

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



TESIS

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

**“PÉRDIDA DE SUELO POR INFLUENCIA DE LAS PRECIPITACIONES EN LA
CUENCA DEL RÍO GRANDE DE LA PROVINCIA DE CELENDÍN 2023 – 2024”**

PRESENTADO POR EL BACHILLER

ANDERSON FERNANDO ZEGARRA MUÑOZ

ASESOR

ING. M.Cs. EDGAR DARWIN DÍAZ MORI

CAJAMARCA – PERÚ

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
ANDERSON FERNANDO ZEGARRA MUÑOZ
DNI: N° 72867817
Escuela Profesional/Unidad UNC:
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
2. Asesor:
ING. M.Cs. EDGAR DARWIN DÍAZ MORI
Facultad/Unidad UNC:
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
PÉRDIDA DE SUELO POR INFLUENCIA DE LAS PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE LA PROVINCIA DE CELENDÍN 2023 – 2024
6. Fecha de evaluación: 07/01/2025
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 11%
9. Código Documento: oid3117370211980
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 08/01/2025

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 ING. M.Cs. EDGAR DARWIN DÍAZ MORI DNI: 27041767

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"

Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Celendín, a los cinco días del mes de diciembre del año dos mil veinticuatro, se reunieron en el aula 101 de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental - Sede Celendín, los miembros del Jurado, designados según Resolución de Consejo de Facultad N° 442-2024-FCA-UNC, de fecha 16 de setiembre del 2024, con la finalidad de evaluar la sustentación de la TESIS titulada: "PÉRDIDA DE SUELO POR INFLUENCIA DE LAS PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE LA PROVINCIA DE CELENDÍN 2023 - 2024", realizada por el Bachiller ANDERSON FERNANDO ZEGARRA MUÑOZ para optar por el Título Profesional de INGENIERO AMBIENTAL.

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

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

Dr. Agustín Emerson Medina Chávez
PRESIDENTE

Ing. M. Cs. Giovana Ernestina Chávez Horna
SECRETARIO

Ing. M. Cs. Adolfo Máximo Lopez Ayllas
VOCAL

ING° M. Cs. Edgar Darwin Díaz Mori
ASESOR

COPYRIGHT © 2025 by
ANDERSON FERNANDO ZEGARRA MUÑOZ
Todos los derechos reservados

DEDICATORIA

A mi madre Gloria Esther Muñoz Salazar y mi hermana Cintya Zegarra Muñoz por su apoyo
y amor incondicional.

A mis sobrinos Arturo Silva Zegarra, Adrián Silva Zegarra y Thiago Dávila Zegarra para que
nunca dejen de soñar, de aprender y de creer en ustedes mismos.

A Gabriela Diaz Solís por estar a mi lado en cada paso de este proceso y por darme la fuerza
necesaria para seguir adelante

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme salud y sabiduría durante mi vida universitaria.

A mi familia por su apoyo constante durante años, por haber confiado en mi y mis capacidades para lograr mis metas.

A mi asesor el Ing. M.Cs. Edgar Darwin Díaz Mori quien fue el impulsor para la realización del presente trabajo de investigación.

Al Ing. Bruno Fidel Sánchez Márquez, por su tiempo y por el apoyo en la ejecución de la investigación.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Antecedentes de la investigación	3
2.2. Bases teóricas	7
2.2.1. <i>Degradación de suelos</i>	7
2.2.2. <i>Erosión</i>	9
2.2.2.1. Tasa de erosión o de pérdida de suelos	9
2.2.3. <i>Erosión hídrica</i>	9
2.2.4. <i>Proceso de erosión hídrica</i>	9
2.2.5. <i>Factores de la erosión hídrica</i>	10
2.2.6. <i>Ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE)</i>	10
2.2.6.1. Factor de erosividad (R).....	11
2.2.6.2. Factor de erodabilidad (K)	12
2.2.6.3. Factor de longitud pendiente (LS)	14
2.2.6.4. Factor de cobertura (C)	15
2.2.6.5. Factor de prácticas de conservación de suelo (P)	16
2.3. Definición de términos básicos	17
2.3.1. <i>Conservación de suelos</i>	17

2.3.2. Curva hipsométrica	18
2.3.3. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).....	18
2.3.4. Erosión Hídrica.....	18
2.3.5. Método de curva de doble masa.....	18
2.3.6. Pérdida de suelos	19
CAPÍTULO III.....	20
MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1. Localización de la investigación	20
3.1.1. Climatología.....	21
3.1.2. Población del distrito de Celendín.....	23
3.1.3. Límites del distrito.....	25
3.2. Materiales	25
3.3. Metodología.....	25
3.3.1. Cálculo de precipitación media anual de la Cuenca del río Grande – Celendín ..	26
3.3.1.1. Análisis de consistencia de datos meteorológicos	28
3.3.2. Estimación de la cantidad de suelo perdido	28
3.3.2.1. Delimitación de la cuenca del río Grande - Celendín	28
3.3.2.2. Elaboración del mapa de pendientes.....	29
3.3.2.3. Elaboración del mapa de precipitación	30
3.3.2.4. Mapa de Cobertura Vegetal	31
3.3.2.5. Mapa de Suelo.....	31
3.3.3. Identificación de las áreas más vulnerables a la pérdida del suelo	32
3.3.3.1. Factor de Erosividad (R).....	32
3.3.3.2. Factor de Erodabilidad (K)	32
3.3.3.3. Factor Topográfico (LS)	41

3.3.3.4. Factor de Cobertura (C)	41
3.3.3.5. Factor de Prácticas de Conservación de Suelo (P).....	42
CAPÍTULO IV.....	43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1. Precipitación media anual para el periodo 1994 – 2023	43
4.2. Estimación de la cantidad de suelo perdido en la cuenca del río Grande - Celendín...	46
4.2.1. <i>Generación de mapas base para la estimación de erosión</i>	46
4.2.1.1. Mapa de la cuenca del río Grande - Celendín.....	46
4.2.1.2. Mapa de pendientes de la Cuenca del río Grande - Celendín.....	47
4.2.1.3. Mapa de Precipitación de la Cuenca del río Grande - Celendín.....	50
4.2.1.4. Mapa de Cobertura Vegetal de la Cuenca del río Grande - Celendín.....	52
4.2.1.5. Mapa de Suelos de la Cuenca del río Grande - Celendín	55
4.2.2. <i>Estimación de factores RUSLE</i>	58
4.2.2.1. Factor de Erosividad (R).....	58
4.2.2.2. Factor de Erodabilidad (K)	61
4.2.2.3. Factor Topográfico (LS)	63
4.2.2.4. Factor de Cobertura (C)	66
4.2.3. <i>Estimación de la erosión hídrica en la cuenca del río Grande - Celendín</i>	68
4.3. Identificación de las zonas más vulnerables.....	71
4.3.1. <i>Grado de erosión hídrica en la cuenca del río Grande – Celendín</i>	71
4.4. Pérdida de suelo por influencia de las precipitaciones.....	75
4.4.1. <i>Relación entre Precipitación y Erosividad (Factor R)</i>	75
4.4.2. <i>Distribución de la Pérdida de Suelo según Rango de Precipitación</i>	76
CAPÍTULO V.....	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77

5.1. Conclusiones	77
5.2. Recomendaciones	78
CAPÍTULO VI.....	79
REFERENCIAS.....	79
CAPÍTULO VII	84
ANEXOS	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Códigos USLE de estructura de suelo	13
Tabla 2 Códigos USLE de permeabilidad en función de la textura.....	13
Tabla 3 Valores del factor C para los tipos más comunes de cobertura de suelo.....	16
Tabla 4 Valores experimentales del factor de prácticas de conservación de suelo (P)	17
Tabla 6 Ubicación de puntos de donde se recopila la información meteorológica	27
Tabla 6 Clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor	29
Tabla 7 Unidades de suelos sistema FAO.....	31
Tabla 8 Puntos de muestreo por unidad de suelo de la cuenca del río Grande - Celendín ..	33
Tabla 9 Textura y materia orgánica de cada unidad de suelo de la cuenca del río Grande - Celendín	37
Tabla 10 Porcentaje de arena muy fina de cada unidad de suelo de la cuenca del río Grande de Celendín	38
Tabla 11 Estructura de cada unidad de suelo de la cuenca del río Grande - Celendín.....	39
Tabla 12 Código de estructura por unidad de suelo.....	40
Tabla 13 Tipos de cobertura vegetal adaptados.....	42
Tabla 14 Rango de pendientes clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor	48
Tabla 15 Rango de precipitaciones de la cuenca del río Grande - Celendín.....	50
Tabla 16 Tipos de coberturas vegetales de la cuenca del río Grande - Celendín.....	53
Tabla 17 Unidades de suelos de la cuenca del río Grande - Celendín.....	56
Tabla 18 Rangos de erosividad de la cuenca del río Grande de Celendín.....	59
Tabla 19 Valores del factor K de la cuenca del río Grande - Celendín	61
Tabla 20 Valores del factor LS de la cuenca del río Grande - Celendín.....	64
Tabla 21 Tipos de cobertura vegetal de la cuenca del río Grande - Celendín.....	66

Tabla 22 <i>Erosión media anual de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	69
Tabla 23 <i>Grados de erosión de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Evaluación global de la degradación del suelo</i>	8
Figura 2 <i>Ubicación de la cuenca de estudio “Cuenca del río Grande - Celendín”</i>	20
Figura 3 <i>Mapa de la clasificación climática de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	21
Figura 4 <i>Normales climatológicos estándares 1991 - 2020</i>	22
Figura 5 <i>Porcentaje de hombres y mujeres en el distrito de Celendín</i>	24
Figura 6 <i>Porcentaje urbano y rural en el distrito de Celendín</i>	24
Figura 7 <i>Ubicación de puntos de donde se recopila la información meteorológica</i>	27
Figura 8 <i>Flujograma de la delimitación de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	28
Figura 9 <i>Flujograma de obtención del mapa de pendientes</i>	30
Figura 10 <i>Flujograma de la obtención del mapa de precipitaciones</i>	30
Figura 11 <i>Flujograma de la obtención del mapa de cobertura vegetal</i>	31
Figura 12 <i>Puntos de muestreo por unidad de suelo</i>	34
Figura 13 <i>Análisis curva de doble masa</i>	44
Figura 14 <i>Precipitación promedio anual por punto de control</i>	45
Figura 15 <i>Precipitación promedio anual</i>	45
Figura 16 <i>Mapa de la delimitación de la cuenca del río grande - Celendín</i>	46
Figura 17 <i>Curva hipsométrica de las pendientes de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	48
Figura 18 <i>Mapa de pendientes de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	49
Figura 19 <i>Mapa de isoyetas de precipitaciones de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	51
Figura 20 <i>Mapa de cobertura vegetal de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	54
Figura 21 <i>Mapa de suelos de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	57
Figura 22 <i>Mapa del factor de erosividad (R) de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	60
Figura 23 <i>Mapa de la erodabilidad (K) de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	62

Figura 24 <i>Mapa del factor topográfico (LS) de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	65
Figura 25 <i>Mapa del factor de cobertura (C) de la cuenca del río Grande de Celendín</i>	67
Figura 26 <i>Mapa de la erosión estimada en la cuenca del río Grande - Celendín</i>	70
Figura 27 <i>Mapa del grado de erosión de la cuenca del río Grande - Celendín</i>	73
Figura 28 <i>Erosión hídrica anual para la Región Hidrológica “Atlántico 9”</i>	74
Figura 29 <i>Relación entre precipitación promedio anual y erosividad</i>	75
Figura 30 <i>Distribución de pérdida de suelo en función del rango de precipitación promedio anual</i>	76

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal estimar la pérdida de suelo por influencia de las precipitaciones en la cuenca del río Grande de Celendín durante el periodo 2023 – 2024, el estudio fue tipo de observacional con un diseño cuantitativo, transeccional y descriptivo. La metodología consistió en calcular la precipitación anual utilizando datos de CHIRPS y SENAMHI. Luego, mediante SIG, se generaron mapas de la cuenca, incluyendo delimitación, pendientes, precipitaciones, cobertura vegetal y suelos, complementados con pruebas in situ y de laboratorio para determinar textura, estructura y materia orgánica del suelo. Con esta información, se calcularon los factores RUSLE para estimar los grados de erosión, revelando una pérdida de suelo promedio de 81.53 T/ha*año. Cerca del 30% del territorio experimenta una erosión fuerte, destacando la urgencia de medidas de recuperación. Además, se identificó que el factor de cobertura vegetal y el topográfico son principales contribuyentes a la erosión del suelo. En conclusión, las áreas más vulnerables se localizan en la parte baja de la cuenca y en la zona oeste, debido a sus pendientes extremas y escasa cobertura vegetal, acentuadas por las precipitaciones las cuales se estimaron en un promedio de 953.74 mm/año.

Palabras claves: Erosión hídrica, ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE), conservación de suelos.

ABSTRACT

The main objective of this research was to estimate soil loss due to precipitation influence in the Grande de Celendín river basin during the period 2023-2024. It follows an observational approach with a quantitative, cross-sectional, and descriptive design. The methodology involved calculating annual precipitation using CHIRPS and SENAMHI data. Subsequently, through GIS (Geographic Information Systems), maps of the basin were generated, including delineation, slopes, precipitation, vegetation cover, and soils. These were complemented with in situ and laboratory tests to determine soil texture, structure, and organic matter. Using this information, RUSLE factors were calculated to estimate erosion levels, revealing an average soil loss of 81.53 T/ha*year. Approximately 30% of the territory experiences severe erosion, highlighting the urgency of recovery measures. Additionally, it was identified that vegetation cover and topography are the main contributors to soil erosion. In conclusion, the most vulnerable areas are located in the lower part of the basin and in the western zone, due to their steep slopes and sparse vegetation cover, exacerbated by the precipitations, estimated at an average of 953.74 mm/year.

Keywords: Water erosion, revised universal soil loss equation (RUSLE), soil conservation

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es un desafío global, la FAO (2018), estima que se pierden anualmente aproximadamente 24.000 millones de toneladas de suelo, comprometiendo la productividad y la seguridad alimentaria. En esta problemática, el Perú se destaca como uno de los países más afectados en Sudamérica y a nivel mundial. La región de Cajamarca no escapa a esta realidad, evidenciando una alta tasa de pérdida de suelo debido a la erosión hídrica. Un estudio del INEI (2018) revela que la región pierde anualmente 114 millones de toneladas de suelo, afectando tanto la calidad del suelo como la producción agrícola.

La cuenca del río Grande de Celendín ubicada en el distrito de Celendín, región Cajamarca, es una zona montañosa por lo cual es afectada por la erosión del suelo y la pérdida de productividad agrícola debido a la intensidad de sus pendientes y lluvias. Estos problemas se agravan debido a las malas prácticas y la falta de conservación del suelo. Con el fin de abordar la problemática y contrarrestar sus efectos negativos se han planteado los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Estimar la pérdida de suelo por influencia de las precipitaciones en la cuenca del río Grande de Celendín durante el periodo 2023 – 2024

Objetivos específicos

- Calcular la precipitación media anual en la cuenca del río Grande de Celendín para el periodo 2023 – 2024

- Estimar la cantidad de suelo perdido en la cuenca del río Grande de Celendín durante el periodo 2023 -2024 a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)
- Identificar las áreas más vulnerables a la pérdida de suelo por la influencia de las precipitaciones.

Para alcanzar los objetivos propuesto primero se tuvo que calcular la precipitación anual en la cuenca utilizando datos proporcionados por el servidor web CHIRPS y el SENAMHI. Posteriormente, se emplearon los Sistemas de Información Geográfica (SIG), específicamente el programa ArcGIS 10.8, para generar mapas temáticos como la delimitación de la cuenca, pendientes, precipitaciones, cobertura vegetal y suelos. Además, se determinó mediante pruebas in situ y de laboratorio la textura, estructura y materia orgánica de cada unidad presente en la cuenca. A partir de estos mapas y de las pruebas ya mencionadas, se calcularon los factores RUSLE (Factor de erosividad, erodabilidad, topográfico y de cobertura) para posteriormente estimar los grados de erosión. Los resultados revelaron una pérdida de suelo promedio de 81.53 T/ha*año, especialmente acentuada en áreas con escasa cobertura vegetal y pendientes pronunciadas. Cerca del 30% del territorio exhibe erosión fuerte, superando las 50 toneladas por hectárea por año, subrayando la necesidad urgente de implementar medidas de recuperación del suelo. La precipitación media anual en la cuenca se mantuvo en 953.74 mm/año, con poca variación a lo largo del rango altitudinal. Al estimar la cantidad de suelo perdido mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), se identificaron al factor de cobertura vegetal y al factor topográfico como los principales contribuyentes a la erosión del suelo. En conclusión, se destaca que las áreas más vulnerables a la pérdida de suelo se encuentran en la parte baja de la cuenca debido a sus pendientes extremas, así como en la zona oeste, caracterizada por su escasa cobertura vegetal y pendientes empinadas.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

Arias – Muñoz et al. (2023, p.207) cuantificaron la distribución espacial de la erosión hídrica en las diferentes coberturas de suelo en la cuenca media-alta del río Mira en Ecuador. Por lo cual aplicaron el modelo RUSLE en un entorno SIG. Los resultados muestran que la erosión varía desde 0 hasta los 812.30 t/ha/año con un promedio de 32.79 t/ha/año. En la zona de estudio solamente los bosques y los páramos presentan erosión promedio por debajo del umbral de erosión, con valores inferiores a 10 t/ha/año. Mientras que las áreas desnudas y los cultivos son las coberturas que provocan más erosión del suelo. Se demuestra que la erosión en la zona de la investigación es una de las más altas del mundo. Por lo que se recomienda a las autoridades alternativas de manejo de uso de suelo dentro de la cuenca.

Jaya (2023, p.26) utilizó el método USLE, y los SIG para modelar las tasas de erosión en la microcuenca de río Muchacho. Según los resultados de la simulación, se observa una pérdida media de suelo de 74,4 t/ha/año, categorizada como "erosión alta". Las cabeceras de cuenca, caracterizadas por suelos dispersos, vegetación escasa, pastoreo, pendientes pronunciadas y lluvias frecuentes, muestran tasas de erosión del suelo que van de medias a muy altas (> 25 t/ha/año). En contraste, las áreas con alta densidad de vegetación, pendientes moderadas y precipitaciones escasas exhiben tasas de erosión bajas (0-25 t/ha/año), localizadas principalmente en la parte central y baja de la cuenca. Además, los resultados de la simulación indican una mayor frecuencia de valores de erosión altos.

Ramos (2022, p.1) estimó la erosión potencial del suelo en una finca cafetalera con visión agroecológica, ubicada en el Cantón San Juan Buena, departamento Santa Ana, donde

aplica la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE). Se extraen muestras de suelo que son analizadas en laboratorio del CENTA y de la facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, donde se determina la textura de suelo a través del método de Bouyoucos, la densidad aparente y materia orgánica. Los resultados arrojan los coeficientes de correlación de los siguientes factores: lluvia R, erodabilidad K, longitud y pérdida de ladera LS, cobertura vegetal C y prácticas de conservación de suelo P. El grado de erosión de la finca la Esperanza es de 0.7061 T/ha/año. Al ser este un valor menor a uno nos indica una erosión tolerable. Sin embargo, se deben adoptar medidas para que el grado de erosión no continúe incrementándose en los próximos años

Flores (2016, p.1) analizó cómo las características específicas de 3 cuencas mexicanas (Pichucalco, San Pedro Y Sonora) contribuyen a la pérdida de suelo. Se encontró que el clima, la topografía y las características del suelo son los factores que más influyen en la pérdida de suelo. Para cuantificar la degradación y erosión del suelo utilizaron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) que estima la pérdida anual de suelo producto de las lluvias y el escurrimiento en una cuenca. Se utilizan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para analizar y modelar la erosión. Los resultados indican que los factores que más erosionan el suelo son la cantidad de lluvia, el uso del suelo y la pendiente. Además, se observa que los grados de erosión generalmente son más altos en zonas tropicales que en zonas templadas debido a que estos son ecosistemas altamente vulnerables (mayor frecuencia de lluvias intensas y transformaciones agropecuarias y forestales causadas por la actividad humana).

Chipana (2022, p. xiv) estimó la pérdida de suelo media anual en la cuenca del río Chumbao y determinó los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE). Utiliza el método RUSLE junto con diferentes ecuaciones y métodos para el cálculo de los factores R, K, LS y C. Los resultados muestran un amplio rango de valores

para el factor R, variando desde 0 hasta los 6965.87 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹. año⁻¹. El factor K es dominado por un 98.1% de área de textura franco arcilla arenosa. La pendiente varía desde 0 hasta 256%, donde el 40.32% de la superficie tiene una pendiente de 30-60%. La cobertura vegetal predominante es "ligera" en un 50.6% del área y "mediana" en un 43.2%. En conclusión, los factores de erosividad, topografía y cobertura vegetal tienen una influencia significativa en la pérdida de suelo media anual en la cuenca del río Chumbao, mientras que el factor de erodabilidad no muestra dicha influencia

Zúñiga (2017, p. x) determinó diversos grados de erosión en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca empleando el método USLE y técnicas geoespaciales mediante dos modelos: MC78, basado en el método USLE y NDVI de imagen satelital de 2014, y el modelo MC80, basado en USLE e imágenes Landsat de 2001. Luego crearon mapas retrospectivos y prospectivos de erosión en la cuenca aportante y su relación con la sedimentación del embalse en tres fases: 2002-2006, 2006-2010 y 2010-2015. El modelo MC80 arroja un promedio anual de erosión de 128.96 T/ha, mientras que el modelo MC78 tiene un promedio anual de 145.50 T/ha. Estas tasas indican una cuenca erosiva con tendencia a la desertificación, superando los estándares recomendados por ICONA (1991) y la FAO. Si se incrementa la cobertura vegetal se proyecta una disminución del 28% del promedio anual de erosión (116.74 T/ha/año). Esto llevaría a una reducción en la tasa anual de sedimentación del embalse de 0.42 Hm³/año a 0.30 Hm³/año prolongando su vida útil de 17 a 23 años

Raymundo (2018, p. xiii) evaluó la pérdida de suelo utilizando la Ecuación de Pérdida de Suelo Universal Revisada (RUSLE) junto con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección en la microcuenca del río Jucusbamba, Perú. Los factores de la ecuación fueron estimados utilizando datos base como la precipitación (Factor R), el mapa de suelos de la FAO (Factor K), el modelo digital de elevación (Factor LS), el mapa de cobertura y uso actual del suelo (Factor C), y el mapa de pendiente (Factor P). Según los

resultados obtenidos, el 93,34 % del área total presenta una pérdida leve de suelo (0 a 5 tn/ha.año), el 3,94 % experimenta una pérdida moderada (5 a 10 tn/ha.año), el 1,82 % muestra una pérdida alta (10 a 20 tn/ha.año), el 0,61 % registra una pérdida muy alta (20 a 40 tn/ha.año), y solo el 0,29 % presenta una pérdida severa (> 40 tn/ha.año). Se concluye que las áreas con erosión alta, muy alta y severa se concentran principalmente en la parte media y baja de la microcuenca.

Cabrejos (2016, p. xi) identificó y cuantificó las áreas erosionadas y/o vulnerables de la microcuenca del río Atuén en la región Amazonas utilizando un modelo geoespacial a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) de Wischmeier y Smith (1968). Se recopiló información temática y socioeconómica, tanto en formato digital como físico, y realiza un trabajo de campo para obtener datos adicionales. Utilizando el SIG, se procesaron imágenes satelitales y se realizó un modelamiento geoespacial que considera aspectos físicos, bióticos y sociales. Se observa que las zonas más altas de la cuenca y las riberas de los ríos presentaban mayores incidencias erosivas, y también se asocian con niveles socioeconómicos bajos.

Nakaya (2018, p. i) determinó la vulnerabilidad a la erosión hídrica en la cuenca del río Tingo en Cajamarca. Donde utiliza la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) y herramientas SIG, donde identificó las zonas vulnerables a la erosión hídrica según la clasificación FAO. Se propusieron alternativas de protección y conservación del suelo según el nivel de vulnerabilidad erosiva de cada zona. La investigación tuvo tres etapas. Primero compilación de la información sobre cobertura vegetal, tipo de suelos, precipitaciones, fisiografía, geología y cartas nacionales, también se definen las rutas y los lugares de muestreo de suelos. Luego trabajos de campo para recolectar muestras de suelo, identificar la cobertura vegetal, los accesos al área de estudio y las prácticas de manejo del suelo. Finalmente se determina la textura, materia orgánica y arena muy fina de las muestras

de suelo, y se procesan la información recopilada anteriormente. Haciendo uso del SIG, se procesaron digitalmente las imágenes satelitales y se elabora el modelamiento geoespacial de los parámetros físicos asociados a la ecuación RUSLE. El resultado fue un mapa que muestra la distribución espacial de la vulnerabilidad a la erosión hídrica en donde la erosión es mayor en zonas con pendientes pronunciadas y poca cobertura vegetal. Se concluye que la pérdida de suelo se debe más a pendientes pronunciadas y poca cobertura vegetal que al volumen de precipitaciones.

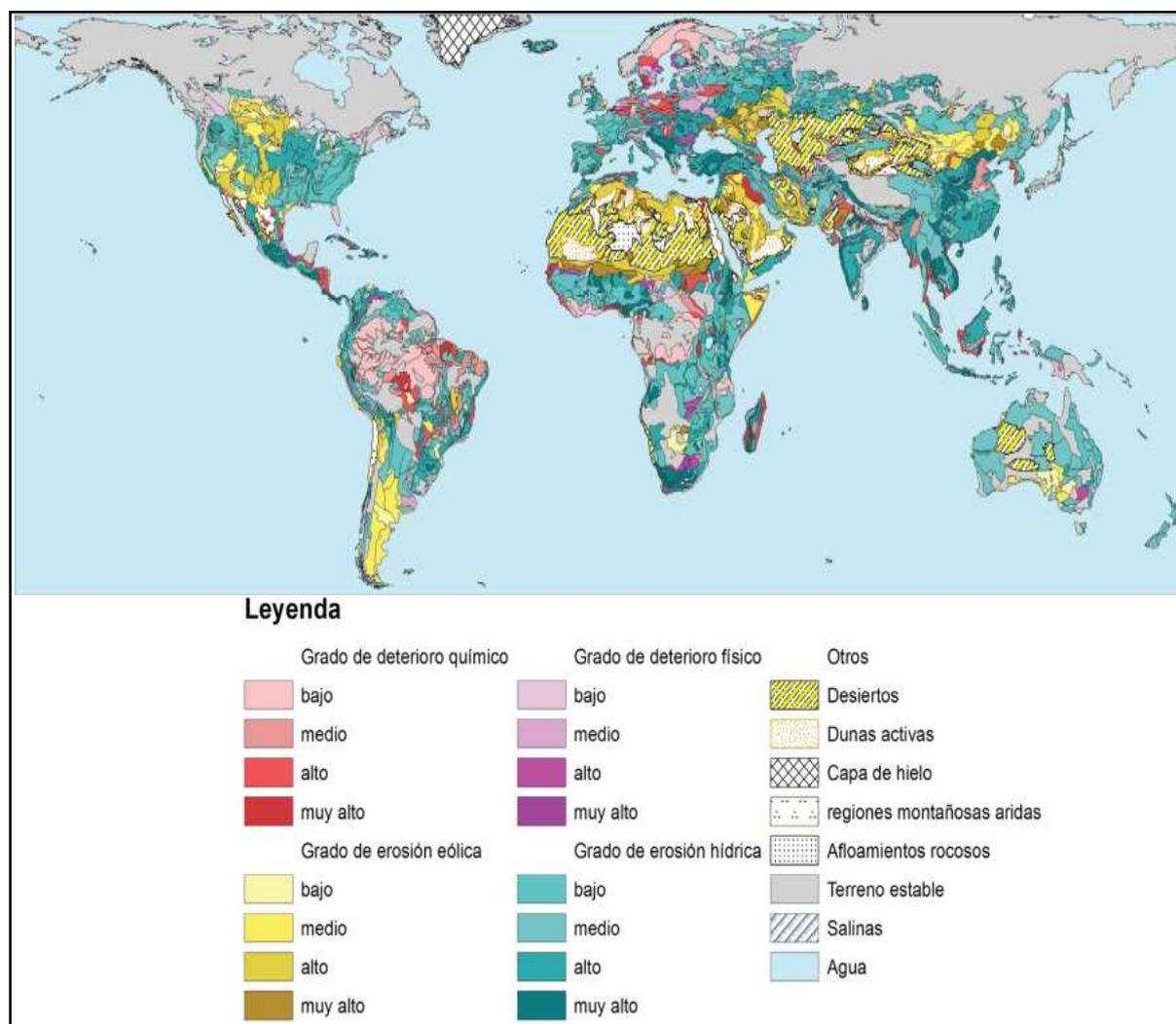
2.2. Bases teóricas

2.2.1. Degradación de suelos

En su portal web la FAO (2018) define a la degradación del suelo como una alteración en la calidad del suelo que conlleva a una disminución en la capacidad del ecosistema para generar productos o brindar servicios a sus beneficiarios. Los suelos degradados presentan un estado de salud que no les permite ofrecer los bienes y servicios habituales dentro de su ecosistema respectivo.

