ª ed.)* (Mundi-Pren). https://www.google.com.pe/books/edition/Soil_Erosion_and_Conservation/j8C8fFiPNOkC
- Ñahui, A. D. (2024). Estimación de erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la cuenca Chonta - Sucre - Ayacucho, 2024. *[Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]*. <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/7769>
- Piscitelli, Marcela; Varni, Marcelo; Sfeir, A. A. M. G. (2010). Valores de erodabilidad (factor K-USLE) para suelos representativos de la cuenca alta del arroyo Azul (partido de Azul- Buenos Aires). *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5718160.pdf>.
- Rondinel, A. H. A. (2020). Estimación satelital, validación y distribución espacial de la evapotranspiración a través del clima en la cuenca Cachi Ayacucho, 2020. *[Tesis, Universidad Nacional de San Martín]*. <https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5720>
- Roose, E. (1977). *Vingt Années En Petites Parcelles Expkri Esures* (O.R.S.T.O.). https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/Tra_d_cm/09011.pdf
- Sabino, E., Obando, F., G., O., & Lavado, W. S. (2017). Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú. *SENAMHI*. https://idesep.senamhi.gob.pe/portalidesep/files/tematica/atlas/erosion_de_suelo/Atlas_Erosion_Suelos_por_Regiones_Hidrologicas_Peru.pdf
- Salas, C. A. J. (2022). Validación de los datos de precipitaciones satelitales GPM en la cuenca Madre de Dios, para el periodo de 2010 al 2019. *[Tesis, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios]*. <https://repositorio.unamad.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14070/828/004-2-3-127.pdf>
- Silva, T. E. M. (2023). Pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca del río Almoloya – Oztolotepec, Estado de Méxic. *[Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]*. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/138715>
- Suárez, M. C. (2008). TESIS DOCTORAL Director de Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los modelos RUSLE y USPED aplicación al

- arroyo del lugar, Guadalajara (España). [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7308558.pdf>
- Tapia, J. M. D., & Gómez, C. M. P. (2018). Estimación de la erosión hídrica mediante la aplicación de la metodología RUSLE en la cuenca del río Piura. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/f679df35-463a-42df-8ba8-f475cc46af39>
- USDA. (1962). *Rainfall erosivity index. Agriculture Handbook No. 282. United States Department of Agriculture.* https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/50201000/USLEDatabase/AH_282.pdf
- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J., Vásquez, C., Castro, A., Tapia, M., & Alcántara, J. (2017). *Libro manejo y gestión de cuencas hidrográficas.* Fondo Editorial-UNALM. <https://es.scribd.com/document/360252359/Libro-Manejo-y-Gestio-n-de-Cuencas-Hidrogra-ficas-Absalon-Vasquez-pdf#%0Ahttps://es.scribd.com/document/360252359/Libro-Manejo-y-Gestio-n-de-Cuencas-Hidrogra-ficas-Absalon-Vasquez-pdf>
- Villón, B. M. (2016). *Hidrología Estadística.* <https://www.udocz.com/apuntes/97147/05-villon-maximo-hidrologia-estadistica>
- Villón, M. (2002). *Hidrología.* Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Wischmeier, W. H., and Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning (USDA Agriculture Handbook No. 537)* (Número 537). USDA. https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/RUSLE/AH_537_Predicting_Rainfall_Soil_Losses.pdf
- WMO. (2008). GCOS / WCRP Terrestrial Observation Panel for Climate. *Report, (Report No (WMO).* https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=12407
- Zavala-Cruz, J., Palma-López, D. J., Fernández-Cabrera, C. R., López-Castañeda, A., & Shirma-Tórres, E. (2001). *Degradación y conservación de suelos en la cuenca del río Grijalva, Tabasco.* obtenido de https://www.researchgate.net/publication/293944208_Degradacion_y_Conservacion_de_Suelos_en_la_Cuenca_del_Rio_Grijalva_Tabasco (Ed.), M. C. Letic (Ed. https://www.researchgate.net/publication/293944208_Degradacion_y_Conservacion_de_Suelos_en_la_Cuenca_del_Rio_Grijalva_Tabasco.

ANEXOS



**1.- DATOS HISTÓRICOS DE
LAS PRECIPITACIONES
OBSERVADAS**

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ

REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ESTACION: HUANCA SANCOS LATITUD: 13°55'1"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°20'1"S PROVINCIA: HUANCA SANCOS
 CODIGO: 100055 ALTITUD: 3440 DISTRITO: SANCOS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Annual
1998	138.3	72.4	124.1	16.4	0	24.8	1.6	4.5	3.8	30.7	63.9	93.2	573.7
1999	66.8	321	152.3	45.8	27.1	0.3	5.4	0.6	14.8	58.3	24.7	107	824.1
2000	187.5	197.1	167.8	30.9	5.3	1.8	2.9	9.6	7.2	53.6	25.2	151.4	840.3
2001	169.3	127.6	151.9	54.6	13.8	0.8	13.3	13.7	20.7	50.3	55.1	32.6	703.7
2002	1	115.8	100.1	46	8.4	12.2	38.9	1.3	24.9	40.9	66	118.4	573.9
2003	146.7	155	122.3	28.4	12.8	0	2.2	19.4	1.9	37.8	12.8	156.8	696.1
2004	68.4	135.5	119.5	66.4	0.8	9.3	12.3	16.5	22.5	25.1	29.5	156.2	662
2005	105	77.8	0	0	0	0	0	0	44	5.5	11.6	164.4	408.3
2006	159	125.8	125.9	75.9	0	6	0	8.7	17.6	34.2	46	133.5	732.6
2007	115.6	123.7	198.6	82.5	11.9	3.5	0	0	15.6	35.6	14.2	121.1	722.3
2008	249	149.4	70.7	13.9	2.9	6.7	1.5	3.6	9.1	42.4	30.1	96	675.3
2009	90.6	236.6	110.2	54.7	8.6	0	18.1	0	14	46.1	97	75.9	751.8
2010	161.4	93.1	90.3	31.9	8.5	4.1	0	4	3.9	49.3	11.5	136.5	594.5
2011	255.1	169.8	164	92.4	6.5	2.6	8.6	0.8	27.9	4.5	32.5	142.9	907.6
2012	121.9	232.3	169.2	133.1	0	0.6	2.5	0	18.3	31.3	30.4	144.3	883.9
2013	110.3	169.7	124.9	3.6	37.1	11.7	4	13	30.7	27.6	35	117.5	685.1
2014	181.7	60.6	122.5	54.9	2.7	5.8	4.8	13.9	33	71.7	22.2	102.6	676.4
2015	104.3	127.9	122.6	36.8	29.9	2	2	10.8	32	39.1	54.7	66.8	628.9
2016	30.8	117.8	70.9	22.9	8.8	1.2	10.2	14.6	32	17.803	8.6	57.4	393
2017	275.6	87.5	148.9	27.4	9.8	4.8	11.8	4	25.9	27.8	25.5	12	661
2018	155.4	113.4	155.6	40.6	3.2	19.8	13.8	18.1	2	33.7	12.9	51.7	620.2
2019	143.7	178.2	79.3	64	1.7	16	12.7	0	2.6	16.9	67.5	150.6	733.2
2020	111.7	170.6	51.1	22.519	9.1158	0.4739	0	0	12.2	31.4	24	258.6	691.71
2021	164.8	116.6	142.8	84.9	14.8	5	1.4	1.7	22.3	56.6	58.5	107.5	776.9
2022	160.6	131.8	126	46.7	0.6	1.8	0	0	0.2	0	5.6	118.1	591.4
2023	195.6	156.2	141.7	49.4	18.4	0	1	10.2	34	61.6	108.2	74	850.3
2024	163	185.2	107.7	59.1	6.4	0	0	0	6.929	58.244	141.94	132.55	861.07
Promedio	141.97	146.24	120.77	47.619	9.2265	5.2324	6.2593	6.2593	17.779	36.594	41.302	114.06	693.31
Ppmax	275.6	321	198.6	133.1	37.1	24.8	38.9	19.4	44	71.7	141.94	258.6	907.6

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ

REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ESTACION: VILCASHUAMAN LATITUD: 13°40'7.7"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 73°57'8.6"S PROVINCIA: VILCAS HUAMAN
 CODIGO: 113100 ALTITUD: 3440 DISTRITO: VILCAHUAMAN

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1998	207.77	135.14	209.81	22.21	0.00	20.17	0.00	0.00	17.22	41.24	72.67	100.39	826.62
1999	129.59	164.89	44.94	32.00	2.19	0.00	10.01	0.00	119.61	8.71	84.86	65.64	662.46
2000	138.83	240.30	128.48	2.19	32.00	0.00	0.00	0.34	34.22	73.22	79.87	122.94	852.41
2001	259.90	124.97	131.44	0.00	28.31	2.19	1.51	43.65	33.30	50.49	75.44	100.39	851.57
2002	81.40	252.50	157.60	40.70	16.80	0.00	55.00	3.90	35.70	61.00	38.50	106.80	849.9
2003	98.20	149.70	137.50	42.10	2.70	0.00	0.00	14.50	0.00	40.50	27.60	151.00	663.8
2004	85.70	199.40	95.80	49.50	8.60	10.30	13.60	12.40	18.20	32.10	28.70	174.30	728.6
2005	103.80	80.20	28.70	28.70	28.70	0.00	1.90	20.40	47.70	42.90	45.30	127.90	556.2
2006	242.20	148.40	149.80	54.80	2.90	13.40	0.00	32.40	14.80	42.50	110.90	103.80	915.9
2007	126.20	99.50	158.70	39.70	4.40	0.00	14.10	10.00	17.20	35.40	88.90	141.70	735.8
2008	201.10	154.90	102.30	10.20	5.50	7.10	0.00	2.10	5.60	23.60	41.90	113.00	667.3
2009	150.40	183.70	104.30	58.00	3.50	2.00	22.80	2.10	2.40	46.50	122.50	127.60	825.8
2010	219.90	182.00	72.40	45.90	23.70	0.00	0.00	25.60	10.80	39.70	26.10	127.90	774
2011	264.30	288.00	180.30	62.60	10.40	0.00	8.10	0.00	43.90	43.50	42.60	87.90	1031.6
2012	78.86	179.77	82.54	36.17	0.00	4.31	2.63	3.44	20.32	11.29	16.59	142.27	578.19
2013	148.50	152.30	134.60	17.70	18.80	13.50	5.50	39.20	5.60	29.10	30.70	168.40	763.9
2014	235.60	129.70	161.80	27.80	10.80	0.00	25.10	2.50	60.30	55.80	33.20	84.70	827.3
2015	158.50	151.80	104.50	30.10	29.16	1.39	7.24	17.66	14.87	28.57	44.79	66.33	654.91
2016	52.70	163.70	66.70	33.20	12.30	11.20	9.10	4.60	11.00	30.30	26.50	86.00	507.3
2017	259.00	204.60	132.70	78.50	40.70	4.00	11.00	0.00	30.80	50.20	55.30	119.70	986.5
2018	216.30	193.80	165.70	32.00	1.20	22.20	17.10	21.30	11.50	39.30	14.80	75.50	810.7
2019	190.50	184.30	124.30	46.80	7.30	0.00	10.10	0.00	9.50	58.60	103.60	164.70	899.7
2020	64.80	196.20	150.40	15.30	17.60	1.20	0.00	19.20	10.00	16.10	23.72	199.54	714.05
2021	187.16	108.30	129.18	56.01	20.88	1.70	1.85	2.29	11.00	56.10	81.60	123.00	779.07
2022	271.20	198.50	104.90	45.50	1.70	12.40	0.00	4.70	6.40	4.20	16.10	131.30	796.9
2023	149.20	176.60	106.60	4.40	34.50	0.00	2.20	5.80	33.90	41.30	62.60	136.60	753.7
2024	137.40	149.70	108.10	52.90	13.90	0.51	3.70	0.00	8.72	57.77	207.60	139.04	879.34
Promedio	165.15	170.11	121.26	35.74	14.02	4.7246	8.2418	10.67	23.502	39.259	59.368	121.79	773.83
Ppmax	271.2	288	209.81	78.5	40.7	22.2	55	43.647	119.61	73.22	207.6	199.54	1031.6

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ

REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ESTACION: HUANCAPI LATITUD: 13°44'56.4"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°4'5.2"S PROVINCIA: VICTOR FAJARDO
 CODIGO: 113022 ALTITUD: 3117 DISTRITO: HUANCAPI

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Annual
1998	195.99	194.37	162.78	23.75	0.00	7.85	0.00	1.60	2.65	17.80	57.51	93.80	758.11
1999	80.60	239.60	200.10	106.30	4.10	6.10	4.40	3.50	69.10	63.80	24.80	89.00	891.4
2000	165.90	237.40	135.10	18.40	37.60	5.40	8.10	31.30	8.00	77.10	13.90	146.40	884.6
2001	239.90	126.60	140.70	58.30	34.40	10.10	14.10	13.90	43.20	30.60	74.40	42.70	828.9
2002	103.16	157.91	133.35	58.48	9.58	2.33	53.29	18.02	65.84	25.37	55.67	144.06	827.06
2003	182.36	165.27	173.27	64.22	16.72	0.00	4.28	29.38	19.75	41.06	37.06	112.36	845.72
2004	76.33	146.55	132.81	25.59	0.00	30.46	13.69	14.45	28.30	41.93	42.04	168.08	720.22
2005	50.26	72.33	6.87	6.87	6.87	0.00	2.11	20.40	59.78	51.45	26.78	122.75	426.48
2006	229.00	140.00	135.40	69.00	0.00	17.40	0.00	33.90	11.00	34.20	78.00	130.30	878.2
2007	88.70	143.90	184.10	85.10	7.80	0.60	0.00	14.00	33.40	30.80	40.70	187.20	816.3
2008	230.00	148.10	94.50	15.40	2.60	5.00	0.00	3.80	0.60	33.50	31.10	156.80	721.4
2009	129.90	176.00	152.00	53.80	10.80	1.07	26.19	1.16	10.91	48.22	103.45	94.41	807.92
2010	167.98	133.22	85.99	37.00	13.13	2.20	0.00	19.11	11.32	43.36	17.09	146.47	676.85
2011	267.11	241.14	216.96	20.99	9.20	1.39	13.77	2.89	44.02	28.08	47.53	112.49	1005.6
2012	48.64	251.00	95.20	75.52	2.06	10.71	3.35	2.78	30.23	35.24	19.90	133.13	707.75
2013	42.85	135.97	55.09	7.15	32.30	23.41	4.17	42.16	16.66	42.86	31.74	74.86	509.22
2014	174.95	100.81	147.55	37.08	11.19	7.48	23.12	18.50	71.14	73.18	31.92	100.41	797.33
2015	131.64	148.96	176.39	32.75	29.28	2.96	9.33	27.15	18.61	32.71	36.61	66.07	712.46
2016	32.38	120.89	90.03	38.78	10.15	14.71	13.31	15.78	23.66	20.23	13.57	68.29	461.79
2017	196.29	144.72	84.55	63.00	29.10	10.60	9.90	5.20	30.90	47.20	41.20	54.50	717.16
2018	190.50	154.10	176.90	41.50	3.00	29.30	33.20	37.40	16.00	35.00	26.20	83.50	826.6
2019	164.00	160.50	101.30	22.10	14.10	15.80	20.20	0.00	9.30	58.60	75.10	229.20	870.2
2020	76.40	134.30	39.70	20.29	13.15	0.00	0.00	14.70	11.68	22.75	21.80	38.60	393.37
2021	187.65	104.99	157.18	76.44	21.01	3.62	2.39	3.52	21.96	63.60	68.74	117.26	828.37
2022	176.50	158.50	112.50	34.70	1.10	1.90	0.00	2.20	5.40	19.90	17.20	120.10	650
2023	139.80	172.10	124.20	12.90	28.50	0.00	9.10	4.90	19.60	48.40	73.80	127.80	761.1
2024	160.40	163.30	170.10	52.10	14.65	1.08	1.56	0.00	10.91	66.04	169.11	138.34	947.6
Promedio	145.53	158.24	129.06	42.872	13.422	7.8322	9.9835	14.137	25.701	41.963	47.293	114.77	750.8
Ppmax	267.11	251	216.96	106.3	37.6	30.46	53.288	42.163	71.142	77.1	169.11	229.2	1005.6

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ

REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ESTACION: HUAC HUAS LATITUD: 13°55'1"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°20'1"S PROVINCIA: LUCANAS
 CODIGO: 100055 ALTITUD: 3440 DISTRITO: HUAC HUAS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1998	345.40	245.20	213.20	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.83774	48.60	867.24
1999	144.70	262.80	198.60	6.70	0.00	0.00	0.00	0.00	2.17	4.87	5.24	55.20	680.28
2000	285.20	209.00	188.90	34.50	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00	8.10	103.40	837.8
2001	185.40	484.20	291.90	54.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.20	8.30	0.00	1026.5
2002	88.33	257.49	269.33	70.65	1.55	1.20	0.00	0.00	0.00	6.09	58.32	23.77	776.74
2003	81.51	242.08	218.73	5.77	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	15.01	128.39	692.95
2004	211.43	273.22	213.05	51.83	0.00	0.00	0.09	0.00	0.25	0.09	5.77	151.74	907.49
2005	207.54	207.54	2.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39	0.00	0.00	150.77	570.22
2006	347.99	477.75	466.88	19.23	0.00	0.00	0.00	0.00	3.34	0.90	51.83	38.86	1406.8
2007	58.48	107.30	170.07	16.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.69	50.05	404.9
2008	383.60	431.30	220.30	78.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.60	1.70	54.80	1173
2009	202.00	179.20	164.00	34.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.80	30.60	14.70	633.2
2010	53.10	176.00	103.30	26.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	54.60	414.4
2011	319.30	384.60	100.70	65.50	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00	4.80	59.70	935.8
2012	116.00	478.20	231.20	126.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.80	0.00	66.20	1047.7
2013	86.60	427.30	152.40	3.10	6.00	2.90	0.30	0.00	0.00	11.00	4.20	49.00	742.8
2014	136.00	98.40	216.70	10.50	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	9.40	11.90	45.00	528.6
2015	78.30	255.00	338.20	12.70	1.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	4.20	10.20	699.8
2016	6.90	118.10	153.50	50.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	35.80	364.5
2017	548.70	354.70	430.80	10.80	0.70	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.90	20.90	1368.2
2018	149.60	178.80	180.30	27.40	3.80	20.90	1.10	0.00	0.00	1.00	0.40	0.00	563.3
2019	180.00	284.80	102.00	2.10	4.70	0.00	0.00	0.00	5.20	2.10	0.70	39.90	621.5
2020	348.80	165.30	204.10	14.53	0.90	0.07	0.00	0.02	3.10	4.90	8.60	103.20	853.51
2021	242.10	56.60	228.20	23.00	6.50	0.00	0.00	0.00	3.00	5.60	5.80	23.70	594.5
2022	106.10	230.10	276.60	9.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.40	68.50	693.8
2023	192.00	327.30	414.30	139.40	0.00	0.00	0.00	0.00	2.30	15.60	0.90	101.80	1193.6
2024	192.50	246.00	218.20	64.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	5.42	24.67	49.45	801.22
Promedio	196.21	265.12	221.05	35.712	1.0339	0.9285	0.1071	0.0267	0.8123	4.325	9.9359	57.342	792.61
Ppmax	548.7	484.2	466.88	139.4	6.5	20.9	1.2	0.7	5.2	29.8	58.32	151.74	1406.8

GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO

GERENCIAREGIONAL DE INFRAESTRUCTURA SUB GERENCIA DE OBRAS

RED HIDROMETEOROLGICA - OPEMAN

REGISTRO DE PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ESTACION: PAMPA CANGALLO LATITUD: 13°34'09"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°11'37"S PROVINCIA: CANGALLO
 CODIGO: 4 ALTITUD: 3350 DISTRITO: LOS MOROCHUCOS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1998	236.34	138.68	164.47	15.70	5.03	10.97	4.28	2.61	4.08	28.26	109.93	104.37	824.72
1999	104.18	228.04	156.01	57.39	7.98	3.08	2.91	2.84	96.24	74.58	62.70	103.13	899.08
2000	98.17	74.29	162.62	30.55	24.34	13.25	0.64	22.39	0.64	113.15	19.34	98.17	657.53
2001	232.67	94.63	261.91	40.17	43.46	3.75	9.47	4.84	14.10	43.46	67.83	29.94	846.25
2002	154.33	184.55	158.23	23.97	7.77	2.59	51.63	11.54	84.16	32.86	156.28	291.15	1159.1
2003	184.18	155.06	161.64	58.57	6.55	5.03	0.68	17.51	40.54	44.19	60.52	160.42	894.91
2004	64.18	202.70	154.70	28.23	1.62	6.91	8.25	5.21	40.17	48.70	79.89	141.05	781.62
2005	93.54	76.72	4.90	4.90	4.90	5.03	0.03	36.88	48.46	47.36	30.67	139.35	492.76
2006	263.74	146.41	203.92	45.29	2.47	1.01	5.03	22.75	35.18	40.05	64.42	51.02	881.28
2007	90.86	101.82	201.60	72.93	7.77	4.42	0.70	2.10	34.69	51.75	61.62	151.29	781.55
2008	227.19	208.43	107.18	28.84	3.38	0.82	4.33	0.28	10.93	35.79	75.38	115.22	817.78
2009	130.58	138.98	167.61	64.91	4.78	5.03	14.22	5.03	8.74	41.88	116.81	120.10	818.66
2010	258.60	136.50	107.30	31.70	2.90	0.00	0.00	3.30	14.00	36.50	23.60	170.20	784.6
2011	280.00	260.70	124.50	90.10	8.00	0.00	13.30	4.40	34.50	34.50	89.30	89.50	1028.8
2012	114.00	253.50	165.80	169.30	5.70	13.20	3.10	1.20	21.20	23.40	14.20	215.80	1000.4
2013	124.30	172.90	126.90	2.50	19.60	11.60	0.00	24.62	5.60	56.40	44.80	155.70	744.92
2014	167.20	159.40	128.40	42.60	16.60	7.80	20.70	14.80	71.90	68.90	48.00	108.30	854.6
2015	206.90	119.90	181.00	40.80	25.70	2.10	14.10	23.80	2.70	32.50	39.70	92.30	781.5
2016	43.36	115.10	85.63	33.43	9.30	15.21	12.91	10.86	17.18	15.95	16.27	49.27	424.44
2017	242.07	202.67	124.45	80.95	18.00	10.53	13.98	11.68	27.03	42.91	60.10	52.80	887.17
2018	170.80	121.10	147.00	43.40	14.60	18.90	35.00	23.80	20.90	39.20	39.90	64.36	738.96
2019	173.30	183.60	43.70	41.10	12.50	0.00	1.80	0.00	17.00	85.90	94.50	147.40	800.8
2020	103.30	133.50	108.50	22.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.30	14.80	16.60	249.70	652.7
2021	172.10	175.30	131.30	96.40	20.10	0.00	2.80	3.00	18.50	62.20	94.10	141.30	917.1
2022	168.30	154.80	123.90	35.10	0.00	0.00	0.00	2.20	5.90	2.40	5.00	130.60	628.2
2023	190.30	196.90	125.40	10.10	10.20	0.00	8.40	3.50	42.90	55.80	86.20	89.10	818.8
2024	179.20	125.60	173.30	66.20	18.70	1.50	0.00	0.00	6.80	47.60	146.80	116.40	882.1
Promedio	165.69	157.84	140.81	47.302	11.182	5.2852	8.4543	9.6717	26.975	45.222	63.87	125.11	807.42
Ppmax	280	260.7	261.91	169.3	43.463	18.9	51.626	36.884	96.237	113.15	156.28	291.15	1159.1

2.- Cálculo del factor R de Erosividad observada

CALCULO DE FACTOR DE EROSIVIDAD R MENSUAL (MJ.mm/(ha.h.año) PARA LA ESTACION HUANCA SANCOS

ESTACION: HUANCA SANCOS LATITUD: 13°55'1"S REGION: AYACUCHO
 LONGITUD: PROVINCIA
 TIPO: CONVENCIONAL : 74°20'1"W : HUANCA SANCOS
 CODIGO: 100055 ALTITUD: 3440 DISTRITO: SANCOS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag o	Set	Oct	Nov	Dic	Ranual
1998	276.6	39.7	199.9	0.5	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	3.0	27.3	84.7	633.2
1999	18.1	2008.9	214.6	5.8	1.2	0.0	0.0	0.0	0.2	12.0	0.9	74.4	2336.2
2000	388.8	451.7	278.7	1.7	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	9.1	0.9	204.7	1335.8
2001	373.5	159.9	269.8	12.5	0.2	0.0	0.2	0.2	0.7	9.8	12.9	2.7	842.3
2002	0.0	162.3	104.8	10.2	0.1	0.2	6.2	0.0	1.6	7.2	30.0	173.5	496.0
2003	247.0	291.3	143.1	1.8	0.2	0.0	0.0	0.6	0.0	4.2	0.2	301.6	990.0
2004	27.0	209.9	144.0	24.7	0.0	0.1	0.2	0.4	1.0	1.3	2.2	321.5	732.1
2005	201.6	82.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.8	0.0	0.3	773.8	1072.6
2006	291.3	144.3	144.6	31.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	2.9	7.1	172.4	794.7
2007	114.3	140.1	579.8	41.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	0.2	131.5	1011.2
2008	1264.1	273.0	28.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	6.2	2.2	72.4	1647.3
2009	51.8	923.2	93.3	11.4	0.0	0.0	0.4	0.0	0.2	6.8	63.6	30.5	1181.3
2010	416.8	80.0	73.0	3.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	0.2	252.1	837.2
2011	872.4	257.3	231.8	41.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	1.8	153.3	1559.3
2012	99.0	685.4	264.9	128.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.7	1.5	164.3	1346.1
2013	107.5	391.6	156.1	0.0	4.1	0.1	0.0	0.2	2.3	1.7	3.4	130.0	797.1
2014	490.0	18.2	150.1	13.5	0.0	0.0	0.0	0.2	2.9	30.1	0.9	88.2	794.2
2015	103.4	190.6	167.9	4.5	2.4	0.0	0.0	0.1	3.0	5.4	14.9	27.2	519.5
2016	5.4	301.5	65.7	2.2	0.1	0.0	0.2	0.6	6.0	1.0	0.1	34.9	417.8
2017	1769.9	56.6	279.1	1.7	0.1	0.0	0.1	0.0	1.5	1.8	1.4	0.1	2112.5
2018	349.1	135.7	350.5	6.2	0.0	0.7	0.2	0.6	0.0	3.6	0.2	12.9	859.6
2019	214.8	409.6	36.1	19.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.3	22.3	247.2	949.6
2020	110.1	392.2	10.5	0.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	2.4	1.1	1365.9	1883.3
2021	297.0	105.2	193.2	40.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.7	12.0	13.3	82.4	744.7
2022	413.8	228.7	199.9	10.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	164.6	1017.2
2023	433.7	220.9	164.9	7.0	0.4	0.0	0.0	0.1	2.3	13.5	73.4	23.5	939.5
2024	246.3	361.2	71.0	11.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.2	162.6	132.4	996.6
Promedio	340.1	323.0	171.0	16.0	0.3	0.1	0.3	0.1	1.5	6.0	16.5	193.4	1068.4
Ppmax	1769.9	2008.9	579.8	128.9	4.1	1.6	6.2	0.6	14.8	30.1	162.6	1365.9	2336.2

CALCULO DE FACTOR DE EROSIVIDAD R MENSUAL (MJ.mm/ha.h.año) PARA LA ESTACION VILCASHUAMAN

ESTACION: VILCASHUAMAN LATITUD: 13°40'7.7"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 73°57'8.6"W PROVINCIA: VILCAS HUAMAN
 CODIGO: 113100 ALTITUD: 3440 DISTRITO: VILCAHUAMAN

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ranual
1998	542.3	149.2	558.4	0.7	0.0	0.5	0.0	0.0	0.3	4.2	23.2	61.2	1340.0
1999	183.4	377.8	7.6	2.8	0.0	0.0	0.1	0.0	144.2	0.1	51.5	23.8	791.3
2000	154.5	112.9	122.5	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	2.3	22.7	29.4	107.3	553.4
2001	1015.1	112.9	131.3	0.0	1.3	0.0	0.0	4.8	2.1	7.4	24.8	58.5	1358.2
2002	31.3	933.6	227.0	3.9	0.3	0.0	9.6	0.0	2.6	13.2	3.3	70.6	1295.5
2003	79.6	281.9	218.4	6.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	5.6	1.8	289.3	883.0
2004	46.0	579.2	64.2	8.9	0.0	0.1	0.2	0.1	0.4	2.4	1.7	386.9	1090.2
2005	122.5	56.5	2.6	2.6	2.6	0.0	0.0	0.9	11.9	8.6	10.2	229.2	447.6
2006	736.5	169.4	174.3	8.5	0.0	0.1	0.0	1.8	0.2	4.0	70.7	58.0	1223.4
2007	144.7	70.9	287.7	4.5	0.0	0.0	0.2	0.1	0.4	3.2	50.6	204.8	767.1
2008	677.9	309.8	89.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	6.1	120.3	1204.6
2009	206.0	375.3	68.7	11.8	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	6.1	111.3	125.8	905.8
2010	709.6	402.3	25.3	6.5	0.9	0.0	0.0	1.1	0.1	4.2	1.2	139.6	1290.7
2011	800.7	1035.9	254.2	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	3.6	3.4	29.5	2141.5
2012	50.7	600.4	58.1	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.1	0.5	297.6	1013.2
2013	222.9	240.4	166.0	0.4	0.5	0.2	0.0	4.1	0.0	1.7	2.0	325.0	963.0
2014	789.7	131.7	255.8	1.3	0.1	0.0	1.0	0.0	13.2	10.5	2.2	36.7	1242.2
2015	341.4	299.9	97.8	2.3	2.1	0.0	0.0	0.5	0.3	2.0	7.7	25.0	779.1
2016	18.4	551.7	37.3	4.6	0.2	0.2	0.1	0.0	0.2	3.5	2.3	80.0	698.5
2017	805.7	397.2	108.4	22.4	3.1	0.0	0.1	0.0	1.4	5.9	7.8	79.5	1431.5
2018	629.9	453.1	283.2	2.0	0.0	0.7	0.3	0.6	0.1	3.8	0.2	26.8	1400.7
2019	368.1	333.3	102.3	5.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	10.7	59.2	237.9	1117.0
2020	20.5	568.8	256.2	0.3	0.4	0.0	0.0	0.5	0.1	0.3	1.0	598.3	1446.3
2021	433.2	83.9	142.4	11.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.1	11.7	35.9	123.0	842.4
2022	1274.0	499.6	73.7	6.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	144.6	1998.4
2023	230.6	382.5	84.1	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	2.7	4.9	17.0	177.0	901.7
2024	142.9	184.9	69.6	8.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	10.6	493.0	148.1	1057.5
Promedio	399.2	359.1	146.9	5.1	0.6	0.1	0.5	0.5	6.9	5.6	37.7	155.7	1117.9
Ppmax	1274.0	1035.9	558.4	22.4	3.1	0.7	9.6	4.8	144.2	22.7	493.0	598.3	2141.5

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DEL PERÚ

CALCULO DE FACTOR DE EROSIVIDAD R MENSUAL (MJ.mm/ha.h.año) PARA LA ESTACION HUAC HUAS

ESTACION: HUAC HUAS LATITUD: 14°56'49"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°56'27"S PROVINCIA: LUCANAS
 CODIGO: 100055 ALTITUD: 3180 DISTRITO: HUAC - HUAS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ranual
1998	2354.2	842.3	553.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	3756.7
1999	245.4	1469.8	634.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.6	2363.2
2000	1374.5	540.9	399.4	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	65.5	2382.9
2001	278.4	4959.7	1086.6	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6331.9
2002	45.7	1133.2	1296.8	23.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.2	0.9	2513.2
2003	42.7	1117.5	824.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	166.7	2151.4
2004	496.8	1072.0	508.3	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	183.6	2268.1
2005	943.3	943.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	361.7	2248.2
2006	1147.6	2969.4	2771.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	1.6	6894.0
2007	35.3	217.9	867.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.1	1143.5
2008	2018.9	2869.5	382.4	17.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	5294.1
2009	743.3	518.9	397.8	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.3	1666.8
2010	25.5	928.6	187.8	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.7	1172.6
2011	1634.0	2855.4	51.3	14.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.7	4565.4
2012	66.1	4633.3	523.6	85.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	12.3	5321.9
2013	46.1	5537.5	251.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	8.4	5843.2
2014	297.4	112.6	1203.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	10.8	1624.4
2015	37.3	1287.0	3002.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	4327.0
2016	0.1	340.1	746.8	25.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.5	1122.3
2017	4690.3	1267.0	2270.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	8227.6
2018	359.8	614.3	629.9	2.2	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1607.3
2019	540.8	2142.3	98.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	2787.5
2020	2445.3	260.3	489.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	63.3	3259.1
2021	1406.6	18.0	1178.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	2605.2
2022	93.9	957.9	1663.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.3	2741.0
2023	246.6	1221.7	2477.9	94.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	36.8	4077.5
2024	451.9	943.2	658.2	17.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	7.7	2079.1
Promedio	817.3	1547.2	931.7	11.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.8	38.8	3347.2
Ppmax	4690.3	5537.5	3002.5	94.4	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.1	13.2	361.7	8227.6

GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO
GERENCIAREGIONAL DE INFRAESTRUCTURA SUB GERENCIA DE OBRAS

RED HIDROMETEOROLGICA - OPEMAN

CALCULO DE FACTOR DE EROSIVIDAD R MENSUAL (MJ.mm/ha.h.año) PARA LA ESTACION PAMPA CANGALLO

ESTACION: PAMPA CANGALLO LATITUD: 13°34'09"S REGION: AYACUCHO
 TIPO: CONVENCIONAL LONGITUD: 74°11'37"S PROVINCIA: CANGALLO
 CODIGO: 4 ALTITUD: 3350 DISTRITO: LOS MOROCHUCOS

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ranual
1998	800.9	161.8	269.9	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	1.4	80.6	69.0	1383.9
1999	60.3	632.0	202.4	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	47.5	22.1	13.1	58.5	1046.0
2000	80.6	34.9	366.5	2.4	1.2	0.2	0.0	1.0	0.0	123.5	0.6	80.6	691.5
2001	735.2	49.5	1048.7	3.8	4.8	0.0	0.0	0.0	0.2	4.8	18.2	1.6	1866.7
2002	133.9	228.9	144.3	0.5	0.0	0.0	5.0	0.1	21.7	1.3	139.0	898.7	1573.3
2003	335.3	200.1	226.7	10.8	0.0	0.0	0.0	0.3	3.6	4.6	11.9	221.6	1014.9
2004	17.4	547.6	243.4	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	7.6	33.5	184.5	1039.9
2005	107.5	59.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	14.9	14.0	3.8	355.4	561.6
2006	1007.6	172.4	465.7	5.1	0.0	0.0	0.0	0.6	2.4	3.5	14.7	7.3	1679.3
2007	49.3	69.4	538.9	25.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	9.1	15.4	227.7	938.1
2008	720.5	556.3	75.7	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.8	26.3	94.0	1477.2
2009	136.6	164.7	288.9	16.8	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	4.5	97.8	106.3	815.6
2010	1130.7	166.3	80.8	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	3.2	0.9	322.3	1706.4
2011	955.9	771.5	84.0	31.8	0.0	0.0	0.1	0.0	1.8	1.8	31.0	31.2	1909.2
2012	67.3	739.8	207.0	220.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.4	0.6	0.1	456.4	1692.0
2013	135.7	365.3	144.4	0.0	0.5	0.1	0.0	1.1	0.0	12.7	6.4	266.8	933.0
2014	268.8	232.9	121.8	4.4	0.3	0.0	0.5	0.2	21.4	18.8	6.4	73.1	748.6
2015	582.5	113.4	390.0	4.5	1.1	0.0	0.2	0.9	0.0	2.3	4.1	51.7	1150.6
2016	13.4	250.5	103.2	6.1	0.1	0.6	0.4	0.2	0.8	0.7	0.7	19.7	396.4
2017	771.3	452.7	104.8	28.8	0.3	0.1	0.1	0.1	1.1	4.3	11.8	8.0	1383.5
2018	356.4	127.0	227.2	5.8	0.2	0.5	3.1	1.0	0.7	4.3	4.5	19.1	749.8
2019	330.0	392.4	5.3	4.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	40.2	53.5	203.1	1029.3
2020	95.0	205.0	110.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	1341.5	1753.2
2021	263.7	278.7	117.1	46.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.3	12.4	43.1	146.0	908.1
2022	435.0	338.5	173.6	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	203.3	1154.4
2023	422.6	468.2	120.9	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	4.8	10.7	39.3	43.4	1110.1
2024	315.6	108.7	285.5	15.9	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	173.5	86.5	991.9
Promedio	382.6	292.1	227.6	16.8	0.4	0.1	0.4	0.4	4.8	11.7	30.8	206.6	1174.2
Ppmax	1130.7	771.5	1048.7	220.4	4.8	0.6	5.0	6.6	47.5	123.5	173.5	1341.5	1909.2

Factor de Erosividad multimensual

ESTACIÓN	REGISTROS DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA MEDIA MENSUAL Y ANUAL (MJ.mm/ha.h.año)												Ranual	
	ALTITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV		DIC
HUANCA SANCOS	3440	340.12	323.00	170.97	16.05	0.34	0.11	0.28	0.11	1.47	6.03	16.48	193.43	1068.41
VILCASHUAMAN	3518	399.19	359.07	146.90	5.06	0.63	0.07	0.46	0.55	6.93	5.63	37.72	155.71	1117.92
HUANCAPI	3117	304.01	327.26	183.77	10.65	0.63	0.24	0.55	0.88	4.28	7.39	18.39	147.86	1005.91
HUAC HUAS	3180	817.33	1547.18	931.66	11.34	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.06	0.78	38.83	3347.22
PAMPA CANGALLO	3315	382.56	292.15	227.65	16.81	0.36	0.06	0.36	0.44	4.79	11.75	30.76	206.56	1174.25
PROMEDIO		448.64	569.73	332.19	11.98	0.40	0.11	0.33	0.40	3.49	6.17	20.83	148.48	1542.74

**3.- Descarga del factor R
desde la plataforma Google
Earth Engine con lenguaje
de programación
JavaScript**

```

// =====
// FACTOR R DE RUSLE – AREA DE INFLUENCIA AYACUCHO (1998–2024)
// =====

// 1. Definir región de estudio (puedes dibujarla o importarla como geometría)
var ayacuchoRegion = geometry;

// 2. Cargar la colección de datos satelitales GPM IMERG V07 (precipitación
horaria)
var dataset = ee.ImageCollection('NASA/GPM_L3/IMERG_V07') // Cargar
colección de imágenes
    .filterBounds(ayacuchoRegion) // Filtrar por región de Ayacucho
    .select('precipitation'); // Seleccionar solo la banda de
precipitación

// 3. Definir los años a analizar (desde 1998 hasta 2024)
var years = ee.List.sequence(1998, 2024); // Lista de años de forma secuencial
ejemplo de enero 1998, febrero 1998, etc.

// =====
// 4. Función para calcular el factor R para un año específico
// =====
var calculateRYear = function(year) {
  year = ee.Number(year); // Convertir el año a tipo numérico de Earth Engine
  var start = ee.Date.fromYMD(year, 1, 1); // Definir fecha inicial (1 de enero del año)

  var months = ee.List.sequence(0, 11); // Lista de meses (0 = enero, ..., 11 =
diciembre)

  // 4.1 Calcular la precipitación acumulada mensual
  var monthly = months.map(function(m) {
    m = ee.Number(m); // Convertir mes a número
    var ini = start.advance(m, 'month'); // Fecha de inicio del mes

```

```

var fin = ini.advance(1, 'month');    // Fecha final del mes

// Sumar toda la precipitación del mes (en mm)
var monthlyAccum = dataset.filterDate(ini, fin).sum()
    .set('month', m.add(1))          // Añadir metadato del mes (1-12)
    .set('year', year)              // Añadir metadato del año
    .set('system:time_start', ini.millis()); // Establecer tiempo de inicio
return monthlyAccum;
});

// 4.2 Convertir la lista de imágenes en una colección y apilar como bandas
var monthlyCollection = ee.ImageCollection.fromImages(monthly); // Convertir
lista en colección
var monthlyStack = monthlyCollection.toBands(); // Apilar las imágenes como
bandas (una por mes)

// 4.3 Calcular la precipitación total anual (P_total = suma de los 12 meses)
var P_total = monthlyStack.reduce(ee.Reducer.sum()).rename('P_total');

// 4.4 Obtener lista de nombres de bandas mensuales
var bandsList = monthlyStack.bandNames();

// 4.5 Función para calcular el factor R mensual para cada banda
var computeRMonth = function(bandName) {
var p_i = monthlyStack.select([bandName]); // Seleccionar banda mensual P_i

var piPositive = p_i.gt(0); // Máscara: considerar solo donde P_i > 0

var IMF = p_i.pow(2).divide(P_total); // Calcular  $P_i^2 / P_{total}$ 
var safeTerm = IMF.max(0.00001); // Evitar log(0) con valor mínimo seguro

