

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Efecto de los cambios de uso de suelo en el aumento de la erosión
hídrica a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la
zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas
Namballe

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR

Luis Fernando Calle Vidal

ASESOR

Francisco Alejandro Alcántara Boza

Lima, Perú

2021

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 023 - 2021/UCSS/FIA/DI

Siendo las 10:00 a. m. del día 10 de agosto de 2021 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- | | |
|---------------------------------------|-----------------|
| 1. Roger Manuel Mestas Valero | presidente |
| 2. Maximiliana Irene Castro Medina | primer Miembro |
| 3. José Miguel Montemayor Mantilla | segundo Miembro |
| 4. Francisco Alejandro Alcántara Boza | asesor |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada **Efecto de los cambios de uso de suelo en el aumento erosión hídrica a través la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe, 2020** que presenta el bachiller en Ciencias Ambientales, **Luis Fernando Calle Vidal** cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR

DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **MUY BUENA** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare **EXPEDITA** para conferirle el **TÍTULO de INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 10 de agosto de 2021.



Roger Manuel Mestas Valero
PRESIDENTE



Maximiliana Irene Castro Medina
1° MIEMBRO



José Miguel Montemayor Mantilla
2° MIEMBRO



Francisco Alejandro Alcántara Boza
ASESOR

DEDICATORIA

A la belleza natural del Santuario Nacional
Tabaconas Namballe.

Que este trabajo de investigación sea una
contribución en favor de mantener la esperanza
de promover su conservación.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento profundo a mi madre Lily Vidal Brito y mis hermanas por hacer de mi vida cotidiana sencilla y sin complicaciones.

A todos los que contribuyeron en hacer que este proceso de investigación sea posible en especial a las comunidades aledañas al Santuario Nacional Tabaconas Namballe y su visión de conservación de los recursos naturales.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Índice General.....	V
Índice de tablas	IX
Índice de figuras	X
Índice de apéndices.....	XII
Resumen.....	XIII
Abstract.....	XIV
Introducción.....	1
OBJETIVOS	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Bases teóricas especializadas.....	9
1.2.1. Erosión hídrica.....	9
Tipos de erosión hídrica	9
a. Erosión por salpicadura.....	9
b. Erosión laminar.....	9
c. Erosión por surcos	10
d. Erosión en cárcavas	10
e. Erosión en cursos permanentes	10
Etapas de la erosión hídrica	10
a. Etapa de desprendimiento	10
b. Etapa de transporte	11
c. Etapa de sedimentación.....	11
Las actividades humanas y su vinculación con la erosión hídrica	11
a. Incineración de la cobertura vegetal	11
b. Ganadería.....	12

c. Deforestación	12
d. Agricultura.....	12
1.2.2. Cuenca hidrográfica.....	12
1.2.3. La ecuación universal de pérdida de suelos (EUPS)	13
Factor (R) erosividad de lluvias.....	14
Factor (K) o índice de erodabilidad.....	16
Longitud y gradiente de la pendiente o factor topográfico (LS)	16
Factor (C) de cobertura vegetal	17
Factor (P) de prácticas de conservación	18
1.2.4. Ordenamiento territorial	18
Zonificación Ecológica Económica (ZEE).....	18
Estudios Especializados (EE)	18
Diagnóstico Integrado de Territorio (DIT).....	19
Plan de Ordenamiento Territorial (POT).....	19
1.2.5. Sistema de Información Geográfica (SIG)	19
Modelo de Elevación Digital.....	19
Base de datos raster	20
Base de datos vectorial	20
Base de datos alfanumérica	20
1.2.6. Área Natural Protegida	20
Zona de Amortiguamiento (ZA).....	21
Plan Maestro	21
Zonificación del Área Natural Protegida.....	21
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.1. Diseño de la investigación	22
2.2. Lugar y fecha	22
2.3. Características generales de la zona de estudio	24
2.3.1. Ecología	24
2.3.2. Geografía	24
2.3.3. Economía	24
2.4. Materiales	24