Figura 1

Evaluación global de la degradación del suelo



Nota. La figura 1 elaborada por Camargo et al. (2017, p.73) muestra el mapa de degradación del suelo a nivel mundial utilizando archivos vectoriales proporcionados por ISRIC (2017). La representación destaca los principales tipos de degradación del suelo, como la degradación química, eólica, física e hídrica. Además, se evidencia que, en Perú, la principal causa de degradación del suelo se atribuye a la erosión hídrica, mostrando niveles significativos de este fenómeno.

2.2.2. Erosión

La erosión es uno de los principales factores de la degradación de suelos, el Ministerio de Agricultura y riego del Perú (MINAGRI, 2014, p. 3) la define como el desprendimiento y arrastre (lavado) del suelo desde un lugar hacia otro, siendo ocasionada por diversos factores como la lluvia, el viento o malas prácticas agrícolas. Dichas pérdidas gradualmente reducen la profundidad del suelo y resultan en la pérdida de su fertilidad. Es importante destacar que esta degradación del suelo es irreversible.

2.2.2.1. Tasa de erosión o de pérdida de suelos

Para evaluar la erosión de un suelo, es fundamental considerar la tasa de pérdida de suelos, la cual según Montgomery (2007, p. 32) se define como "La cantidad de suelo que se erosiona o se pierde anualmente en una determinada área. Se expresa generalmente en toneladas por hectárea por año y es un indicador importante para evaluar la degradación del suelo y planificar medidas de conservación"

2.2.3. Erosión hídrica

La erosión hídrica es un proceso de erosión que se produce debido a la acción del agua sobre la superficie de la tierra. Este proceso es causado principalmente por la lluvia y el flujo de agua superficial que se mueve por la superficie del suelo. La erosión hídrica es uno de los procesos más importantes de la degradación del suelo y la pérdida de la fertilidad de este (Lal, 1995, p.5).

2.2.4. Proceso de erosión hídrica

De acuerdo con De Regoyos (2003) los principales procesos de erosión son tres:

1. El desprendimiento el cual implica la separación de partículas del suelo de su masa original debido a los agentes erosivos (ASCE, 1975, citado por De Regoyos, p .31)

2. El transporte el cual se refiere al movimiento de los sedimentos desde su ubicación inicial hacia otras áreas, a menudo a través de arroyos hasta llegar eventualmente al océano (Holeman, 1968, citado por De regoyos p. 32).
3. La sedimentación la cual ocurre cuando algunos sedimentos se depositan en áreas como los límites de las pendientes, presas y valles. Además, es importante destacar que estos depósitos pueden ser temporales y pueden ser redistribuidos por tormentas posteriores, a veces incluso muchos años después (Trimble, 1975 y ASCE, 1975, citado por De Regoyos, p .32)

2.2.5. Factores de la erosión hídrica

Los factores que influyen principalmente en la erosión hídrica son: la intensidad y la duración de la lluvia, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal, la textura del suelo y la capacidad de retención de agua del suelo. Estos factores se pueden supervisar y administrar para mitigar la erosión. (Wischmeier y Smith, 1978, p. 3).

2.2.6. Ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) es una herramienta ampliamente utilizada para estimar la tasa media anual de erosión hídrica en el suelo, particularmente en áreas de cultivo. Este modelo, desarrollado por Wischmeier y Smith (1978, p. 4), se centra en la erosión en forma de láminas y surcos, excluyendo procesos más intensivos como la erosión en cárcavas y sistemas de drenaje.

Posteriormente, Renard et al. (1997) introdujeron la versión revisada de este modelo, conocida como RUSLE (Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo). La RUSLE conserva la estructura básica de la USLE pero incorpora avances significativos, como la actualización de los valores de los factores de la ecuación y el uso de datos más detallados, incluyendo características específicas del terreno y prácticas de manejo más modernas.

Ambos modelos permiten calcular la tasa anual de pérdida de suelo (tn/ha) mediante una ecuación que combina diversos factores (ver ecuación 1). Sin embargo, mientras la USLE es considerada una herramienta más general, la RUSLE mejora la precisión y aplicabilidad del cálculo al adaptarse mejor a diferentes contextos y condiciones, ampliando su uso en diversos tipos de paisajes y prácticas agrícolas.

Ecuación RUSLE

Ecuación (1)

$$A = R \times K \times L \times C \times P$$

Donde:

A= Tasa de erosión del suelo (toneladas por hectárea por año tn/ha)

R= Factor de erosividad de la lluvia (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹)

K= Factor de erodibilidad del suelo (toneladas por MJ mm)

L= Factor de longitud de la pendiente (adimensional)

S= Factor de inclinación de la pendiente (adimensional)

C= Factor de cobertura vegetal (adimensional)

P=Factor de prácticas de conservación del suelo (adimensional)

2.2.6.1. Factor de erosividad (R)

El factor de erosividad de la lluvia (R) es una medida de la energía de la lluvia que cae sobre la superficie del suelo y su capacidad para causar la erosión. Este factor está influenciado por la intensidad de la lluvia y la duración de esta (Renard et al., 1997). Según el mismo autor, "la erosividad de la lluvia se incrementa con la intensidad y duración de las lluvias, y el tamaño de la gota" (p. 417).

$$R = \frac{EI_{30} J \cdot cm}{100 m^2 \cdot hr} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

E= Energía de la lluvia $\frac{J}{m^2}$

I₃₀= Máxima intensidad de lluvia en 30 minutos $\frac{cm}{hr}$

2.2.6.2. Factor de erodabilidad (K)

El factor de erodabilidad del suelo (K) es una medida de la susceptibilidad del suelo a la erosión. Este factor está influenciado por la textura, la estructura, la permeabilidad y la materia orgánica del suelo (Renard et al., 1997). Lal (1995) explica que "la erodabilidad del suelo es una medida de la susceptibilidad del suelo a la erosión, en términos de la cantidad de suelo que se pierde por unidad de energía de la lluvia" (p. 69).

El cálculo matemático para determinar el factor de erodabilidad del suelo se lleva a cabo utilizando la ecuación del nomograma de Wischmeier, citado por Mannaerts (1999).

$$K = \left(\frac{10}{7.594} \right) * \left[\frac{[2.1 * 10^{-4} * (12 - OM) * M^{1.14} + 3.25 * (S - 2) + 2.5 * (P - 3)]}{100} \right]$$

Ecuación (3)

Donde:

K= Factor de erodabilidad del suelo (t/ha.MJ*ha/mm*hr)

OM= Materia orgánica (%)

S= Código de estructura USLE

P= Código de permeabilidad USLE

M= Producto de (% limo + % arena muy fina) * (100 - arcilla)

Tabla 1*Códigos USLE de estructura de suelo*

	Código USLE	Tipo de estructura
1	Granular muy fina	
2	Granular fina	
3	Granular media a gruesa	
	Bloques	
	Laminar	
4	Masiva	

Nota. Tomado de Mancilla, 2008, p.15

A continuación, se presentan los códigos de USLE que corresponden a la permeabilidad del suelo según su velocidad de infiltración:

Tabla 2*Códigos USLE de permeabilidad en función de la textura*

Código USLE	Textura	Categoría de Permeabilidad
6	Arcilla, franco arcilloso	Muy lenta ($<0.13 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$)
5	Arcillo arenoso, franco arcillo limoso	Lenta ($0.13 - 0.5 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$)
4	Franco arcillo arenoso, franco arcilloso	Lenta a moderada ($0.5 - 2 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$)
3	Franco limoso, franco	Moderada ($2 - 6.3 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$)
2	Areno francoso, franco arenoso	Moderada a rápida ($6.3-12.7\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)
1	Arena	Rápida ($> 12.7 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$)

Nota. Tomado de Mannaerts, 1999

2.2.6.3. Factor de longitud pendiente (LS)

El factor de pendiente (LS) "describe la influencia de la pendiente en la erosión hídrica del suelo. La erosión del suelo aumenta a medida que la pendiente se hace más pronunciada" (Renard et al., 1997, p. 37).

a) Longitud de talud (L)

El factor L mide el efecto del largo de la pendiente en la erosión tomando como base una longitud de las parcelas normalizadas en 22.13m (Mencionado por Dufilno et al., 2011, p. 74) y se estima con la siguiente ecuación

$$L = \left[\frac{\lambda}{22.13} \right]^m \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$m = \frac{F}{(1 + F)} \quad \text{Ecuación (5)}$$

$$F = \frac{\sin\beta/0.0896}{3(\sin\beta)^{0.8} + 0.56} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

λ : Es la longitud del declive en grados

β : Ángulo de la pendiente, en grados

m: exponente que depende de la pendiente de la ladera

La ecuación (4) es empleada para el cálculo manual de la longitud de talud (L), sin embargo, para un procesamiento más eficiente de datos, cuando en los estudios se hace uso de los SIG se hace uso de la ecuación planteada por Desment y Govers (1996), la cual es mostrada a continuación.

$$L = \frac{[A + D^2]^{(m+1)} - A^{(m+1)}}{X^m * D^{(m+2)} * (22.13)^m} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde:

L: Longitud de talud

A: acumulación de flujo a nivel de píxel

D: tamaño de píxel

X: coeficiente de forma (1 para sistemas pixelados)

b) Nivel de inclinación de pendiente (S)

El factor S estima la cantidad de suelo perdido en una superficie con una pendiente específica en comparación con la pendiente estándar del 9%. En el cálculo del factor de pendiente S en RUSLE, se emplean las ecuaciones propuestas por McCool et al. (1987). Estas ecuaciones contemplan dos relaciones distintas para pendientes moderadas ($s < 9\%$) y pendientes más pronunciadas ($s \geq 9\%$).

$$\begin{aligned} S &= 10.8 * \sin \theta + 0.03 & \text{Sí: } s < 9\% \\ S &= 16.8 * \sin \theta - 0.5 & \text{Sí: } s \geq 9\% \end{aligned} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

S = Factor de pendiente

s = Inclinación de pendiente (%)

θ = Ángulo de pendiente, en grados

2.2.6.4. Factor de cobertura (C)

La vegetación puede reducir la erosión del suelo al proteger la superficie del suelo de la fuerza de la lluvia, reducir la velocidad del agua que se mueve sobre la superficie del suelo, aumentar la capacidad de retención de agua del suelo y estabilizar la superficie del suelo" (Lal, 1995, p. 66).

Tabla 3

Valores del factor C para los tipos más comunes de cobertura de suelo

Cobertura vegetal	C
Suelo desnudo	1
Bosque, matorral denso	0.001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Pradera sobre pastoreada	0.1
Maíz, sorgo, alto rendto., laboreo convencional	0.20 – 0.55
Maíz, sorgo, alto rendto., sin laboreo convencional	0.50 – 0.90
Maíz, sorgo, bajo rendto., laboreo mínimo	0.02 – 0.10
Maíz, sorgo, alto rendto., laboreo con chisel	0.12 – 0.20
Maíz, sorgo, bajo rendto., laboreo con chisel	0.30 – 0.45
Algodón	0.40 – 0.70
Pradera herbácea	0.01 – 0.025
Soya	0.20 – 0.50
Trigo	0.10 – 0.40
Arroz	0.10 – 0.20
Cacahuate	0.30 – 0.80
Frutales con cobertura vegetal	0.01 – 0.80
Caña de azúcar	0.56
Arbolado denso	0.001 – 0.003
Arbolado forestal clareado	0.003 – 0.009
Arbolado muy clareado (25 – 60 %)	0.041
Matorral con buena cobertura	0.003 – 0.013
Matorral ralo y eriales	0.20 – 0.013
Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Pasturas	0.15
Plantas herbáceas y matorjos (100%)	0.003
Plantas herbáceas y matorjos (60%)	0.035
Cubierta escasa (60%)	0.15 – 0.09
Cubierta inapreciable	0.45

Nota. Tomado de Cayo, 2011, p 7

2.2.6.5. Factor de prácticas de conservación de suelo (P)

El componente de la ecuación RUSLE conocido como el "Factor de prácticas de conservación del suelo" (P) se encarga de describir el impacto que tienen las prácticas de conservación del suelo en la erosión de este, según la definición de Renard et al. (1997, p. 41). Estas prácticas de conservación pueden reducir la erosión al minimizar la exposición del suelo a la erosión hídrica y mejorar la capacidad de retención de agua en el suelo (Renard et al., 1997, p. 41). Los valores específicos para este factor, asignados a diversos tipos de

cultivos y coberturas, han sido establecidos experimentalmente y están disponibles en las publicaciones de Wischmeier (1978) y Mannaerts (1999).

Tabla 4

Valores experimentales del factor de prácticas de conservación de suelo (P)

Cobertura vegetal	C
Cultivo a nivel s = 0 - 1 ⁰	0.60
Cultivo a nivel s = 2 - 5 ⁰	0.50
Cultivo a nivel s = 6 - 7 ⁰	0.60
Cultivo a nivel s = 8 - 9 ⁰	0.70
Cultivo a nivel s = 10 - 11 ⁰	0.80
Cultivo a nivel s = 12 - 14 ⁰	0.90
Bacanales a nivel	0.14
Bacanales a contra pendiente	0.05
Bacanales con pend. Siguiendo la pend.	0.35
Bacanales a nivel con referencia de agua	0.01
Caballones enlazados	0.10 – 0.20

Nota. Tomado de Cayo, 2011, p 7

En áreas donde no se implementan prácticas de conservación del suelo, se asigna el valor 1 al factor P, lo cual indica que no hay impacto en la reducción de la pérdida de suelo en condiciones simuladas sin cobertura ni aplicación de prácticas de conservación.

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Conservación de suelos

Actividades a nivel local que mantienen o aumentan la capacidad productiva de la tierra en áreas afectadas por o propensas a la degradación, incluye la prevención o la reducción de la erosión del suelo, consolidación y la salinidad; la conservación o drenaje del suelo; el mantenimiento o mejoramiento de la fertilidad del suelo. (FAO, 2024)

2.3.2. Curva hipsométrica

Representación gráfica del área de una cuenca en función de la altitud de su superficie. Se elabora ubicando en el eje de las abscisas los valores de la superficie drenada proyectada, expresados en km² o en porcentaje, obtenidos hasta un nivel específico, que se coloca en el eje de las ordenadas, usualmente en metros. (Ibáñez et al., 2014)

2.3.3. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

Herramienta diseñada para anticipar la tasa media anual de erosión hídrica del suelo en áreas de cultivo y en otros contextos. Aborda principalmente la pérdida de suelo en forma de láminas y surcos, excluyendo la erosión en cárcavas y sistemas de drenaje. (Wischmeier y Smith ,1978)

2.3.4. Erosión Hídrica

Proceso que se produce debido a la acción del agua sobre la superficie de la tierra. causado principalmente por la lluvia y el flujo de agua superficial que se mueve por la superficie del suelo. (Lal, 1995)

2.3.5. Método de curva de doble masa

Herramienta estadística utilizada para analizar y corregir los efectos de cambios en la exposición o ubicación de pluviómetros, variaciones en las técnicas de observación e incluso errores instrumentales o de lectura en estaciones pluviométricas. Se basa en la compensación entre los valores acumulados del promedio de las precipitaciones anuales de varias estaciones contiguas, lo que permite ubicar en un gráfico las sumas acumuladas promedio de un conjunto de estaciones en un eje y las sumas acumuladas de la estación en estudio en el otro. (Arumí et al., 2005)

2.3.6. Pérdida de suelos

La degradación o pérdida de suelos es la alteración en la calidad del suelo que conlleva a una disminución en la capacidad del ecosistema para generar productos o brindar servicios a sus beneficiarios. (FAO, 2018)

CAPÍTULO III

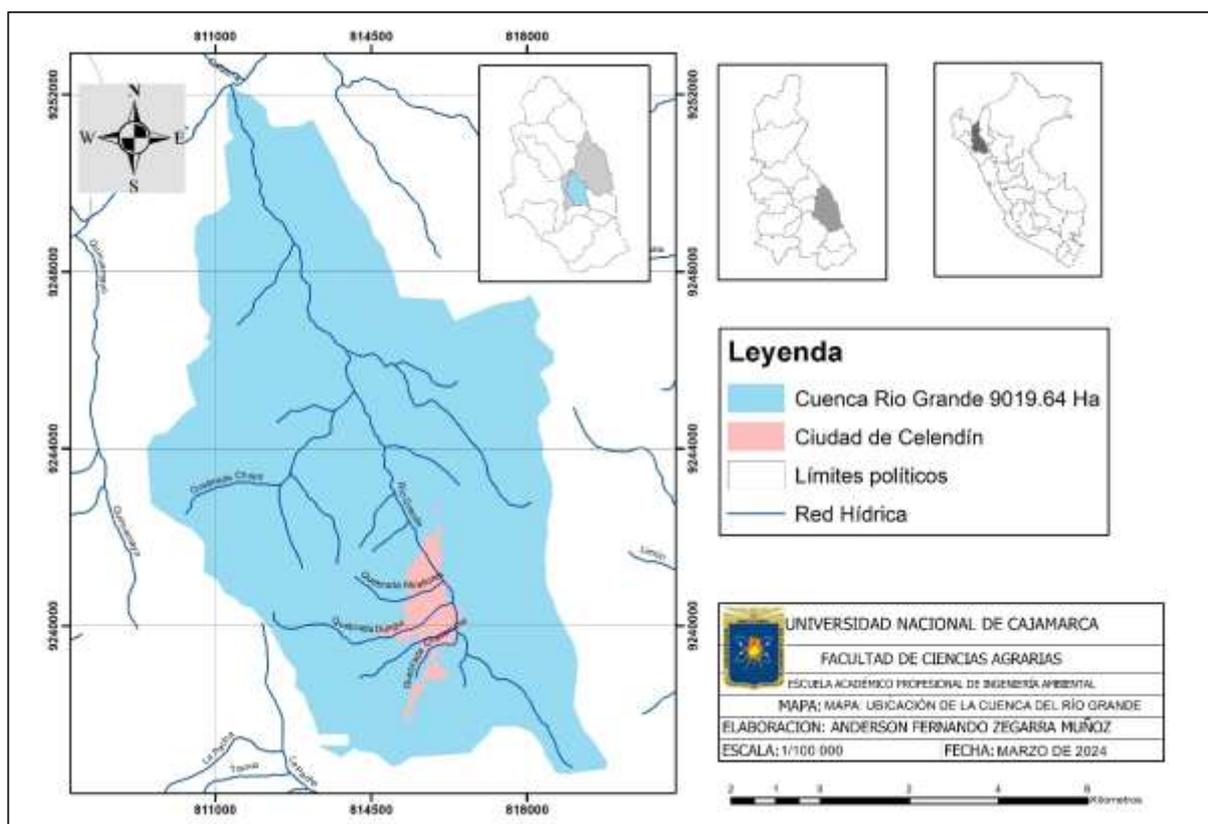
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización de la investigación

La Cuenca del río Grande se encuentra ubicada en la provincia de Celendín, departamento de Cajamarca la cual abarca una extensión aproximada de 9019.64 hectáreas con altitudes que van desde los 1400 m.s.n.m (extremo noroeste) hasta los 3400 m.s.n.m. (extremo sureste).

Figura 2

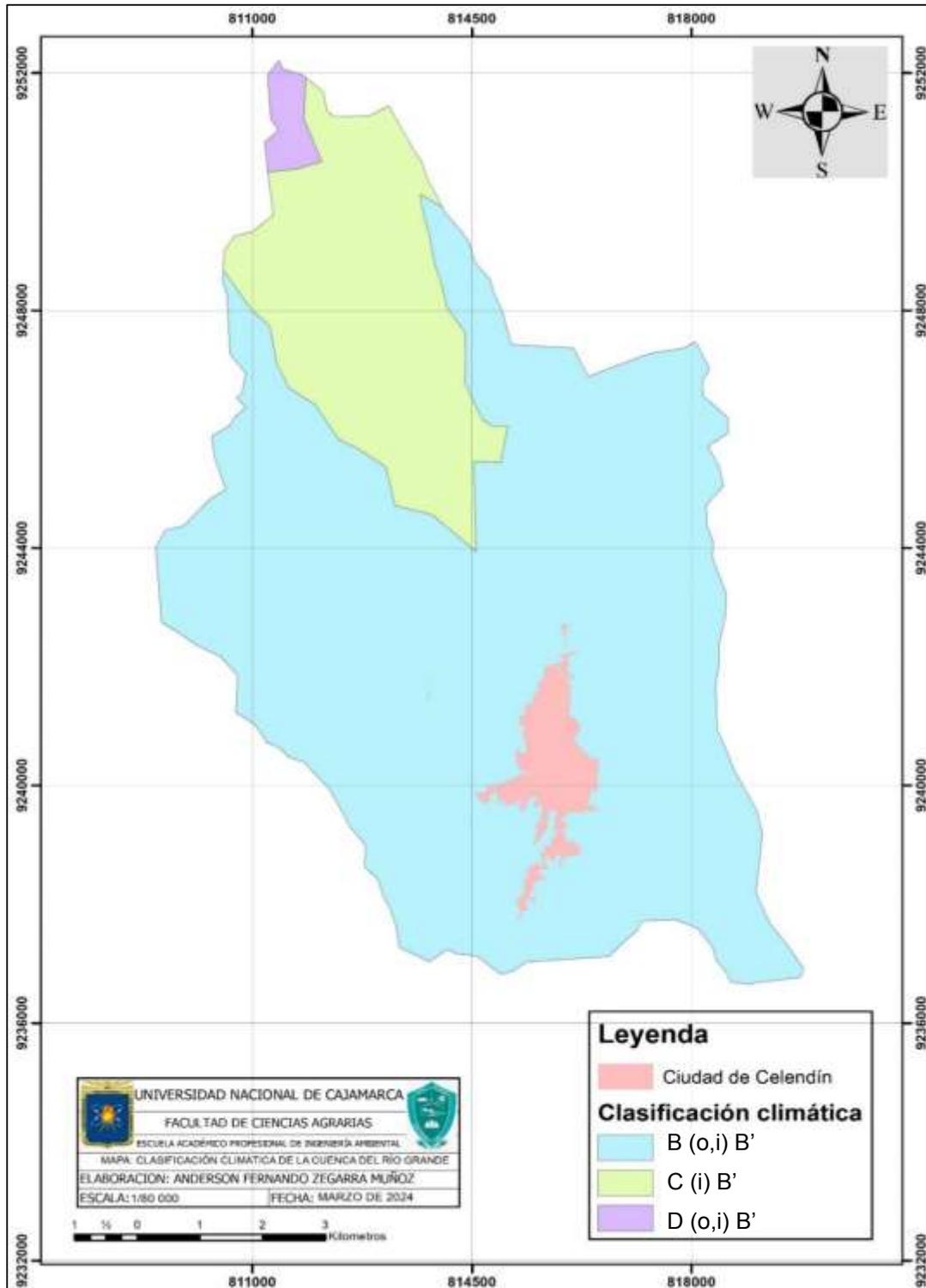
Ubicación de la cuenca de estudio “Cuenca del río Grande - Celendín”



3.1.1. Climatología

Figura 3

Mapa de la clasificación climática de la cuenca del río Grande - Celendín

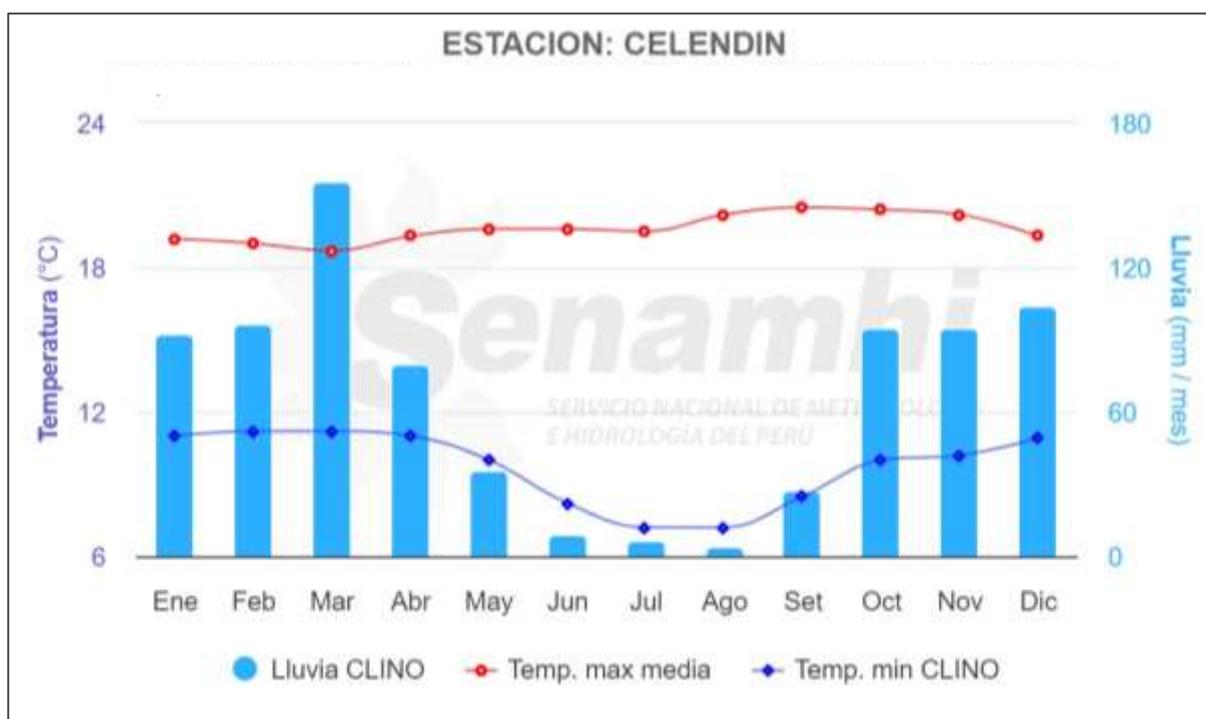


La cuenca del río Grande presenta una diversidad climática que según la clasificación del SENAMHI (2020). La mayor parte de la cuenca, aproximadamente un 79.92%, tiene un clima B (0,i) B', caracterizado por lluvias con estaciones secas en otoño e invierno y temperaturas templadas, donde se ubica Celendín. En la parte baja, el 18.90% del área posee un clima C (i) B', clasificado como semiseco con invierno seco y temperaturas templadas, abarcando localidades como Llanguat. Finalmente, una pequeña proporción del 1.19% presenta un clima D (o,i) B', semiárido, también con otoños e inviernos secos y temperaturas templadas. Esta variedad climática impacta aspectos como la agricultura y el turismo en la región.

A continuación, se presentan Las Normales Climatológicas Estándares, conocidas como CLINO en inglés, estos datos constituyen los promedios climatológicos calculados por el SENAMHI (2024) para intervalos continuos de 30 años.