```

```

// Aplicar la fórmula:  $R = 1.735 \times 10^{(1.5 * \log_{10}(P_i^2/P) - 0.08188)}$ 
var logTerm = safeTerm.log10();          //  $\log_{10}(P_i^2 / P)$ 
var exponent = logTerm.multiply(1.5).subtract(0.08188); // Exponente corregido
var power10_correct = exponent.multiply(Math.log(10)).exp(); //  $10^{\text{exponente}}$ 
var R_value = power10_correct.multiply(1.735); // Multiplicar por 1.735 (factor constante FAO)

// Si  $P_i = 0$ ,  $R = 0$ ; se enmascara donde no hay precipitación
var R_month = R_value.updateMask(piPositive).unmask(0).rename('R_month');

return R_month;
};

// 4.6 Aplicar la función para cada mes del año
var R_months = bandsList.map(function(bandName) {
    return computeRMonth(bandName); // Calcular R mensual para cada mes
});

// 4.7 Sumar los R mensuales para obtener el valor anual de R
var R_collection = ee.ImageCollection.fromImages(R_months); // Convertir lista a colección
var R_year = R_collection.sum()          // Sumar los 12 meses
    .set('year', year)                  // Establecer metadato de año
    .set('system:time_start', start.millis()); // Establecer fecha de inicio

return R_year; // Retornar imagen del factor R anual
};

// =====
// 5. Calcular la colección de imágenes anuales del factor R
// =====
var R_collection = ee.ImageCollection.fromImages(

```

```

years.map(calculateRYear) // Aplicar función a cada año
);

// =====
// 6. Visualizar el factor R del año 2020 en el mapa
// =====
var R_2020 = R_collection.filter(ee.Filter.eq('year', 2020)).first(); // Seleccionar año
2020

Map.centerObject(ayacuchoRegion, 7); // Centrar vista en Ayacucho
Map.addLayer(R_2020, {
  min: 0,
  max: 5000,
  palette: ['blue', 'cyan', 'green', 'yellow', 'orange', 'red'] // Paleta de colores
}, 'Factor R Año 2020'); // Añadir capa al mapa

// =====
// 7. Calcular y visualizar el promedio del factor R (1998–2024)
// =====
var R_mean = R_collection.mean().set('description',
'Factor_R_promedio_1998_2024'); // Promedio

Map.addLayer(R_mean, {
  min: 0,
  max: 200,
  palette: ['blue', 'cyan', 'green', 'yellow', 'orange', 'red'] // Paleta ajustada
}, 'Factor R Promedio 1998-2024'); // Añadir capa de promedio

// =====
// 8. Exportar el promedio multianual a Google Drive
// =====
Export.image.toDrive({

```

```

image: R_mean.clip(ayacuchoRegion), // Recortar a región de Ayacucho
description: 'Factor_R_Promedio_Ayacucho_1998_2024', // Nombre de tarea
folder: 'earthengine', // Carpeta de Drive
fileNamePrefix: 'Factor_R_Promedio_Ayacucho_1998_2024', // Nombre del
archivo
region: ayacuchoRegion, // Región para exportar
scale: 10000, // Escala en metros (10 km)
crs: 'EPSG:4326', // Sistema de coordenadas geográficas
fileFormat: 'GeoTIFF', // Formato de salida
maxPixels: 1e13 // Límite de píxeles
});
// =====
// 9. Calcular estadísticos (mínimo y máximo) del promedio y de 2020
// =====
// 9.1 Estadísticas del promedio multianual
var stats_mean = R_mean.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.minMax(), // Reducir para obtener valor mínimo y máximo
  geometry: ayacuchoRegion, // Área de análisis
  scale: 10000, // Escala (10 km)
  maxPixels: 1e13 // Límite de píxeles procesables
});
print('Min/Max Factor R Promedio 1998–2024:', stats_mean); // Imprimir al panel

// 9.2 Estadísticas del año 2020
var stats_2020 = R_2020.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.minMax(), // Reducir para mínimo y máximo
  geometry: ayacuchoRegion,
  scale: 10000,
  maxPixels: 1e13
});
print('Min/Max Factor R Año 2020:', stats_2020); // Imprimir al panel

```

**4.- PANEL FOTOGRÁFICO,
EVIDENCIAS SOBRE LA
VISITA AL CAMPO**

IMAGEN 1: Vista panorámica de parte baja de la microcuenca Paliza

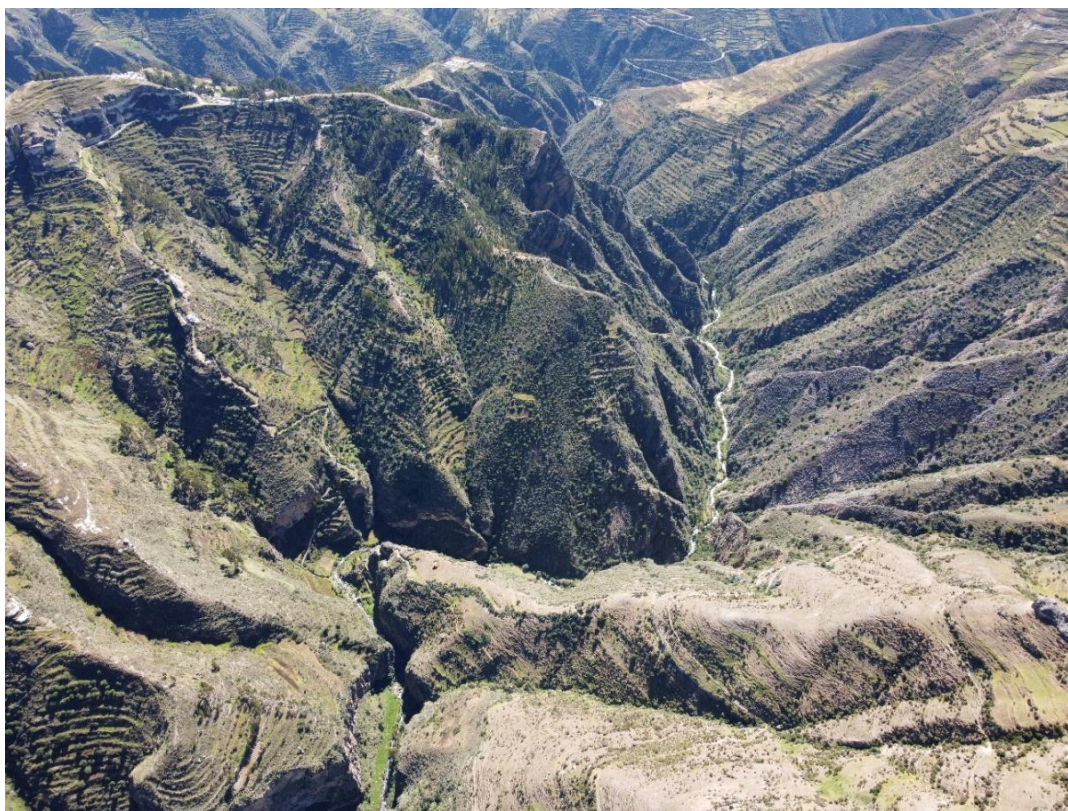


IMAGEN 2: Vista panorámica de parte baja de la microcuenca Paliza



IMAGEN 3: Vista panorámica de parte media de la microcuenca Paliza



IMAGEN 4: Vista panorámica de parte media de la microcuenca Paliza



IMAGEN 5: Vista panorámica de un suelo con poca vegetación



IMAGEN 6: Vista panorámica de las prácticas de conservación de los suelos



IMAGEN 7: Vista panorámica de la parte media de la microcuenca Paliza

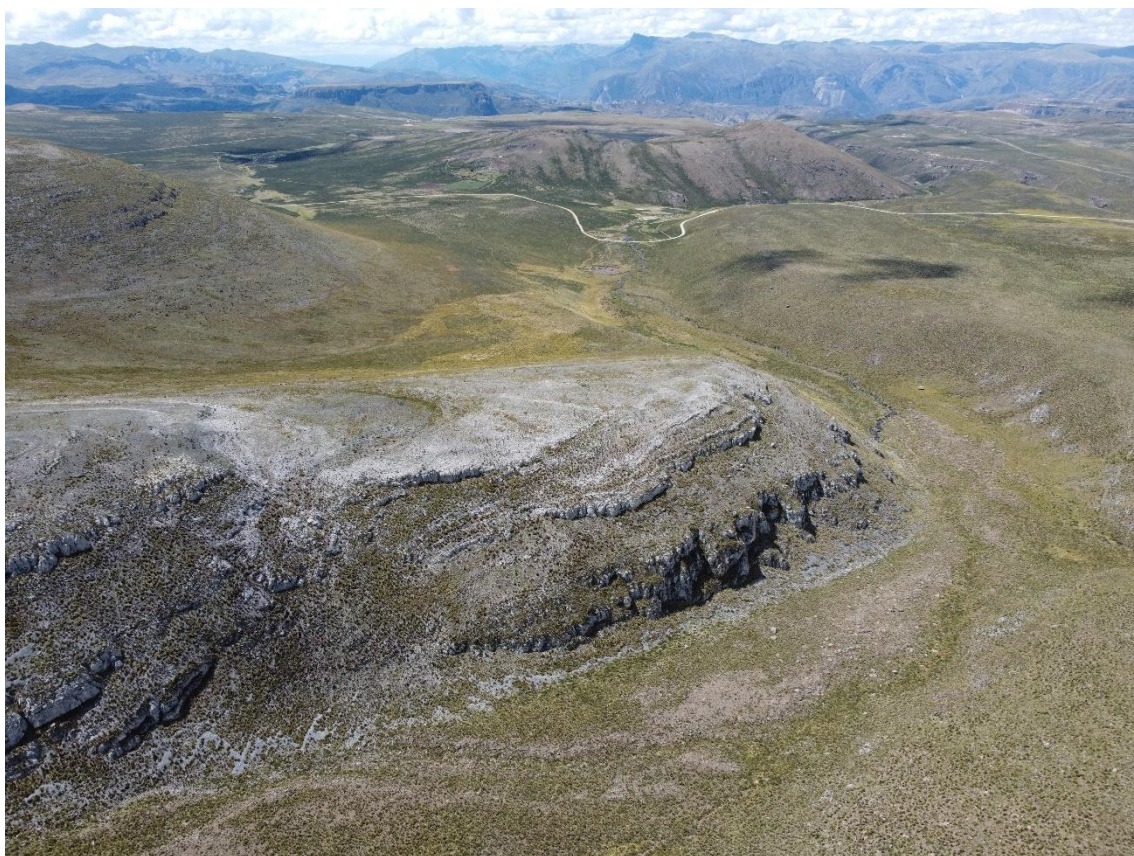


IMAGEN 8: Vista panorámica de la cabecera de la microcuenca Paliza



IMAGEN 9: Vista panorámica de los bofedales, pastos y matorrales en la parte alta de la microcuenca



IMAGEN 10: Vista panorámica de los suelos con poca vegetación



IMAGEN 11: Vista panorámica de las coberturas vegetales



IMAGEN 12: Visita al campo de estudio con el asesor de la tesis



IMAGEN 13: Vista panorámica de la parte alta de microcuenca Paliza



IMAGEN 14: Vista panorámica de la parte alta de microcuenca Paliza



IMAGEN 15: Vista panorámica de la clasificación de las coberturas vegetales



IMAGEN 16: Vista panorámica de la parte baja de la microcuenca en tiempos de sequía



IMAGEN 17: Muestreo del suelo; calicata N° 01



IMAGEN 18: Muestreo del suelo; calicata N° 01, verificado por el asesor.



IMAGEN 19: Muestreo del suelo; calicata N° 02



IMAGEN 20: Muestreo del suelo; calicata N° 03



IMAGEN 21: Muestreo del suelo; calicata N° 03



IMAGEN 22: Muestreo del suelo; calicata N° 04



IMAGEN 23: Muestreo del suelo; calicata N° 05



IMAGEN 24: Muestreo del suelo; calicata N° 05



IMAGEN 25: Muestreo del suelo; calicata N° 06



IMAGEN 26: Muestreo del suelo; calicata N° 06

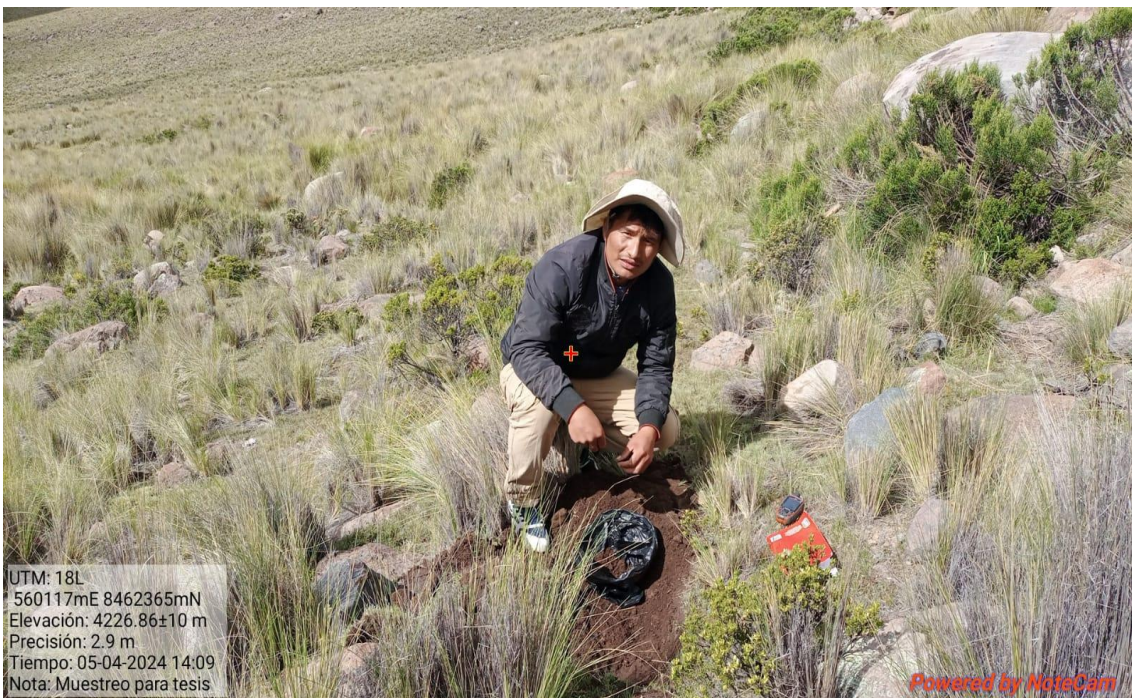


IMAGEN 27: Muestreo del suelo; calicata N° 07



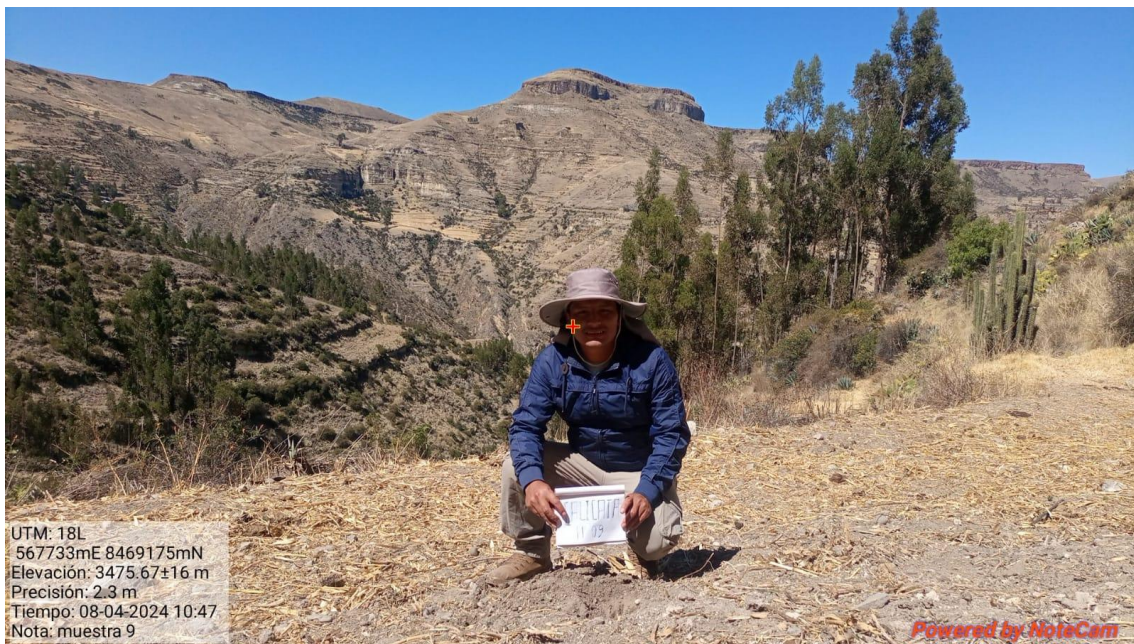
IMAGEN 28: Muestreo del suelo; calicata N° 07



IMAGEN 29: Muestreo del suelo; calicata N° 08



IMAGEN 30: Muestreo del suelo; calicata N° 09



**5.- RESULTADO DEL
ANÁLISIS DE LOS SUELOS
DENTRO DE LA
MICROCUENCA PALIZA**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
 FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
 PROGRAMA DE INVESTIGACION EN PASTOS Y GANADERIA
LABORATORIO DE SUELOS Y ANALISIS FOLIAR

Jr. Abraham Valdelomar N° 249 – Telf. 315936 966942996

Ayacucho – Perú

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

Región : Ayacucho HR. 0074
 Provincia : Huanca Sancos
 Distrito : Lucanamarca
 Localidad : Microcuenca Paliza
 Proyecto : "Estimación de pérdida de suelo aplicando el modelo RUSLE con datos de precipitación GPM_v6 en la Microcuenca Paliza – Lucanamarca – Huanca Sancos - Ayacucho 2024"
 Solicitantes : Sr. Luis Lucas García Allecahuaman

ANALISIS FISICO QUIMICO DE SUELO

Muestra Calicata	Coordenadas			Análisis Granulométrico			Clase Textural	Carbono total (%)
	E	N	Altitud	%Arena	%Limo	%Arcilla		
01	568206	8466925	3845	54.7	29.7	15.6	Fr-Ao	4.46
02	568623	8466554	3757	50.7	25.7	23.6	Fr-Ar-Ao	6.09
03	567035	8466760	3538	42.7	27.7	29.6	Fr-Ar	5.81
04	558675	8464557	4218	38.7	35.7	25.6	Fr	4.89
05	560098	8462853	4234	66.7	27.7	5.6	Fr-Ao	6.72
06	563087	8462103	4126	56.7	29.7	13.6	Fr-Ao	12.2
07	563762	8467090	3880	56.7	33.7	9.6	Fr-Ao	6.98
08	565604	8468635	3440	64.4	20.0	15.6	Fr-Ao	4.49
09	567801	8468826	3390	44.4	32.0	23.6	Fr	5.45

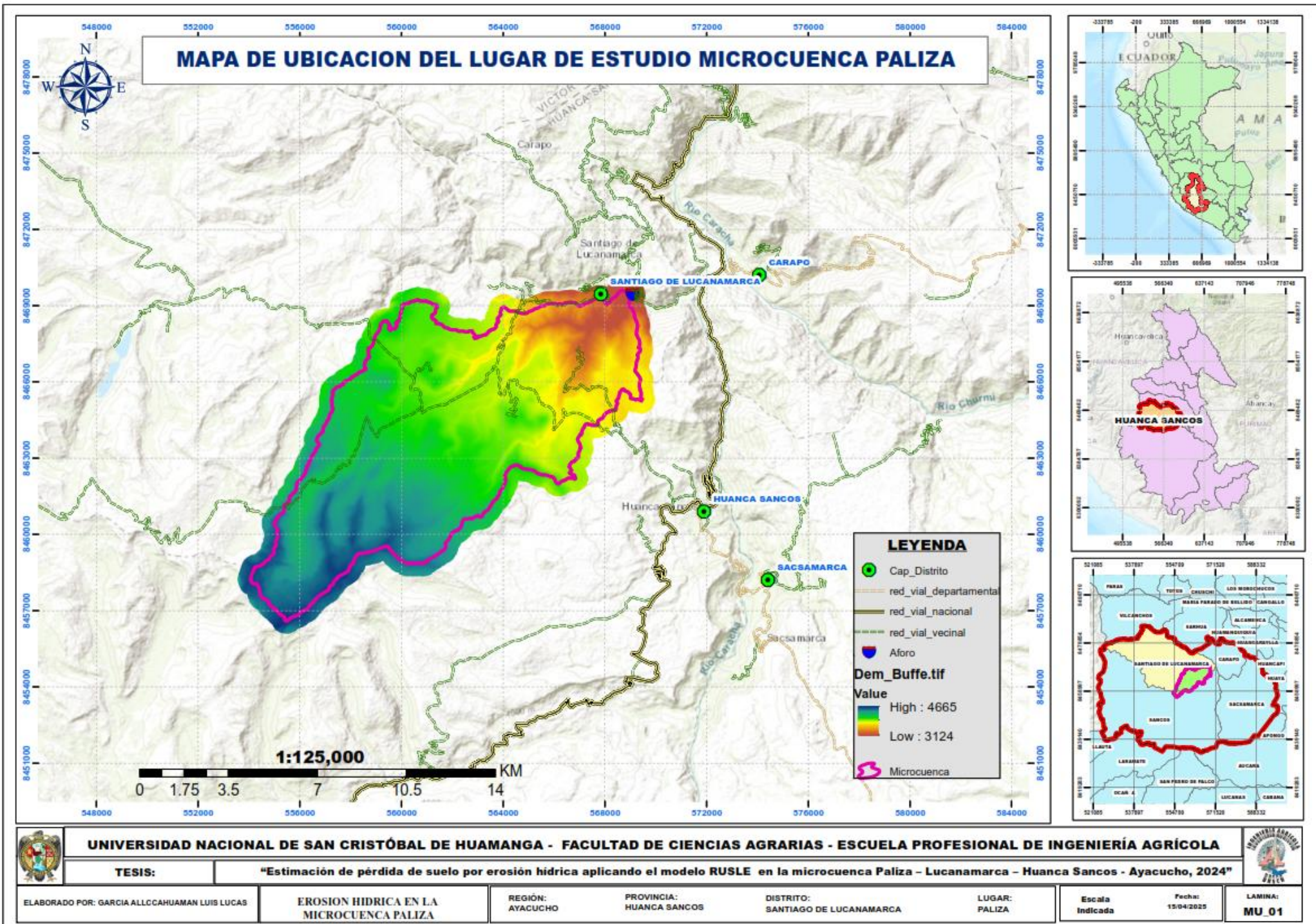
Ayacucho, 08 de Agosto del 2024.