2.5. Población y muestra.....	25
2.6. Descripción de la investigación	25
Recopilación de información primaria	26
a. Precipitación	26
b. Modelo de Elevación Digital (MED)	26
c. Edafología... ..	27
d. Cobertura Vegetal.....	29
Construcción de factores geoespaciales	29
a. Factor de Erosividad o factor “R”	30
b. Cálculo del Factor de erodabilidad o factor “K”	34
c. Cálculo de longitud y gradiente de la pendiente o factor topográfico (LS).....	35
d. Cálculo del factor de Cobertura Vegetal o factor “C”	36
e. Factor de prácticas de conservación de suelos o factor “P”.....	36
Estimación de tasas de erosión y análisis de cambio.....	37
Análisis de consistencia de resultados.....	37
2.7. Identificación de variables y su mensuración.....	38
2.8. Análisis de datos	38
CAPÍTULO III: RESULTADOS	39
3.1. Determinación de los factores de erosión hídrica.....	39
3.1.1. Determinación del factor de erosividad.....	39
Análisis de consistencia de precipitaciones.....	39
a. Análisis gráfico	39
b. Análisis doble de masa	42
c. Análisis estadístico de saltos y tendencias.....	44
Cálculo del Factor de Erosividad o Factor “R”	48
3.1.2. Determinación del factor de erodabilidad.....	51
3.1.3. Determinación del factor de cobertura vegetal.....	54
Estimación del Factor de Cobertura Vegetal con cambios de uso de suelo	54
Estimación del Factor de cobertura vegetal sin cambios de uso del suelo	56
Análisis de cambio de la Cobertura Vegetal	58
3.1.4. Determinación del factor topográfico.....	59

Pendientes.....	59
Cálculo del factor topográfico	61
3.2. Determinación de la erosión hídrica efectiva	63
3.3. Estimación de la erosión hídrica potencial	65
3.4. Análisis del cambio en la erosión hídrica potencial y efectiva.....	67
3.5. Evaluación de consistencia de resultados	67
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES	83
4.1. Determinación de los factores de erosión hídrica.....	83
4.2. Erosión hídrica efectiva	85
4.3. Erosión hídrica potencial	85
4.4. Análisis de cambios en las tasas de erosión hídrica	86
4.5. Consistencia de resultados.....	86
4.5.1. Mecanismos de control de la erosión hídrica	87
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	89
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS	91
TERMINOLOGÍA.....	96
APÉNDICES	98

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Niveles de erosión establecidos por la FAO.....	13
Tabla 2. Clasificación del IMF para Latinoamérica	15
Tabla 3. Estaciones meteorológicas con información de precipitación.....	26
Tabla 4. Datos generales del Modelo de Elevación Digital	26
Tabla 5. Información edafológica por puntos de muestreo de la zona de amortiguamiento del SNTN.....	27
Tabla 6. Clase de permeabilidad del suelo según tipo de textura del suelo	34
Tabla 7. Clase de estructura del suelo según descripción.....	34
Tabla 8. Factor C según tipo de cobertura vegetal	36
Tabla 9. Factor P según tipo de práctica de cultivo en función a la pendiente.....	37
Tabla 10. Variables de estudio y su metodología de determinación.	38
Tabla 11. Índice de correlación entre estaciones meteorológicas.	42
Tabla 12. Prueba T de Student para las medias por estación meteorológica.....	45
Tabla 13. Prueba F de Fischer para la desviación estándar de las estaciones meteorológicas.....	46
Tabla 14. Análisis de tendencia de la media por estación meteorológica	46
Tabla 15. Análisis de tendencia para la desviación estándar por estación meteorológica	47
Tabla 16. Cálculo del factor de erodabilidad por punto de muestreo de suelos	51
Tabla 17. Factor de Cobertura Vegetal con cambios de uso de suelo	54
Tabla 18. Factor de Cobertura Vegetal sin cambios de uso de suelo	56
Tabla 19. Variación de las pendientes en la zona de amortiguamiento del SNTN.....	59
Tabla 20. Variación del factor topográfico por área en la zona de amortiguamiento del SNTN.....	61
Tabla 21. Prueba de T de Student para la erosión hídrica potencial y efectiva.....	67
Tabla 22. Caracterización de los puntos de muestreo para el análisis de consistencia de erosión hídrica	69