Figura 4

Normales climatológicas estándares 1991 - 2020



Nota. Tomado de SENAMHI 2024

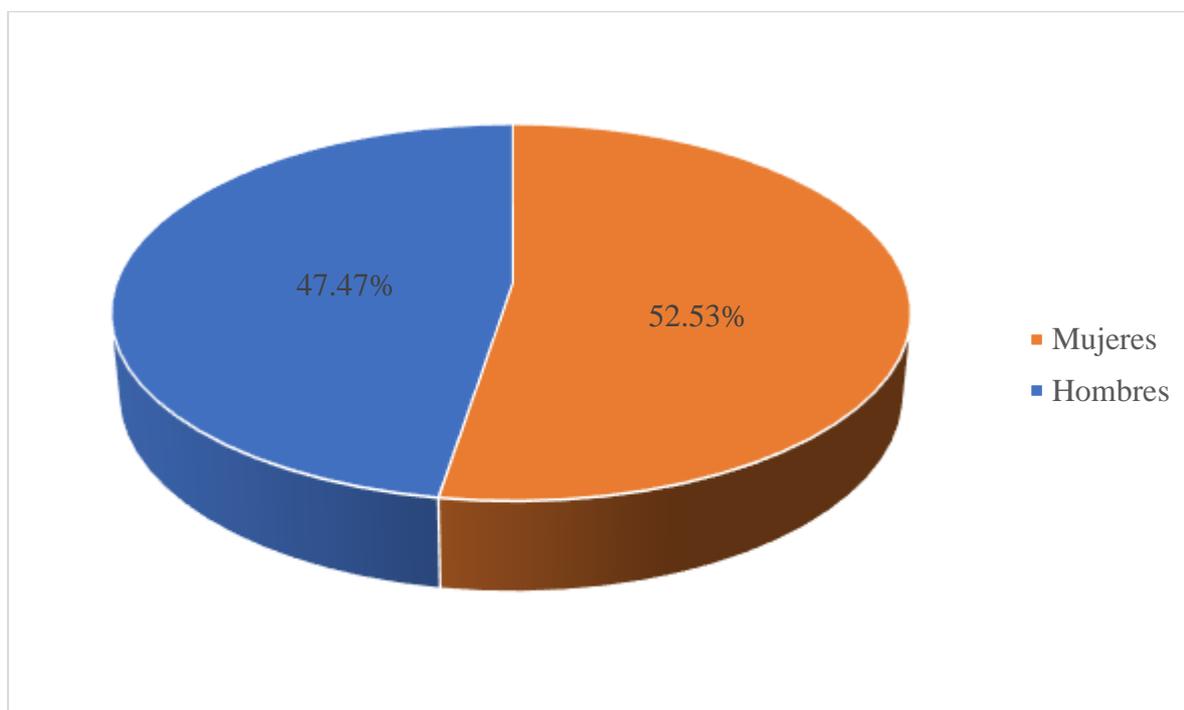
De acuerdo a las CLINO las precipitaciones determinan la estacionalidad climática de la cuenca, existiendo dos estaciones claramente marcadas. La primera la estación húmeda que se inicia en octubre y se extiende hasta marzo, mientras que la segunda se da desde abril a septiembre en donde se registra un descenso en las precipitaciones, marcando los meses de la estación de estiaje. El mes de marzo destaca por ser el que registra el mayor volumen de precipitaciones, alcanzando un promedio de 155.8 mm por mes, mientras que agosto registra el menor nivel de precipitaciones, con apenas 4.2 mm por mes. Respecto a las temperaturas, las temperaturas máximas media se alcanzan en septiembre, llegando a los 20.5°C, mientras que las mínimas se registran en julio y agosto, descendiendo hasta los 7.2°C.

3.1.2. Población del distrito de Celendín

A partir de los datos obtenidos en el Censo del año 2017, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), proyectó a la población del distrito de Celendín para el año 2022 en un estimando de 26 925 personas la mayoría asentada dentro de la cuenca del río Grande de Celendín de las cuales el 47.47% son hombres y un 52.53% son mujeres. Además, se observa que el 71.70% de esta población reside en áreas urbanas, concentrándose principalmente en la ciudad de Celendín, mientras que el 28.30% restante es de carácter rural, distribuyéndose mayoritariamente en los alrededores y comunidades aledañas. Estos datos ofrecen una visión detallada de la composición demográfica y la distribución geográfica de la población en el distrito.

Figura 5

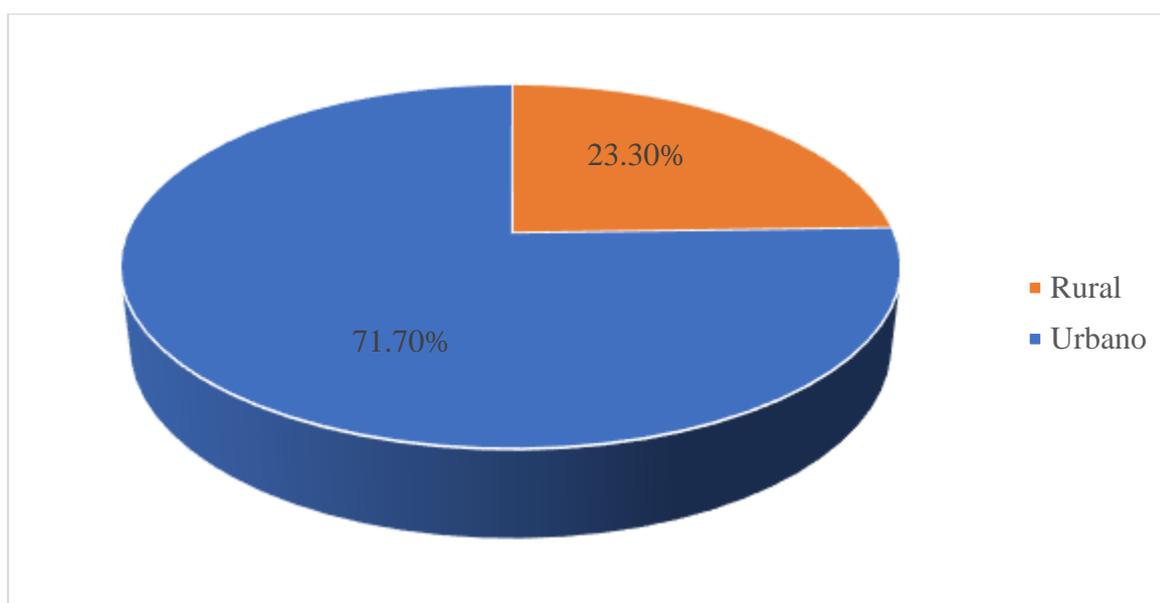
Porcentaje de hombres y mujeres en el distrito de Celendín



Nota. Tomado de INEI 2022

Figura 6

Porcentaje urbano y rural en el distrito de Celendín



Nota. Tomado de INEI 2022

3.1.3. Límites del distrito

El distrito de Celendín tiene los siguientes límites:

- Al norte con el distrito de Chumuch
- Al sur con los distritos de José Gálvez y Utco
- Al este con el departamento de Amazonas
- Al oeste con los distritos de Miguel Iglesias, La Libertad de Pallán y Huasmín.

3.2. Materiales

- Carta 14G
- Registro histórico de precipitaciones
- Mapa base de cobertura vegetal de la provincia de Celendín
- Mapa base de tipo de suelo de la provincia de Celendín
- Imagen satelital de la cuenca del río Grande de Celendín (Google Earth, 2023)
- Datos climáticos del servidor global CHIRPS (Climate Hazards Center, 2024)
- Software ArcGIS Desktop 10.7 (Esri, 2019)
- Tamices 200” y 40”
- Hidrómetro de Bouyoucos
- Termómetro
- GPS Garmin Etrex 22x Gps De Mano Con Pantalla
- Probetas
- Estufa

3.3. Metodología

Para estimar la pérdida de suelo por influencia de las precipitaciones en la cuenca del río Grande de Celendín primero se calculó la precipitación media anual de la cuenca del río Grande usando datos del servidor CHIRPS y de los datos de la estación del SENAMHI en Celendín, con registros desde 1994 hasta 2023. Para asegurar la consistencia de estos datos,

se aplicó el método de curva de doble masa, luego se delimitó la cuenca en ArcGIS 10.8 usando curvas de nivel de la carta 14G, y se elaboraron mapas de pendientes, cobertura vegetal, y precipitación en base al DEM. Para el análisis de pérdida de suelo por erosión, se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE), calculando los factores de erosividad (R) usando datos de precipitación y erodabilidad (K) mediante análisis de textura, contenido de arena muy fina y materia orgánica en el laboratorio.

3.3.1. Cálculo de precipitación media anual de la Cuenca del río Grande – Celendín

Dado que se requiere un historial mínimo de 30 años de datos de precipitaciones para el análisis de las precipitaciones y que en la zona de estudio solo existe una estación con registros de esa duración, se decidió utilizar los datos del Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), un sistema global de monitoreo de precipitaciones desarrollado por el Climate Hazards Group de la Universidad de California en Santa Bárbara, que combina datos de estaciones meteorológicas y observaciones satelitales infrarrojas para generar estimaciones de precipitación en áreas donde la infraestructura meteorológica es limitada. Con una resolución espacial de aproximadamente 5 km², CHIRPS proporciona datos diarios y acumulados de lluvias, permitiendo obtener promedios precisos para áreas geográficas específicas.

Para representar adecuadamente las precipitaciones en el área de estudio, se seleccionaron datos de cinco puntos satelitales de CHIRPS que cubren completamente la cuenca. Además, se incorporaron los registros de la estación del SENAMHI en la ciudad de Celendín. Las coordenadas de estos puntos son las siguientes:

Tabla 5

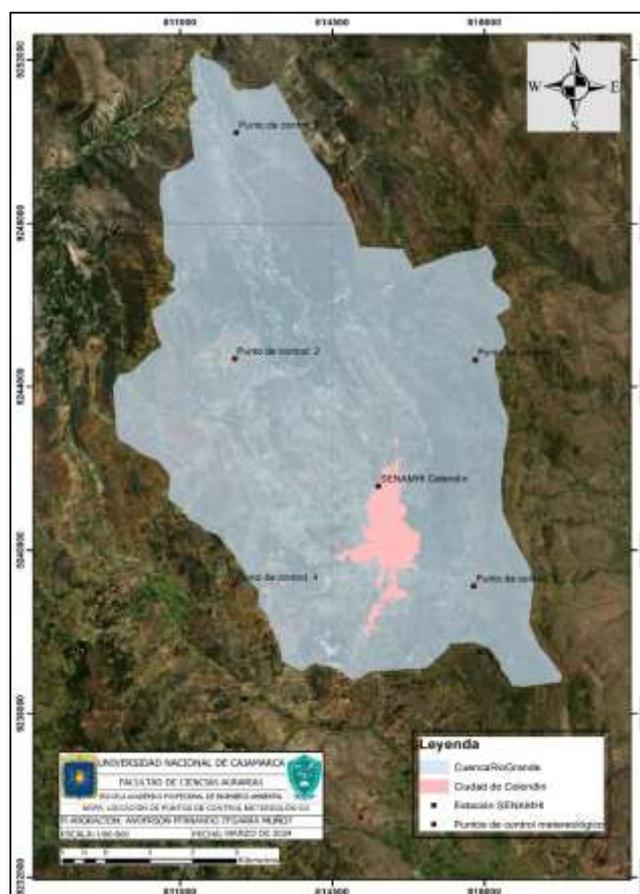
Ubicación de puntos de donde se recopila la información meteorológica

Estación	Norte	Este	Altitud	Periodo
PCM* 1	9250214.69	812295.25	1598 m.s.n.m	1994 – 2023
PCM* 2	9244681.32	812262.75	1805 m.s.n.m	1994 – 2023
PCM* 3	9244648.60	817794.03	2201 m.s.n.m	1994 – 2023
SENAMHI Celendín	9241562.00	815563.00	2607 m.s.n.m	1994 – 2023
PCM* 4	9239147.45	812230.22	2731 m.s.n.m	1994 – 2023
PCM* 5	9239114.89	817760.60	2875 m.s.n.m	1994 – 2023

*PCM (Punto de control meteorológico)

Figura 7

Ubicación de puntos de donde se recopila la información meteorológica



3.3.1.1. Análisis de consistencia de datos meteorológicos

Para verificar la consistencia de los datos obtenidos, se realizó un análisis utilizando el método de la curva de doble masa. Además, en este análisis se incluyeron los datos de la estación meteorológica del SENAMHI ubicada en la ciudad de Celendín. El propósito fue confirmar que los datos recopilados por satélite concuerdan con los registros obtenidos por la estación terrestre del SENAMHI.

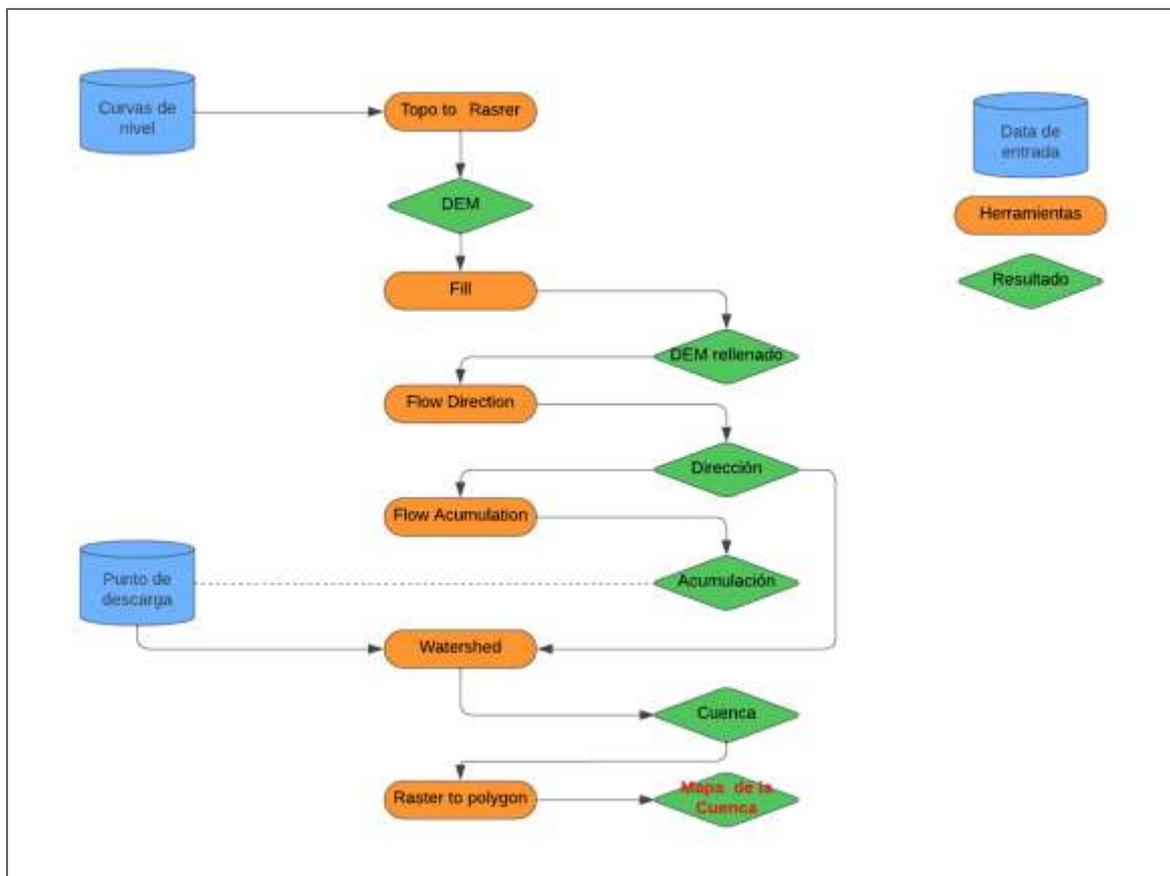
3.3.2. Estimación de la cantidad de suelo perdido

3.3.2.1. Delimitación de la cuenca del río Grande - Celendín

Para delimitar la cuenca del Río Grande, se emplearon las curvas de nivel de la carta 14G. El procesamiento de estas curvas se llevó a cabo mediante el software ArcGIS 10.8. A continuación, se presenta el diagrama de flujo que detalla el procedimiento utilizado

Figura 8

Flujograma de la delimitación de la cuenca del río Grande - Celendín



3.3.2.2. Elaboración del mapa de pendientes

El mapa de pendientes se creó utilizando el Modelo Digital de Elevación (DEM) generado durante la delimitación de la cuenca, como se mostró en la sección anterior. Este mapa se reclasificó conforme al Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (2022).

Tabla 5

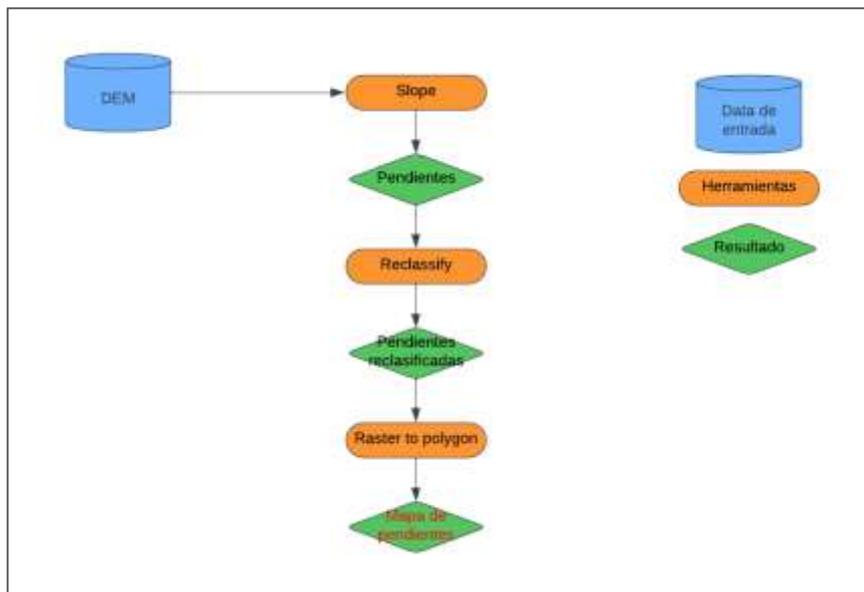
Clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor

Rango de pendientes para laderas cortas	Rango de pendientes para ladera largas
0 – 4%	0 – 2 %
4 – 8 %	2 – 4 %
8 – 15 %	4 – 8 %
15 – 25 %	8 – 15 %
25 – 50 %	15 – 25 %
50 – 75 %	25 – 50 %
> 75 %	50 – 75 %
	> 75 %

Nota: Tomado de MIDAGRI 2022

Figura 9

Flujograma de obtención del mapa de pendientes

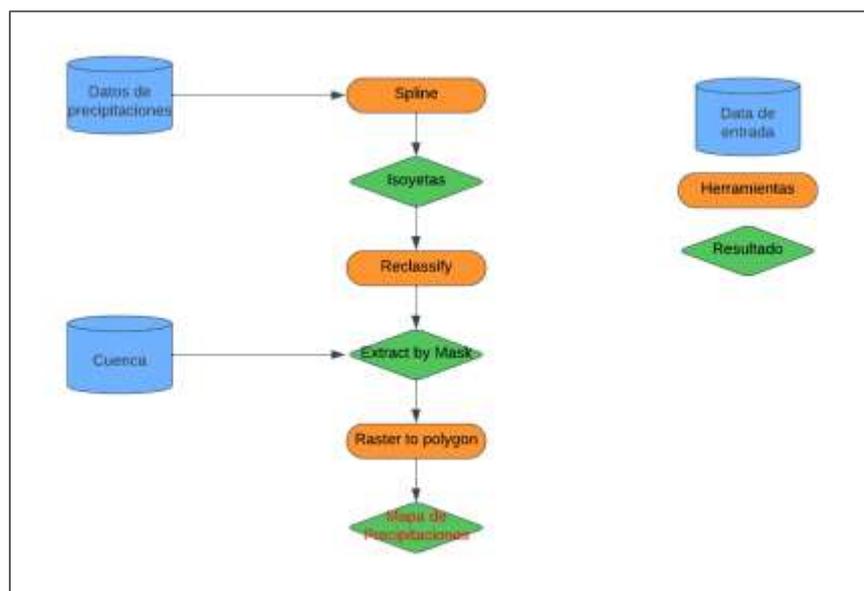


3.3.2.3. Elaboración del mapa de precipitación

El mapa de precipitaciones se elaboró a partir de los datos recopilados del servidor CHIRPS y de la estación meteorológica del SENAMHI de Celendín, luego esa data recopilada fue procesada en el software ArcGIS, siguiendo el flujograma mostrado a continuación.

Figura 10

Flujograma de la obtención del mapa de precipitaciones

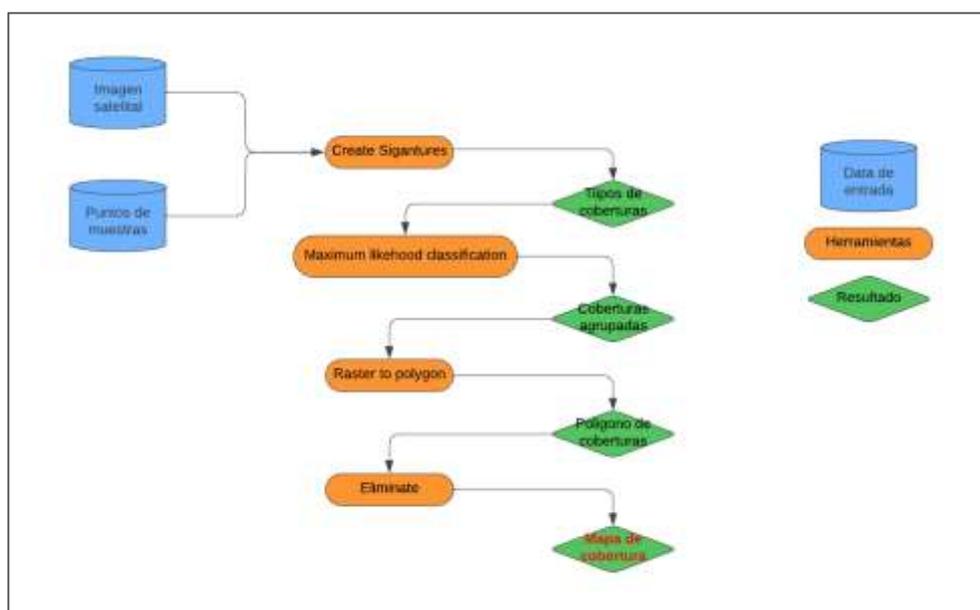


3.3.2.4. Mapa de Cobertura Vegetal

El mapa de cobertura vegetal se elaboró a través de una clasificación supervisada y no supervisada, finalmente el mapa se elaboró en base al Sistema de Clasificación propuesto por la Unión Geográfica Internacional (UGI) el cual fue adaptado a la zona de estudio.

Figura 11

Flujograma de la obtención del mapa de cobertura vegetal



3.3.2.5. Mapa de Suelo

El mapa de suelo se obtuvo a partir del mapa de base de suelos del ZEE del Gobierno Regional de Cajamarca. El cual tiene un sistema FAO de clasificación.

Tabla 6

Unidades de suelos sistema FAO

Nº	Unidad de suelo
1	Casco urbano
2	Fluvisol-Phaeozem
3	Leptosol
4	Leptosol – Regosol
5	Phaeozem
6	Phaeozem-Leptosol

3.3.3. Identificación de las áreas más vulnerables a la pérdida del suelo

Con la finalidad de identificar las áreas más vulnerables a la pérdida de suelo por erosión hídrica, se hizo una evaluación individual de los diversos factores que constituyen la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE). Este procedimiento implicó el procesamiento de datos ráster obtenidos con anterioridad, utilizando la herramienta Raster Calculator dentro del software ArcGIS 10.8

3.3.3.1. Factor de Erosividad (R)

El factor de erosividad (R) al ser el potencial de la lluvia para desprender las partículas de suelo, para ser calculado se necesitó de la ayuda de los datos de precipitaciones brindados por SENAMHI y del servidor CHIRPS. Antes de calcular el factor de erosividad, se elaboró el análisis consistencia de la data meteorológica para poder elaborar el mapa de precipitaciones ya antes mencionado, Posteriormente, se generó el ráster que describe el factor de erosividad R, utilizando la ecuación de Morgan (1974).

$$R = I_{30} \frac{9.28P - 8.393}{1000}$$

Donde

R = Erosividad

I_{30} = 75 mm/h (propuesto por Wischmier)

P = Precipitación media anual

Se adoptó el valor de I_{30} propuesto por Wischmeier (75 mm/h) debido a la falta de datos específicos para determinarlo. Este valor se considera un estándar para zonas con precipitaciones elevadas, como es el caso de la cuenca del río Grande.

3.3.3.2. Factor de Erodabilidad (K)

Para determinar el factor de erodabilidad (K), se recolectó una muestra de suelo representativa de cada unidad de suelo en el área de estudio. Estas muestras se analizaron en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Cajamarca, evaluando

textura, porcentaje de arena muy fina y contenido de materia orgánica. La estructura de cada unidad de suelo se determinó utilizando los códigos de estructura de la USLE (Tabla N° 1) y la permeabilidad según los valores de la (Tabla N° 2). Se decidió utilizar una sola muestra por unidad de suelo, ya que la textura, estructura y contenido de materia orgánica presentan valores similares en cada unidad, y el sitio de extracción fue cuidadosamente seleccionado para reflejar condiciones representativas de cada unidad de suelo.

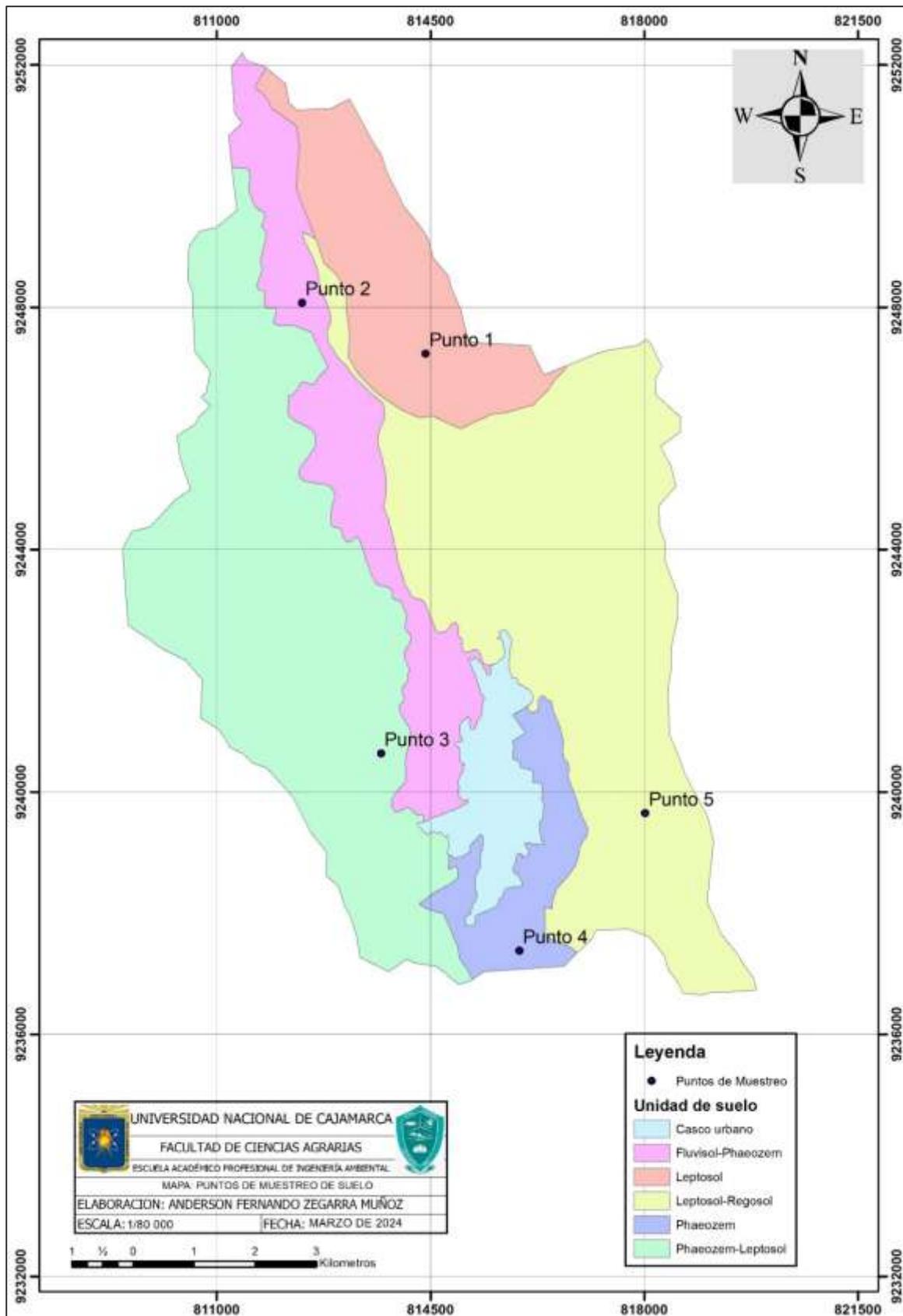
Tabla 7

Puntos de muestreo por unidad de suelo de la cuenca del río Grande - Celendín

Unidad de suelo	Código	Norte	Este	Altitud
Leptosol	L	9247007.16	816078.47	2933 m.s.n.m
Fluvisol-Phaeozem	J-H	9248074.73	812395.84	1781 m.s.n.m
Phaeozem-Leptosol	H-L	9240633.21	813691.75	2881 m.s.n.m
Phaeozem	H	9237147.76	816569.14	2813 m.s.n.m
Leptosol-Regosol	L-R	9238866.22	818858.21	3110 m.s.n.m

Figura 12

Puntos de muestreo por unidad de suelo



i) Determinación de Textura

La textura del suelo se determinó mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962), según las adaptaciones metodológicas actuales descritas por la Soil Science Society of America (SSSA, 2020), que mantiene este procedimiento como un método estándar para el análisis granulométrico de suelos.