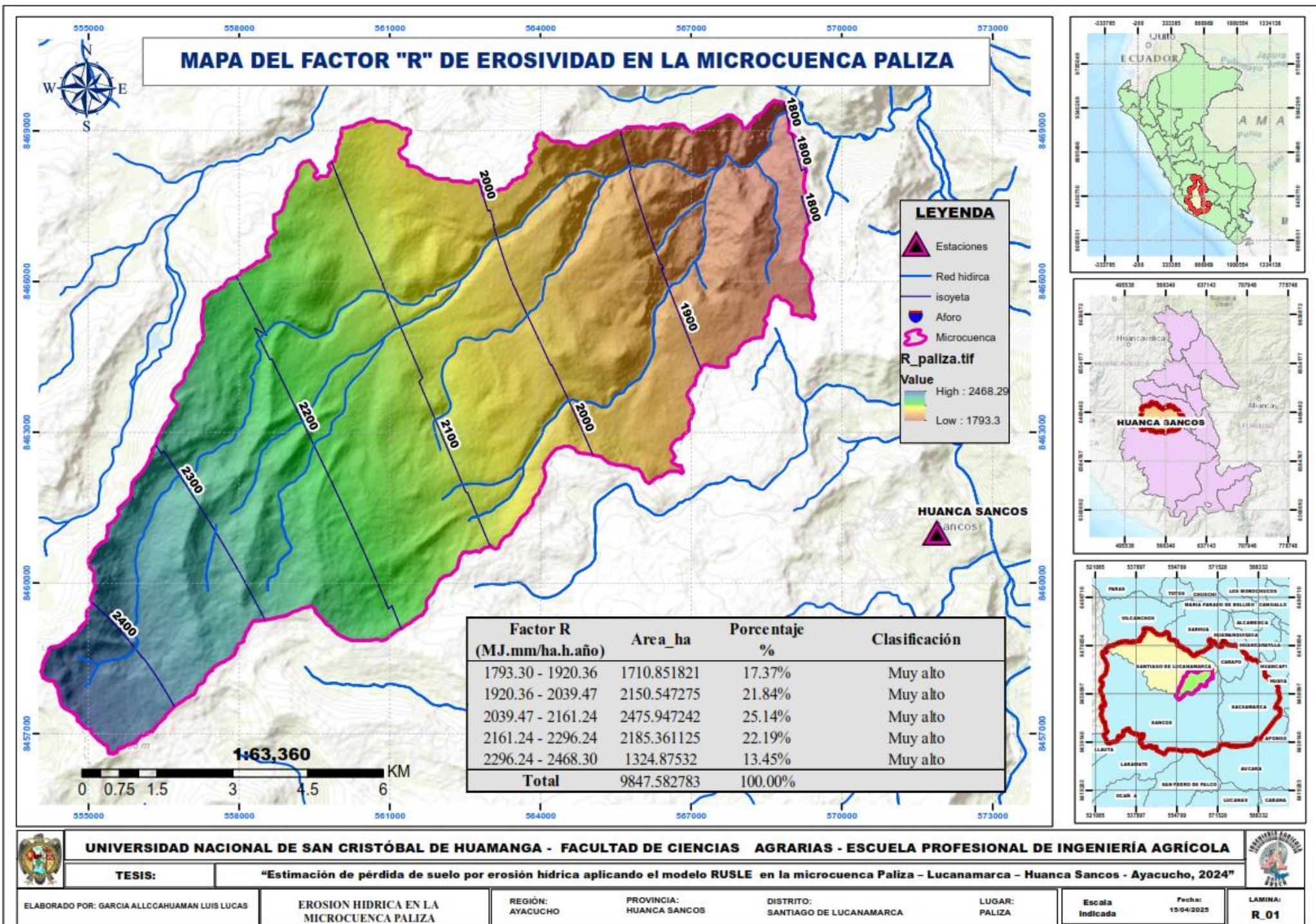
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS
 PLANTA, AGUAS Y FERTILIZANTES
 RESPONSABLE

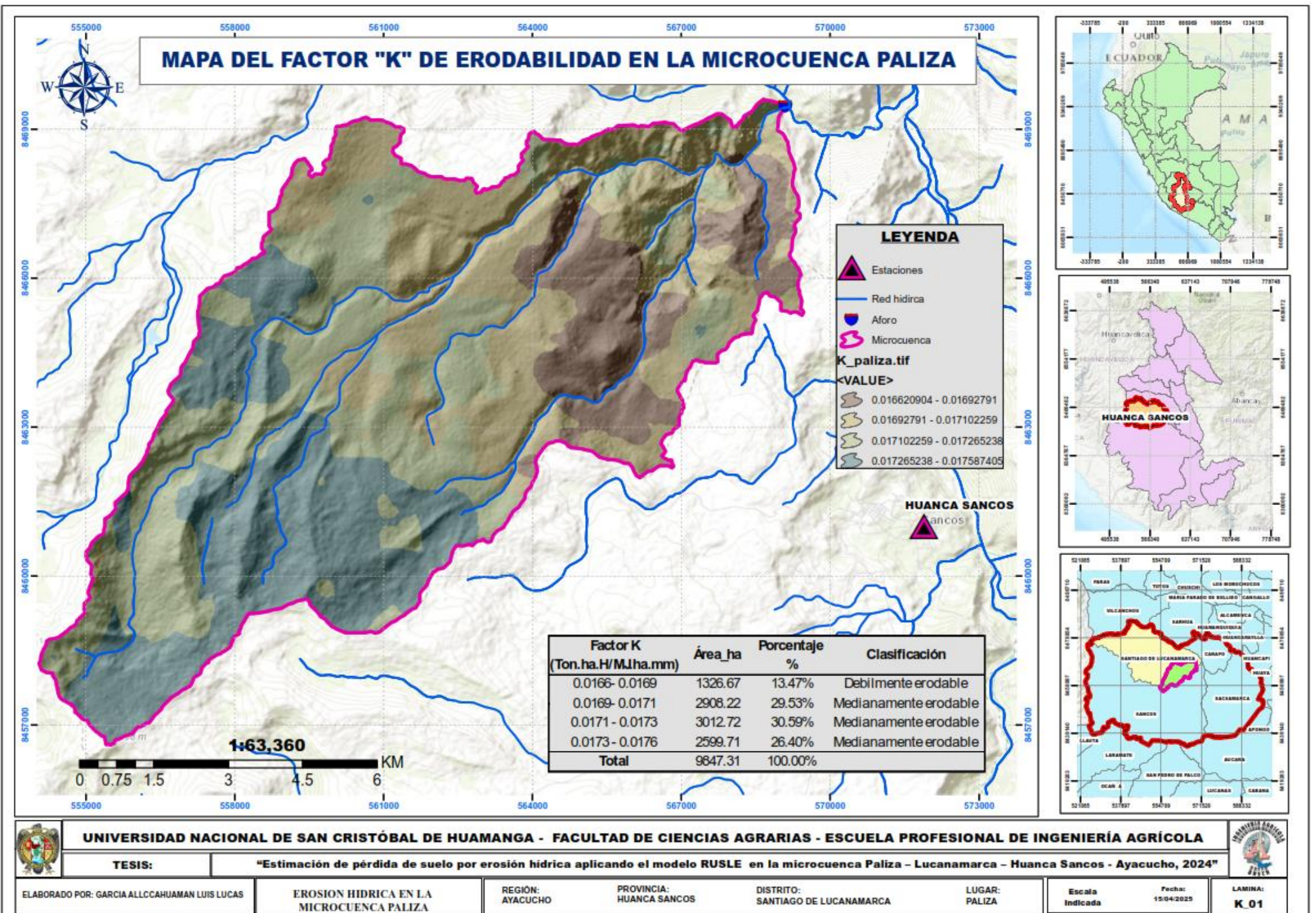
Juan B. Girón Molina
 C.I.P. 77120

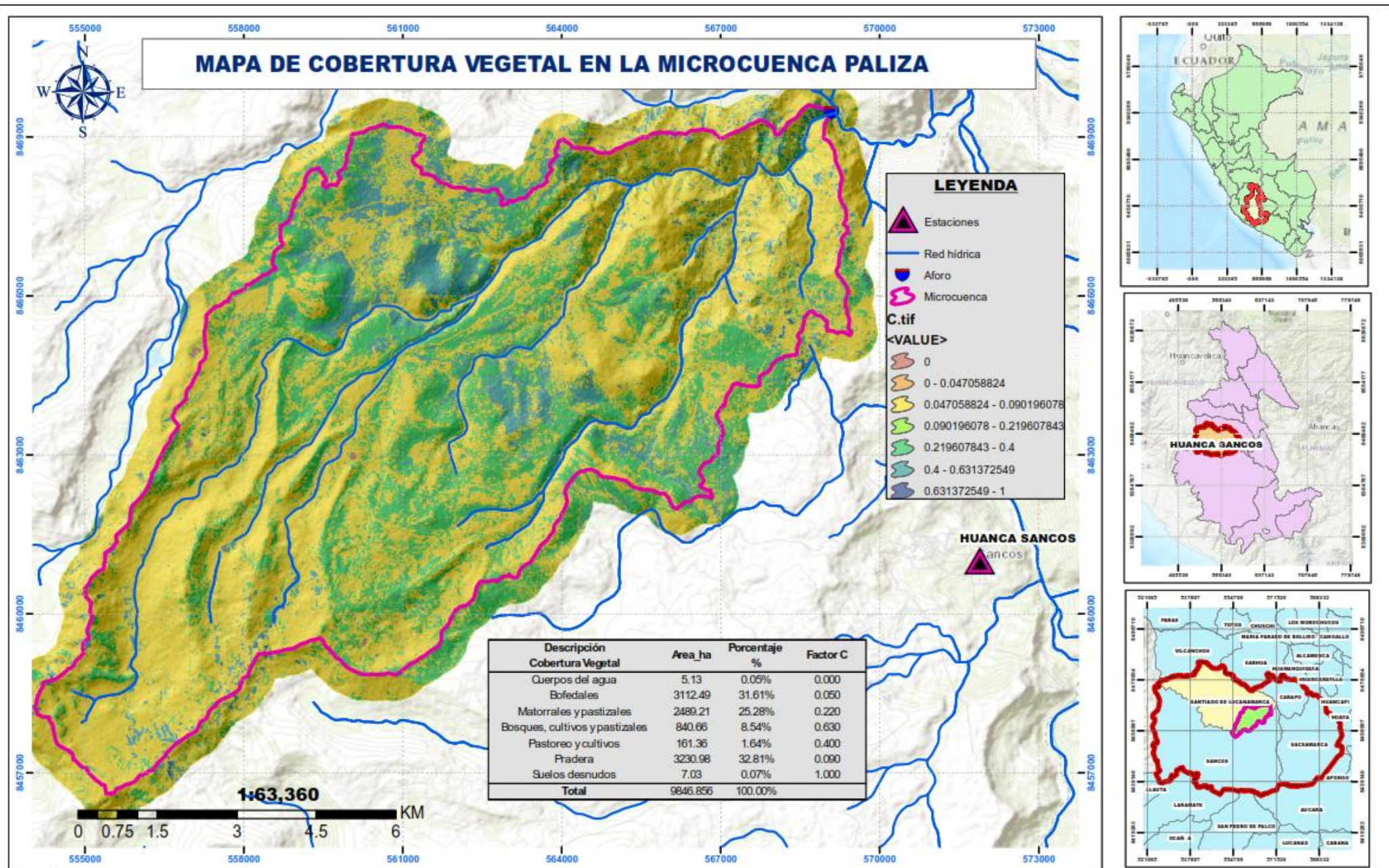
Ao: Arenoso; Ao-Fr: Arena franca; Fr-Ao: Franco arenosos; Fr: Franco; Fr-L: Franco limoso; L: Limoso; Fr-Ar-Ao: Franco arcillo arenoso; Fr-Ar: Franco arcilloso; Fr-Ar-L: Franco arcillo limoso; Ar-Ao: Arcillo arenoso; Ar-L: Arcillo limoso; Ar: Arcilloso

**6.- MAPAS TEMÁTICOS DE
LA EROSIÓN HÍDRICA Y DE
FACTORES DEL RUSLE**





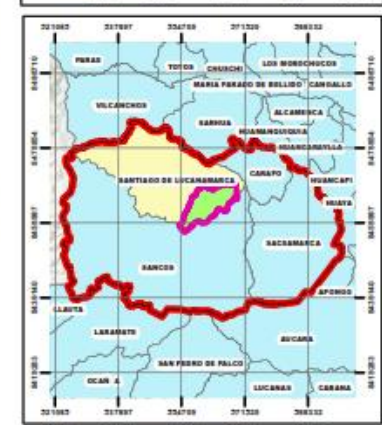
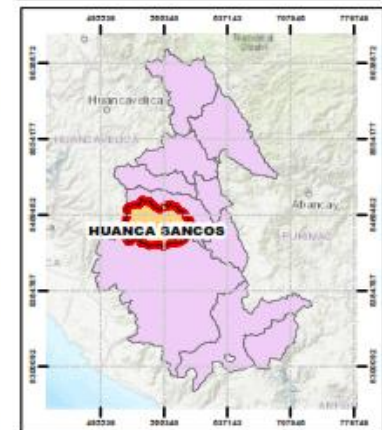
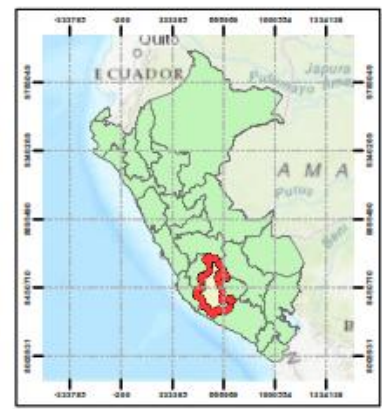
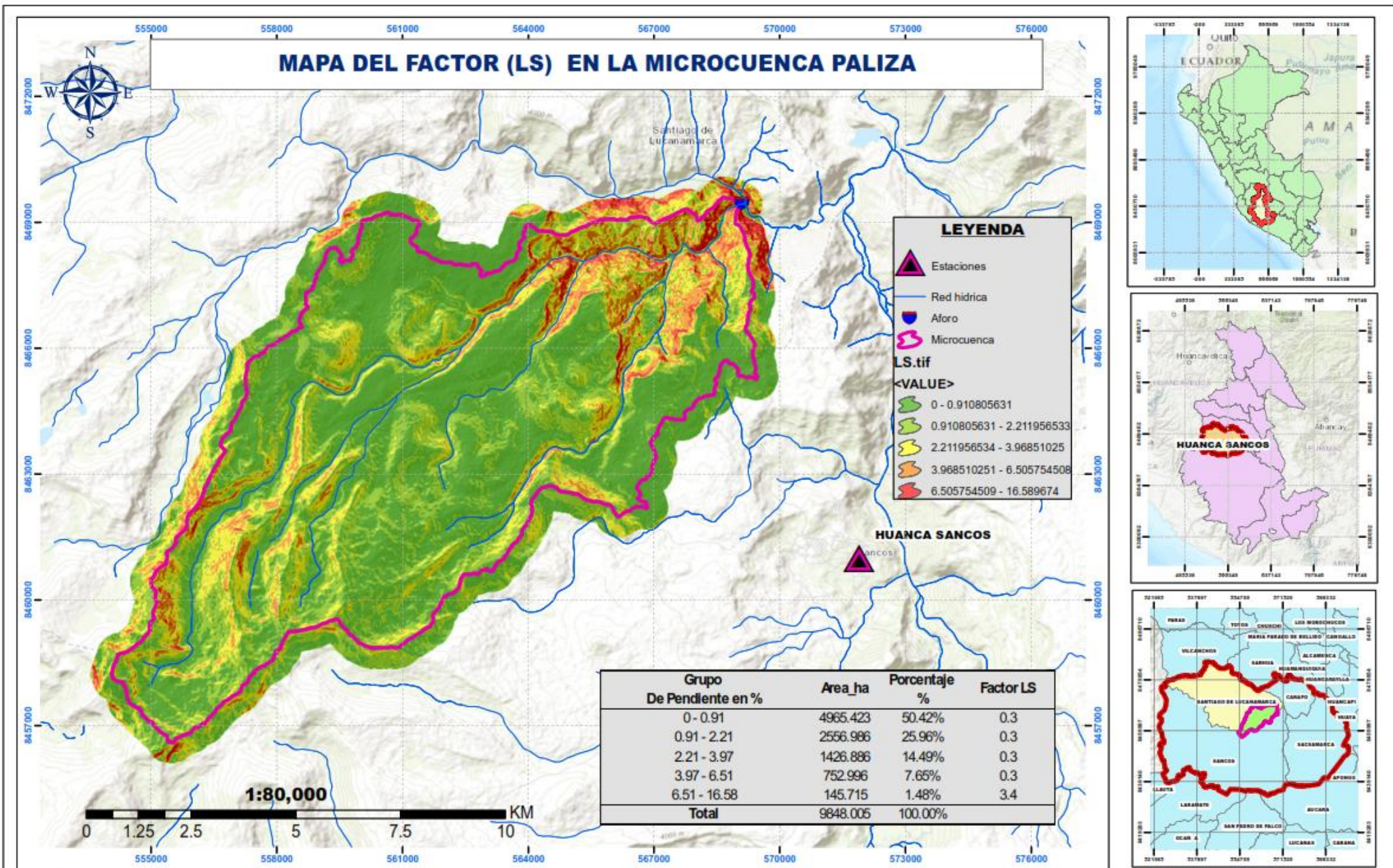