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Mapa de ubicación de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas-Namballe	23
<i>Figura 2.</i> Flujograma metodológico de la investigación.....	25
<i>Figura 3.</i> Distribución de puntos de muestreo de suelos en la zona de amortiguamiento del SNTN.....	28
<i>Figura 4.</i> Diagrama metodológico de construcción de factores de erosión hídrica.	29
<i>Figura 5.</i> Análisis de precipitación de la estación meteorológica Tabaconas 1978-2010.....	39
<i>Figura 6.</i> Análisis de precipitación de la estación meteorológica San Ignacio 1978-2010.....	40
<i>Figura 7.</i> Análisis de precipitación de la estación meteorológica Chirinos 1978-2010....	40
<i>Figura 8.</i> Análisis de precipitación de la estación meteorológica Huancabamba 1978-2010.....	41
<i>Figura 9.</i> Precipitación histórica de la estación meteorológica Sondorillo 1978-2010. ...	41
<i>Figura 10.</i> Precipitación histórica de la estación meteorológica Salala 1978-2010.	42
<i>Figura 11.</i> Análisis de doble masa con relación al promedio multianual según estaciones.....	43
<i>Figura 12.</i> Análisis doble de masa con Estación Chirinos como referencia de estimación.	44
<i>Figura 13.</i> Precipitación media mensual periodo 1986-2010 por estación meteorológica.	47
<i>Figura 14.</i> Mapa de distribución del IMF en la Zona de Amortiguamiento del SNTN.....	48
<i>Figura 15.</i> Mapa de Erosividad o Factor “R” en la Zona de Amortiguamiento del SNTN.....	49
<i>Figura 16.</i> Distribución del factor de erosividad por distritito de la zona de amortiguamiento del SNTN.....	50
<i>Figura 17.</i> Mapa del factor de erodabilidad de la Zona de Amortiguamiento del SNTN.....	52

<i>Figura 18.</i> Distribución del factor de erodabilidad por distrito en la zona de amortiguamiento del SNTN.....	53
<i>Figura 19.</i> Mapa de distribución del Factor de Cobertura Vegetal con cambios de uso de suelo en la zona de amortiguamiento del SNTN.	55
<i>Figura 20.</i> Mapa de distribución del Factor de Cobertura Vegetal sin cambios de uso de suelo en la zona de amortiguamiento del SNTN.....	57
<i>Figura 21.</i> Comparación de los promedios y máximos en la variación de cobertura vegetal.....	58
<i>Figura 22.</i> Mapa de pendientes de la zona de amortiguamiento del SNTN.	60
<i>Figura 23.</i> Mapa de distribución del factor topográfico en la zona de amortiguamiento del SNTN.....	62
<i>Figura 24.</i> Distribución de la erosión hídrica efectiva aproximada por rangos.....	63
<i>Figura 25.</i> Mapa de erosión hídrica efectiva en la zona de amortiguamiento del SNTN.....	64
<i>Figura 26.</i> Distribución de la erosión hídrica potencial aproximada por rangos.....	65
<i>Figura 27.</i> Mapa de erosión hídrica efectiva en la zona de amortiguamiento del SNTN. ..	66
<i>Figura 28.</i> Mapa de recorrido realizado en la zona de amortiguamiento del SNTN	68
<i>Figura 29.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-01.....	70
<i>Figura 30.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-02.....	71
<i>Figura 31.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-03.....	71
<i>Figura 32.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-04.....	72
<i>Figura 33.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-05.....	73
<i>Figura 34.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-06.....	73
<i>Figura 35.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-07.....	74
<i>Figura 36.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-08.....	75
<i>Figura 37.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-09.....	75
<i>Figura 38.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-10.....	76
<i>Figura 39.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-11.....	77
<i>Figura 40.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-12.....	77
<i>Figura 41.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-13.....	78
<i>Figura 43.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-15.....	79
<i>Figura 44.</i> Fotografía panorámica del punto de muestreo P-16.....	80