Preparación de la muestra:

- Secar la muestra de suelo al aire
- Tamizar a través de malla de 2 mm
- Pesar 50 g de suelo tamizado

Procedimiento:

Colocar la muestra en un vaso de precipitado

- Agregar 10 mL de hexametáfosfato de sodio (agente dispersante)
- Añadir agua destilada hasta 2/3 del vaso
- Agitar durante 5 minutos
- Transferir la suspensión a una probeta de 1 L
- Completar con agua destilada hasta 1000 mL
- Agitar manualmente durante 1 minuto

Tomar lecturas con el hidrómetro:

- Primera lectura: 40 segundos (% arena)
- Segunda lectura: 2 horas (% arcilla)
- Registrar temperatura en cada lectura
- Realizar corrección por temperatura (+0.2 por cada °C > 19.5°C)

Cálculos:

- % Arena = $100 - (\text{Primera lectura corregida} \times 2)$
- % Arcilla = $\text{Segunda lectura corregida} \times 2 \%$

- Limo = 100 - (% Arena + % Arcilla)

ii) **Determinación de materia orgánica**

El contenido de materia orgánica se cuantificó utilizando el método de oxidación húmeda Walkley-Black (Walkley & Black, 1934), siguiendo las modificaciones y estandarizaciones actuales presentadas por Nelson & Sommers (2018), quienes confirman la vigencia y precisión de este método para la determinación rutinaria de carbono orgánico en suelos.

Preparación de la muestra:

- Secar la muestra al aire
- Tamizar a través de malla de 0.5 mm
- Pesar 1 g de suelo tamizado

Procedimiento:

- Transferir la muestra a un matraz Erlenmeyer de 500 mL
- Agregar 10 mL de dicromato de potasio 1N
- Añadir 20 mL de ácido sulfúrico concentrado
- Agitar suavemente durante 1 minuto
- Dejar reposar por 30 minutos
- Añadir 200 mL de agua destilada
- Agregar 10 mL de ácido fosfórico al 85%
- Añadir 5-7 gotas de difenilamina (indicador)
- Titular con sulfato ferroso 0.5N hasta cambio de color de azul a verde

Cálculos:

- % C orgánico = $(\text{meq } K_2 Cr_2 O_7 - \text{meq } FeSO_4) \times 0.003 \times 100 \times 1.3 / \text{peso de la muestra}$
- % Materia orgánica = % C orgánico $\times 1.724$

Tabla 8

Textura y materia orgánica de cada unidad de suelo de la cuenca del río Grande - Celendín

Unidad de suelo	Código	%Arena	%Limo	%Arcilla	%Arena fina	%M.O	Textura
Fluvisol-Phaeozem	J-H	79.75	5.01	15.24	21.43	3.29	Franco arenoso
Leptosol	L	79.92	4.91	15.17	10.93	5.36	Franco arenoso
Leptosol-Regosol	L-R	79.79	5.13	15.08	24.62	8.31	Franco arenoso
Phaeozem	H	79.83	4.94	15.23	20.70	7.51	Franco arenoso
Phaeozem -Leptosol	H-L	79.62	5.22	15.16	20.71	5.15	Franco arenoso

iii) Determinación de porcentaje de arena muy fina

Para determinar el contenido de arena muy fina en cada muestra de suelo, se siguió el método descrito por Cabrejos (2016).

Preparación de la muestra:

- Secar la muestra al aire
- Desagregar suavemente los terrones
- Pesar entre 300 g a 500 g de muestra

Procedimiento:

- Colocar los tamices en orden descendente:
- Tamiz #40 (0.420 mm) arriba
- Tamiz #200 (0.074 mm) abajo
- Verter la muestra en el tamiz superior
- Agitar el conjunto de tamices durante 10 minutos
- Pesar el material retenido en cada tamiz

- Registrar los pesos

Cálculos:

- % Arena muy fina = (Peso retenido en tamiz #200 / Peso total de la muestra) × 100

Tabla 9

Porcentaje de arena muy fina de cada unidad de suelo de la cuenca del río Grande de Celendín

Unidad de suelo	Código	Peso de la muestra g	Peso retenido en malla 40"	Peso retenido en malla 200"	% arena muy fina
Phaeozem-Leptosol	H-L	300	233.12	62.14	20.71 %
Leptosol	L	400	350.15	43.72	10.93 %
Leptosol-Regosol	L-R	260	188.58	64.02	24.62 %
Phaeozem	H	300	230.16	62.08	20.69 %
Fluvisol-Phaeozem	J-H	300	168.05	128.57	21.43 %

iv) Determinación la estructura del suelo

La estructura del suelo se determinó directamente en las unidades de suelo, y se clasificaron de acuerdo a los códigos USLE de la tabla N° 1.

Tabla 10*Estructura de cada unidad de suelo de la cuenca del río Grande - Celendín*

Unidad de suelo	Código	Imagen	Código de estructura
Phaeozem- Leptosol	H-L		Granular fina
Leptosol	L		Granular media a gruesa
Leptosol-Regosol	L-R		Granular media a gruesa
Phaeozem	H		Granular media a gruesa
Fluvisol- Phaeozem	J-H		Granular fina

v) Determinación de la permeabilidad

La permeabilidad del suelo se determinó utilizando los datos de textura y estructura del suelo, los cuales se encuentran en las tablas 10 y 11, respectivamente. Con esta información, se clasificó el tipo de permeabilidad de la unidad según los criterios de Mannaerts (1999) (tabla 2).

Tabla 11

Código de estructura por unidad de suelo

Unidad de suelo	Textura	Código de permeabilidad	Estructura	Código de estructura
Phaeozem-Leptosol	Franco	2 moderada a	Granular fina	2
	Arenoso	rápida		
Leptosol	Franco	2 moderada a	Granular media a gruesa	3
	Arenoso	rápida		
Leptosol-Regosol	Franco	2 moderada a	Granular media a gruesa	3
	Arenoso	rápida		
Phaeozem	Franco	2 moderada a	Granular media a gruesa	3
	Arenoso	rápida		
Fluvisol-Phaeozem	Franco	2 moderada a	Granular fina	2
	Arenoso	rápida		

Finalmente, con todos los datos obtenidos en el presente apartado se procede a aplicar la siguiente fórmula para obtener el valor de erodabilidad

$$K = \left(\frac{10}{7.594} \right) * \left[\frac{[2.1 * 10^{-4} * (12 - OM) * M^{1.14} + 3.25 * (S - 2) + 2.5 * (P - 3)]}{100} \right]$$

Donde:

K= Factor de erodabilidad del suelo (t/ha.MJ*ha/mm*hr)

OM= Materia orgánica (%)

S= Código de estructura USLE

P= Código de permeabilidad USLE

$$M = \text{Producto de (\% limo + \% arena muy fina) * (100 - arcilla)}$$

3.3.3.3. Factor Topográfico (LS)

El factor topográfico LS es el producto de multiplicar los factores de longitud de talud (L) por la inclinación de la pendiente (S), por lo que para calcular L y S se procedió de la siguiente manera:

A partir del mapa de pendientes generado anteriormente se calcula con la herramienta Raster Calculator los datos necesarios, haciendo uso de las siguientes expresiones

1) Cálculo de L

$$F = (\text{Sin}(\beta * 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{Power}(\text{Sin}(\beta * 0.01745), 0.8) + 0.56)$$

$$m = "F" / (1 + "F")$$

$$L = (\text{Power}("FlowAcc" + 42.07 * 42.07, "m" + 1) - (\text{Power}("FlowAcc", "m" + 1))) / (\text{power}(42.07, "m" + 2) * \text{Power}(22.13, "m"))$$

2) Cálculo de S

$$S = \text{Con}(\text{Tan}("B" * 0.01745) < 0.09, (10.8 * \text{Sin}("B" * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \text{Sin}("B" * 0.01745) - 0.5))$$

3) Cálculo de LS

$$LS = L \times S$$

3.3.3.4. Factor de Cobertura (C)

El factor de cobertura (C) fue calculado utilizando la tabla de valores de cobertura vegetal (Tabla N°3). Para ello, se asignaron valores a cada clase de cobertura identificada de acuerdo con las unidades de cobertura vegetal presentes en el área de estudio

Tabla 12*Tipos de cobertura vegetal adaptados*

Cobertura de la zona	Cobertura según UGI	Valores del Factor C
Suelos urbanos	Urbano	0
Bosques y matorrales	Zonas Boscosas	0.008
Herbáceas y matorrales	Herbáceas	0.019
Cultivos anuales y herbáceos	Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Suelos desnudos	Suelos desnudos	1

3.3.3.5. Factor de Prácticas de Conservación de Suelo (P)

El factor P representa los valores asignados a distintos métodos de conservación del suelo y prácticas agrícolas específicas que contribuyen a reducir la pérdida de suelo.

La identificación de dichas prácticas se hizo mediante visitas a campo y del análisis visual de imágenes satelitales en donde no se encontraron métodos de conservación relevantes en la cuenca por lo cual se consideró valor 1 para toda la zona de estudio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Precipitación media anual para el periodo 1994 – 2023

Luego de transformar las precipitaciones diarias a precipitaciones promedio anual, se procedió a realizar el análisis de consistencia de los datos a través de método de curva de doble masa dando para asegurar la precisión, coherencia y calidad de los datos obtenidos.

El análisis consolidado de la figura 13 revela una relación muy fuerte entre la precipitación acumulada anual y el promedio anual acumulado de precipitación en los puntos de control meteorológico ($R^2 = 1$) y en la estación SENAMHI ($R^2 = 0.9996$). Esto evidencia una consistencia notable entre estos datos y el resto de los puntos de control, por lo que no es necesario realizar correcciones en las series de datos al contrario de los estudios de erosión realizados por Cabrejos (2016) y Nakaya (2018) destacando así la fiabilidad de los datos de CHIRPS en comparación con los registros de estaciones terrestres

De acuerdo a los gráficos 13, 14 y 15 se observa:

- Punto de control meteorológico 1 ubicado a 1598 m.s.n.m se encuentra en la parte baja de la cuenca y presenta el volumen de precipitaciones más bajo de toda la cuenca (879.46 mm/año)
- Punto de control meteorológico 2 ubicado a 1805 m.s.n.m. muestra precipitaciones por debajo del promedio debido también a su baja altitud (928.37 mm/año).
- Punto de control meteorológico 3: a una altitud de 2201 m.s.n.m., tiene un volumen de precipitación menor que el promedio, similar al punto 1 y 2 (928.45 mm/año).

- Estación SENAMHI Celendín: que a pesar de no tener una correlación perfecta cuenta con una correlación muy fuerte ($R^2 = 0.9996$), presenta un volumen de precipitación cercano al promedio de la cuenca pues se ubica en la parte media (987.07 m.s.n.m.).
- Punto de control meteorológico 4: con 2731 m.s.n.m se ubica en la parte alta de la cuenca por lo que muestra un volumen de precipitación superior al promedio (1019.43 mm/año).
- Punto de control meteorológico 5: a 2875 m.s.n.m., presenta un volumen de precipitación similar al punto 4 y al ser este el punto de control con mayor elevación presenta el mayor volumen de precipitación (10.26.06 mm/año)

La consistencia observada sugiere que los datos están libres de errores comunes de medición o cambios de ubicación en las estaciones, destacando la fiabilidad de las estimaciones de precipitación en toda la cuenca.

Figura 13

Análisis curva de doble masa

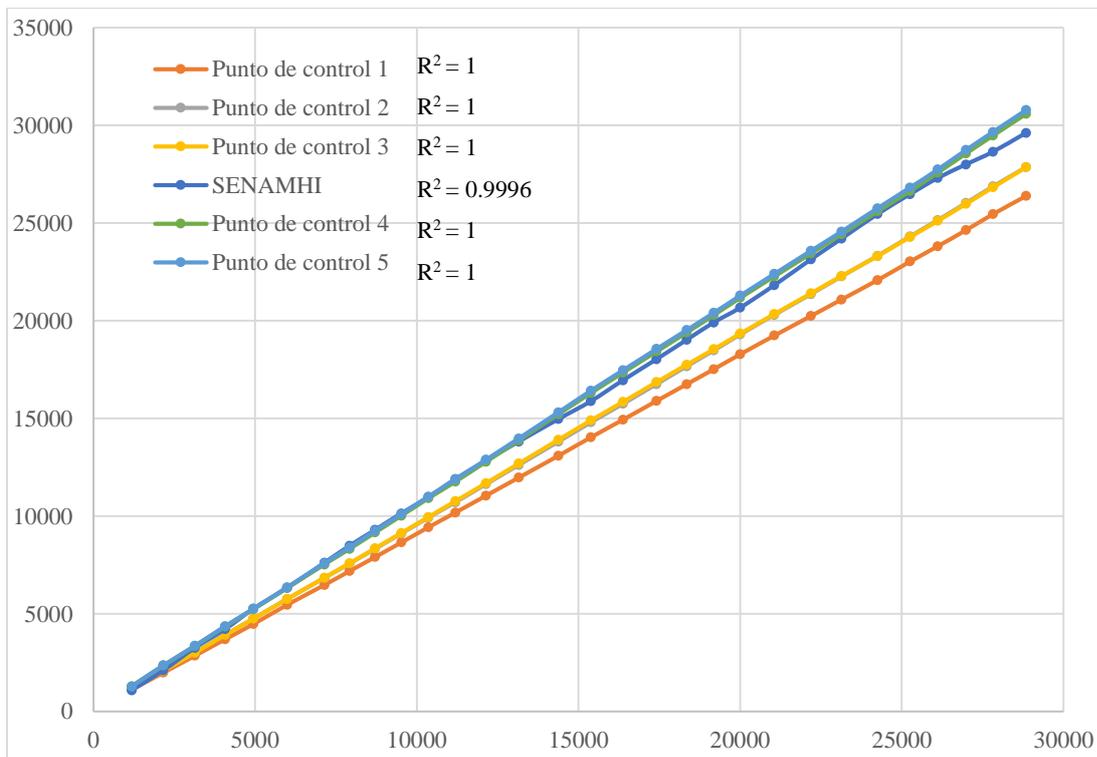


Figura 14

Precipitación promedio anual por punto de control

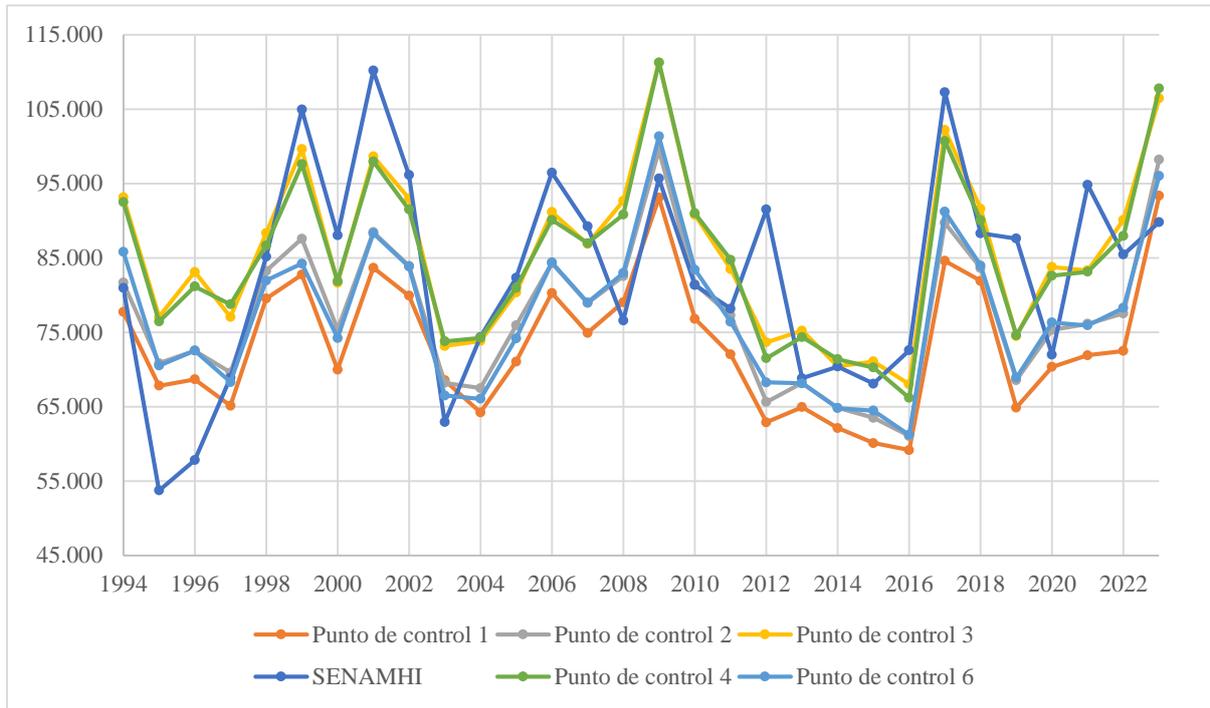
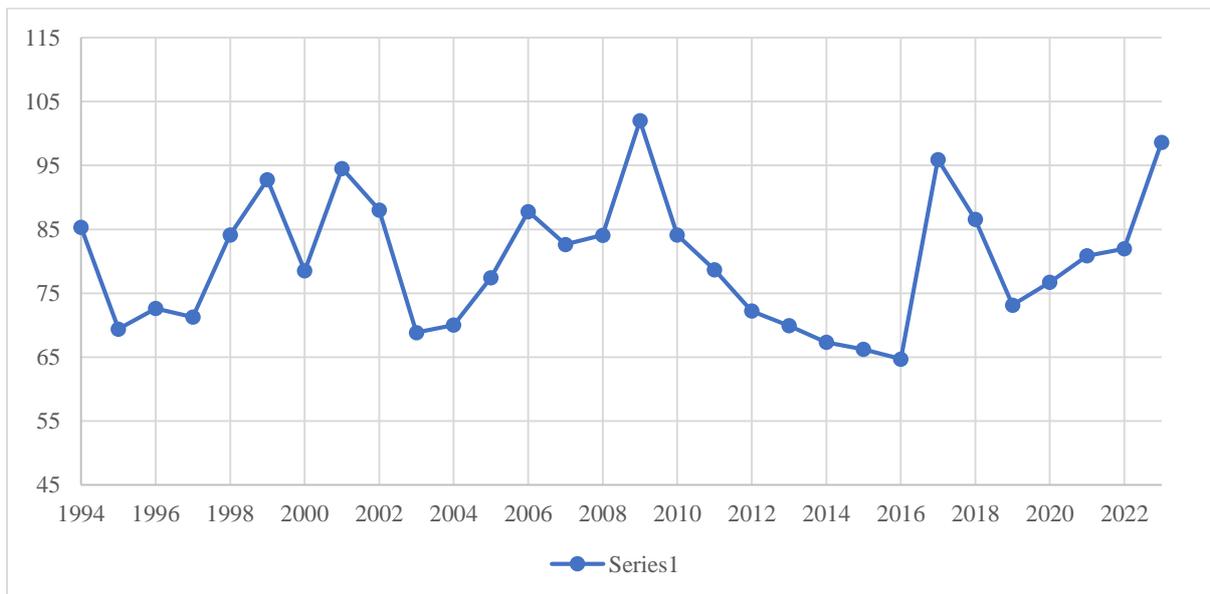


Figura 15

Precipitación promedio anual



4.2. Estimación de la cantidad de suelo perdido en la cuenca del río Grande - Celendín

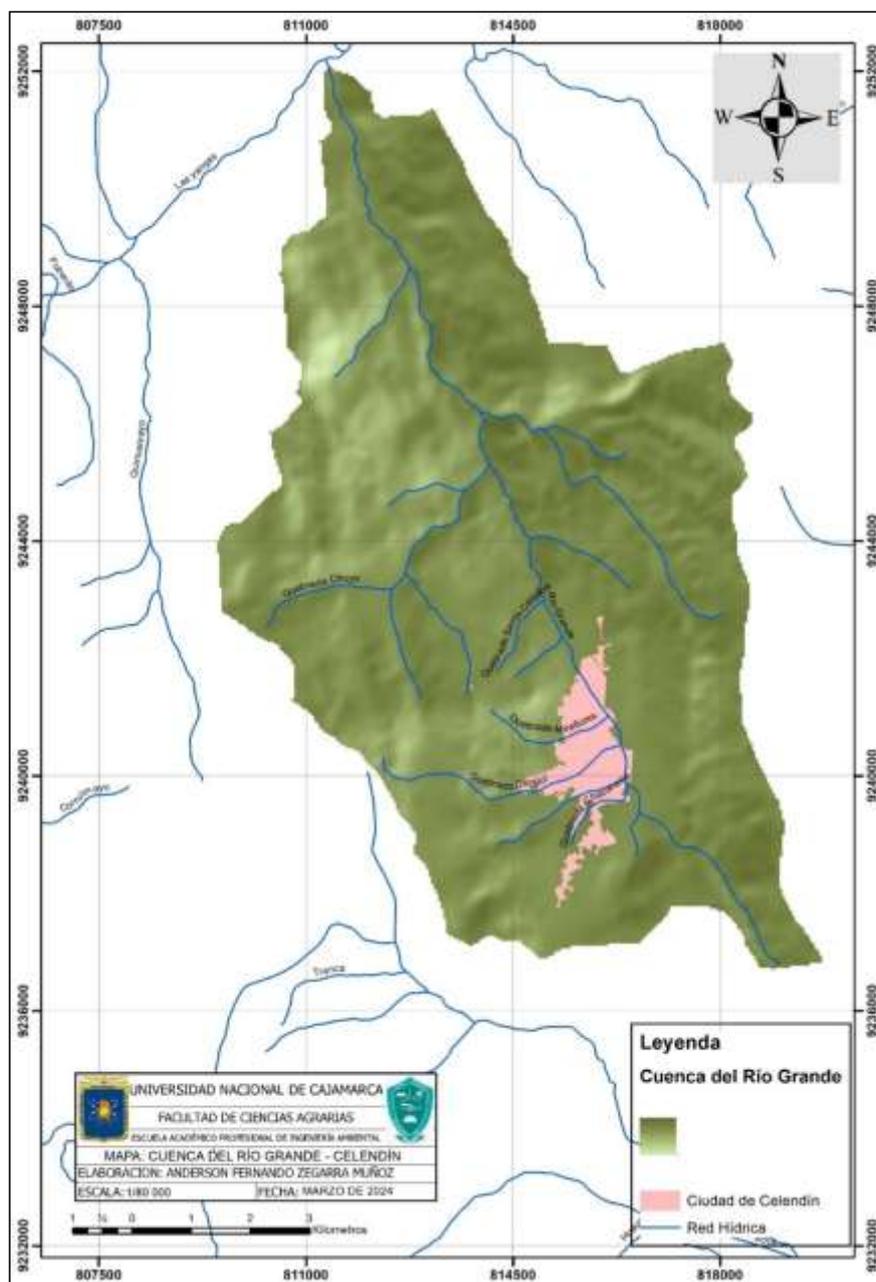
4.2.1. Generación de mapas base para la estimación de erosión

4.2.1.1. Mapa de la cuenca del río Grande - Celendín

De acuerdo al mapa base, la cuenca del río Grande - Celendín (figura 16) posee una superficie total de 9019.64 hectáreas, y un perímetro de 47.84 km.

Figura 16

Mapa de la delimitación de la cuenca del río grande - Celendín



4.2.1.2. Mapa de pendientes de la Cuenca del río Grande - Celendín

La cuenca del río Grande presenta una predominancia de pendientes empinadas en su zona baja y este, áreas en las que se concentran elevaciones orográficas significativas. Este patrón de pendientes es un factor crítico que contribuye a una mayor susceptibilidad a la erosión debido a la aceleración de los flujos superficiales en terrenos inclinados. Las pendientes de entre 25% y 50%, que cubren el 35.83% de la cuenca, son especialmente vulnerables, ya que representan áreas donde el agua de lluvia adquiere mayor velocidad al descender, intensificando el arrastre de partículas de suelo.

Este comportamiento es característico de cuencas montañosas donde el relieve abrupto y las diferencias altitudinales son factores predominantes en el proceso erosivo. Por ejemplo, en la cuenca del río Atué (Cabrejos, 2016), se documentan pendientes menores en proporción (solo el 4.1% del área presenta pendientes mayores al 25%), lo cual indica una menor predisposición a la erosión en comparación con la cuenca del río Grande. La diferencia en la frecuencia y extensión de pendientes entre ambas cuencas sugiere que el relieve montañoso y la disposición de las pendientes en el río Grande incrementan el riesgo de erosión de manera considerable.

Además, la curva hipsométrica de la cuenca del río Grande (figura 17), confirma que aproximadamente el 70% del territorio se encuentra en altitudes superiores a los 2600 metros, destacando su perfil convexo. Este tipo de cuenca se clasifica en fase joven, con altos índices de erosión potencial. El predominio de elevaciones en las zonas empinadas intensifica la acción erosiva, especialmente en áreas con suelos poco cohesivos y expuestos. En cuencas montañosas como la de Atuen, con un relieve menos acentuado, el proceso erosivo tiene menor impacto, lo que destaca la relevancia del relieve como un factor diferenciador clave en la cuenca del río Grande.

Tabla 13

Rango de pendientes clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor

Rango de pendientes	Área (Ha)	Porcentaje del territorio
0.0 – 4.0%	483.53	5.36 %
4.0 – 8.0 %	741.07	8.22 %
8.0 – 15 %	1195.62	13.26 %
15 – 25 %	1741.49	19.31 %
25 – 50 %	3232.12	35.83 %
51 – 75 %	1253.57	13.90 %
> 75 %	372.25	4.13 %
Total	9019.64	100.00 %

Figura 17

Curva hipsométrica de las pendientes de la cuenca del río Grande - Celendín

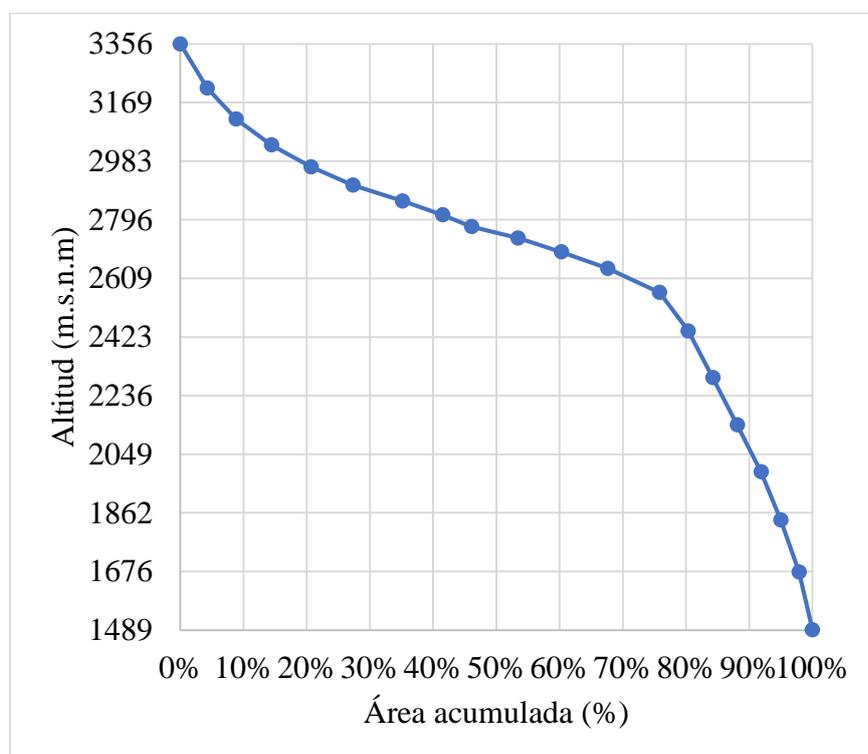
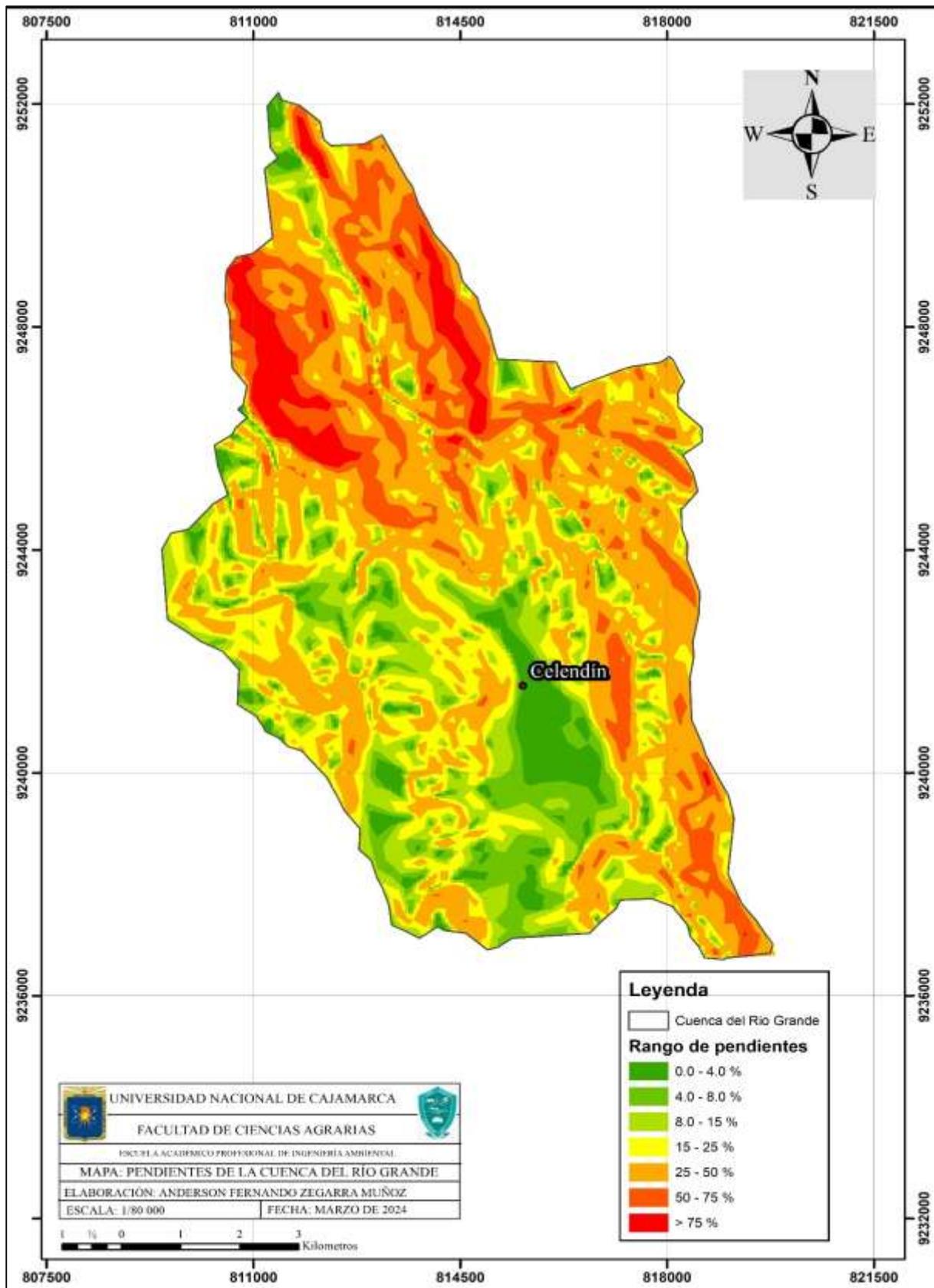


Figura 18

Mapa de pendientes de la cuenca del río Grande - Celendín



4.2.1.3. Mapa de Precipitación de la Cuenca del río Grande - Celendín

En la cuenca del río Grande, la precipitación anual promedio es de 953.74 mm, con variaciones significativas en función de la altitud. Los valores de precipitación más elevados (hasta 1072 mm/año) se encuentran en las zonas altas, mientras que los valores mínimos (856 mm/año) predominan en áreas más bajas como el valle de Llanguat. Esta distribución altitudinal crea un gradiente de precipitaciones en el que las áreas altas, al recibir mayor cantidad de lluvia, se ven expuestas a mayores índices de erosividad (factor R), intensificando la erosión hídrica en esas zonas.