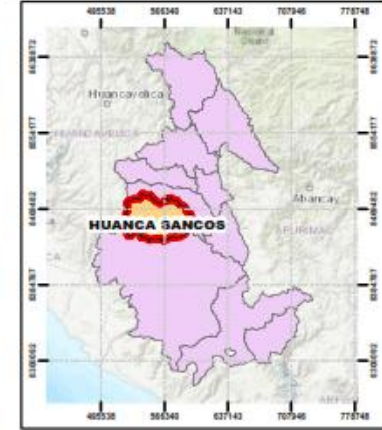
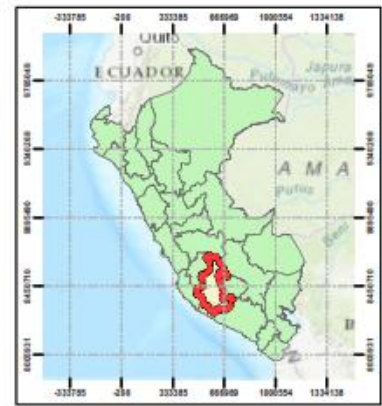
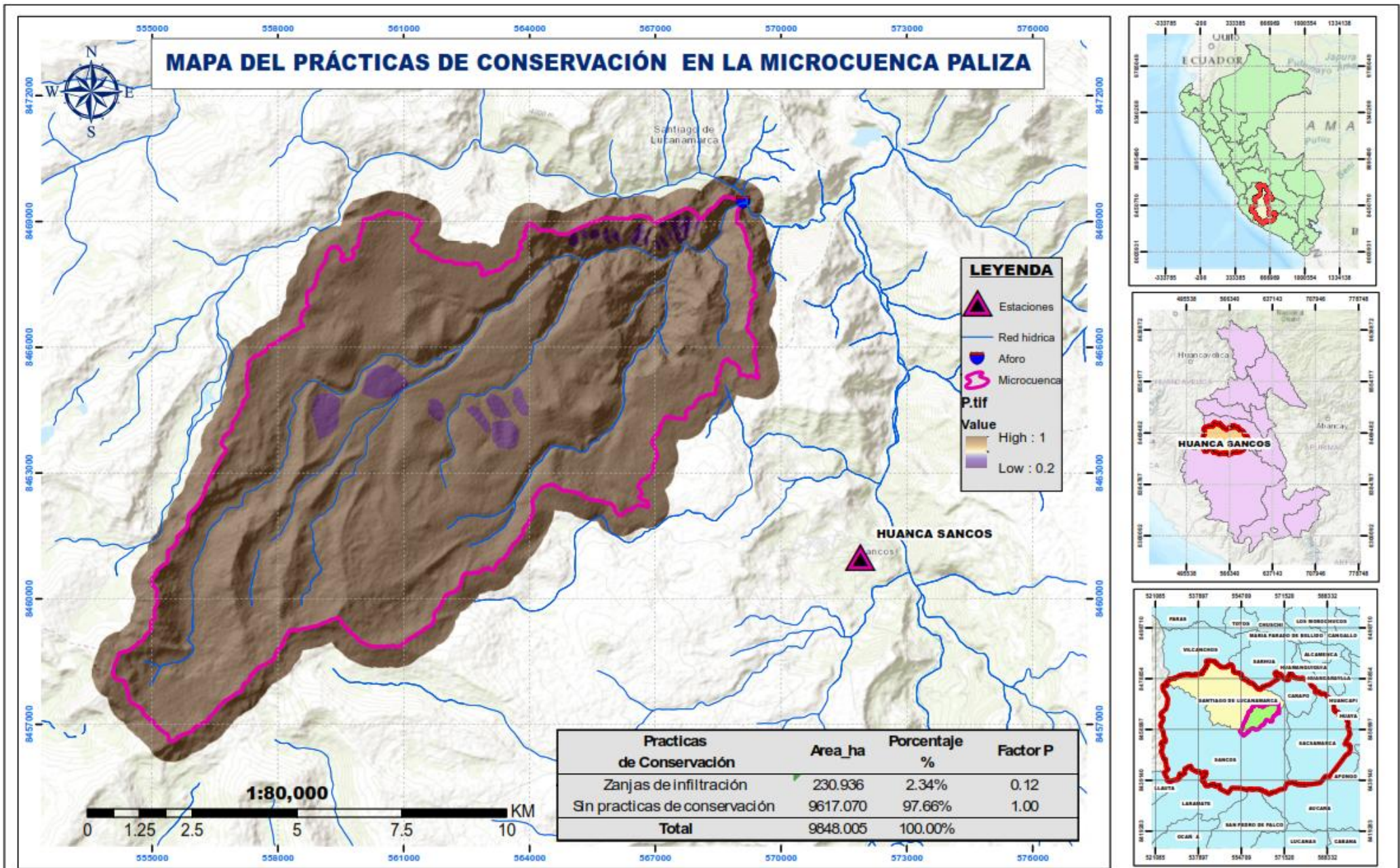


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA - FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS - ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

TESIS: "Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza - Lucanamarca - Huancasancos - Ayacucho, 2024"

ELABORADO POR: GARCIA ALLCAHUAMAN LUIS LUCAS	EROSION HIDRICA EN LA MICROCUENCA PALIZA	REGION: AYACUCHO	PROVINCIA: HUANCASANCOS	DISTRITO: SANTIAGO DE LUCANAMARCA	LUGAR: PALIZA	Escala Indicada	Fecha: 15/04/2025	LAMINA: C 01
--	--	------------------	-------------------------	-----------------------------------	---------------	-----------------	-------------------	--------------

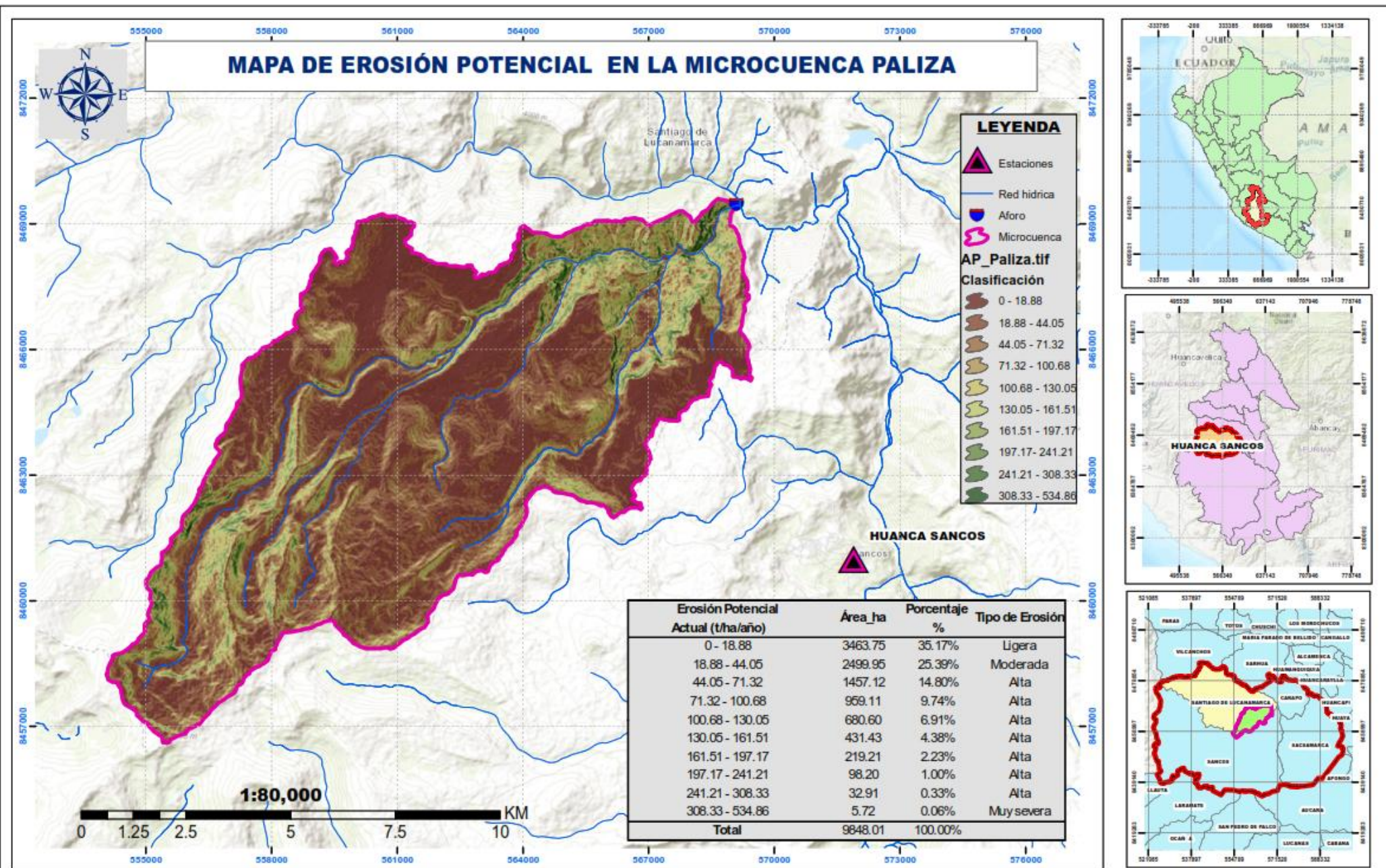




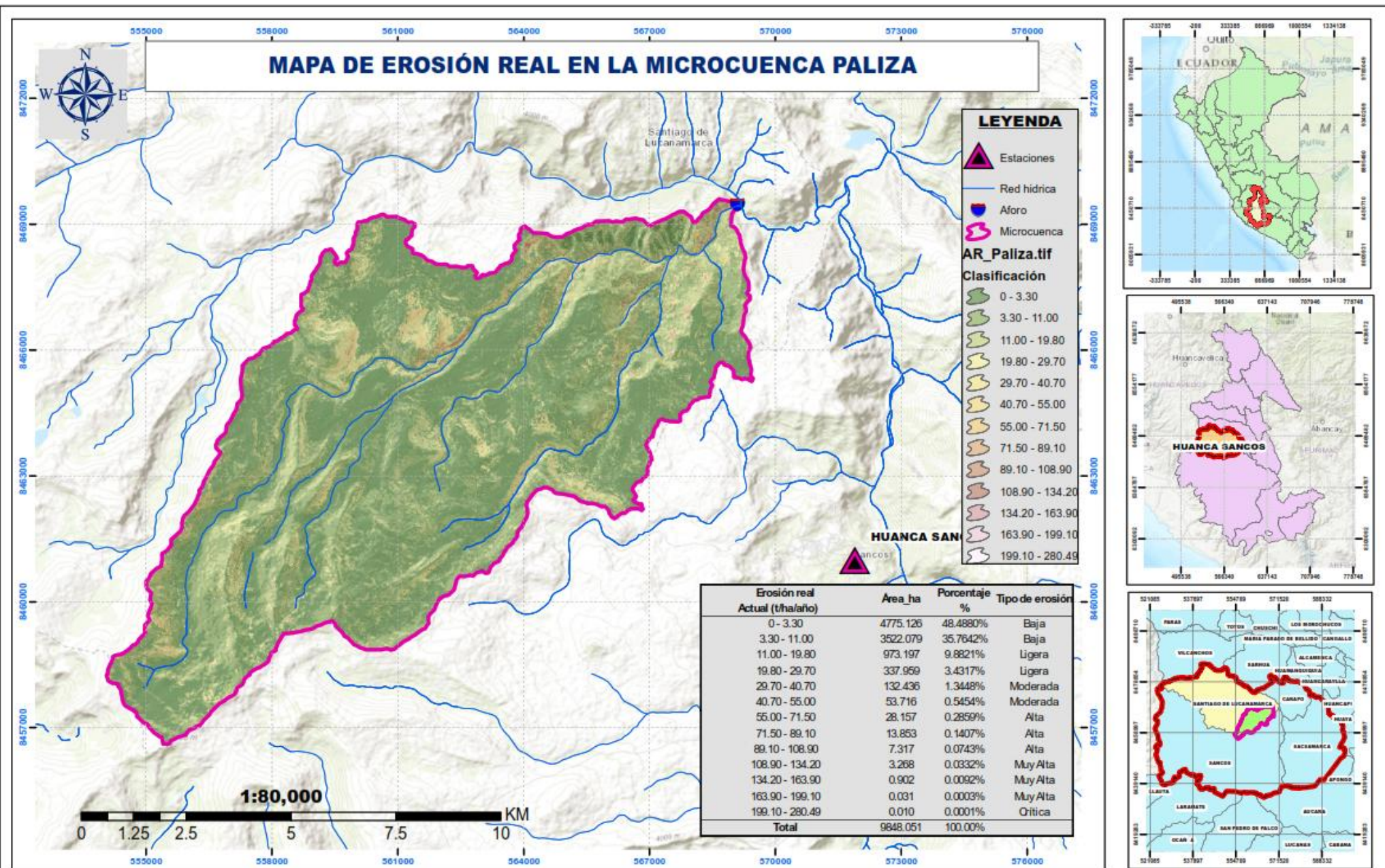
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA - FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS - ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

TESIS: "Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza - Lucanamarca - Huanca Sancos - Ayacucho, 2024"

ELABORADO POR: GARCIA ALLCAHUAMAN LUIS LUCAS	EROSION HIDRICA EN LA MICROCUENCA PALIZA	REGIÓN: AYACUCHO	PROVINCIA: HUANCA SANCOS	DISTRITO: SANTIAGO DE LUCANAMARCA	LUGAR: PALIZA	Escala Indicada	Fecha: 15/04/2025	LAMINA: P.01
--	--	------------------	--------------------------	-----------------------------------	---------------	-----------------	-------------------	--------------



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA - FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS - ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA				
TESIS:	"Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza - Lucanamarca - Huanca Sancos - Ayacucho, 2024"			
ELABORADO POR: GARCIA ALLCCAHUAMAN LUIS LUCAS	EROSION HIDRICA EN LA MICROCUENCA PALIZA	REGIÓN: AYACUCHO	PROVINCIA: HUANCA SANCOS	DISTRITO: SANTIAGO DE LUCANAMARCA
			LUGAR: PALIZA	Escala Indicada
				Fecha: 15/04/2025
				LAMINA: AP_01



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA - FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS - ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

TESIS:

"Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza - Lucanamarca - Huanca Sancos - Ayacucho, 2024"

ELABORADO POR: GARCIA ALLCAHUAMAN LUIS LUCAS

EROSION HIDRICA EN LA MICROCUENCA PALIZA

REGIÓN:
AYACUCHO

PROVINCIA:
HUANCA SANCOS

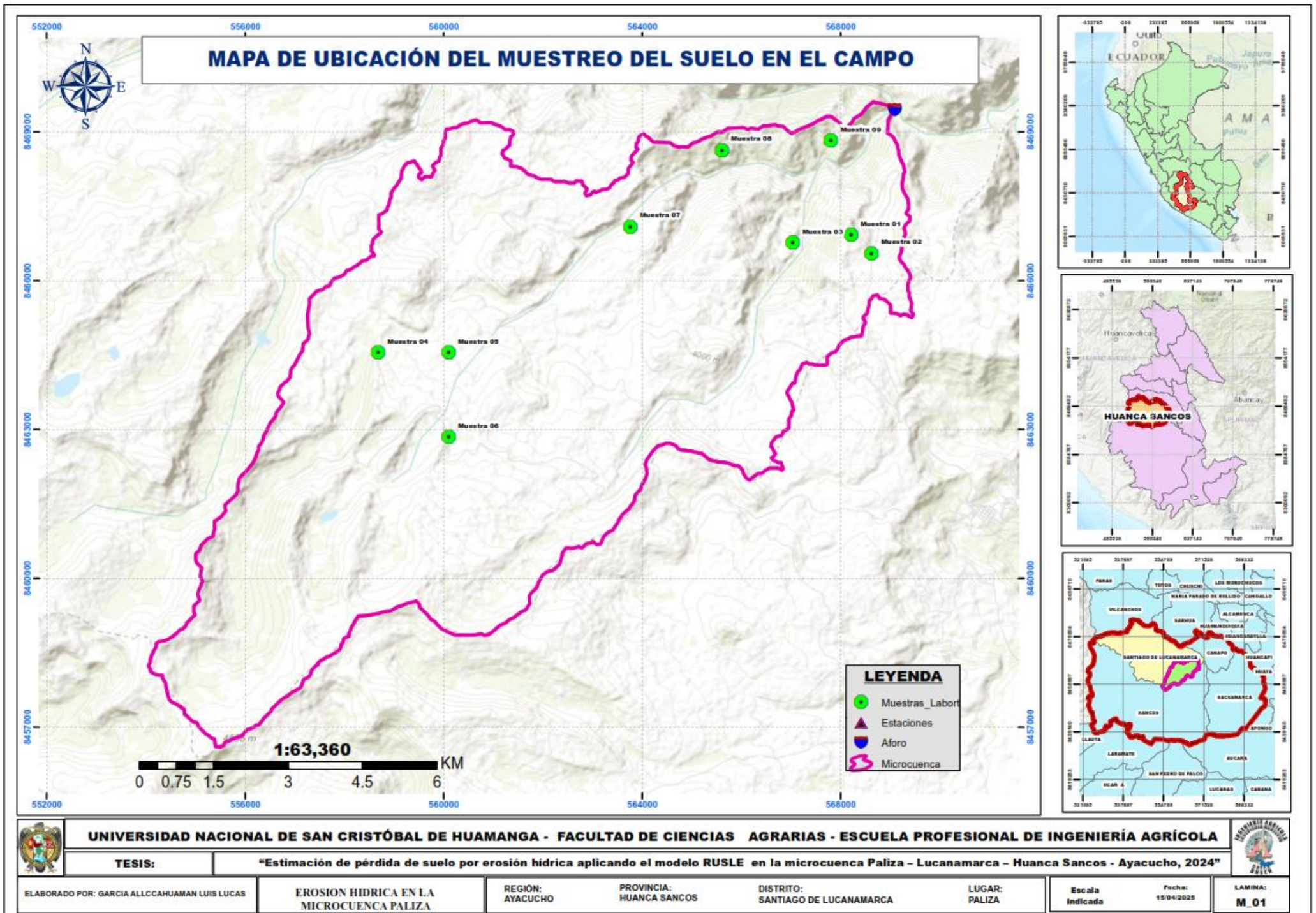
DISTRITO:
SANTIAGO DE LUCANAMARCA

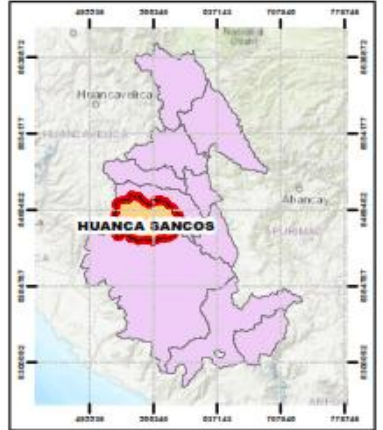
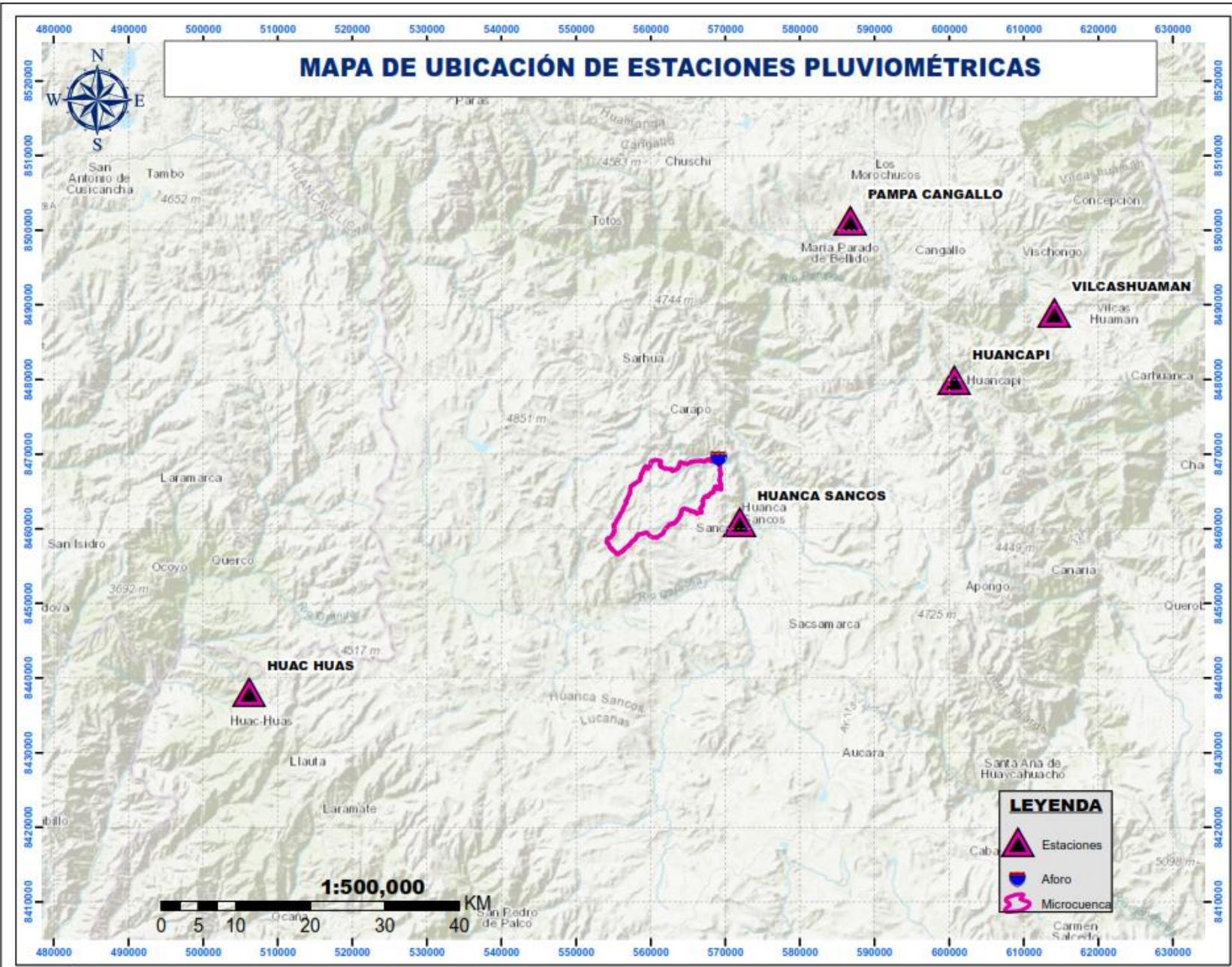
LUGAR:
PALIZA

Escala
Indicada

Fecha:
15/04/2025

LAMINA:
AR_01





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA - FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS - ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA									
TESIS:		"Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza - Lucanamarca - Huanca Sancos - Ayacucho, 2024"							
ELABORADO POR: GARCIA ALLCCAHUAMAN LUIS LUCAS	EROSION HIDRICA EN LA MICROCUENCA PALIZA	REGION: AYACUCHO	PROVINCIA: HUANCASANCOS	DISTRITO: SANTIAGO DE LUCANAMARCA	LUGAR: PALIZA	Escala Indicada	Fecha: 15/04/2025	LAMINA: E 01	

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**
Bach. LUIS LUCAS GARCIA ALLCCAHUAMAN**R.D. N° 159-2025-UNSCH-FCA-D**

En la ciudad de Ayacucho a los diez días del mes de julio del año dos mil veinticinco, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por la Ph.D. Sandra Del Águila Ríos, M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán como asesor, Mg. Alex Lázaro Tineo Bermúdez y el Dr. Eleazar Chuchón Angulo; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza - Lucanamarca - Huanca Sancos - Ayacucho, 2024**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola, presentado por el Bachiller **LUIS LUCAS GARCIA ALLCCAHUAMAN**.