El patrón observado es característico de cuencas montañosas, donde la orografía influye en la concentración de lluvias, al incrementar la captación de humedad en las zonas de mayor elevación. En estudios como el de la cuenca del río Chumbao en Apurímac (Chipana, 2022), también se observa una mayor acumulación de precipitaciones en las zonas altas desde los 995 mm en la cuenca alta y 457 mm en la cuenca baja, lo cual confirma que la altitud es un factor clave en la distribución de las lluvias en cuencas de este tipo.

Esta gradiente de precipitación tiene un impacto directo en los procesos erosivos, ya que las zonas altas de la cuenca, con precipitaciones más intensas, enfrentan una erosividad elevada, lo que incrementa el riesgo de arrastre de partículas del suelo. La relación entre precipitación y altitud se convierte, por tanto, en un elemento esencial para entender los patrones de erosión en la cuenca del río Grande.

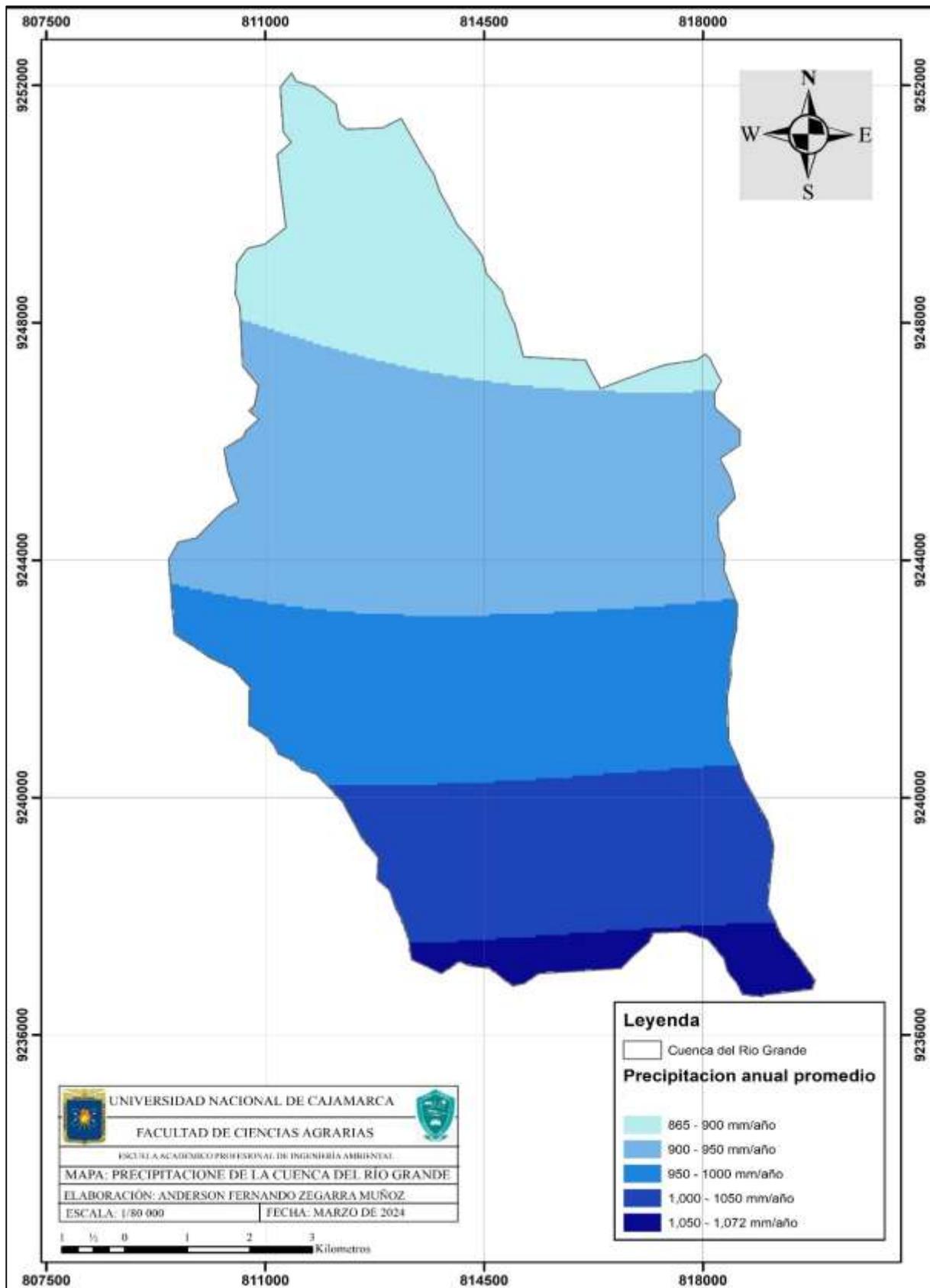
Tabla 14

Rango de precipitaciones de la cuenca del río Grande - Celendín

Precipitación promedio	Área (Ha)	Porcentaje
865 – 900 mm/año	1669.26	18.51 %
900 – 950 mm/año	3094.34	34.31 %
950 – 1000 mm/año	2146.70	23.80 %
1000 – 1050 mm/año	1755.24	19.46 %
1050 - 1072 mm/año	354.10	3.93 %
Total	9019.64	100.00%

Figura 19

Mapa de isoyetas de precipitaciones de la cuenca del río Grande - Celendín



4.2.1.4. Mapa de Cobertura Vegetal de la Cuenca del río Grande -

Celendín

La cuenca del río Grande presenta una variada cobertura vegetal, en la cual destacan los bosques y matorrales, que abarcan el 28.77% del área total y se localizan principalmente en la zona baja de la cuenca. Esta cobertura vegetal densa contribuye a una mejor retención del suelo y protección contra la erosión, dado que actúa como una barrera frente al impacto directo de la lluvia.

Los cultivos anuales y herbáceos, que ocupan el 27.39% del territorio, se distribuyen en áreas fragmentadas, especialmente alrededor de la ciudad de Celendín. Este tipo de cobertura es más vulnerable a la erosión, ya que en ciertos periodos del ciclo de cultivo el suelo queda expuesto, reduciendo así la protección contra la pérdida de suelo por escorrentía. En la cuenca del río Jcusbamba (Raymundo, 2018), se observa un patrón similar, donde los suelos agrícolas fragmentan la cobertura natural y aumentan la exposición del suelo a la erosión.

Además, las áreas de herbáceas y matorrales, que cubren el 23.60% de la cuenca, brindan una protección intermedia, ya que su cobertura arbustiva reduce la velocidad de la escorrentía, disminuyendo el potencial erosivo en esas zonas. Los suelos desnudos, que representan el 17.44% del área, son las áreas más expuestas y vulnerables a la erosión, ya que carecen de cualquier tipo de vegetación que ayude a amortiguar el impacto de la lluvia o a estabilizar el suelo. En estudios como el de Jaya (2023), se confirma que áreas de suelo desnudo presentan los mayores valores de pérdida de suelo, especialmente en terrenos con pendientes significativas.

Este análisis de la cobertura vegetal en la cuenca del río Grande subraya la importancia de cada tipo de vegetación en el control de la erosión, dado que las áreas con

vegetación más densa tienen un rol crucial en la estabilización del suelo frente a los procesos erosivos.

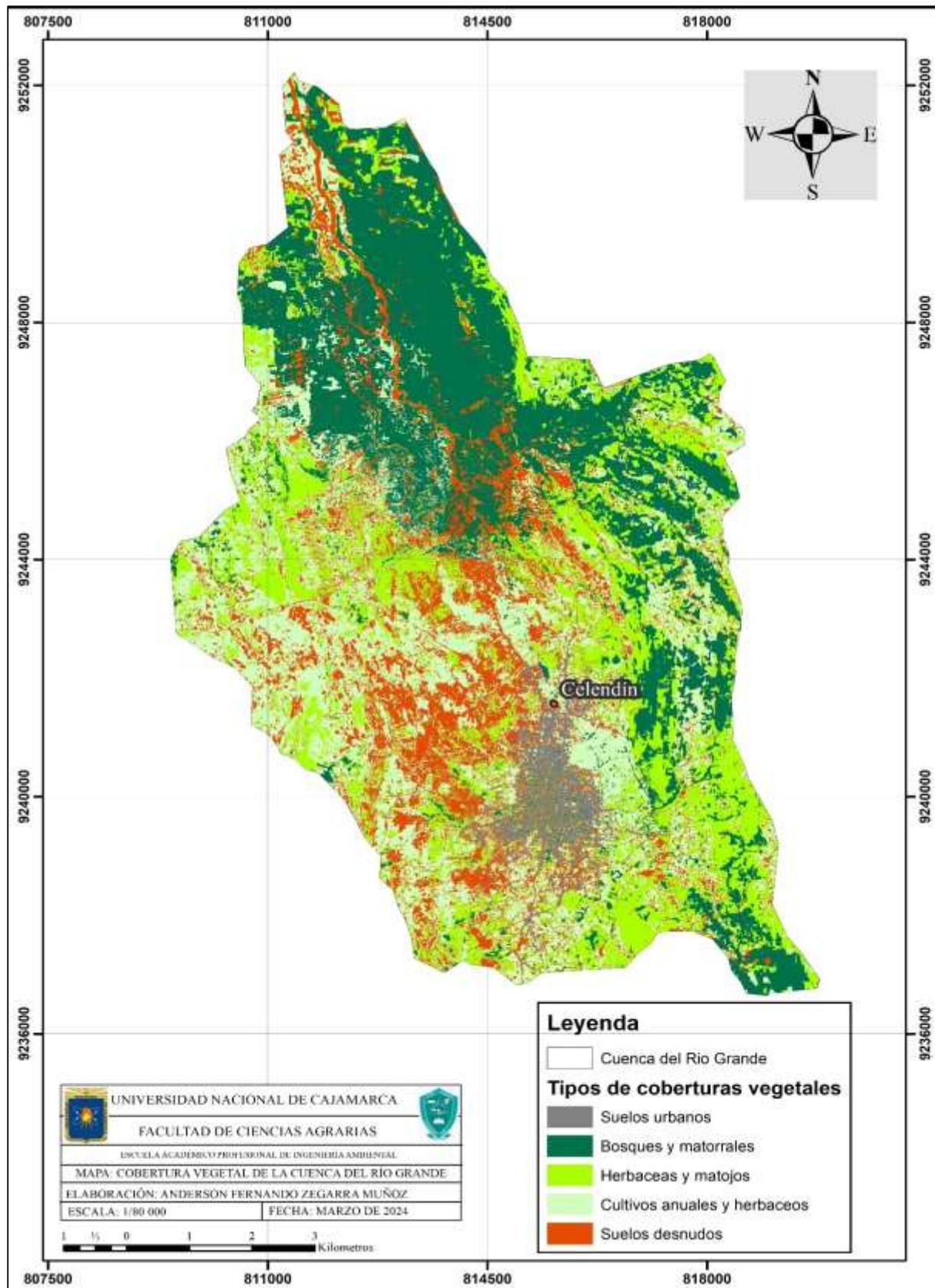
Tabla 15

Tipos de coberturas vegetales de la cuenca del río Grande - Celendín

Tipo de cobertura	Área (Ha)	Porcentaje
Suelos urbanos	252.74	2.80 %
Bosques y matorrales	2595.15	28.77 %
Herbáceas y matorrales	2128.91	23.60 %
Cultivos anuales y herbáceos	2470.09	27.39 %
Suelos desnudos	1572.75	17.44 %
Total	9019.64	100.00 %

Figura 20

Mapa de cobertura vegetal de la cuenca del río Grande - Celendín



4.2.1.5. Mapa de Suelos de la Cuenca del río Grande - Celendín

En la cuenca del río Grande, los tipos de suelo predominantes de acuerdo al sistema FAO son el Leptosol-Regosol y el Phaeozem-Leptosol, que abarcan el 34.62% y 32.83% del área total, respectivamente. Estos suelos son característicos de áreas montañosas, donde las condiciones de pendiente y las limitaciones en retención de humedad contribuyen a una baja cohesión del suelo, haciéndolo susceptible a la erosión hídrica. El tipo Leptosol, en particular, es común en áreas de alta pendiente debido a su perfil delgado y limitada capacidad de retención de nutrientes, lo que lo hace vulnerable a la pérdida de suelo superficial cuando se expone a lluvias intensas.

En estudios como el realizado por Nakaya (2018) en la cuenca del río Tingo, también predominan los suelos Phaeozem y Leptosol, reflejando condiciones similares en términos de susceptibilidad erosiva debido a su textura y baja capacidad de retención de agua. Estas características son relevantes en la cuenca del río Grande, donde los suelos Leptosol y Phaeozem, al estar ubicados en zonas de mayor pendiente, aumentan el riesgo de erosión.

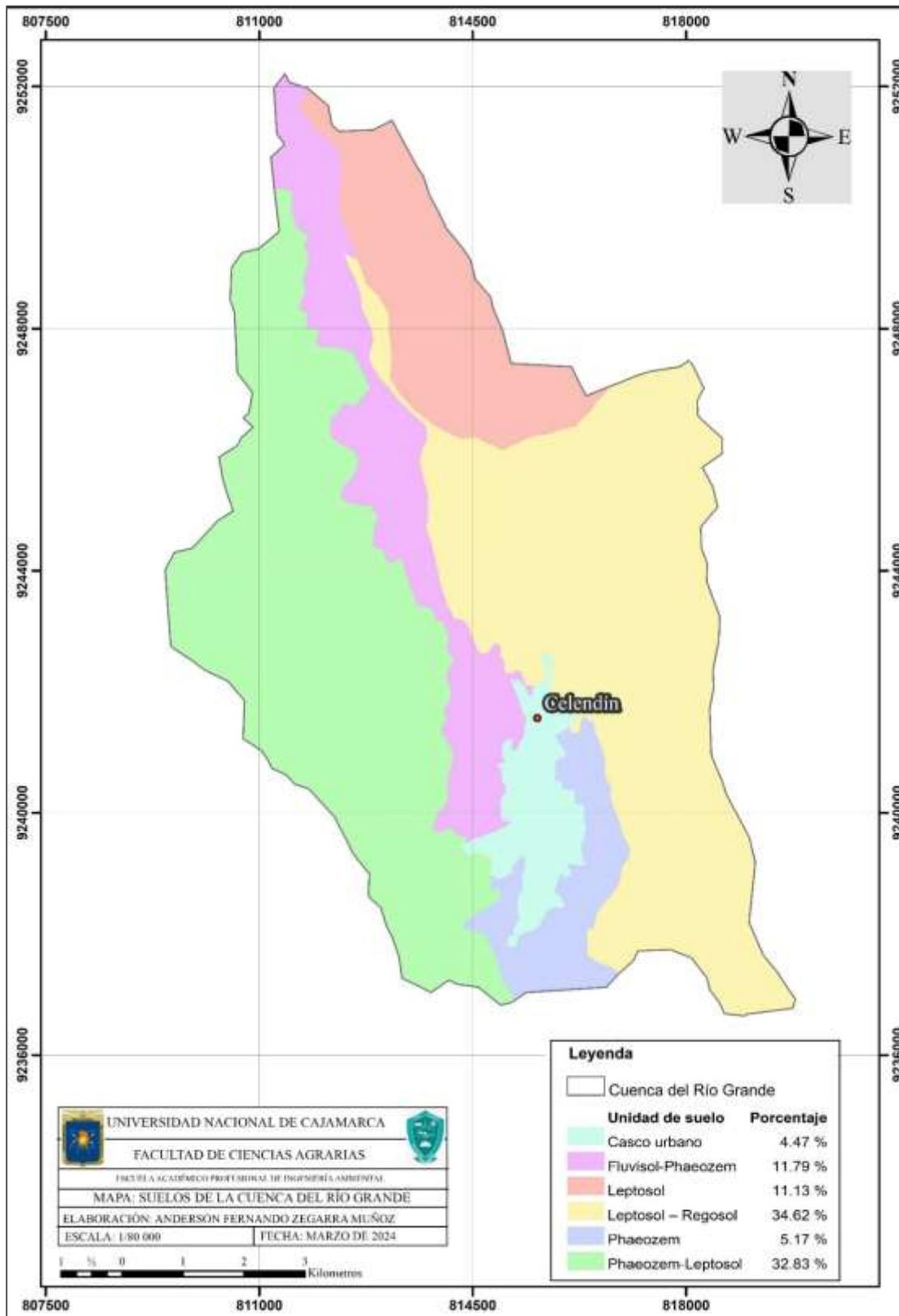
Por otro lado, el suelo urbano cubre un 4.47% del área total y se concentra en la ciudad de Celendín, mientras que el Fluvisol-Phaeozem y el Phaeozem ocupan el 11.79% y 5.17%, respectivamente, contribuyendo con una textura más arcillosa que puede proporcionar cierta estabilidad en zonas con menos pendiente. Sin embargo, el predominio de Leptosol en áreas inclinadas implica que, a diferencia de suelos más cohesivos, este tipo de suelo es altamente susceptible a la erosión, especialmente en la zona este y baja de la cuenca, donde se concentran las mayores pendientes y los niveles de precipitación."

Tabla 16*Unidades de suelos de la cuenca del río Grande – Celendín*

Unidad de suelo	Área (Ha)	Porcentaje
Casco urbano	402.96	4.47 %
Fluvisol-Phaeozem	1063.44	11.79 %
Leptosol	1003.72	11.13 %
Leptosol - Regosol	3122.56	34.62 %
Phaeozem	466.26	5.17 %
Phaeozem-Leptosol	2960.70	32.83 %
Total	9019.64	100.00 %

Figura 21

Mapa de suelos de la cuenca del río Grande - Celendín



4.2.2. Estimación de factores *RUSLE*

4.2.2.1. Factor de Erosividad (R)

En la cuenca del río Grande, los valores de erosividad (R) oscilan entre 600 y 745 MJ·cm/ha/h, con los valores más altos concentrados en las zonas elevadas donde la precipitación es más intensa. Este patrón sugiere que la erosividad está directamente influenciada por el gradiente altitudinal de la cuenca, ya que las precipitaciones en áreas montañosas suelen ser más energéticas, aumentando la energía con la que las gotas de lluvia impactan el suelo y, por lo tanto, el potencial de erosión.

La erosividad es un factor clave en la estimación de la pérdida de suelo, y en cuencas montañosas como esta, la combinación de lluvias intensas y pendientes pronunciadas amplifica el riesgo de erosión. En estudios de otras cuencas andinas, como la cuenca del río Chumbao en Apurímac (Chipana, 2022), se ha observado que la altitud y la intensidad de la precipitación contribuyen significativamente a valores altos de erosividad, alcanzando hasta 697 MJ·cm/ha/h en zonas altas. Este comportamiento es característico de cuencas que presentan variaciones climáticas y topográficas, donde la erosividad aumenta con la altitud debido al aumento en la intensidad de las precipitaciones.

En el caso de la cuenca del río Grande, la presencia de elevaciones orográficas importantes y la distribución de lluvias más intensas en las zonas altas hacen que el factor R sea particularmente elevado en comparación con áreas de menor altitud

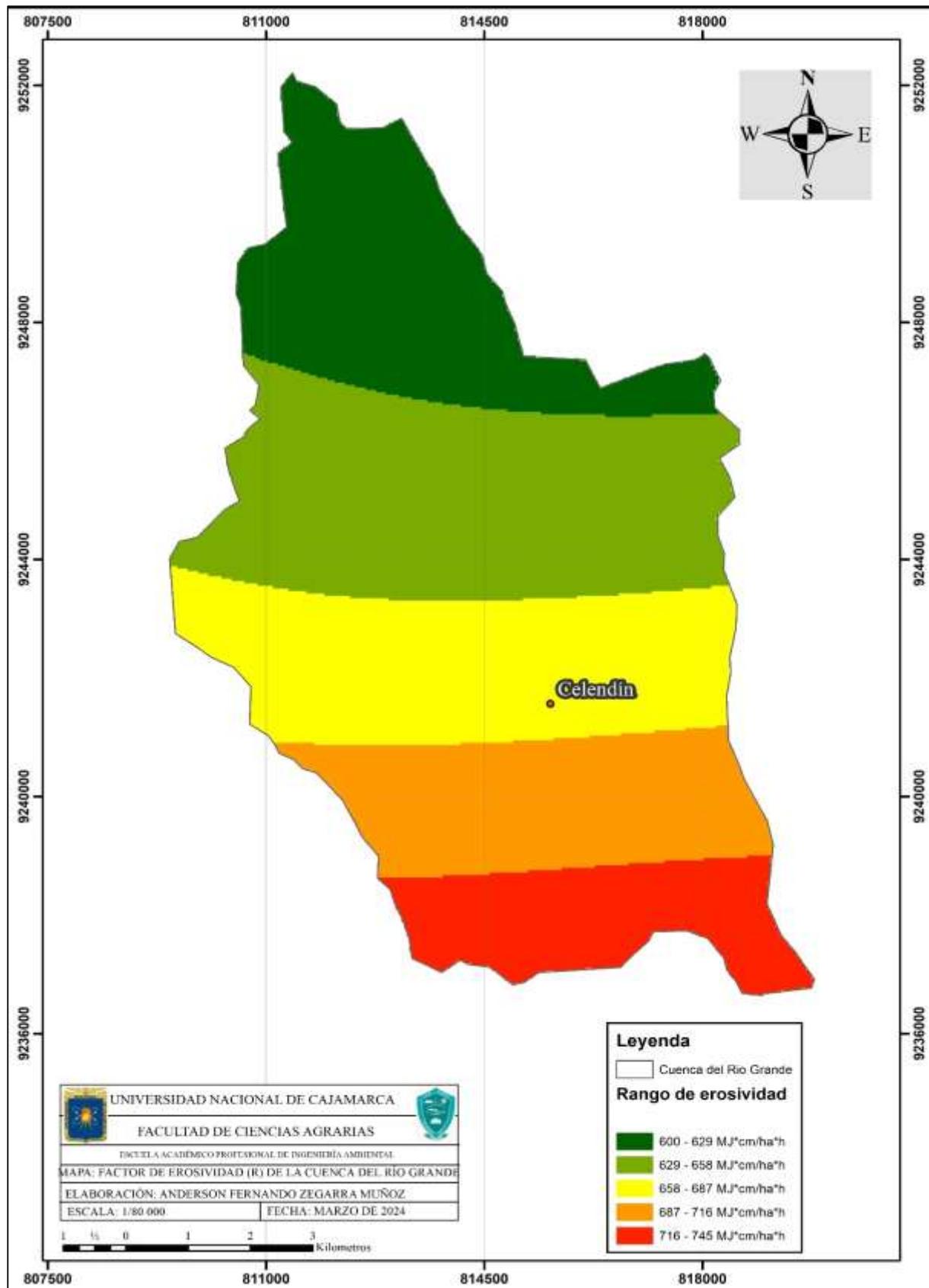
Tabla 17*Rangos de erosividad de la cuenca del río Grande de Celendín*

Rango de erosividad	Área (Ha)	Porcentaje
600 - 629 MJ*cm/ha/h	2088.50	23.16 %
629 - 658 MJ*cm/ha/h	2784.06	30.87 %
658 - 687 MJ*cm/ha/h	1754.78	19.46 %
687 -716 MJ*cm/ha/h	1365.55	15.14 %
716 - 745 MJ*cm/ha/h	1026.75	11.38 %
Total	9019.64	100.00 %

Nota. MJ·cm/ha/h es la unidad que mide la cantidad de energía que la lluvia transfiere en megajolues por cada centímetro de precipitación en una hectárea de terreno

Figura 22

Mapa del factor de erosividad (R) de la cuenca del río Grande - Celendín



4.2.2.2. Factor de Erodabilidad (K)

Los valores de erodabilidad (K) en la cuenca del río Grande, entre 0.0889614 y 0.126089 T·ha·h/ha·MJ·cm, revelan una alta susceptibilidad a la erosión hídrica, especialmente en suelos como el Leptosol y Phaeozem-Leptosol, de textura franco arenosa con aproximadamente un 80% de arena. Esta textura, junto con la estructura granular media a gruesa y una permeabilidad de moderada a rápida, facilita que las partículas de suelo se desprendan y se movilizan fácilmente bajo el impacto de las lluvias. Aunque ciertas áreas, como el Leptosol-Regosol, tienen un mayor contenido de materia orgánica, su capacidad para estabilizar el suelo es limitada debido a la textura arenosa y las pendientes pronunciadas. En estudios como el de la cuenca del río Mira en Ecuador (Arias-Muñoz et al., 2023), suelos de textura franco arcillosa-arenosa mostraron una erodabilidad similar debido a sus características sueltas y baja cohesión, lo cual coincide con lo observado en el río Grande. Además, los altos valores de erosividad (R) en la cuenca, asociados con precipitaciones intensas en zonas elevadas, incrementan la pérdida de suelo, pues la energía de las lluvias impacta estos suelos menos cohesivos, intensificando la erosión en las áreas más expuestas de la cuenca

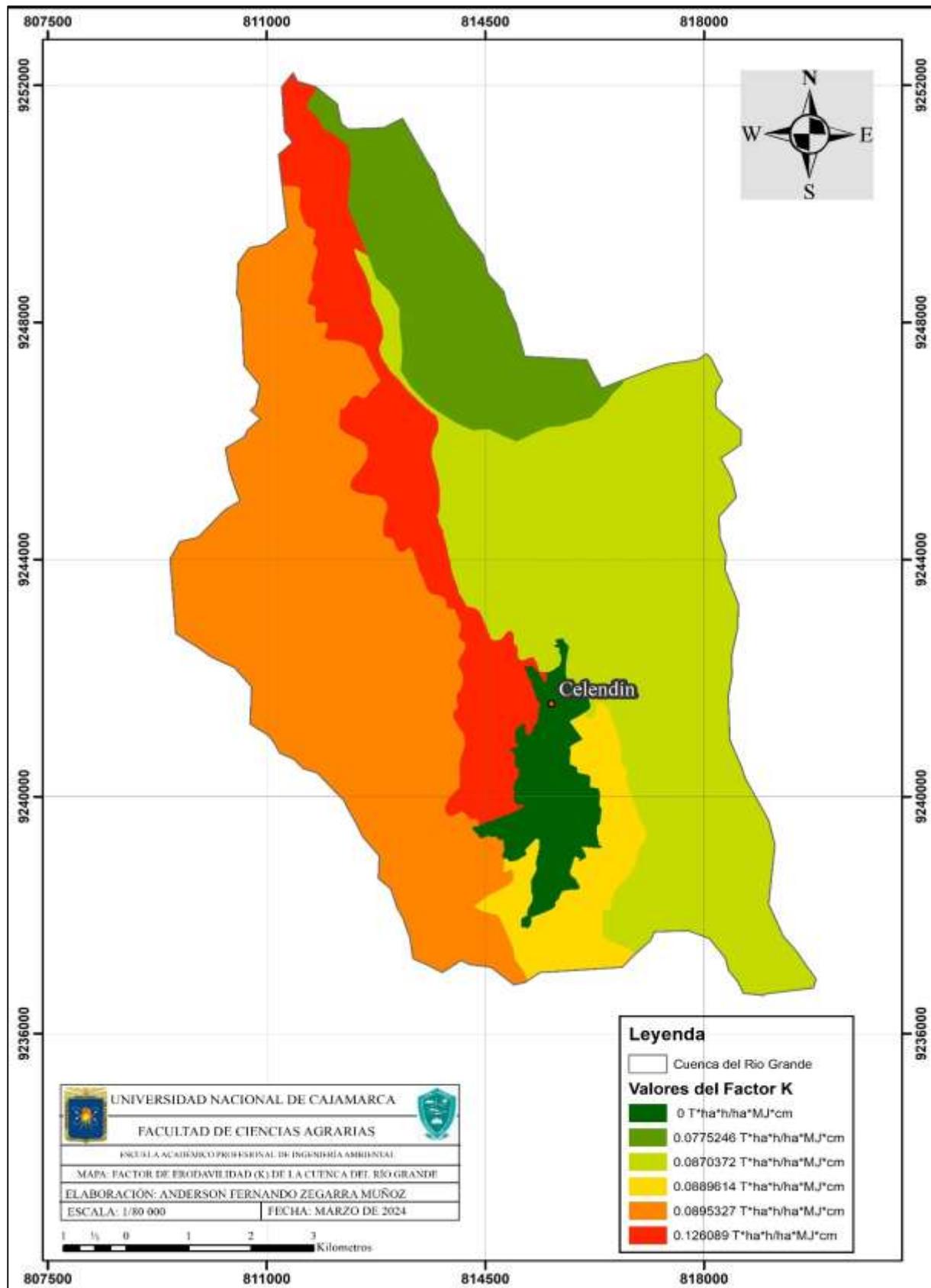
Tabla 18

Valores del factor K de la cuenca del río Grande - Celendín

Valores del factor K	Área (Ha)	Porcentaje
0 T*ha*h/ha*MJ*cm	402.96	4.47 %
0.0775246 T*ha*h/ha*MJ*cm	1063.44	11.79 %
0.0870372 T*ha*h/ha*MJ*cm	1003.72	11.13 %
0.0889614 T*ha*h/ha*MJ*cm	3122.56	34.62 %
0.0895327 T*ha*h/ha*MJ*cm	466.26	5.17 %
0.1260890 T*ha*h/ha*MJ*cm	2960.70	32.83 %
Total	9019.64	100.00 %

Figura 23

Mapa de la erodabilidad (K) de la cuenca del río Grande - Celendín



4.2.2.3. Factor Topográfico (LS)

El factor topográfico (LS) en la cuenca del río Grande está determinado en gran medida por sus pendientes pronunciadas y la longitud de escorrentía en las laderas, características que amplifican el riesgo de erosión. En esta cuenca, el 78.04% del territorio presenta valores de LS entre 0 y 10, correspondientes a áreas de menor pendiente, mientras que el 21.96% restante muestra valores altos de LS, concentrados en zonas bajas y en el sector este, donde predominan las laderas más inclinadas. Estas zonas con valores elevados de LS representan un riesgo incrementado de erosión debido a que la combinación de pendiente y longitud de escorrentía aumenta la velocidad y energía del flujo superficial, intensificando el desprendimiento y transporte de partículas de suelo.

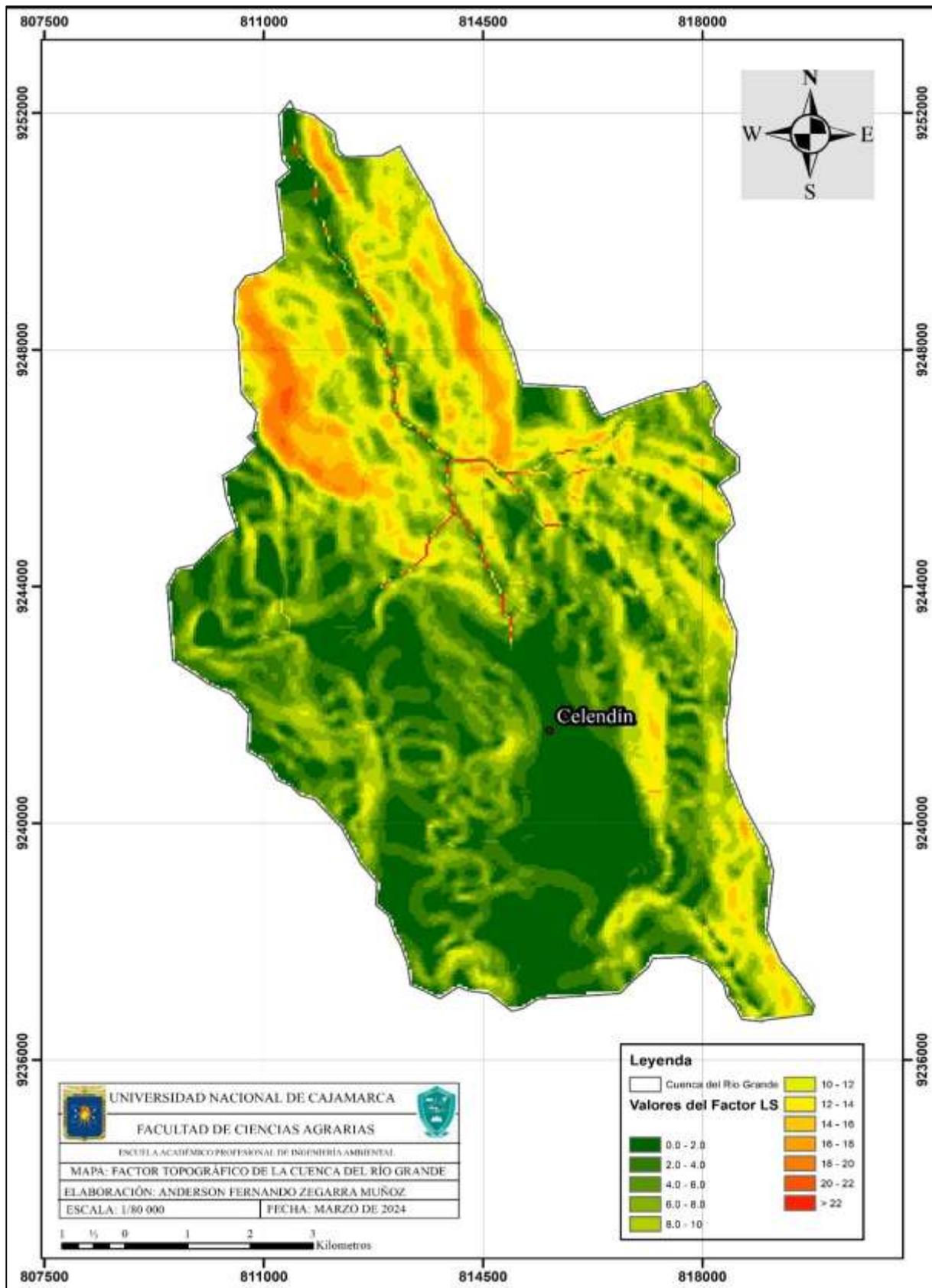
En comparación, en la cuenca del río Atué (Cabrejos, 2016), que también presenta zonas de pendiente significativa, los valores de LS alcanzan un máximo de 88.90, lo que muestra cómo el relieve montañoso favorece la escorrentía en pendientes inclinadas. Por otro lado, en la cuenca Pichucalco en México (Flores, 2016), los valores de LS son considerablemente menores, con un máximo de 37.91, lo cual se atribuye a su relieve menos accidentado. Estas diferencias destacan que el alto valor de LS en la cuenca del río Grande está directamente relacionado con su geografía montañosa, donde las áreas de mayor inclinación presentan una vulnerabilidad elevada a la erosión, en contraste con cuencas de menor pendiente.

Tabla 19*Valores del factor LS de la cuenca del río Grande - Celendín*

Valores del factor LS	Área (Ha)	Porcentaje
0.0 – 2.0	1653.54	18.33 %
2.0 – 4.0	1499.01	16.62 %
4.0 – 6.0	1528.86	16.95 %
6.0 – 8.0	1217.36	13.50 %
8.0 – 10	1140.20	12.64 %
10 – 12	884.95	9.81 %
12 – 14	549.69	6.09 %
14 – 16	293.43	3.25 %
16 – 18	167.12	1.85 %
18 – 20	55.64	0.62 %
20 – 22	2.84	0.03 %
> 22	27.01	0.30 %
Total	9019.64	100.00 %

Figura 24

Mapa del factor topográfico (LS) de la cuenca del río Grande - Celendín



4.2.2.4. Factor de Cobertura (C)

En la cuenca del río Grande, el factor de cobertura (C) varía significativamente según el tipo de cobertura vegetal, lo cual influye directamente en la capacidad del suelo para resistir la erosión. Las áreas de bosques y matorrales, que ocupan el 28.77% del territorio, tienen un valor de C de 0.008, lo que indica una excelente protección contra la erosión debido a la cobertura densa que reduce el impacto directo de la lluvia. Por otro lado, los cultivos anuales y herbáceos, que abarcan el 27.39% de la cuenca, presentan un valor de C de 0.25, lo cual representa una protección moderada, aunque es variable dependiendo de la etapa de crecimiento del cultivo, ya que el suelo puede quedar expuesto durante ciertas fases.

Las zonas de suelos desnudos, con un valor de C de 1 y un 17.44% del área, son las más susceptibles a la erosión, al carecer de vegetación que proteja el suelo del impacto de la lluvia y la escorrentía. Este comportamiento coincide con estudios en otras cuencas, como la cuenca del río Muchacho en Ecuador (Jaya, 2023), donde las áreas con baja cobertura vegetal presentan valores de C cercanos a 1 incrementando significativamente la vulnerabilidad a la erosión. De manera similar, se ha documentado en otras regiones que las áreas con cobertura densa, como los bosques, tienden a tener valores de C próximos a 0, proporcionando una barrera efectiva contra la erosión.

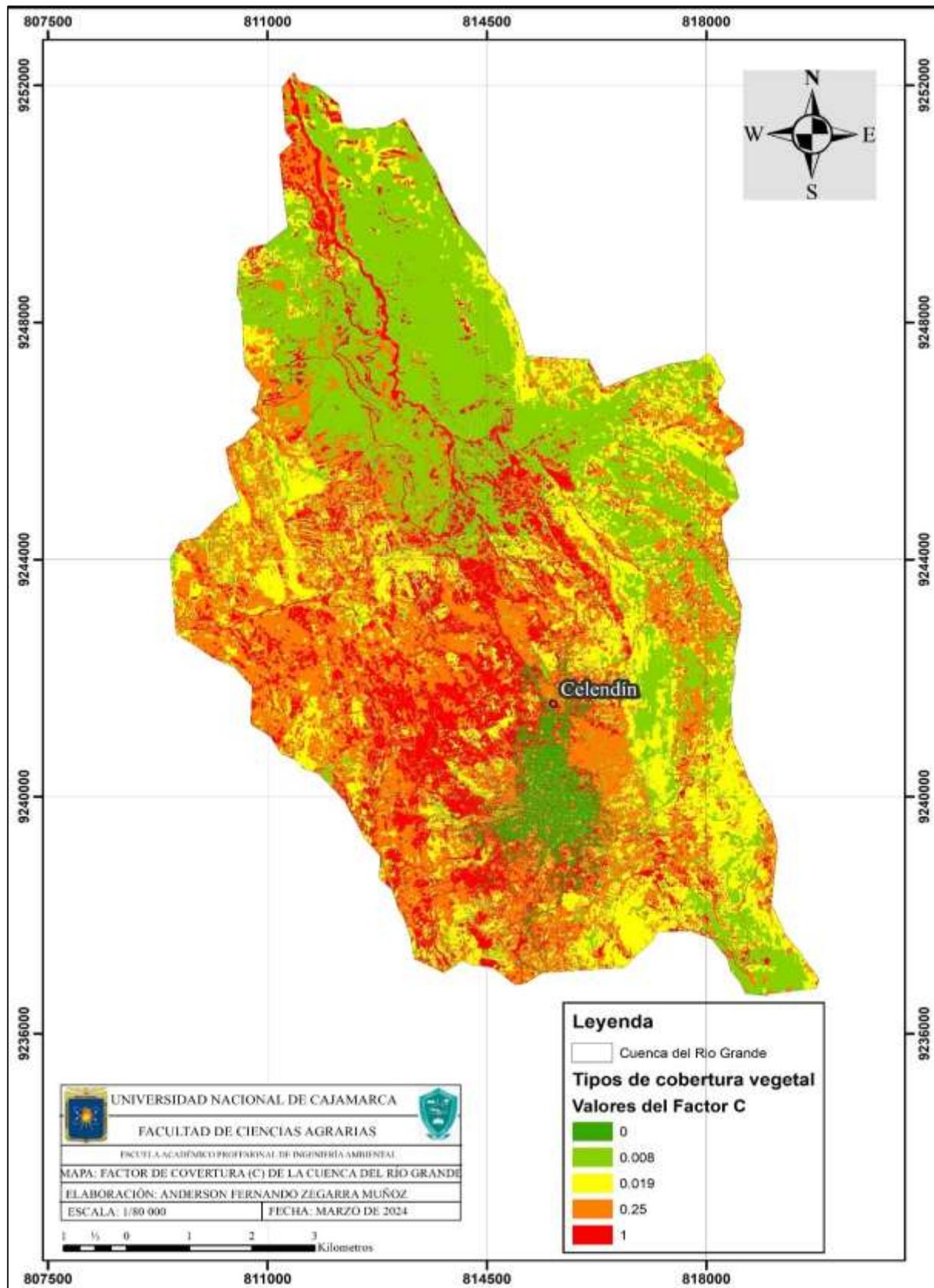
Tabla 20

Tipos de cobertura vegetal de la cuenca del río Grande - Celendín

Tipo de cobertura	Valores del Factor C	Área (Ha)	Porcentaje
Suelos urbanos	0	252.74	2.80 %
Bosques y matorrales	0.008	2595.15	28.77 %
Herbáceas y matorrales	0.019	2128.91	23.60 %
Cultivos anuales y herbáceos	0.25	2470.09	27.39 %
Suelos desnudos	1	1572.75	17.44 %
	Total	9019.64	100.00 %

Figura 25

Mapa del factor de cobertura (C) de la cuenca del río Grande de Celendín



4.2.3. Estimación de la erosión hídrica en la cuenca del río Grande - Celendín

Los resultados indican que el 55.5% de la cuenca, correspondiente a 5005.33 hectáreas, presenta una pérdida de suelo menor a 10 t/ha/año, mostrando que en las áreas con menor pendiente y vegetación densa el impacto erosivo es controlado. Sin embargo, el 26.18% del área (2361.45 hectáreas) experimenta pérdidas significativas, entre 50 y 500 t/ha/año, debido a la combinación de pendientes pronunciadas, suelos arenosos, y menor cobertura vegetal.

Las zonas de mayor erosión se encuentran en áreas con valores altos de LS, donde la topografía inclinada facilita la escorrentía y aumenta el arrastre de partículas. Asimismo, en los suelos con alto valor de K, como el Leptosol y el Phaeozem-Leptosol, la estructura granular y la textura franco arenosa incrementan la susceptibilidad al desprendimiento. En términos de cobertura, los suelos desnudos y los cultivos anuales, con valores de C elevados, presentan un mayor riesgo de pérdida de suelo en comparación con las áreas de bosque y matorrales que brindan protección.

Estos valores coinciden en parte con los reportados en la cuenca del río Muchacho en Ecuador, donde se estimaron pérdidas similares en áreas con vegetación escasa, pendientes inclinadas y suelos poco cohesivos (Jaya, 2023). La cuenca del río Grande, con un promedio de erosión de 81.53 t/ha/año, evidencia cómo la interacción de los factores naturales y el uso del suelo afectan de manera diferenciada el riesgo de erosión en diversas zonas, siendo crucial entender estas relaciones para manejar la pérdida de suelo en áreas vulnerables. Al utilizar la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) se encontró que el 55.5 % del área estudiada (5005.33 hectáreas) presenta una pérdida de suelo menor a 10 t/ha/año; el 14.32 % (1291.15 hectáreas) tiene pérdidas entre 10 y 50 t/ha/año; el 26.18 % (2361.45 hectáreas) experimenta pérdidas entre 50 y 500 t/ha/año; y el 3.61 % (4.01 hectáreas) supera las 500 t/ha/año. En promedio, la cuenca pierde 81.53 t/ha/año, un valor

comparable al reportado por Jaya (2023) en la cuenca del río Muchacho en Ecuador, que tiene una pérdida promedio de 74.4 t/ha/año debido a factores similares como suelos dispersos, vegetación escasa, pastoreo, pendientes pronunciadas y lluvias frecuentes. Sin embargo, la cuenca en estudio muestra valores significativamente más altos en comparación a cuenca como la del río Mira, donde Arias-Muñoz (2023) encontró una erosión promedio de 32.79 t/ha/año donde sugiere que los valores sostenibles deben ser menores a 10 t/ha/año

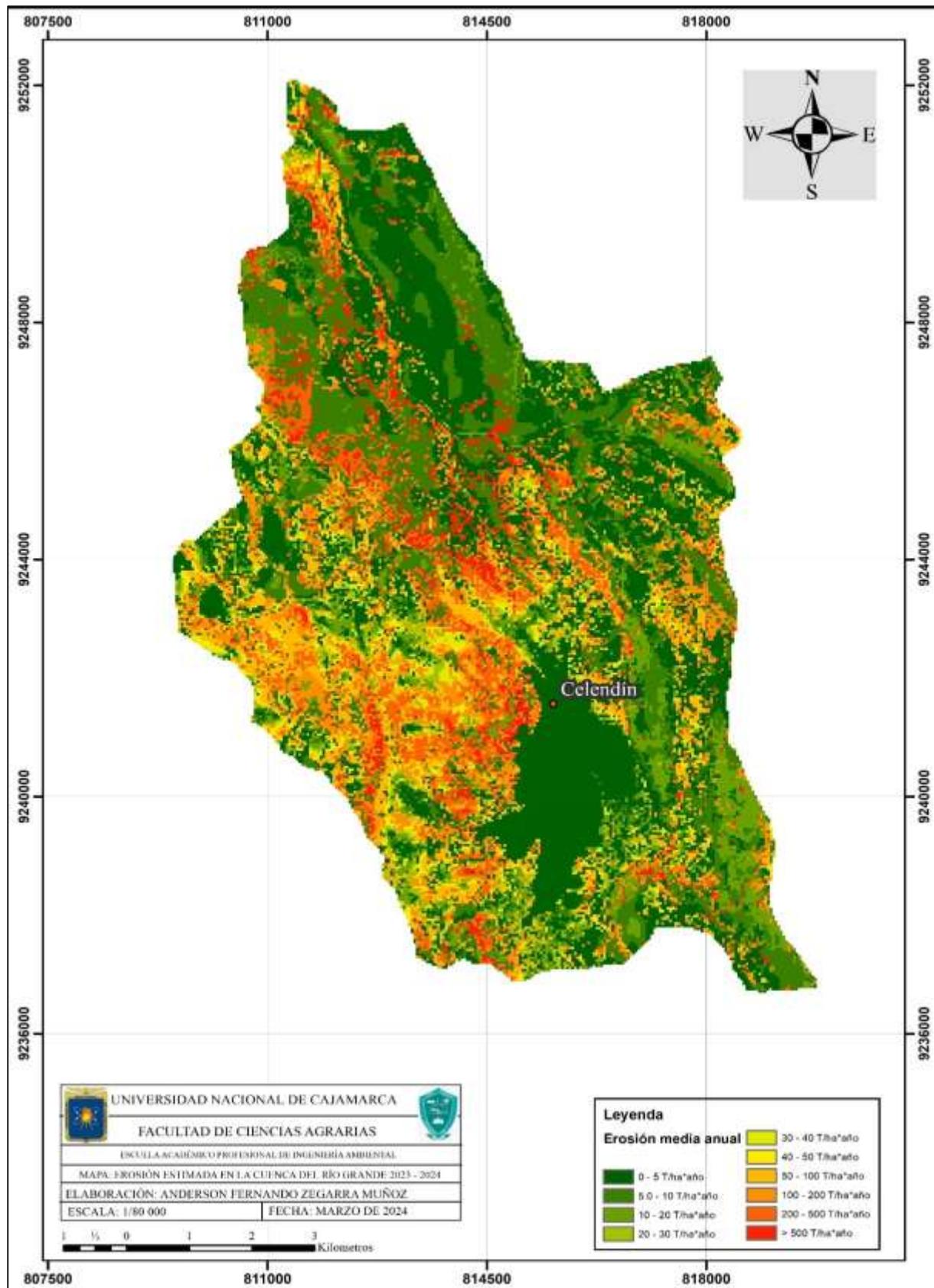
Tabla 21

Erosión media anual de la cuenca del río Grande - Celendín

Erosión media anual	Área (Ha)	Porcentaje
0 – 5 T/ha*año	3520.96	39.04 %
5 – 10 T/ha*año	1484.37	16.46 %
10 – 20 T/ha*año	708.78	7.86 %
20 – 30 T/ha*año	196.47	2.18 %
30 – 40 T/ha*año	189.43	2.10 %
40 – 50 T/ha*año	196.47	2.18 %
50 – 100 T/ha*año	849.45	9.42 %
100 – 200 T/ha*año	735.14	8.15 %
200 – 500 T/ha*año	776.86	8.61 %
> 500 T/ha*año	361.70	4.01 %
Total	9019.64	100 %

Figura 26

Mapa de la erosión estimada en la cuenca del río Grande - Celendín



4.3. Identificación de las zonas más vulnerables

4.3.1. Grado de erosión hídrica en la cuenca del río Grande – Celendín

El grado de erosión hídrica en la cuenca del río Grande varía ampliamente según los factores físicos y de cobertura del suelo. La estimación muestra que el 39.04% de la cuenca tiene niveles aceptables de erosión, correspondientes principalmente a áreas de pendientes suaves y una cobertura vegetal densa, la cual reduce el impacto de la lluvia y la escorrentía en la superficie del suelo. Esta cobertura vegetal, con valores bajos de C, actúa como una barrera natural que disminuye la erosión, similar a lo que se observa en áreas con vegetación natural en la cuenca del río Tingo (Nakaya, 2018), donde las pendientes moderadas y la cobertura vegetal también limitan la pérdida de suelo.

Por otra parte, el 30.77% de la superficie de la cuenca presenta grados de erosión de moderada a fuerte, lo cual requiere medidas de control. Este nivel se encuentra en zonas de mayor pendiente y con una cobertura vegetal menos densa, donde el factor topográfico (LS) es más elevado, permitiendo que la escorrentía gane velocidad y capacidad de arrastre. En estas áreas, los suelos franco arenosos, como los Leptosoles, y una estructura granular facilitan el desprendimiento de partículas bajo el impacto de la lluvia, particularmente en terrenos de cultivo o en suelos parcialmente descubiertos. En la cuenca del río Atuén (Cabrejos, 2016), se han observado situaciones similares en áreas agrícolas con suelos poco cohesivos y pendientes variables, que también muestran mayores tasas de erosión en función de estos mismos factores.

El 30.19% restante de la cuenca del río Grande exhibe grados severos de erosión, con valores de pérdida de suelo que superan los 200 t/ha/año en zonas con pendientes extremas y cobertura vegetal mínima o nula. Estos valores altos de LS y C reflejan una combinación de pendientes fuertes y falta de protección vegetal que permite que la escorrentía erosione el suelo rápidamente. En áreas como el río Tingo y el río Atuen, las zonas con pendiente

acentuada y baja cobertura también registran mayores niveles de erosión, especialmente en suelos de baja cohesión, lo que subraya cómo la interacción de estos factores intensifica la pérdida de suelo en terrenos vulnerables.