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Ph.D. Sandra Del Águila Ríos	16	14	16	15
M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán	16	16	16	16
Mg. Alex Lázaro Tineo Bermúdez	16	15	18	16
Dr. Eleazar Chuchón Angulo	17	18	17	17
PROMEDIO GENERAL				16

Acto seguido se invita al sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.

.....
Ph.D. Sandra Del Águila Ríos
Presidente

.....
M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán
Asesor

.....
Mg. Alex Lázaro Tineo Bermúdez
Jurado

.....
Dr. Eleazar Chuchón Angulo
Jurado

.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente



UNSCH

FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativisar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por R.C.F. N° N° 005-2024-UNSCH-FCA-CF; hace constar que el trabajo titulado;

Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza – Lucanamarca – Huanca Sancos - Ayacucho, 2024

Autor : Luis Lucas Garcia Allicahuaman

Asesor : César Vidal Gutiérrez Ninahuamán

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de Tesis, aprobado mediante la RCU N° 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de dieciséis por ciento (**16 %**) de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajos estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con Identificador de la entrega: 2719304074

Ayacucho, 22 de julio de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias
Ing. Edgar Tenorio Mancilla
Coordinador de Control de originalidad de
trabajo de Investigación y tesis - FCA

Estimación de pérdida de suelo
por erosión hídrica aplicando el
modelo RUSLE en la
microcuenca Paliza –
Lucanamarca – Huanca Sancos
- Ayacucho, 2024

por LUIS LUCAS GARCIA ALLCCAHUAMAN

Fecha de entrega: 22-jul-2025 10:27p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2719304074

Nombre del archivo: BORRADOR_DE_TESIS_LUIS_GARCIA_1_1_.pdf (5.52M)

Total de palabras: 37117

Total de caracteres: 177140

Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza – Lucanamarca – Huanca Sancos - Ayacucho, 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	15%	7%	9%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	3%
	Trabajo del estudiante	
2	hdl.handle.net	3%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.unsch.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.unas.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.lamolina.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.untumbes.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
7	repositorio.unap.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.upn.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
9	Submitted to uncedu	<1%
	Trabajo del estudiante	
10	1library.co	<1%
	Fuente de Internet	
11	repositorio.inta.gob.ar	
	Fuente de Internet	

<1 %

12 repositorio.ucss.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

13 Submitted to Universidad Nacional Hermilio
Valdizan
Trabajo del estudiante

<1 %

14 idoc.pub
Fuente de Internet

<1 %

15 dspace.unach.edu.ec
Fuente de Internet

<1 %

16 www.ana.gob.pe
Fuente de Internet

<1 %

17 Submitted to Universidad Privada Boliviana
Trabajo del estudiante

<1 %

18 repositorio.uncp.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

19 repositorio.utea.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

20 Submitted to Universidad Nacional Autonoma
de Chota
Trabajo del estudiante

<1 %

21 Jesús Mejía-Marcacuzco, Edwin Pino-Vargas,
Edilberto Guevara-Pérez, Víctor Olivos-Alvites,
Milagros Condori-Ventura. "Predicción
espacial de la erosión del suelo en zonas
áridas mediante teledetección. Estudio de
caso: Quebrada del Diablo, Tacna, Perú",
Revista Ingeniería UC, 2021
Publicación

<1 %

22 www.senamhi.gob.pe
Fuente de Internet

<1 %

23	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
24	ri.uaemex.mx Fuente de Internet	<1 %
25	orcid.org Fuente de Internet	<1 %
26	polodelconocimiento.com Fuente de Internet	<1 %
27	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
28	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
29	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
30	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
31	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
32	Isolina C. Gutiérrez Aguilar, Miguel E. Blanco Chávez. "Erosión hídrica superficial en la microcuenca del río Mancotal en Jinotega Nicaragua, 1996 - 2015", Nexa Revista Científica, 2021 Publicación	<1 %
33	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
34	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
35	Submitted to Universidad Católica de Santa María	<1 %

36 Condori Apaza, Valeriano. "Pérdida del suelo por erosión hídrica en la comunidad de San Francisco de Chañajari Moho - Puno", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru)
Publicación

37 Submitted to Universidad Continental
Trabajo del estudiante

38 upc.aws.openrepository.com
Fuente de Internet

39 oa.upm.es
Fuente de Internet

40 www.repositorio.usac.edu.gt
Fuente de Internet

41 pt.scribd.com
Fuente de Internet

42 www.aet.org.es
Fuente de Internet

43 baixardoc.com
Fuente de Internet

44 repositorio.upt.edu.pe
Fuente de Internet

45 dspace.unl.edu.ec
Fuente de Internet

46 Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina
Trabajo del estudiante

47 www.slideshare.net
Fuente de Internet

48

Fuente de Internet

<1%

49

Submitted to Universidad Católica Santa
María la Antigua

Trabajo del estudiante

<1%

50

cia.uagraria.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza – Lucanamarca – Huanca Sancos - Ayacucho, 2024

Estimation of Soil Loss from Water Erosion Applying the RUSLE Model in the Paliza – Lucanamarca - Huanca Sancos Micro - watershed, Ayacucho, 2024

Luis Lucas Garcia Allccahuaman¹,
luis.garcia.21@unsch.edu.pe

César Vidal Gutiérrez Ninahuamán²
cesar.gutierrez@unsch.edu.pe

Áreas de investigación: Medio Ambiente

Línea de investigación: Hidrología e hidráulica

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo estimar la erosión hídrica en la microcuenca Paliza (98.48 km²), ubicada en el distrito de Lucanamarca, provincia de Huanca Sancos, región Ayacucho, aplicando la metodología RUSLE. Para ello, se empleó la plataforma Google Earth Engine (GEE) junto con el lenguaje de programación JavaScript, con el fin de descargar y procesar los valores del factor R obtenidos a partir de series temporales del satélite GPM, los cuales fueron ajustados con datos de R observados calculados de los datos proporcionados por el SENAMHI. En cuanto al factor K de erodabilidad, se emplearon datos provenientes de SoilGrids, los cuales fueron ajustados con los datos obtenidos de las mediciones del campo. El factor R se calculó mediante la ecuación de Wischmeier y Smith (1978), clasificando la erosividad como muy alta. El factor K indicó suelos medianamente erodable. El factor LS mostró pendientes suaves en la mayor parte del área y mayores pendientes en zonas bajas. El factor C se derivó mediante clasificación supervisada de imágenes del satélite Sentinel 2A, identificando matorrales y pastizales como coberturas predominantes. El factor P se asignó según prácticas de conservación observadas en campo, como zanjas de infiltración y cultivos en terrazas. La erosión hídrica potencial promedio fue de 49.92 t/ha/año, clasificada como moderada. La erosión real promedio fue de 6.88 t/ha/año, clasificada como ligera. Las mayores tasas de pérdida de suelo se registraron en la parte baja de la microcuenca, asociadas a pendientes más pronunciadas. Finalmente, se elaboraron mapas temáticos de pérdida de suelo y de cada uno de los factores RUSLE, siguiendo la clasificación de la FAO. Estos mapas constituyen herramientas clave para la planificación y gestión sostenible de los recursos edáficos en la microcuenca Paliza.

Palabras clave: Erosión hídrica, pérdida de suelos, prácticas de conservación, Google Earth Engine, Satélite GPM, SoilGrids, Sentinel-2A, RUSLE.

ABSTRACT

The objective of this study was to estimate water erosion in the Paliza micro-watershed (98.48 km²), located in the district of Lucanamarca, province of Huanca Sancos, Ayacucho region, by applying the RUSLE methodology. To this end, the Google Earth Engine (GEE) platform was used in combination with the JavaScript programming language to download and process R factor values derived from GPM satellite time series. These values were calibrated with observed R values calculated using data provided by SENAMHI.

For the soil erodibility factor (K), data from the SoilGrids database were used and adjusted with field measurements. The R factor was calculated using the Wischmeier and Smith (1978) equation, classifying rainfall erosivity as very high. The K factor indicated moderately erodible soils. The LS factor revealed gentle slopes throughout most of the area, with steeper slopes in lower-lying zones. The C factor was derived through supervised classification of Sentinel-2A satellite imagery, identifying shrublands and grasslands as the predominant land covers. The P factor was assigned based on conservation practices observed in the field, such as infiltration ditches and terraced agriculture.

The average potential water erosion was estimated at 49.92 t/ha/year, classified as moderate, while the average actual erosion was 6.88 t/ha/year, classified as slight. The highest soil loss rates were recorded in the lower part of the micro-watershed, associated with steeper slopes. Finally, thematic maps of soil loss and each RUSLE factor were developed following FAO classification standards. These maps represent essential tools for the sustainable planning and management of soil resources in the Paliza micro-watershed.

Keywords: water erosion, soil loss, conservation practices, Google Earth Engine, GPM satellite, SoilGrids, Sentinel-2A, RUSLE.

I. INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es uno de los principales procesos de degradación del suelo a nivel mundial, afectando negativamente la productividad agrícola, la calidad del agua y el equilibrio ecológico de las cuencas hidrográficas. Este fenómeno implica el desprendimiento y transporte de partículas del suelo como arcilla, limo, arena y materia orgánica debido al impacto de las gotas de lluvia y al escurrimiento superficial, ya sea en forma laminar o concentrada (erosión en surcos). En regiones con topografía abrupta, como las zonas altoandinas del Perú, la acción de la gravedad intensifica este proceso (Brea & Bolocche, 2016).

En la microcuenca Paliza (Lucanamarca, Ayacucho), la erosión hídrica representa un problema crítico debido a factores como el uso inadecuado del suelo, la deforestación, las prácticas agrícolas no sostenibles, la alta pendiente del terreno y la limitada implementación de medidas de conservación. Esta situación amenaza la seguridad alimentaria local, incrementa el riesgo de movimientos en masa y sedimentación de cauces, y pone en peligro los recursos hídricos disponibles para consumo humano y riego (FAO, 2019; Soto & López, 2017).

Frente a esta problemática, se justifica la necesidad de evaluar cuantitativamente la pérdida de suelo en la microcuenca, a fin de establecer lineamientos de planificación y manejo sostenible del territorio. En ese contexto, la aplicación del modelo empírico RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) se presenta como una herramienta eficaz, debido a su capacidad de integrar cinco factores determinantes de la erosión: la erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), la longitud e inclinación de la pendiente (LS), el tipo de cobertura vegetal (C) y las prácticas de conservación (P). Este modelo, ampliamente utilizado y validado en estudios similares, es

especialmente útil cuando se combina con herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo cual permite analizar espacialmente grandes extensiones con alta resolución.

Además, la utilización de datos satelitales, como los proporcionados por el Global Precipitation Measurement (GPM), ofrece una alternativa viable para la caracterización climática de zonas donde no existe una densa red de estaciones meteorológicas. La integración de estos datos grillados, previa validación con información observada, mejora significativamente la estimación del factor R (García-Ruiz et al., 2015; Ochoa-Cueva et al., 2015).

Finalmente, los resultados del presente estudio expresados en mapas temáticos de pérdida de suelo permiten clasificar los niveles de erosión según los umbrales establecidos por la FAO, proporcionando información clave para priorizar intervenciones y promover la implementación de prácticas de conservación de suelos adaptadas a las condiciones particulares de la microcuenca Paliza.

Objetivo general

Estimar la erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE, con datos de precipitación de GPM en la microcuenca Paliza – Lucanamarca – Huanca Sancos - Ayacucho, 2024.

Objetivos específicos

1. Obtener los valores del factor de erosividad (R) del GPM y ajustar con valores observados de (SENAMHI).
2. Determinar los parámetros del modelo RUSLE para estimar la erosión hídrica en la microcuenca Paliza.
3. Estimar la pérdida del suelo mediante el modelo RUSLE en la microcuenca Paliza.
4. Elaborar mapas de pérdidas de suelos en la microcuenca Paliza (según clasificación FAO).

II. MATERIALES Y METODOS

2.1. Área de estudio

La microcuenca Paliza se encuentra en la región Ayacucho, provincia Huanca Sancos, distrito Lucanamarca. Presenta altitudes entre 3,100 y 4,000 m s.n.m., clima semiárido templado con lluvias concentradas entre noviembre y marzo, y uso predominante de tierras agropecuarias, bofedales y praderas naturales.

2.2. Datos Utilizados

Tabla 1

Datos necesarios para el presente estudio

Variable	Fuente
Precipitación	Satélite GPM (1998–2024), SENAMHI
Suelo	SoilGrids 250 m, análisis de laboratorio
Cobertura	Sentinel-2A, verificación con dron
Topografía	ALOS PALSAR (12.5 m)
Software	GEE, ArcGIS, QGIS, Excel

2.3. Procedimiento Metodológico

2.3.1. Delimitación de la microcuenca

1. Para la obtención del Modelo de Elevación Digital (MED) de alta resolución (12.5 m), se identificó y delimitó el área de estudio correspondiente a la microcuenca Paliza, incluyendo el punto de aforo. La descarga del MED se realizó desde el portal de ALOS PALSAR mediante la plataforma EARTHDATA.

2. Una vez obtenido el MED, se procedió a realizar la corrección de depresiones espurias (sinks) utilizando la herramienta Fill, ubicada en ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill en el entorno de ArcGIS 10.5. Esta operación permitió asegurar la continuidad del flujo hídrico superficial.

3. Con el MED corregido, se generó el mapa de dirección de flujo mediante la herramienta Flow Direction, accediendo a ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction. Este paso fue esencial para

establecer la dirección en la que se desplaza el agua sobre la superficie del terreno.

4. Posteriormente, se generó el mapa de acumulación de flujo mediante la herramienta Flow Accumulation, localizada en ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation. Esta capa permite identificar las zonas de concentración del escurrimiento superficial.

5. Con la dirección y acumulación de flujo generadas, se definió el punto de aforo mediante la creación de un archivo vectorial tipo shapefile. Este punto fue rasterizado y ajustado a la celda más próxima al flujo mediante la herramienta Snap Pour Point (ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Snap Pour Point).

6. Finalmente, con el punto de aforo y los datos hidrológicos generados, se delineó la microcuenca de estudio. A partir de ella, se calcularon los parámetros morfométricos básicos: área de drenaje, perímetro, coeficiente de compacidad, relación de elongación, pendiente media y red hidrográfica, fundamentales para el análisis hidrológico y erosivo.

2.3.2. Cálculo del factor R (erosividad)

1. Análisis estadísticos e interpretación de los datos observados

a. Imputación, extensión y Análisis estadísticos de datos históricos observados (SENAMHI)

Se recopiló información de SENAMHI, ANA y OPEMAN, y se completaron y extendieron los datos mediante el método Cutoff usando el paquete “CutoffR” en RStudio. Luego, se aplicaron análisis estadísticos con las tablas de Fisher y Student, y se corrigieron los datos según la metodología de Villón Vegar (Hidrología estadística). La confiabilidad se verificó mediante la prueba de doble masa.

2. Cálculo del factor R observada aplicando la ecuación de Wischmeier y Smith (1978)

a. Cálculo del factor de R de erosividad pluvial (observada)

Con los datos de SENAMHI, ANA y OPEMAN debidamente tratadas se procedió a calcular el factor R, para ello en Excel se procedió a formar columnas de datos, y aplicamos la ecuación (1) de (Wischmeier, W. H., and Smith, 1978) para cada mes, este proceso se sigue en los cinco estaciones de interés.

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \log_{10}(\frac{P_i^2}{P}) - 0.08188)} \quad (1)$$

Aplicando la ecuación en Excel de Wischmeier y Smith (1978) sería de la siguiente manera: =SI(Pi>0;1.735*10^(1.5*LOG10((Pi^2)/Pt)-0.08188);0) esto para cada mes empezando desde enero 1998 al diciembre del 2024, esta misma metodología se aplicada para cada estación en estudio.

3. Ajuste de los valores del factor R (GPM y observada)

El ajuste de los valores del factor R de GPM con R observada se aplicó la metodología de regresión lineal simple, para este método es importante calcular el intercepto, la pendiente y el coeficiente de R2 de los datos GPM y SENAMHI, cabe señalar que R2 juega un papel importante porque un valor cercano a uno garantiza que los valores son correctamente ajustados, el caculo fue realizado de la siguiente manera:

- Intercepto (a) = valor del GPM y valor de observada
- Pendiente (b) = valor del GPM y valor de observada
- R2 = coeficiente del R2

Ya teniendo los valores del intercepto y la pendiente se forma una ecuación de la siguiente manera (Rondinel, 2020).

$$GPM_{ajus} = a + b * gpm \quad (2)$$

Aplicando la ecuación se consigue a ajustar los valores del GPM precedido, también cabe mencionar que esta ecuación de ajuste será utilizada para todas estaciones virtuales de GPM de interés.

Tabla 2.

Valores del factor R de observados y virtuales

Estación	Altitud	Erosividad	
		Observada	GPM
		MJ.mm/(ha.h.año)	MJ.mm/(ha.h.año)
HUANCA SANCOS	3440	1068.41	2066.52
VILCASHUAMAN	3518	1117.92	2625.12
HUANCAPÍ	3117	1005.91	2611.50
HUAC HUAS	3180	3347.22	1057.31
PAMPA CANGALLO	3315	1174.25	2411.65

A partir de la tabla 2, que presenta los valores anuales obtenidos del producto satelital GPM y los datos observados, se procedió a calcular los coeficientes de la ecuación de regresión lineal simple.

Para ello, se utilizó Microsoft Excel, donde existen funciones específicas para calcular el intercepto (Bo) y la pendiente (Bi) de la recta, las funciones aplicadas fueron:

- = PENDIENTE (observada; gpm) para calcular la pendiente Bi.
- = INTERCEPTO (observada; gpm) para obtener el intercepto Bo.