Estos resultados evidencian que, en la cuenca del río Grande, la combinación de factores topográficos, textura del suelo y cobertura vegetal determina la intensidad de la erosión, destacando que las áreas con pendientes y vegetación densa tienden a estabilizar el suelo, mientras que aquellas con pendientes pronunciadas y vegetación escasa sufren los mayores niveles de pérdida de suelo

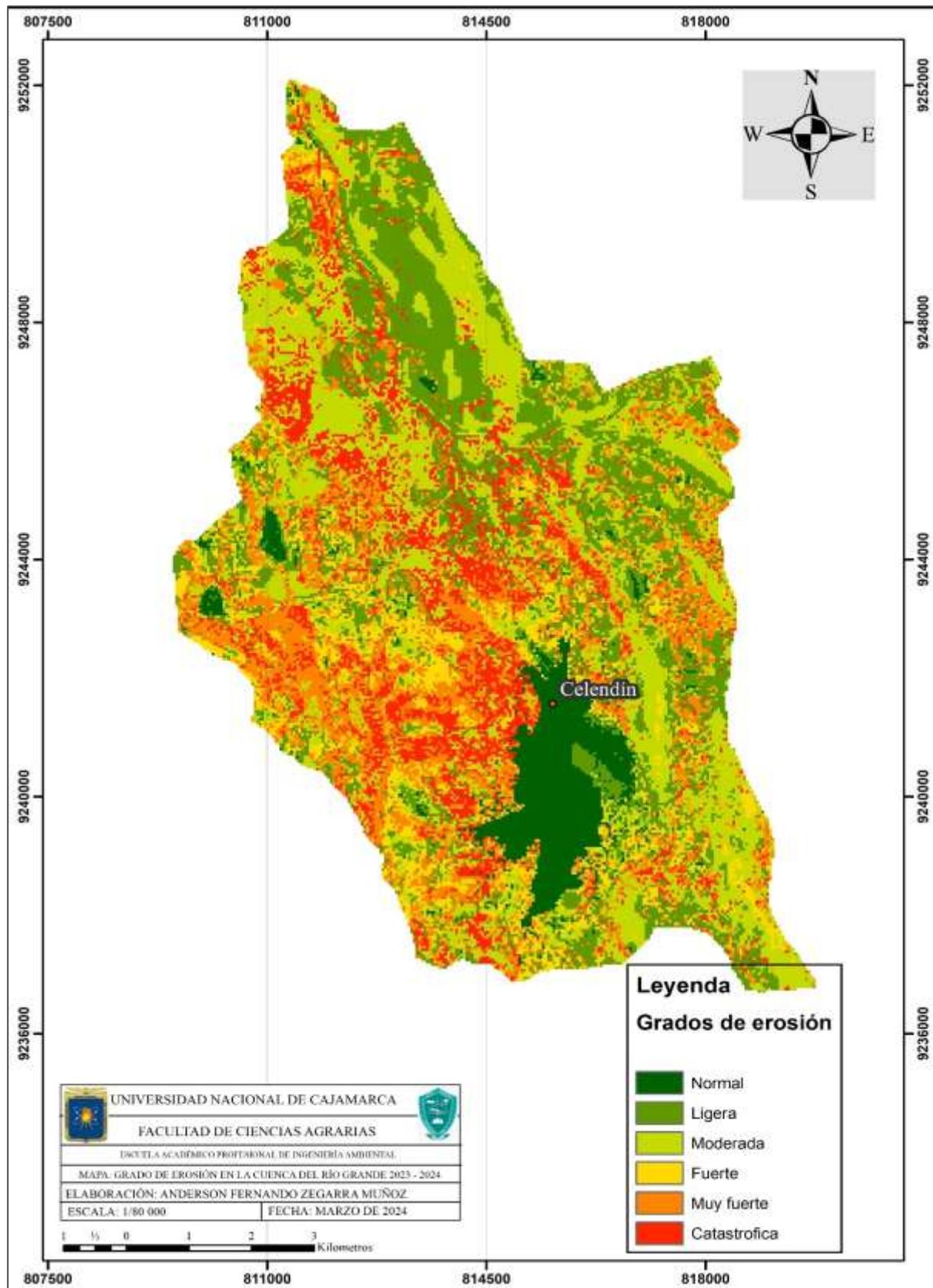
Tabla 22

Grados de erosión de la cuenca del río Grande - Celendín

Pérdida de suelo (T/h*año)	Área (Ha)	Porcentaje	Grado de erosión	Medidas
< 0.5	791.85	8.78 %	Normal	No presenta erosión visible
0.5 – 5	2729.11	30.26 %	Ligera	Erosión incipiente, requiere medidas de conservación
5 – 15	1993.25	22.10 %	Moderada	Erosión moderada, requiere medidas de control
15 – 50	782.28	8.67 %	Fuerte	Erosión severa, requiere medidas de recuperación
50 – 200	1584.59	17.57 %	Muy fuerte	Erosión muy severa, requiere medidas drásticas de recuperación
> 200	1138.56	12.62 %	Catastrófica	Suelo prácticamente destruido, no se puede recuperar

Figura 27

Mapa del grado de erosión de la cuenca del río Grande - Celendín

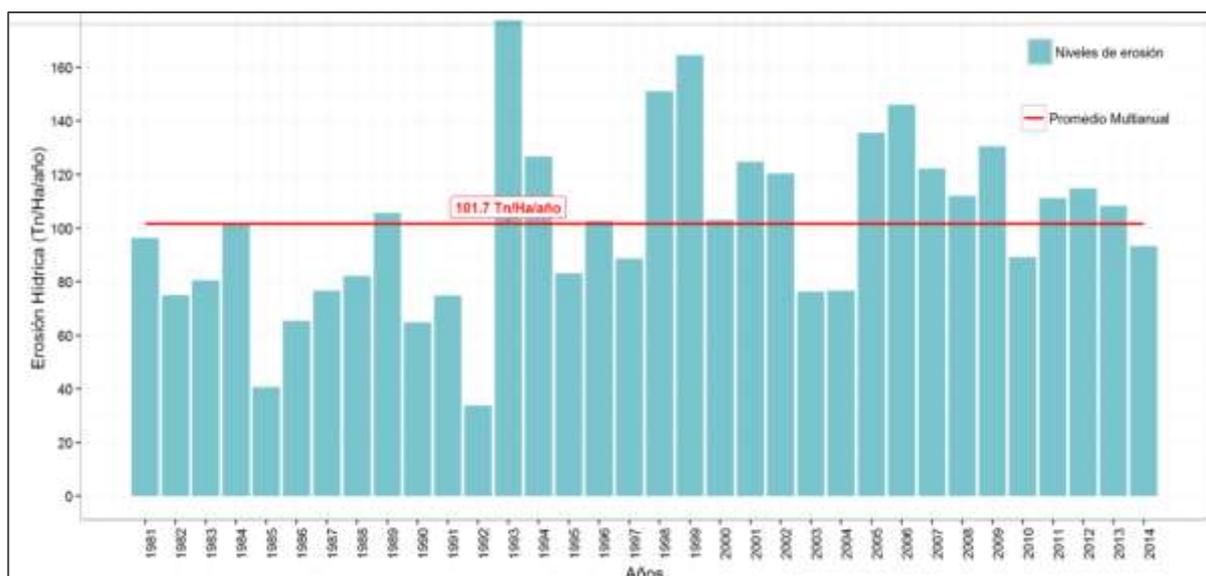


En la figura 28 al contrastar los grados de erosión obtenidos en la cuenca del Río Grande con los reportados en el Atlas de Erosión de Suelos por Regiones Hidrológicas elaborado por el SENAMHI (2017), se observa que los resultados presentan una notable correspondencia. En el atlas, se estima una erosión promedio de 101.7 (tn/ha/año) para la región hidrológica Atlántico 10, basado en datos recopilados entre 1981 y 2014. Por su parte, el valor estimado en este estudio fue de 81,53 tn/ha/año.

Cabe señalar que en ambos casos se utilizó la misma metodología, basada en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), lo que refuerza la validez de la comparación. Sin embargo, la diferencia en los resultados puede atribuirse al nivel de análisis: mientras el atlas considera un enfoque más macro, abarcando un área de 59 283,49 km², nuestro estudio se centra específicamente en una subcuenca de 90,2 km². Estas diferencias de escala influyen en la precisión de los parámetros utilizados, como la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del suelo. Además, es importante destacar que la cuenca del Atlántico 9, presenta una de las tasas de erosión más altas del Perú.

Figura 28

Erosión hídrica anual para la Región Hidrológica “Atlántico 9”



Nota. Tomado de SENAMHI (2017)

4.4. Pérdida de suelo por influencia de las precipitaciones

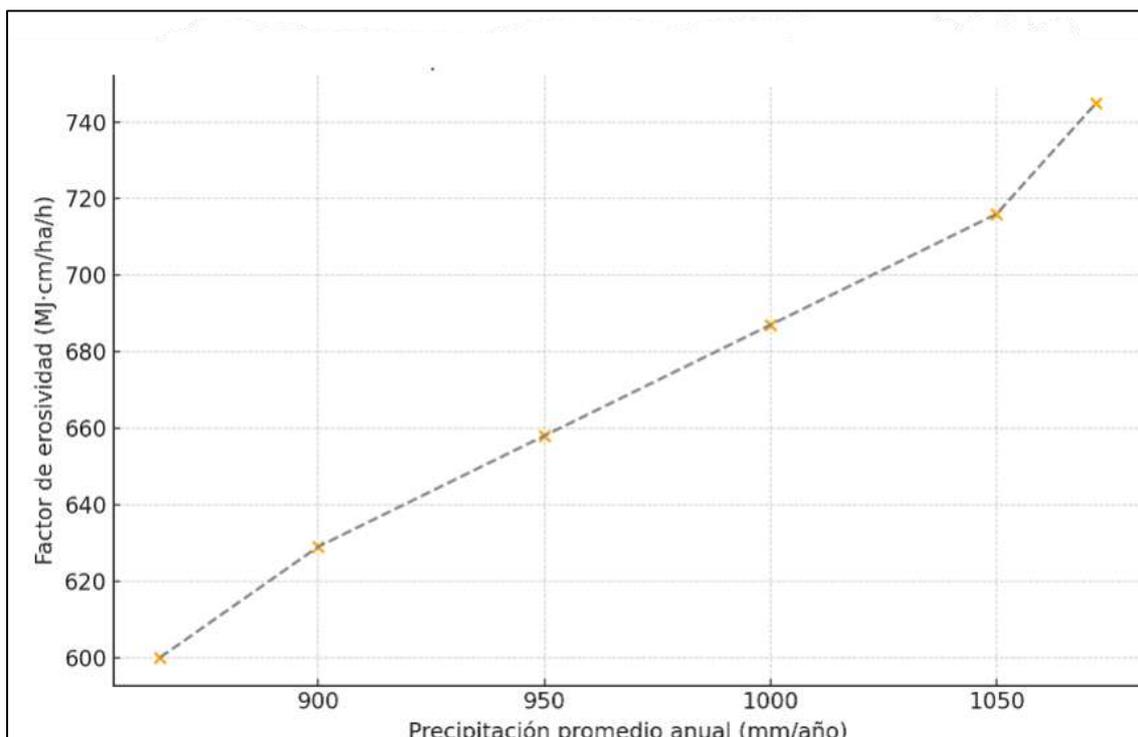
La erosión hídrica en cuencas montañosas está fuertemente influenciada por la precipitación, que actúa como un factor clave al incrementar la energía de impacto sobre el suelo, facilitando su desagregación y posterior arrastre. En la cuenca del río Grande - Celendín, las precipitaciones varían según la altitud y la topografía, generando un patrón de erosión que afecta de forma diferencial a las distintas áreas de la cuenca

4.4.1. Relación entre Precipitación y Erosividad (Factor R)

A través del gráfico de dispersión (figura 29) se muestra la relación entre los niveles de precipitación y el factor de erosividad. Este análisis evidencia que el aumento en la precipitación está asociado a mayores niveles de erosividad, con valores de hasta 745 MJ·cm/ha/h en zonas de alta precipitación. Esta relación sugiere que, a mayor intensidad de la lluvia, mayor es la capacidad de impacto de las gotas sobre el suelo, lo cual incrementa el potencial de pérdida de suelo.

Figura 29

Relación entre precipitación promedio anual y erosividad

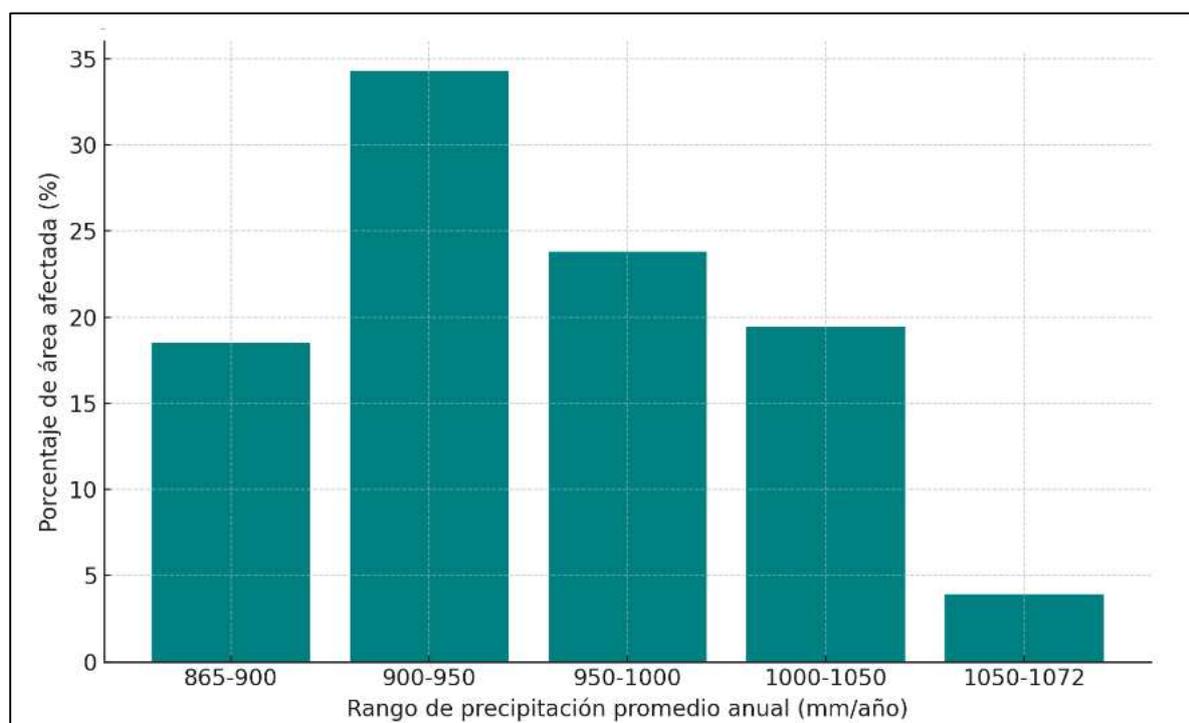


4.4.2. Distribución de la Pérdida de Suelo según Rango de Precipitación

En el gráfico de la figura 30 se muestra la distribución de la pérdida de suelo en función de distintos rangos de precipitación promedio anual. Las áreas con precipitaciones entre 900 y 950 mm/año concentran el mayor porcentaje de pérdida de suelo, indicando una mayor susceptibilidad a la erosión en zonas con estas condiciones de precipitación. La falta de vegetación densa en ciertas áreas amplifica esta vulnerabilidad, pues el impacto directo de la lluvia sobre suelos descubiertos incrementa la erosión.

Figura 30

Distribución de pérdida de suelo en función del rango de precipitación promedio anual



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se estimó la pérdida de suelo por influencia de las precipitaciones en la cuenca del río Grande en un promedio de 81.53 T/ha*año. Esta pérdida es más significativa en áreas con pobre cobertura vegetal y pendientes pronunciadas. Además, aproximadamente el 30 % del territorio muestra una erosión fuerte, superando las 50 toneladas por hectárea por año.
- Se calculó que la precipitación media anual en la cuenca del río Grande de Celendín en el periodo 2023 – 2024 tiene un promedio de 953.74 mm/año, A pesar de que la cuenca presenta una gradiente altitudinal, de aproximadamente 2000 metros de diferencia entre la mayor y menor altitud, las precipitaciones no varían considerablemente con la altitud, registrándose precipitaciones de 865 mm/año en las altitudes más bajas, aumentando gradualmente hasta alcanzar los 1072 mm/año en las altitudes más altas.
- Se estimó la cantidad de suelo perdido en la cuenca del río Grande de Celendín en el periodo 2023 -2024 a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) en un promedio de 81.53 T/ha*año, se identifica dentro de los factores que considera dicha ecuación, el factor de cobertura vegetal y el factor topográfico son los elementos que más influyen en la erosión del suelo.
- Se identificó que las áreas más vulnerables a la pérdida de suelo por la influencia de las precipitaciones son las partes bajas de la cuenca por sus pendientes extremas, y la

zona oeste, caracterizada por escasa cobertura vegetal y pendientes empinadas. Las lluvias en estas áreas son responsables de su alta vulnerabilidad a la erosión.

5.2. Recomendaciones

- Realizar estimaciones de erosión empleando métodos alternativos aplicables a cuencas montañosas con alta precipitación, como parcelas de erosión, batimetría en embalses, monitoreo de sedimentos en ríos, modelo WEPP y fotogrametría con drones, para validar y contrastar los resultados obtenidos,
- Realizar una evaluación más exhaustiva de las áreas con erosión severa y catastrófica para tomar medidas de manera inmediata.
- Hacer un llamado a las autoridades pertinentes (Municipalidad Provincial de Celendín, Gobierno Regional de Cajamarca, Ministerio del Ambiente) para que tomen medidas y evitar el aumento de la erosión en la cuenca.
- Incentivar el uso de técnicas de conservación del suelo para garantizar la buena calidad de los suelos.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS

- Arias-Muñoz, P., Saz, M.A., & Escolano, S. (2023). Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. Caso de estudio: cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, (79), 207-230.
<https://doi.org/10.14198/INGEO.22390>
- Arumí, J. Jara, J. Salgado, L. (2005) *Análisis hidrológico*. Universidad de Concepción. Chile
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.
<https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Cabrejos, M. (2016). *Modelamiento geoespacial en la determinación del riesgo, vulnerabilidad y de la cuantificación de la erosión hídrica en la microcuenca del río Atuen – Amazonas*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1951>
- Camargo, C. Pacheco, C. Lopez, 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*, 20(2), 265-280.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6687514>
- Cayo, L. (2001). *Modelamiento Ambiental para Análisis de Susceptibilidad Erosiva en la cuenca media y alta del Río Cañete y determinación del Mapa De Erosión* Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Chipana, O. (2022). *Estimación de la pérdida de suelo media anual y determinación de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada en la cuenca del río*

- Chumbao*. (Tesis de pregrado, Universidad tecnológica de los Andes), Apurímac, Perú <https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/384>
- Climate Hazards Center. (2024). *CHIRPS: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*. Climate Hazards Center, UC Santa Barbara. <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- De Regoyos Sáinz, Marta (2003). Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo geowepp a dos pequeñas cuencas en Madrid. (Tesis Doctoral) Universidad Politecnica de Madrid, madrid, España <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.450>.
- Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of soil and water conservation*, 51(5), 427-433. <https://www.jswnonline.org/content/51/5/427>
- Dufilho, A. C., Frugoni, M. C., Macchi, P., & Thot, A. (2011). Estimación de erosión hídrica de suelos para plan de manejo del campo forestal aguas frías, Patagonia Argentina. *Boletín geográfico*, (33), 69-85. <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/73>
- Esri. (2019). *ArcGIS Desktop: Release 10.7* [Software]. Esri. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/overview>
- FAO. (2018). *La erosión del suelo*. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/soil-erosion/es/>
- FAO. *Portal de suelos de la FAO (2018)*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>
- Flores Islas, E. (2016) *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en tres cuencas de la República Mexicana, utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo*. (Tesis de pregrado) Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México,

México.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12111/Tesis.pdf?sequence=4>

Google Earth. (2023). Imagen satelital de la Cuenca del Río Grande de Celendín, Perú [Imagen de satélite]. Google Earth. <https://earth.google.com/web/>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Vol. 6, pp. 102-256). México: McGraw-Hill.

Ibáñez, S. Moreno, H. Gisbert, Juan. (2014). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Universidad Politécnica de Valencia. España.

INEI. (2018). *Análisis de la erosión hídrica en el Perú*.

https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1546/Libro.pdf

Jaya-Santillán, J. (2023). Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 15(1), 26-39. <https://doi.org/10.29166/revfig.v15i1.4269>

Lal, R. (1995). *Soil erosion and conservation* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Mancilla, G. 2008. *Uso de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE) en el campo forestal*. Santiago, Chile.

Mannaerts, C. 1999. *Factores de erosión, Curso de postgrado en levantamiento de recursos hídricos*. Cochabamba, Bolivia.

MIDAGRI. (2022). *Clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor*.

<https://www.gob.pe/institucion/midagri/normas-legales/2979424-0005-2022-midagri>

MINAGRI. (2014). *Programa Presupuestal 0089 Reducción de la Degradación de los Suelos Agrarios*. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/ais-2015/erosion-suelo.pdf>

- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(33), 13268-13272
- Nakaya Barzola, D. (2018). *Estimación de la pérdida de suelo media anual mediante el modelo R.U.S.L.E., en la cuenca del río Tingo – Cajamarca*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3591>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (2018). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical methods* (pp. 961-1010).
- Ramos Fernandez, X. (2022). *Estimación de la erosión potencial del suelo en una finca cafetalera con visión agroecológica*. (Tesis de pregrado). Universidad de El Salvador, El Salvador. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/27325/1/13101763.pdf>
- Raymundo Jáuregui, A. A. (2018). *Evaluación de la pérdida del suelo mediante el modelo Rusle en la microcuenca del río Jucusbamba, Provincia de Luya, Región Amazonas (Perú)*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú. <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1552>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Department of Agriculture
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2017). *Atlas de Erosión de Suelos por Regiones Hidrológicas del Perú*.
<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/261>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2020). *Climas del Perú - Mapa de Classification Climática Nacional*.

<https://idesep.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/9f18b911-64af-4e6b-bbef-272bb20195e4>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2024). *Normales Climáticas Estándares y Medias 1991-2020*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=normales-estaciones>

Soil Science Society of America. (2020). *Methods of soil analysis* (Vol. 4): Physical methods. SSSA Book Series. Soil Science Society of America.

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2020). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services: Summary for Policymakers*. https://www.ipbes.net/sites/default/files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_es.pdf

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration. https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/64080530/RUSLE/AH_537.pdf

Zúñiga Huaco, J. (2017). *Determinación de la pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca-Arequipa, aplicando USLE y técnicas geoespaciales*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3072>

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1: Punto de control meteorológico 1 Promedio mensual de precipitaciones, 1994 - 2023

Mes Año	ene	feb	Mar	abr	may	Jun	Jul	Ago	Sep	oct	nov	dic
1994	117.41	130.91	166.94	153.37	24.87	0.00	0.00	6.27	28.35	79.78	119.60	105.09
1995	63.51	112.25	127.78	68.11	30.89	0.00	10.08	9.31	37.38	110.43	109.79	134.18
1996	100.75	145.16	170.85	81.08	26.51	0.00	0.00	9.10	31.41	144.87	72.75	41.35
1997	83.32	133.70	74.36	93.38	16.54	0.00	0.00	6.31	33.73	82.14	104.04	153.94
1998	74.29	158.94	170.17	135.35	44.62	2.64	0.00	6.85	54.78	136.06	86.27	84.16
1999	137.56	249.31	109.38	38.03	33.46	18.25	6.10	5.89	99.22	47.11	101.50	147.16
2000	72.43	151.54	186.50	82.61	39.59	6.34	6.22	9.74	68.83	24.65	68.53	122.70
2001	180.71	89.67	221.43	51.24	34.44	0.00	0.00	0.00	55.49	103.90	164.43	102.63
2002	65.14	110.97	164.13	156.99	24.17	5.56	9.85	5.99	28.89	141.30	122.95	122.97
2003	73.47	106.16	139.72	76.16	21.08	6.62	0.00	9.04	40.89	81.92	104.27	103.55
2004	61.14	69.20	94.01	79.42	30.34	0.00	11.60	7.79	31.89	121.19	158.78	105.23
2005	78.75	90.49	195.61	96.03	20.49	0.00	0.00	5.30	43.32	140.42	58.19	123.83
2006	105.36	123.12	238.32	80.81	14.19	4.50	7.61	6.66	52.97	96.19	110.76	122.86
2007	98.60	49.57	188.82	125.24	28.69	0.00	8.58	9.88	26.41	126.45	150.38	86.28
2008	114.50	157.98	173.48	91.96	35.79	6.28	0.00	13.34	56.07	133.89	110.27	54.88
2009	194.62	133.52	193.10	138.78	40.82	0.00	6.54	5.93	33.28	111.66	141.92	116.83
2010	78.53	146.66	163.42	80.43	50.31	5.63	11.17	5.92	45.82	100.37	121.47	111.69
2011	100.84	115.94	183.67	117.39	18.97	3.17	8.18	6.63	51.17	94.21	95.84	68.14
2012	93.36	94.18	71.29	163.77	23.61	0.00	5.39	6.85	29.21	99.83	92.93	74.29
2013	71.17	109.88	151.79	62.89	40.83	5.36	7.40	21.34	35.87	120.07	71.84	80.66
2014	66.12	76.77	195.64	83.30	45.77	0.00	6.14	6.82	25.58	67.70	97.06	74.45
2015	111.32	94.24	156.13	77.85	41.65	0.00	9.34	6.73	31.61	47.94	86.41	58.03
2016	97.86	83.78	158.83	80.64	16.32	5.29	6.74	6.35	33.61	84.43	42.61	93.35
2017	127.60	107.98	201.71	105.37	55.10	9.57	6.30	28.98	28.90	106.06	99.43	138.02
2018	98.13	139.21	133.90	96.78	48.49	5.48	6.40	6.69	24.35	109.47	206.99	107.02
2019	69.83	77.09	182.53	71.55	27.32	1.43	9.44	6.14	46.25	70.14	88.78	127.81
2020	97.53	64.21	91.55	66.96	20.78	3.97	15.69	11.01	61.62	97.47	59.78	253.55
2021	83.64	75.99	199.86	83.65	15.55	5.72	8.54	18.02	27.94	121.98	151.62	70.37
2022	112.91	131.46	120.58	160.21	43.31	21.02	17.68	17.15	52.24	75.08	33.87	84.33

2023	225.06	93.73	255.93	121.21	25.02	0.00	6.13	9.26	24.61	119.68	73.90	165.44
------	--------	-------	--------	--------	-------	------	------	------	-------	--------	-------	--------

Anexo 2: Punto de control metereologico2 Promedio mensual de precipitaciones, 1994 - 2023

Mes Año	ene	feb	mar	abr	may	Jun	Jul	Ago	sep	oct	nov	Dic
1994	122.70	133.33	176.34	154.27	30.05	9.74	6.79	7.96	27.82	83.66	108.60	118.71
1995	66.10	117.82	134.54	68.45	33.22	8.66	14.20	11.72	35.77	116.25	99.29	143.89
1996	106.11	147.14	182.22	83.24	29.57	7.97	6.63	11.45	30.17	151.47	68.45	45.97
1997	86.71	135.49	76.11	94.39	18.43	11.02	5.90	7.70	33.12	91.54	99.05	175.58
1998	78.14	161.03	184.11	136.76	48.16	8.69	5.50	8.86	52.19	143.77	78.22	93.34
1999	140.52	252.19	115.42	39.64	38.68	43.91	9.02	7.52	100.46	48.91	93.32	161.32
2000	73.48	165.28	197.07	89.21	42.59	18.44	9.06	12.54	71.24	26.82	62.73	136.18
2001	186.70	97.30	231.35	52.70	37.29	7.63	7.35	5.85	53.55	111.32	153.16	117.26
2002	66.51	105.60	191.73	152.28	28.40	12.23	14.23	6.83	28.00	152.00	114.05	135.14
2003	75.67	100.07	156.54	77.81	25.71	18.80	7.21	11.41	38.91	90.66	97.71	117.74
2004	65.33	72.33	101.96	77.16	35.14	9.16	15.45	10.38	28.53	121.39	148.97	124.04
2005	84.99	88.95	213.24	95.71	22.70	6.49	7.47	6.99	40.73	148.29	51.15	144.26
2006	104.17	123.11	257.92	85.78	17.04	14.65	10.63	8.45	52.45	95.63	102.33	139.62
2007	107.34	48.47	208.62	125.54	34.60	5.86	12.40	13.67	25.96	131.30	132.95	100.31
2008	123.97	158.90	176.51	96.38	39.82	16.84	7.18	17.84	53.33	137.90	102.93	58.75
2009	204.94	134.00	194.83	143.11	48.89	11.06	9.37	8.02	30.79	123.49	143.19	142.07
2010	82.02	148.96	171.29	80.24	55.15	16.65	16.10	7.57	45.86	109.53	114.29	130.11
2011	104.32	118.82	196.33	137.28	20.60	7.69	11.52	8.79	50.00	106.05	88.82	76.73
2012	98.62	96.63	73.38	160.15	27.23	7.72	7.64	8.49	29.31	106.49	87.18	84.63
2013	69.79	112.45	160.72	59.37	43.23	17.24	11.23	27.95	35.62	130.96	60.78	88.67
2014	67.38	78.15	201.21	86.75	53.62	9.50	8.38	8.24	24.21	71.45	86.85	82.14
2015	121.76	97.35	159.72	81.81	46.08	9.03	13.03	8.13	30.72	51.07	80.77	62.34
2016	97.34	87.10	164.65	75.31	18.12	12.05	9.70	7.66	33.38	83.90	38.43	104.86
2017	128.85	111.73	207.50	106.37	61.86	27.40	8.69	36.22	28.10	118.11	85.84	155.56
2018	100.93	143.63	137.43	96.44	58.16	15.38	8.83	8.09	24.01	113.00	179.81	117.82
2019	74.22	76.42	199.16	66.23	30.66	9.04	13.41	7.46	45.28	73.87	80.47	146.46
2020	98.86	67.29	98.09	65.67	24.62	10.24	19.86	12.04	63.67	101.30	53.85	288.27
2021	81.94	76.71	220.81	80.12	17.37	19.12	11.85	21.30	28.13	135.18	142.22	78.84
2022	119.80	133.88	127.82	157.04	47.54	45.33	23.80	19.64	49.66	82.28	30.06	93.53
2023	225.60	95.87	261.98	120.77	30.64	5.87	8.45	10.63	26.82	130.86	64.98	196.07

Anexo 3: Punto de control meteorológico Promedio mensual de precipitaciones, 1994 - 2023

Mes Año	ene	Feb	mar	abr	May	jun	Jul	ago	Sep	oct	nov	Dic
1994	176.60	137.16	164.73	177.74	40.53	21.94	14.47	12.22	27.08	89.96	113.98	141.49
1995	75.06	123.07	138.38	84.19	40.23	19.52	28.82	17.52	35.13	109.96	118.56	134.16
1996	140.62	146.88	198.04	117.69	32.49	24.59	14.06	29.39	26.50	132.33	84.98	49.63
1997	126.59	146.05	75.22	96.02	23.67	25.10	12.76	12.21	33.62	93.35	106.22	173.71
1998	114.77	159.68	180.64	131.41	57.93	15.74	12.16	11.03	45.86	150.84	82.96	96.83
1999	174.84	259.70	120.43	62.58	51.28	64.35	19.24	15.82	103.44	44.71	115.47	163.54
2000	79.73	168.79	182.44	93.04	54.11	48.52	18.84	22.21	70.80	26.63	63.62	150.63
2001	248.13	97.62	245.59	54.82	46.63	17.93	15.63	9.41	52.94	110.59	159.35	124.86
2002	82.67	105.28	197.27	150.52	36.25	29.57	29.83	10.76	30.10	166.05	121.80	155.64
2003	91.12	100.06	138.66	79.94	32.09	42.35	14.17	17.65	42.14	92.68	103.38	123.63
2004	79.73	76.55	92.83	78.89	51.36	20.91	31.35	16.73	29.35	118.29	149.36	140.45
2005	97.13	83.53	212.84	105.14	32.04	15.47	12.98	11.67	39.76	156.16	51.14	146.07
2006	120.86	120.78	256.21	92.35	20.57	31.23	19.67	13.51	55.29	105.46	103.65	154.14
2007	136.16	49.60	197.20	133.91	46.75	14.10	23.00	18.72	27.55	144.30	143.63	107.39
2008	169.48	158.02	160.82	113.17	48.59	39.95	15.21	28.75	47.39	151.75	114.07	64.55
2009	246.11	140.38	199.54	151.01	59.39	25.78	19.60	12.27	29.84	132.73	161.57	156.89
2010	99.59	154.40	168.27	83.29	58.62	44.79	31.54	11.51	49.46	116.28	127.93	143.47
2011	130.81	120.79	185.74	145.58	28.44	17.63	24.20	13.82	47.08	106.56	98.14	83.07
2012	119.07	95.55	66.90	186.78	36.22	17.74	15.87	13.19	29.40	117.76	92.95	92.25
2013	88.26	114.71	151.43	67.73	55.67	37.29	26.60	37.39	35.94	124.26	66.04	97.05
2014	85.67	82.64	195.63	92.45	64.09	21.74	17.63	14.45	24.06	71.73	88.08	86.84
2015	157.49	102.43	152.81	86.19	58.48	20.56	28.00	13.17	32.39	51.55	85.43	64.27
2016	119.53	90.90	156.00	87.57	24.76	27.00	19.61	12.41	33.35	85.48	40.77	118.64
2017	165.75	114.55	195.61	111.04	87.71	62.65	18.32	58.27	27.10	120.75	99.23	165.18
2018	130.22	144.01	132.78	102.58	74.27	35.01	18.63	13.10	23.55	119.51	183.19	122.39
2019	88.77	82.51	186.42	69.94	43.21	20.78	28.42	12.10	46.02	74.66	85.47	155.13
2020	129.64	67.96	91.92	70.97	31.09	20.50	39.05	17.43	61.36	105.32	59.62	310.47
2021	102.25	76.53	199.78	89.86	24.87	39.73	25.00	34.13	28.37	142.81	152.27	84.07
2022	146.66	138.21	116.75	165.78	64.46	112.70	52.88	30.97	45.49	76.65	30.72	100.00
2023	279.59	97.77	242.93	128.48	40.70	13.42	17.83	16.79	27.57	130.93	72.94	208.39

Anexo 4: Punto de control meteorológico Promedio mensual de precipitaciones, 1994 - 2023

Mes Año	ene	Feb	mar	abr	may	jun	Jul	ago	Sep	oct	nov	Dic
1994	157.15	143.43	187.81	154.40	32.81	20.55	12.56	11.59	31.69	99.44	124.07	134.67
1995	72.21	119.72	128.66	95.93	39.89	18.23	25.30	16.93	31.67	96.50	123.20	148.93
1996	135.99	155.40	175.59	105.06	47.68	22.81	12.26	16.46	26.21	159.32	69.24	47.88
1997	105.35	152.43	71.62	100.08	23.13	23.07	11.17	10.94	33.33	105.01	116.06	192.70
1998	98.56	163.02	177.57	135.69	64.27	14.44	10.65	13.29	46.38	133.62	80.47	102.04
1999	154.55	265.54	112.09	63.42	49.91	62.01	17.07	14.27	101.15	50.79	110.60	169.72
2000	72.72	174.62	186.17	99.15	56.27	42.75	16.50	20.04	73.38	27.82	64.84	148.02
2001	235.55	103.55	247.86	56.28	45.10	16.71	13.82	8.66	54.00	115.01	155.54	123.34
2002	75.45	103.97	196.32	158.25	34.69	26.82	25.97	10.01	29.10	169.56	115.26	152.57
2003	86.75	100.57	149.45	82.31	33.01	39.83	12.77	16.30	40.02	96.80	98.10	129.28
2004	77.82	78.35	99.32	80.85	47.40	19.37	27.46	15.63	28.03	119.51	150.83	146.32
2005	96.45	87.83	207.54	99.84	29.23	14.39	14.27	10.71	39.29	166.67	51.14	154.08
2006	118.21	123.50	259.98	97.67	20.74	25.95	18.69	12.52	53.19	96.96	105.69	147.99
2007	122.51	50.29	204.04	136.92	40.90	13.00	20.27	18.89	27.10	154.24	146.19	109.37
2008	146.21	161.74	171.57	109.12	44.44	36.98	13.45	26.91	50.79	152.43	110.66	65.31
2009	230.08	143.34	209.79	157.40	55.20	23.00	17.42	9.88	30.07	136.65	156.13	166.15
2010	92.64	159.57	174.75	84.08	61.98	43.86	26.83	12.81	45.52	120.00	124.46	145.32
2011	127.43	122.18	189.51	159.91	26.51	16.28	22.41	12.68	47.48	113.02	95.30	84.04
2012	113.33	95.55	69.01	175.60	35.49	16.30	13.85	12.10	29.35	113.63	93.95	89.65
2013	81.06	116.64	155.74	62.13	57.14	37.23	21.77	39.39	34.99	132.59	61.45	92.09
2014	80.45	82.15	198.40	98.74	73.22	20.13	15.09	12.53	23.75	73.18	91.18	87.66
2015	146.01	100.82	163.22	86.08	58.33	19.18	23.20	11.39	30.35	52.21	88.89	63.38
2016	112.78	91.25	157.10	81.62	23.31	26.81	17.61	10.72	31.31	89.08	41.07	111.52
2017	149.12	111.00	204.01	112.89	84.56	57.72	15.70	52.63	28.85	129.73	93.70	168.41
2018	117.16	147.02	135.55	104.76	67.66	32.94	15.97	11.33	22.80	118.72	183.42	123.09
2019	82.65	79.50	199.24	71.09	44.28	19.69	24.98	10.52	45.93	74.94	83.02	159.42
2020	117.26	68.46	93.10	67.81	29.71	20.15	32.51	16.07	61.97	109.29	58.98	315.65
2021	94.53	75.08	215.26	90.42	23.58	37.59	21.48	29.08	28.02	144.30	154.65	83.47
2022	142.71	137.51	125.11	165.89	56.97	93.35	43.80	26.65	48.46	84.51	30.98	99.33
2023	267.28	97.58	257.84	129.98	42.21	12.52	15.29	15.02	26.28	143.90	70.21	214.97

Anexo 5: Punto de control meteorológico 5 Promedio mensual de precipitaciones, 1994 - 2023

Mes Año	ene	Feb	mar	abr	may	jun	Jul	ago	sep	oct	nov	Dic
1994	142.03	129.06	183.38	179.84	32.44	9.36	7.48	7.78	29.61	85.77	107.30	115.56
1995	74.39	118.10	136.43	73.76	32.74	8.34	15.39	11.23	38.34	93.78	100.25	143.29
1996	104.17	151.68	199.51	89.66	25.11	7.80	7.28	17.01	29.97	123.93	73.02	41.21
1997	95.71	126.20	80.99	92.83	18.29	10.76	6.43	8.00	32.65	94.51	95.19	157.94
1998	77.34	153.56	202.91	141.70	40.80	6.27	6.02	6.97	53.89	132.81	74.73	86.39
1999	133.13	231.92	100.06	46.36	45.70	30.76	9.76	9.69	101.87	46.67	99.35	155.35
2000	66.15	164.50	191.42	86.40	44.53	20.82	9.87	13.39	67.66	26.46	63.29	136.03
2001	198.50	95.47	232.51	51.63	35.60	7.37	7.99	5.89	52.63	107.50	153.73	110.86
2002	69.42	104.21	192.51	138.62	27.09	11.83	15.62	6.82	29.57	151.81	119.95	138.26
2003	73.69	102.40	145.63	74.95	24.22	17.87	8.40	11.46	40.99	86.98	96.80	114.65
2004	66.87	74.33	96.41	72.74	33.27	8.91	16.78	10.34	28.68	116.11	147.71	120.39
2005	79.96	86.61	205.53	96.13	22.54	6.26	7.37	7.06	40.93	147.66	50.43	139.70
2006	102.71	120.14	264.41	87.79	15.81	12.71	11.54	8.39	51.90	98.77	101.04	137.13
2007	111.24	49.99	200.71	125.05	33.99	5.72	13.44	12.34	26.14	130.79	137.32	101.04
2008	124.95	161.62	165.11	101.59	40.66	16.37	7.75	17.86	48.17	144.21	108.75	58.49
2009	204.05	137.14	200.88	146.32	50.19	10.35	10.08	7.97	29.65	123.90	157.53	137.83
2010	80.37	151.89	177.99	81.46	60.16	18.31	17.36	7.71	48.40	109.61	114.93	132.54
2011	105.02	119.92	195.24	127.95	21.53	8.65	12.52	8.86	49.02	97.27	92.92	77.79
2012	97.71	100.26	71.63	180.41	27.00	7.56	8.37	8.56	28.52	106.44	92.88	89.68
2013	71.89	111.62	159.90	58.70	43.34	15.68	12.56	26.33	35.16	125.44	68.33	88.66
2014	69.93	79.75	196.09	90.21	50.57	9.29	9.60	8.67	24.35	72.12	86.00	80.99
2015	127.07	98.41	159.96	82.80	46.76	8.76	14.14	8.54	31.48	51.24	82.16	62.13
2016	100.41	85.07	157.85	78.50	19.07	12.34	10.62	8.05	34.99	78.72	39.75	109.07
2017	135.11	115.02	206.30	107.50	66.74	26.18	9.93	36.73	26.91	114.03	96.31	153.59
2018	103.58	143.84	134.93	98.08	56.26	14.79	10.09	8.49	23.38	113.12	185.61	115.35
2019	73.75	79.30	193.13	67.65	32.76	8.63	14.95	7.79	45.57	74.59	82.17	146.11
2020	108.43	66.04	97.10	67.14	23.94	10.40	21.69	11.62	61.46	103.65	55.65	288.42
2021	83.91	78.22	210.53	82.28	17.13	15.79	13.51	21.07	28.60	136.61	144.82	78.42
2022	121.47	131.33	123.89	165.28	48.88	49.06	27.06	20.91	48.30	78.63	30.36	94.16
2023	218.51	91.70	250.10	121.09	29.26	5.69	9.65	10.83	27.57	124.19	72.55	191.12

Anexo 6: Promedio mensual de precipitaciones SENAMHI CELENDÍN, 1994 - 2023

Mes Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1994	122	139.8	203.3	158.2	37.8	0	10.3	0.3	21	82.2	81.3	115.3
1995	13.5	100.7	124.8	105.8	65.5	3.4	12.8	0	11	57.4	17.2	132.6
1996	69.5	104.5	136.1	74.5	28	0	0.5	0	24.4	176.3	62.6	17.2
1997	51.9	109.2	74.2	168.1	15.9	11.2	0	0	33.5	89.2	119.4	154.1
1998	74.4	156.1	242.4	169.5	49.3	0	0.7	0	18.3	174.3	91.8	44.8
1999	177.5	319.1	100.4	13	54.1	49.2	5.8	6.6	107.8	53.6	130.2	241.9
2000	107.7	224	220.6	112.4	45	54.8	1.9	9.8	60.7	5.7	53.4	160.4
2001	249.5	134.9	445	50.6	39.6	1.3	5.4	0	32.2	104.3	162.2	97
2002	57.9	90.5	289.1	172.6	27.9	1.9	29.3	0	2	208.6	122	151.8
2003	48.7	71.1	158.6	92.7	27.3	21.2	1.7	0.9	39.5	80.9	95.8	116.4
2004	51.3	63.5	101.7	106.6	32.9	0.0	20.5	2.5	50.3	94.4	225.4	143.2
2005	79.3	103.4	236.5	69.3	16.5	0.0	0.0	0.0	39.0	250.3	26.6	166.7
2006	98.5	136.1	349.8	62.4	3.4	11.8	9.1	3.9	SD	118.3	123.1	144.6
2007	91.6	17.6	275.8	122.2	27.6	3.0	6.0	9.9	20.0	215.3	152.9	129.0
2008	98.5	180.2	98.8	98.7	48.5	28.0	11.0	21.0	21.0	132.0	142.5	38.8
2009	212.1	85.1	223.5	150.9	71.4	5.8	6.7	0.0	38.2	98.7	139.5	116.0
2010	84.7	200.4	176.3	61.8	69.9	2.8	18.7	3.9	39.0	60.4	123.0	135.1
2011	62.8	88.8	193.3	125.3	18.8	3.6	15.4	4.8	40.5	96.2	113.2	175.2
2012	218.1	113.5	128.1	99.8	S/D	3.4	0.0	1.7	0.3	142.0	208.1	S/D
2013	76.0	58.9	167.1	66.7	63.0	21.1	16.5	33.2	4.7	166.5	35.3	116.8
2014	78.1	146.5	156.8	84.0	126.8	1.3	0.3	4.4	33.2	70.0	62.2	80.9
2015	179.3	28.9	230.7	114.2	77.3	5.5	3.1	0.0	0.6	35.7	101.6	40.0
2016	108.4	170.5	130.8	42.9	6.7	2.1	1.8	2.0	37.1	134.0	19.4	215.1
2017	240.0	93.9	300.2	169.7	81.1	16.2	1.1	16.9	20.7	100.0	76.0	171.2
2018	150.6	110.0	145.3	62.5	62.0	25.4	0.0	2.1	53.2	123.1	235.4	90.0
2019	120.8	146.7	229.9	108.9	34.2	2.4	9.6	2.5	4.7	142.2	137.1	112.2
2020	75.1	51.2	S/D	S/D	S/D	S/D	38.2	0.6	41.5	33.7	80.3	255.2
2021	103.4	39.5	250.0	S/D	20.2	33.3	6.3	21.9	43.1	144.0	230.6	150.4
2022	151.0	180.6	259.0	70.2	23.2	50.4	22.5	9.4	42.8	123.7	24.8	67.8
2023	148.2	139.8	193.6	109.3	58.3	7.8	1.4	0.4	10.5	76.0	109.7	222.6

Anexo 7: Extracción de muestras y determinación de estructura de unidades de suelos



Anexo 8: Toma de puntos con GPS



Anexo 9: registro y verificación de coberturas vegetales



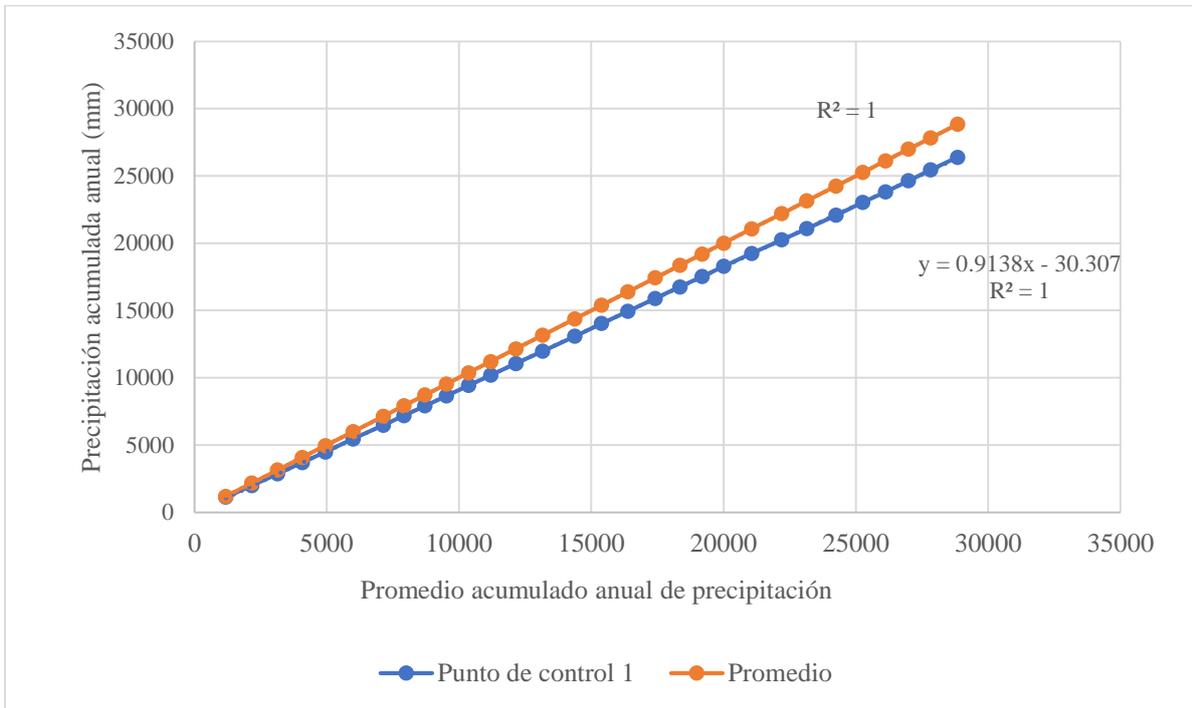
Anexo 10: Determinación de textura (método de Bouyoucos)



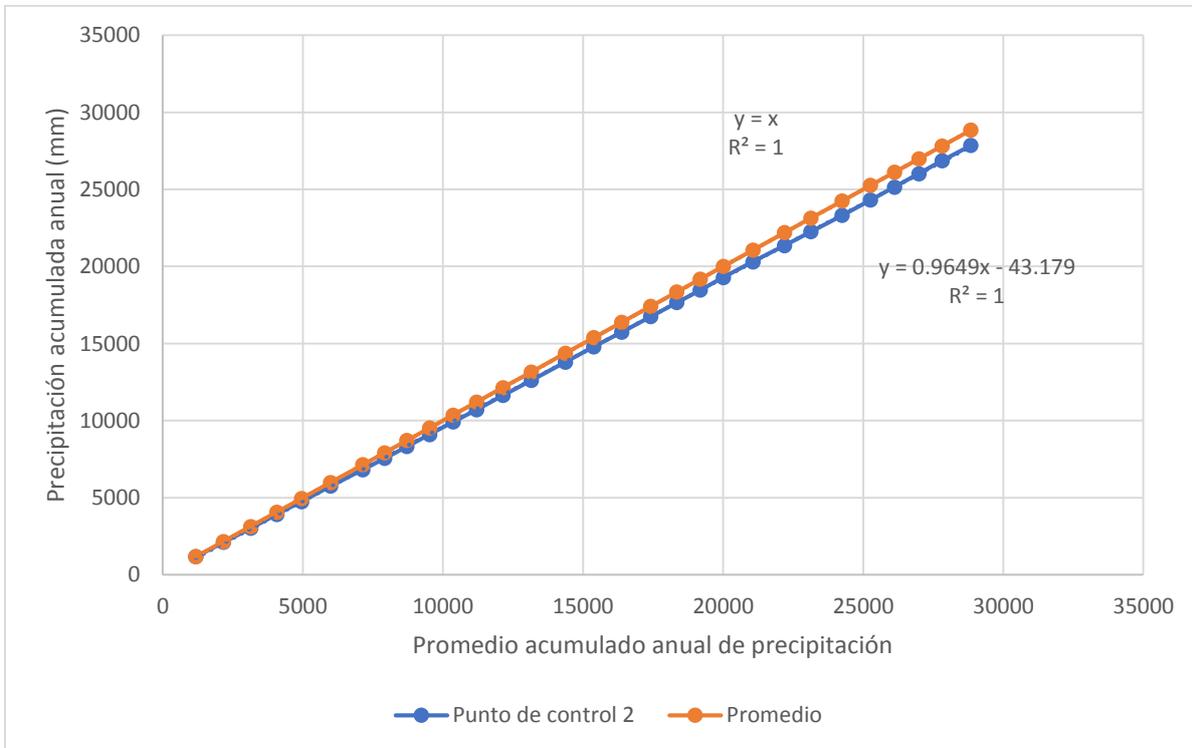
Anexo 11: determinación de materia orgánica



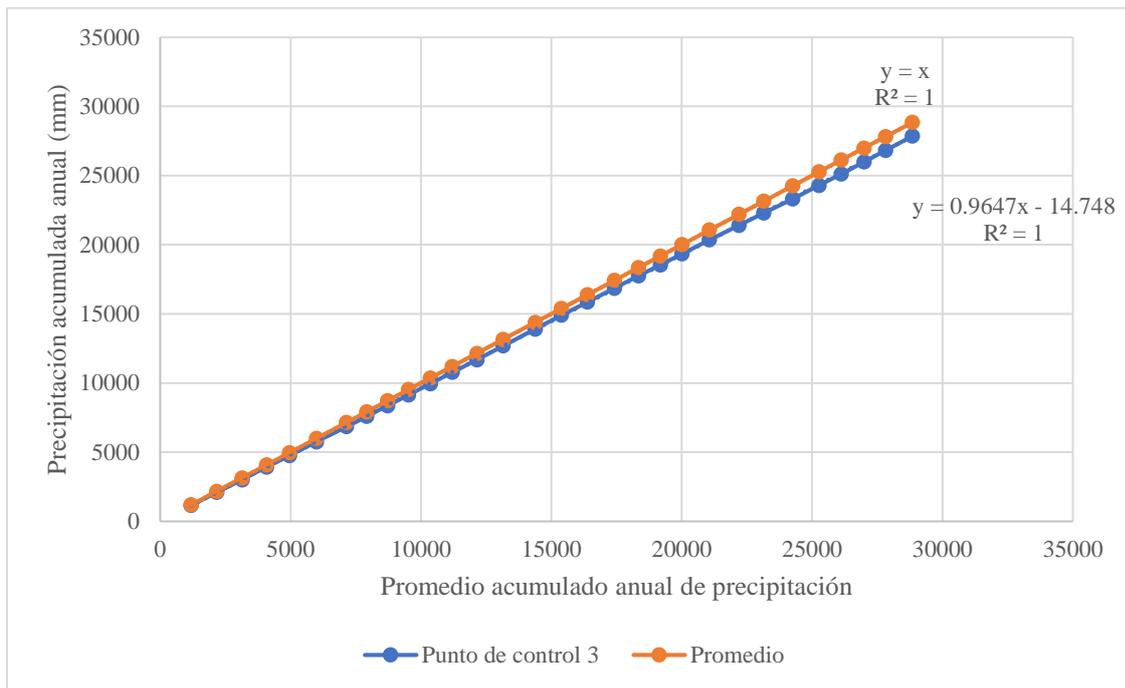
Anexo 12: Análisis de curva de doble masa Punto de control meteorológico 1



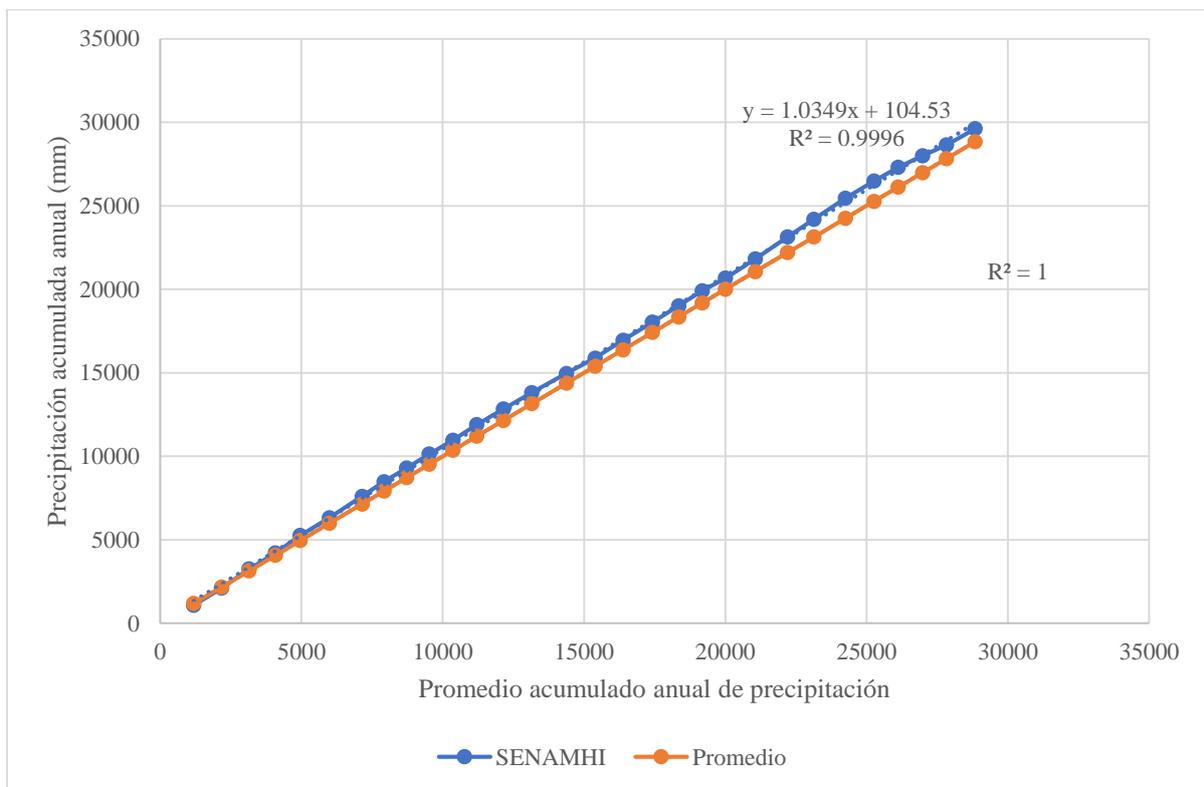
Anexo 13: Análisis de curva de doble masa Punto de control meteorológico 2



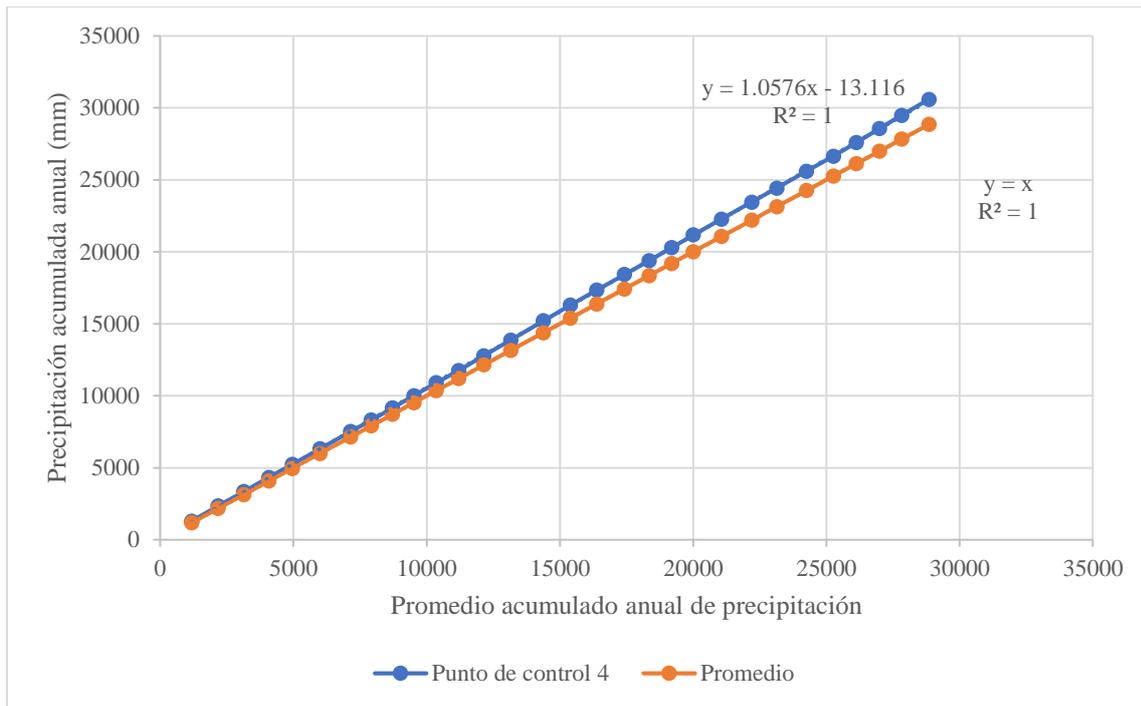
Anexo 14: Análisis de curva de doble masa Punto de control meteorológico 3



Anexo 15: Análisis de curva de doble masa SENAMHI Celendín



Anexo 16: Análisis de curva de doble masa Punto de control meteorológico 4



Anexo 17: Análisis de curva de doble masa Punto de control meteorológico 5