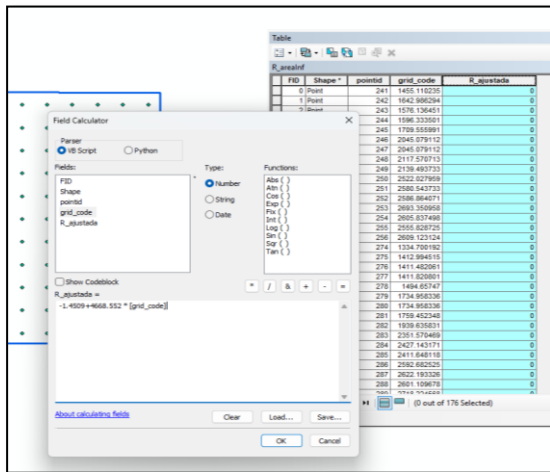
Una vez calculados estos parámetros, se obtuvo la siguiente ecuación de regresión lineal que relaciona los datos de GPM (variable independiente) con los datos de SENAMHI (variable dependiente).

Reemplazando con los valores obtenidos, la ecuación 2 queda expresada como:

$$P_{px} = 4668.552 + (-1.4509) * gpm \quad (3)$$

Una vez generado la ecuación de regresión lineal se procede a ajustar los valores de R_GPM que se encuentran en formato Shapefile, creamos una columna en tabla atributos y con la ayuda de *Field Calculator* se procede ingresar la ecuación.

Figura 1.
Proceso de ajuste del factor R de GPM



En la figura 1 se aprecia el proceso de ajuste de los valores del factor R de erosividad.

4.- Generación de Ráster del R ajustada con Kriging

Teniendo los valores del factor R ajustado, se procedió a crear un ráster utilizando el método de Kriging, a una resolución de 12.5 m de píxel. Para ello, se utilizó el programa ArcGIS 10.5, accediendo a la caja de herramientas ARCTOOLBOX, luego a Spatial Analyst Tools, Interpolation y seleccionando la opción Kriging.

2.3.3. Cálculo de factor K (Erodabilidad)

1. Con los resultados del laboratorio (observados) y los datos de SoilGrid (predichos), se calcularon los errores absolutos, los errores relativos y el coeficiente de corrección multiplicativa. Posteriormente, se promediaron los coeficientes de corrección por tipo de suelo, y con esto, se procedió a corregir los datos obtenidos de SoilGrid (predichos) para

ello usaremos la ecuación propuesta por (Allen et al., 1998).

$$\text{Factor de corrección} = \frac{\text{Valor Observado}}{\text{Valor Simulado}} \quad (4)$$

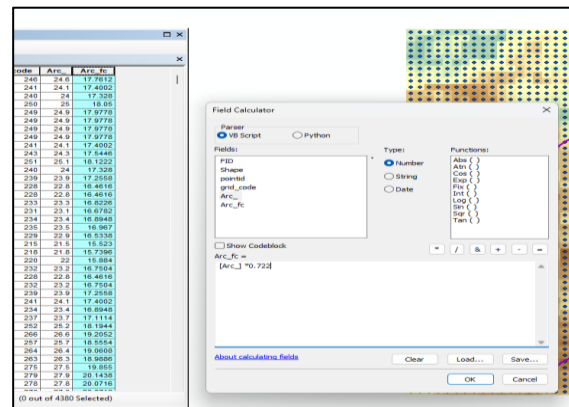
$$\text{Valor Aj} = \text{Valor Sim} * \text{Factor Cor} \quad (5)$$

Tabla 3.
Valores promediados de coeficientes de corrección multiplicativa

Tipo Suelo	Promedio Fc
Arena	1.217
Limo	0.928
Arcilla	0.722
Carb. Org	3.030

La tabla 3 anterior presenta los valores promedio de los coeficientes de corrección multiplicativa determinados para cada tipo de suelo, los cuales fueron empleados para ajustar los datos obtenidos de SoilGrids. Es importante destacar que fue necesaria la conversión de los valores originales de SoilGrids a unidades porcentuales, a fin de asegurar la compatibilidad con los datos provenientes del análisis de laboratorio, que se expresan en dicho formato. Una vez determinados los coeficientes de corrección multiplicativos, se aplicaron a los valores de SoilGrids correspondientes a cada clase de suelo. Cabe resaltar que estos datos se encuentran en formato vectorial, diferenciados por tipo de suelo. La figura siguiente ilustra el procedimiento aplicado.

Figura 2.
Proceso de ajuste de los valores SoilGrid



En la figura anterior se muestra el proceso de ajuste de datos de soliGrid para cada tipo de suelo: limo, arcilla, arena y carbono orgánico.

2. Con los valores ajustados de las propiedades físicas del suelo obtenidos de SoilGrids (en porcentaje), se generaron superficies ráster para arena, limo, arcilla y carbono orgánico. Se utilizó el método de interpolación Kriging con resolución de 12.5 m/píxel, mediante ArcGIS 10.5 (ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Interpolation > Kriging), aplicándolo individualmente a cada variable.

3. A partir de los ráster generados en el paso 2, se calculó el factor K siguiendo el método de Williams 1995. Se organizaron las capas según las variables: arena (ms%), limo (msilt%), arcilla (mc%) y carbono orgánico (orgC%). Luego, se aplicaron las fórmulas correspondientes para obtener los factores intermedios (Sabino et al., 2017).

- $f_{sand} = 0.2 + 0.3 * \text{Exp}(-0.256 * "ms.tif" * (1 - "msilt.tif" / 100))$
- $f_{cl-si} = \text{Power}("msilt.tif" / ("mc.tif" + "msilt.tif"), 0.3)$
- $f_{orgc} = 1 - (0.25 * "orgC.tif") / ("orgC.tif" + \text{Exp}(3.72 - 2.95 * "orgC.tif"))$
- $f_{hisand} = 1 - (0.7 * (1 - "ms.tif" / 100)) / ((1 - "ms.tif" / 100) + \text{Exp}(-5.51 + 22.9 * (1 - "ms.tif" / 100)))$

Donde:

- m_s : % de arena (0.05 – 2 mm de diámetro)
- m_{silt} : % de sedimento (0.002 – 0.05 mm de diámetro)
- m_c : % de arcilla (< 0.002 mm de diámetro)
- C_{org} : % de carbono orgánico (SOC)

Finalmente, el valor del factor K se calculó mediante la fórmula de Williams 1995:

$$K_{USLE} = 0.1317 * f_{csand} * f_{cl-si} * f_{org} * f_{hisand} \quad (6)$$

Donde:

- f_{sand} : El indicador K se reduce en suelos que presentan arenas gruesas e incrementa en ellos que no contiene mucha arena.
- f_{cl-si} : Brinda bajos factores de erosionabilidad a suelos arcillosos y limosos
- f_{orgc} : El valor de K disminuye en aquellos suelos que presentan alto contenido de carbono orgánico.
- f_{hisand} : El indicador K se reduce en suelos que presentan gran contenido de arena.
- Todos los cálculos se realizaron utilizando el software ArcGIS, a través de la herramienta ArcToolbox. En ella, se accedió a Spatial Analyst Tools, seleccionando Map Algebra y posteriormente Raster Calculator.

2.3.4. Cálculo del factor LS

1. Con el modelo de elevación digital (DEM) obtenido del ALOS PALSAR, con una resolución de 12.5 metros por píxel, se procedió al cálculo del factor LS. Para ello, con ArcGIS abierto, se accedió a la caja de herramientas ArcToolbox, luego a la sección Spatial Analyst Tools, seleccionando Map Algebra y finalmente Raster Calculator. Para ello se usó la ecuación desarrollada por Jiang y Zheng (2008).

$$LS = 1.07 * \left(\frac{\lambda}{20}\right)^{0.28} * \left(\frac{\alpha}{10}\right)^{1.45} \quad (7)$$

Siendo:

λ = Longitud de la pendiente

α = Es el Angulo de inclinación en grados

2. Estando en Raster Calculator ingresamos la formula siguiente $(1.07 * \text{power}(12.5/20, 0.28) * \text{power}(\text{slope_grados}/10, 1.45))$.

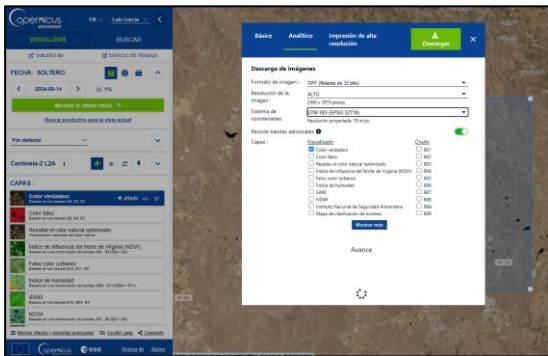
2.3.5. Cálculo del factor C (cobertura vegetal)

1. Descargar la imagen satelital sentinel-2A en alta resolución desde la plataforma virtual de: <https://dataspace.copernicus.eu>, para ello es necesario realizar su registro de usuario.

2. Tras completar el registro, se delimitó el área de interés con un polígono sobre la zona de estudio y se seleccionó una imagen del 14 de agosto de 2024, libre de nubosidad. Posteriormente, se descargó en alta resolución para su análisis.

Figura 3.

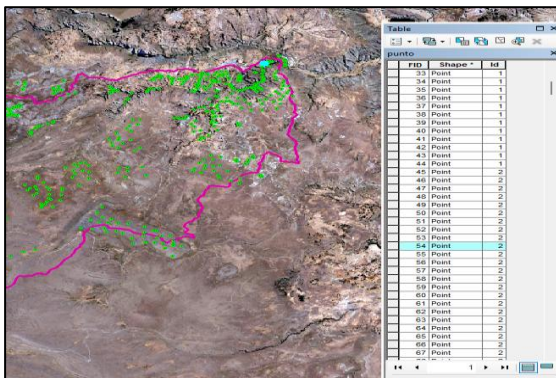
Proceso de descarga de imagen satelital Sentinel 2A.



3. Con la ayuda de las fotografías tomadas con el dron, se ubicaron los puntos donde presentan tipos de coberturas vegetales, cabe señalar que la ubicación de los puntos fue realizada mediante ArcGis generando un shapefile.

Figura 4.

Ubicación de las coberturas vegetales mediante puntos.



4. Con la imagen Sentinel-2A y los puntos georreferenciados de cobertura vegetal en la microcuenca Paliza, se generaron firmas espectrales en ArcGIS 10.5 mediante la herramienta Create Signatures (*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Multivariate*). Estas firmas, que reflejan la respuesta espectral de cada tipo de cobertura, permitieron realizar una clasificación supervisada usando el método Maximum Likelihood. Este algoritmo asigna cada píxel a la clase con mayor probabilidad estadística, asumiendo una distribución normal multivariada, y es ampliamente utilizado por su alta precisión en distinguir coberturas con espectros similares.

Tabla 4.

Valores del factor C

N°	Cobertura Vegetal	C
1	Cuerpos del agua	0.000
2	Bofedales	0.050
3	Matorrales y pastizales	0.220
4	Bosques, cultivos y pastizales	0.630
5	Pastoreo y cultivos	0.400
6	Pradera	0.090
7	Suelos desnudos	1.000

Nota: (Sabino et al., 2017) y (FAO, 2019).

2.3.6. Cálculo de prácticas de conservación del suelo (P)

Las prácticas de conservación se verificaron mediante imágenes de dron, identificándose zanjas de infiltración y andenerías en la parte media y baja de la microcuenca, mientras que en la parte alta no se observaron medidas de manejo. Según esta información, se asignaron valores al factor P del modelo RUSLE: 1.0 para áreas sin prácticas, 0.4 para zonas con zanjas de infiltración y 0.2 para cultivos en andenerías (Morgan, 2005).

Tabla 5.

Valores del factor P en la microcuenca Paliza

Pendiente %	Prácticas	P
11.3 - 17.6	Zanja de infiltración	0.40

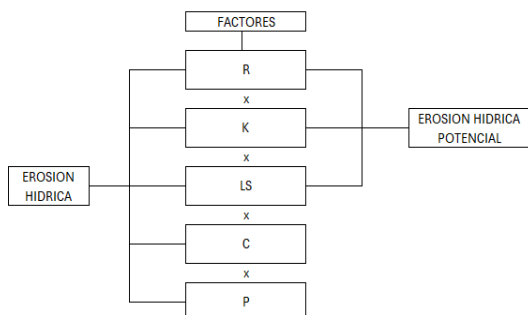
20.0 - 26.8	Cultivo terrazas (Andenerías)	0.20
-	Sin prácticas de conservación	1.00

2.3.7. Cálculo de la erosión hídrica potencial y real en la microcuenca

La pérdida de suelo real se estimó aplicando la ecuación RUSLE, que considera cinco factores: R (erosividad), K (erodabilidad), LS (pendiente y longitud), C (cobertura) y P (prácticas de conservación). Para la erosión potencial, se emplearon solo los factores R, K y LS. Todos los factores fueron representados como mapas ráster y procesados en ArcGIS mediante la herramienta Raster Calculator (ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra).

Figura 5.

Flujograma para el cálculo de erosión potencial y real.



2.3.8. Generación de los mapas

En esta etapa final, se generaron mapas temáticos de los factores RUSLE (R, K, LS, C y P) y del valor “A” (tasa de pérdida de suelo en t/ha·año) utilizando ArcGIS 10.5 y el módulo Spatial Analyst. Esto permitió visualizar la variabilidad espacial de cada parámetro e identificar las zonas más susceptibles a la erosión en la microcuenca.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de la erosión hídrica con el modelo RUSLE

3.1.1. Delimitación de la microcuenca Paliza y cálculo de parámetros

La microcuenca Paliza se localiza en la localidad de Santiago de Lucanamarca, perteneciente a la provincia de Huanca Sancos, en el departamento de Ayacucho. Hidrográficamente, forma parte de la unidad hidrográfica del río Pampas, situándose específicamente dentro de la subcuenca del río Caracha. Presenta una superficie aproximada de 98.48 km² y un perímetro de 55.83 km, según los análisis realizados en entorno SIG. Estas dimensiones la caracterizan como una microcuenca de extensión intermedia, con importancia estratégica para la gestión de recursos hídricos y la conservación de suelos en la región.

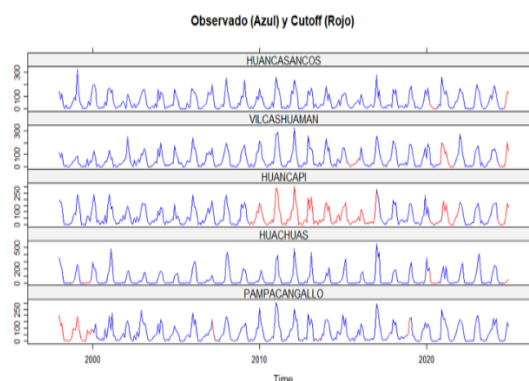
3.1.2. Análisis estadísticos y cálculo del factor R observada

3.1.2.1. Resultados de imputación y extensión de datos faltantes

Se completaron y extendieron datos históricos aplicando la metodología Cutoff en RStudio. Se generó una matriz de correlación con umbral de 0.70 para proceder con la imputación. Este método, además de ser una técnica de completación, actúa como control de calidad, reduciendo el sesgo de datos inconsistentes en estaciones de referencia. Combinado con regresión lineal o múltiple, mejora significativamente la confiabilidad de los resultados.

Figura 6.

Hietograma de imputación y extensión de datos.



El gráfico muestra los datos completados (rojo) y originales (azul), evidenciando una alta concordancia visual. Esta correspondencia indica una correlación significativa, que respalda la eficacia del método de completación aplicado con el algoritmo Cutoff.

Resultado del análisis estadístico de los datos históricos de lluvia

La siguiente tabla muestra los resultados de los análisis de homogeneidad y consistencia para cada estación pluviométrica. En general, los datos son confiables, ya que las inconsistencias detectadas fueron corregidas mediante procedimientos estadísticos. Esta validación asegura la calidad necesaria para el análisis hidrológico posterior (Villón, 2016).

Tabla 6.

Resultado de los análisis estadísticos y corrección de datos históricos

Estación	Fuente	Prueba "T" de STUDENT	Prueba "F" de FISHER
HUANCA SANCOS	SENAMHI	Homogéneo	Consistente
VILCASHUAMAN	SENAMHI	Homogéneo	Consistente
HUANCAPI	ANA	Homogéneo	Consistente
HUAC HUAS	SENAMHI	Homogéneo	Consistente
PAMPA CANGALLO	OPEMAN	Homogéneo	Consistente

La tabla presenta los datos corregidos por estación pluviométrica. La consistencia fue verificada mediante análisis de doble masa, cuya gráfica no muestra quiebres abruptos, lo que confirma la fiabilidad de los datos corregidos.

3.1.2.2. Resultado del cálculo del factor R_observada

El factor R observada fue calculado con los datos históricos completados y debidamente corregidos, para ello se utilizó la ecuación (1), en el cuadro siguiente muestra el resultado de los valores del factor R anual, cabe señalar que el criterio de evaluación del factor R es acuerdo al (Gutierrez & Sabino, 2022).

Tabla 7.

Resultado del factor R anual observada en (MJ.mm/ha.h.año)

ESTACIÓN	ALTITUD	R _{anual}
HUANCA SANCOS	3440	1068.41
VILCASHUAMAN	3518	1117.92
HUANCAPI	3117	1005.91
HUAC HUAS	3180	3347.22
PAMPA CANGALLO	3315	1174.25
PROMEDIO		1542.74

En la tabla anterior se aprecia los resultados de los valores del factor R_observada anual la cual será usada para el respectivo ajuste de los valores de R virtual (GPM).

3.1.3. Ajuste del factor R satelital con valores observados

a). Ajuste de los valores de R_GPM con R observadas

Los valores del factor R_GPM se obtuvieron en Google Earth Engine (GEE) mediante scripts en JavaScript, exportándose en formato ráster y luego convertidos a shapefile para su análisis espacial. Dado que las estaciones del SENAMHI se encuentran dentro de las grillas GPM (~10 km × 10 km), se ajustaron los valores satelitales con datos observados mediante regresión lineal simple, mejorando así la representatividad del R_GPM frente al R_observado.

Tabla 8.

Resultado del ajuste del factor R de GPM con factor R observada

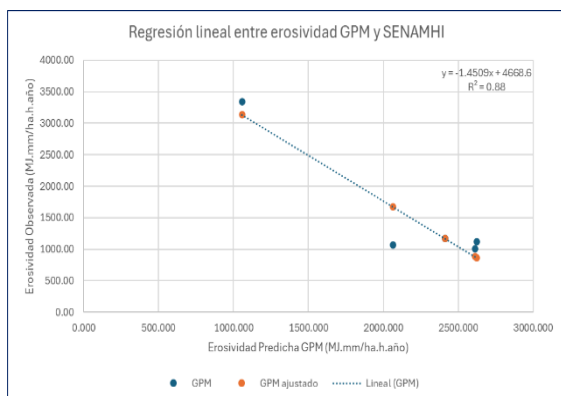
Estación	Altitud	Erosividad	Erosividad (pred)	Erosividad
		Observada MJ.mm/ (ha.h. año)	GPM MJ.mm/(ha. h.año)	GPM ajustado MJ.mm/(ha. h.año)
HUANCA SANCOS	3440	1 068,41	2 066,52	1 670,28
VILCASHUAMAN	3518	1 117,92	2 625,12	859,81
HUANCAPI	3117	1 005,91	2 611,50	879,57
HUAC HUAS	3180	3 347,22	1 057,31	3 134,51
PAMPA CANGALLO	3315	1 174,25	2 411,65	1 169,53

La tabla anterior muestra los valores del factor R_GPM ajustado mediante una ecuación de regresión lineal. Esta misma metodología se

aplicó al resto de los valores R_GPM obtenidos de GEE y convertidos a formato vectorial.

Figura 7.

Resultado de ajuste de los valores de R (GPM) con valores de R (obs).



La figura muestra el ajuste entre los valores de R virtual y R observado, junto con la ecuación de regresión aplicada al shapefile. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.88$) indica que el 88 % de la variabilidad de R observado es explicada por el modelo, reflejando un ajuste sólido y una alta correlación entre los datos simulados y observados, lo que respalda la validez del método de ajuste aplicado.

3.1.4. Resultados de los factores de RUSLE (R, K, LS, C y P).

3.1.4.1. Resultado del factor R_GPM ajustado

Tras ajustar adecuadamente los valores del factor R_GPM, se llevó a cabo la interpolación mediante el método geoestadístico de Kriging, con una resolución espacial de 12,5 metros. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 9.

Resultado de los valores de R anual según su clasificación

Factor R (MJ.mm/ha.h.año)	Área Ha	Porcentaje %	Clasificación
1 793.30 – 1 920.36	1 710.85	17.37%	Muy alto
1 920.36 – 2 039.47	2 150.55	21.84%	Muy alto
2 039.47 – 2 161.24	2 475.95	25.14%	Muy alto
2 161.24 – 2 296.24	2 185.36	22.19%	Muy alto

2 296.24 – 2 468.30	1 324.88	13.45%	Muy alto
Total	9 847.53	100.00%	

La Tabla 9 muestra los valores del factor R, que representa la intensidad y frecuencia de la lluvia y su capacidad erosiva ($\text{MJ}\cdot\text{mm}/\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{año}$). El 100% del área presenta valores muy altos, indicando alta susceptibilidad a la erosión hídrica, especialmente en zonas con mayores registros. Estos resultados subrayan la necesidad de implementar medidas de manejo y conservación del suelo en áreas críticas.

3.1.4.2. Resultado del factor K de erodabilidad

Tras ajustar los datos de SoilGrids con muestreos de campo, se rasterizaron las propiedades del suelo (limo, arcilla, arena y carbono orgánico) mediante interpolación Kriging en ArcGIS (Spatial Analyst Tools > Interpolation > Kriging), con resolución de 12.5 m. Posteriormente, se aplicó el método de Williams para calcular el factor K.

Tabla 10.

Resultado de los valores de K dentro de la microcuena Paliza

Factor K (t. ha.H/MJ.ha.mm)	Área Ha	Porcentaje %	Clasificación
0.0166- 0.0169	1 326.67	13,47%	Débilmente erodable
0.0169- 0.0171	2 908.22	29,53%	Medianamente erodable
0.0171 - 0.0173	3 012.72	30,59%	Medianamente erodable
0.0173 - 0.0176	2 599.71	26,40%	Medianamente erodable
Total	9 847.31	100,00%	

La tabla 10, presenta los valores del factor K, que mide la erodabilidad del suelo. El 13.47 % del área corresponde a suelos débilmente erodables (0.0166 - 0.0169 t·ha·h/MJ·ha·mm), mientras que el 86.52 % presenta valores entre 0.0171 y 0.0176, clasificándose como medianamente erodables. Esto indica que la mayor parte del terreno tiene una susceptibilidad media a la erosión.

3.1.4.3. Resultado del factor LS (longitud y pendiente)

Para la microcuenca Paliza, de acuerdo a los resultados se hizo una clasificación según los grupos de pendientes.

Tabla 11.

Resultado de los valores de LS en el área de la microcuenca

Grupo De pendientes en %	Área Ha	porcentaje %	factor LS
0 - 0.91	4 965.42	50.42%	0.3
0.91 - 2.21	2 556.99	25.96%	0.3
2.21 - 3.97	1 426.89	14.49%	0.3
3.97 - 6.51	752.99	7.65%	0.3
6.51 - 16.58	145.72	1.48%	3.4
Total	9 848,005	100.00%	

La tabla 11, muestra la clasificación de pendientes y sus respectivos valores del factor LS. El 90.87 % del área presenta pendientes suaves (<3.97 %) con un factor LS de 0.3, indicando baja susceptibilidad a la erosión. En cambio, el 1.48 % tiene pendientes >6.51 % y un LS de 3.4, reflejando alta capacidad erosiva. las pendientes pronunciadas se localizan en la parte baja de la microcuenca, mientras que la zona media y alta presentan topografía ondulada y menos vulnerable.

3.1.4.4. Resultados del factor C (cobertura vegetal)

La clasificación de las coberturas vegetales se obtuvo a partir de imágenes satelitales del sensor Sentinel 2A, aplicando una metodología de clasificación supervisada. Los resultados de este proceso se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 12.

Resultado de los valores de C en el área de la microcuenca Paliza

Descripción Cobertura Vegetal	Área Ha	Porcentaje %	Factor C
Cuerpos del agua	5.13	0.05%	0.000
Bofedales	3 112.49	31.61%	0.050
Matorrales y pastizales	2 489.21	25.28%	0.220
Bosques, cultivos y pastizales	840.66	8.54%	0.630
Pastoreo y cultivos	161.36	1.64%	0.400
Pradera	3 230.98	32.81%	0.090

Suelos desnudos	7.03	0.07%	1.000
Total	9 846.86	100,00%	

La tabla 12, presenta las categorías de cobertura vegetal en la microcuenca, junto con su superficie, porcentaje y valor del factor C. Las praderas (32.81 %, C = 0.09) y los bofedales (31.61 %, C = 0.05) ofrecen buena protección contra la erosión, mientras que matorrales y pastizales (25.28 %, C = 0.22) brindan protección moderada. En contraste, los suelos desnudos (0.07 %) presentan la mayor vulnerabilidad (C = 1.00). Los bosques, cultivos y pastizales (8.54 %, C = 0.63) y las zonas de pastoreo y cultivo (1.64 %, C = 0.40) también reflejan riesgo elevado. Los cuerpos de agua (0.05 %) tienen C = 0.00. El análisis indica que, aunque predomina la cobertura protectora, es necesario intervenir en áreas degradadas o sin vegetación.

3.1.4.5. Resultado del factor P

En la microcuenca Paliza se detectaron a menos dos tipos de prácticas de conservación de los suelos y estos son: Zanjas de infiltración, cultivos en andenerías, a continuación, se muestra los resultados obtenidos del valor P.

Tabla 13.

Resultado de los valores de P en el área de la microcuenca.

Prácticas de conservación	Área Ha	porcentaje %	factor P
Zanjas de infiltración	230.94	2.35%	0.4
Cultivo en andenerías (Terrazas)	75.770	0.77%	0.2
Sin prácticas de conservación	9 540.15	96.89%	1.00
Total	9 846.86	100.00%	

La tabla 13, presenta las prácticas de conservación en la microcuenca, sus áreas asociadas y los valores del factor P. Se identificaron zanjas de infiltración (P = 0.40) y cultivos en andenerías (P = 0.20), que reducen eficazmente la erosión. No obstante, el 96.89 % del área carece de prácticas de conservación, con un P = 1.00, lo que indica alta vulnerabilidad. Este análisis resalta la necesidad

de ampliar la implementación de medidas de conservación en las zonas más expuestas.

3.1.5. Resultados de erosión hídrica potencial y real en la microcuenca

a). - Erosión hídrica potencial

La erosión hídrica potencial fue estimada siguiendo la metodología propuesta por la FAO (2019), identificándose zonas con diferentes niveles de susceptibilidad a la erosión. Esta estimación considera como factores principales la longitud y el gradiente de la pendiente, la intensidad de la precipitación y el tipo de suelo.

Tabla 14.

Resultado de la estimación de erosión potencial del suelo.

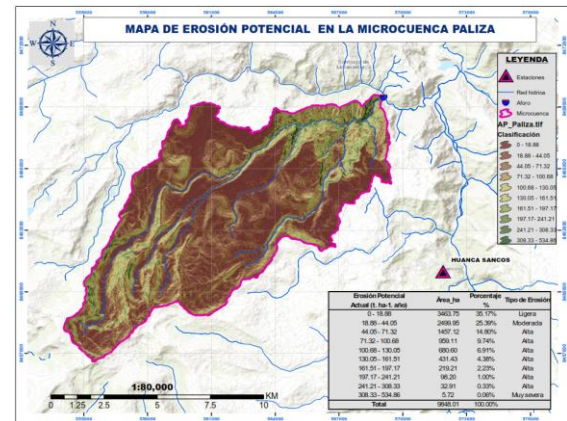
Erosión Potencial Actual (t/ha/año)	Área Ha	Porcentaje %	Tipo de Erosión
0 – 18.88	3 463.75	35.17%	Ligera
18.88 – 44.05	2 499.95	25.39%	Moderada
44.05 – 71.32	1 457.12	14.80%	Alta
71.32 – 100.68	959.11	9.74%	Alta
100.68 – 130.05	680.60	6.91%	Alta
130.05 – 161.51	431.43	4.38%	Alta
161.51 – 197.17	219.21	2.23%	Alta
197.17 – 241.21	98.20	1.00%	Alta
241.21 – 308.33	32.91	0.33%	Alta
308.33 – 534.86	5.72	0.06%	Muy severa
Total	9 848.01	100.00%	

La tabla 14, muestra la distribución espacial de la erosión potencial (t/ha/año) en la microcuenca, sin considerar prácticas de conservación. El 35.17% del área presenta erosión ligera (0 - 18.88 t/ha/año) y el 25.39% moderada (18.88 - 44.05), sumando el 60.56% del territorio con condiciones relativamente estables. El 39.39% restante presenta erosión alta (>44.05 t/ha/año), concentrada en zonas con pendientes, escasa cobertura o uso agrícola intensivo. Dentro de este grupo, más de 3 000 ha registran tasas entre 44.05 y 130.05, evidenciando la necesidad de intervención prioritaria. Un 0.06% del área supera los 308.33

t/ha/año, indicando riesgo extremo de pérdida de suelo.

Figura 8.

Mapa de erosión potencial.



b). - Erosión hídrica real

La erosión hídrica real se clasificó según los rangos establecidos por la FAO (2019), permitiendo identificar zonas con distinta susceptibilidad. La estimación se realizó mediante el modelo RUSLE, integrando los factores R (erosividad), K (erodabilidad), LS (pendiente y longitud), C (cobertura vegetal) y P (prácticas de conservación).

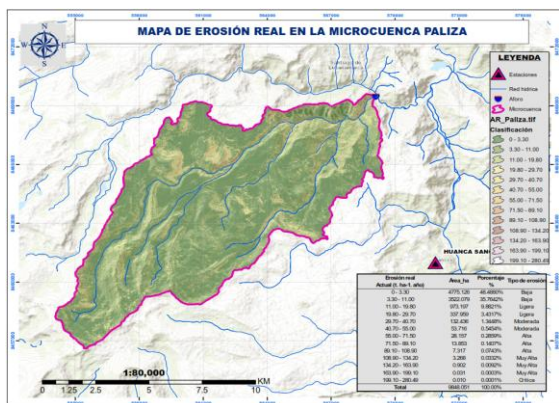
Tabla 15.

Resultado de la estimación de erosión real del suelo

Erosión real Actual (t/ha/año)	Área Ha	Porcentaje %	Tipo de erosión
0 – 3.30	4 775.13	48.4880%	Baja
3.30 – 11.00	3 522.08	35.7642%	Baja
11.00 – 19.80	973.20	9.8821%	Ligera
19.80 – 29.70	337.96	3.4317%	Ligera
29.70 – 40.70	132.44	1.3448%	Moderada
40.70 – 55.00	53.72	0.5454%	Moderada
55.00 – 71.50	28.16	0.2859%	Alta
71.50 – 89.10	13.85	0.1407%	Alta
89.10 – 108.90	7.32	0.0743%	Alta
108.90 – 134.20	3.27	0.0332%	Muy Alta
134.20 – 163.90	0.90	0.0092%	Muy Alta
163.90 – 199.10	0.031	0.0003%	Muy Alta
199.10 – 280.49	0.010	0.0001%	Crítica
Total	9 848.05	100.00%	

La tabla 15, presenta la distribución de la erosión real (t/ha/año) en la microcuenca, considerando el uso actual del suelo. El 84.25 % del área (8 297.21 ha) muestra erosión baja (0 – 11.00), y el 13.31 % (1 311.16 ha) erosión ligera (11.00 – 29.70), lo que indica estabilidad general. La erosión moderada (1.89 %) y alta a crítica (0.50 %) afectan áreas localizadas (235.48 ha en total) con riesgo significativo, que requieren intervención prioritaria. En conjunto, el 98 % del territorio presenta condiciones favorables, permitiendo enfocar acciones en zonas de mayor vulnerabilidad sin descuidar el monitoreo global.

Figura 9.
Mapa de erosión Real.



3.1.6. Generación de los mapas temáticos de acuerdo a los resultados

Tras calcular los valores de los factores RUSLE (R, K, LS, C y P), se generaron mapas temáticos para cada uno, así como del área de erosión hídrica. Mediante análisis espaciales, se visualizó la distribución de la erosión en la microcuenca, identificando zonas vulnerables y protegidas. Estos mapas facilitan la planificación y gestión de los recursos naturales, al evidenciar el aporte de cada factor en distintas áreas, y son clave para orientar acciones de conservación del suelo.

3.2. Discusión de los resultados

La microcuenca Paliza presenta morfología alargada (coeficiente de compacidad: 1.58; relación de elongación: 0.59), lo que favorece la

concentración del escurrimiento y aumenta la susceptibilidad a la erosión, especialmente en las pendientes pronunciadas del sector bajo (Damián et al., 2017).

El factor R muestra alta erosividad (1793.30–2468.30 MJ·mm/ha·h·año), asociada a lluvias intensas, en concordancia con Camargo et al., (2017) y Ñahui (2024), quienes relacionan la energía cinética de la lluvia con mayores tasas de pérdida de suelo.

El factor K oscila entre 0.0166 y 0.0176 T·ha·h/MJ·ha·mm, lo que indica erodabilidad moderada USDA (1962), siendo más elevado en suelos con textura franco-limosa, bajo contenido de materia orgánica y débil estructura (Chipana, 2022).

Respecto al factor LS, el 90.87 % del área presenta pendientes suaves (<math>< 3.97\%</math>,

El factor C evidencia predominio de coberturas protectoras: praderas (32.81 %,

En cuanto al factor P, el 96.89 % del área no presenta prácticas conservacionistas (

La erosión potencial indica que el 60.56 % del área presenta pérdidas entre 0 y 44.05 t/ha/año (“Ligera” a “Moderada”), aunque superan el umbral tolerable de la FAO (5.75 t/ha/año). El 39.38 % muestra erosión “Alta”, y el 0.06 % “Muy severa”, asociadas a topografía escarpada, cobertura degradada y uso intensivo.

La erosión real revela que el 84.25 % del área se encuentra en condiciones “Bajas” (< 11.00 t/ha/año), y el 13.31 % en rangos de “Ligera” a “Moderada” (11.00 – 55.00 t/ha/año). Un 2.43 % presenta erosión “Alta” a “Crítica” (> 55.00), concentrando zonas de mayor riesgo y necesidad de intervención prioritaria.

El uso del modelo RUSLE, junto con análisis espaciales, permitió identificar áreas críticas y orientar la planificación de prácticas estructurales y biológicas para mitigar la erosión y conservar el recurso suelo de forma integral.

CONCLUSIONES

1. El factor de erosividad (R) fue estimado a partir de los datos mensuales de precipitación del satélite GPM, mediante el procesamiento en la plataforma Google Earth Engine (GEE) y la aplicación de la fórmula empírica propuesta por Wischmeier y Smith (1978). Los valores obtenidos fueron posteriormente corregidos mediante una regresión lineal utilizando datos observados de estaciones pluviométricas del SENAMHI, lo cual permitió una estimación de mayor precisión y espacialmente continua del factor R a nivel de píxel.
2. Se caracterizaron espacialmente los cinco factores del modelo RUSLE. El factor R mostró una erosividad muy alta, con valores entre 1793.30 y 2468.30 MJ·mm/ha·h·año. El factor K fue calculado a partir de la base de datos SoilGrids, ajustado con muestras de suelo recolectadas en campo, obteniéndose valores entre 0.0116 y 0.0176 t·ha·h/MJ·mm, lo que indica una susceptibilidad moderada a la erosión. El factor LS se derivó del Modelo Digital de Elevación (MDE), con un promedio de 0.3 y valores máximos de 3.4 en pendientes comprendidas entre 6 % y 16 %. El factor C se estimó mediante clasificación supervisada de imágenes Sentinel-2A, con valores entre 0 y 1, predominando coberturas de pastizales y matorrales. Finalmente, el factor P fue asignado en función de prácticas de manejo

observadas en campo, con valores de 0.20 para terrazas, 0.40 para zanjas de infiltración y 1.0 en áreas sin manejo conservacionista.

3. La implementación del modelo RUSLE permitió cuantificar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la microcuenca, arrojando una tasa promedio de erosión potencial de 49.92 t/ha/año (nivel moderado) y una erosión real promedio de 6.88 t/ha/año (nivel ligero). Estos resultados evidencian la influencia directa de la cobertura vegetal y las prácticas de conservación en la atenuación de la pérdida efectiva de suelo.
4. Se elaboraron mapas temáticos de pérdida de suelo a resolución espacial, clasificados conforme a los rangos establecidos por la FAO. Estos mapas permiten identificar zonas críticas con altos niveles de degradación, constituyéndose en herramientas técnicas clave para la planificación del uso sostenible del suelo, priorización de áreas de intervención y diseño de estrategias de manejo y conservación en la microcuenca Paliza.

REFERENCIAS

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Guidelines for computing crop water requirements (Irrigation and Drainage Paper 56). FAO. https://www.cse.iitb.ac.in/~pocra/Referencas/FAO_Paper56_Irrigation_Drainage.pdf
- Brea, D., & Bolocche, F. (2016). *Proceso de erosión-sedimentación en cauces y cuencas* (Vol. 01). UNESCO Programa Hidrológico Internacional. https://www.cuhs.utalca.cl/ex-ctha/Docs/pdf/Publicaciones/libros/erosion_y_sedimentacion_voll.pdf
- Camargo, C., Pacheco, C., & López, R. (2017). Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Gestión y Ambiente*. <https://doi.org/10.15446/ga.v20n2.63917>

- Chipana, O. (2022). *Estimación de la pérdida de suelo media anual mediante la ecuación universal de pérdida de suelo revisada, en la cuenca del río Chumbao, Provincias de Andahuaylas y Chincheros - Apurímac - 2019*.
<https://hdl.handle.net/20.500.14512/384>
- Damián, D., Recalde, C., Carmen, O., Marcos, V., Víctor, J., & Johana, E. (2017). Priorización de microcuencas en los Andes ecuatorianos usando parámetros morfométricos, WSA y GIS. *Revista Geografica Venezolana*.
<https://www.redalyc.org/pdf/3477/347753792004.pdf>
- FAO. (2019). Soil erosion: The greatest challenge for sustainable soil management. En E. . (D. Pennock (Ed.), *Australian Surveyor* (University, Vol. 8).
<https://doi.org/10.1080/00050326.1940.10436672>
- García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 239, 160–173.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>
- Gutierrez Lope, L. F., & Sabino Rojas, E. D. (2022). Erosividad de la lluvia en el Perú para el periodo 2000-2020. *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI, (2022). Estudio Final*.
https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-104.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Morgan, R. (2005). *Soil erosion and conservation (3.ª ed.)* (Mundi-Pren).
https://www.google.com.pe/books/edition/Soil_Erosion_and_Conservation/j8C8fFiPN0kC
- Ñahui, A. D. (2024). Estimación de erosión hídrica aplicando el modelo RUSLE en la cuenca Chonta - Sucre - Ayacucho, 2024. *[Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]*
<https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20500.14612/7769>
- Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Metzger, M. J., Kok, K., & Breuer, L. (2015). Spatial estimation of soil erosion risk by land-cover change in the Andes of southern Ecuador. *Land Degradation & Development*, 26(6), 565–577
<https://doi.org/10.1002/ldr.2219>
- Rondinel, A. H. A. (2020). Estimación satelital, validación y distribución espacial de la evapotranspiración a través del clima en la cuenca Cachi Ayacucho, 2020. *[Tesis, Universidad Nacional de San Martín]*.
<https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5720>
- Sabino, E., Obando, F., G., O., & Lavado, W. S. (2017). Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú. *SENAMHI*.
https://idesep.senamhi.gob.pe/portaledesep/files/tematica/atlas/erosion_de_suelo/Atlas_Erosion_Suelos_por_Regiones_Hidrológicas_Peru.pdf
- Soto, D., & López, A. (2017). Evaluación de la erosión hídrica en zonas altoandinas con SIG y RUSLE: caso de estudio en Cajamarca. *Revista de Conservación y Medio Ambiente*, 13(2), 45–56.
- USDA. (1962). *Rainfall erosivity index. Agriculture Handbook No. 282. United States Department of Agriculture*.
https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/50201000/USLEDatabase/AH_282.pdf
- Villón, B. M. (2016). *Hidrología Estadística*.
<https://www.udocz.com/apuntes/97147/05-villon-maximo-hidrologia-estadistica>
- Wischmeier, W. H., and Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning (USDA Agriculture Handbook No. 537)* (Número 537). USDA.
https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/RUSLE/AH_537_Predicting_Rainfall_Soil_Losses.pdf