ÍNDICES DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Información histórica de precipitación por estación meteorológica (SENAHMI).	98
Apéndice 2. Subprocesos sin editar para determinar el factor de erosividad.....	104
Apéndice 3. Raster del factor de erodabilidad.....	106
Apéndice 4. Subprocesos para determinar el factor topográfico.....	107
Apéndice 5. Modelo de elevación digital de la zona de estudio.....	111

RESUMEN

La presente investigación se realizó en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas-Namballe con el objetivo de estimar la erosión hídrica en dos escenarios: cambios de uso de suelo (efectiva) y sin cambios de uso de suelo (potencial). Para ello, se determinó (1) el factor de erosividad vinculado a las precipitaciones, (2) el factor de erodabilidad usando la información edafológica de la zona, (3) el factor topográfico vinculado a la longitud e inclinación de la pendiente, (4) el factor de cobertura vegetal vinculado a los escenarios propuestos cuyo insumo fueron el mapa de cobertura vegetal actual (con cambios de uso de suelo) y el mapa de capacidad de uso mayor de suelos (sin cambios de uso de suelo). Los factores estimados se integrados a través del modelo propuesto por la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS) a través del software ArcGis 10.7. determinando que para el escenario de cambios de uso de suelo presenta una tasa de erosión hídrica de $35.92 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y para el escenario sin cambios de uso de suelo $1.53 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. A través de una validación usando el módulo de estadísticos zonales del software ArcGis 10.7. y de l prueba de T de Student se verificó que el escenario que contempla cambios de uso de suelo presenta diferencias significativas frente al escenario que presenta dichos cambios, comprobándose que este incremento se debe principalmente al incremento de la frontera agropecuaria vinculado a la quema de la cobertura vegetal.

Palabras clave: Erosión hídrica, quema de bosques, cambios de uso de suelo, bosques de neblina.

ABSTRACT

This research was conducted in the buffer zone of the National Shrine Tabaconas-Namballe with the aim of estimating water erosion in two scenarios: changes in land use (effective) and without changes in land use (potential). To this end, (1) the erosivity factor linked to rainfall was determined, (2) the erodability factor using the soil information of the area, (3) the topographic factor linked to the length and inclination of the slope, (4) the plant coverage factor linked to the proposed scenarios whose inputs were the current plant cover map (with changes in land use) and the map of capacity for greater use of soils (without changes in land use). Estimated factors are integrated through the model proposed by the Universal Soil Loss Equation (EUPS) through ArcGis 10.7 software determining that for the scenario of land use changes it has a water erosion rate of $35.92 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ and for the scenario without land use changes $1.53 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. Through validation using the Zonal Statistics module of ArcGis 10.7 software and student's T-test verified that the scenario for changes in land use has significant differences from the scenario of these changes, compromising that this increase is mainly due to the increase in the agricultural border linked to the burning of plant cover.

Keywords: Water Erosión, forest burning, land use changes, mist forests.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es un fenómeno natural que se genera cuando la corriente de agua superficial traslada partículas del suelo que se separan por el impacto de la precipitación o la escorrentía (Food and Agriculture Organization [FAO], 2016) originando la pérdida de suelo. Esta situación se va intensificando por las actividades antrópicas como agricultura insostenible, pérdida de cobertura vegetal por deforestación y sobrepastoreo que originan que las condiciones del suelo ya no sean propicias para producción, generando su abandono (Quispe, 2018). En ese sentido, este fenómeno estaría afectando a 1960 millones de hectáreas, donde el 50 % de esta área estaría severamente erosionado (Osman, 2013, citado por Jumbo, 2018, p.1).

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (2017a), publicó un estudio en el cuál estimó la erosión hídrica en el Perú tomando como referencia las 14 cuencas hidrográficas para el periodo de 1981 a 2014. Se encontró que la cuenca del Marañón una tasa de erosión en promedio de $162 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, valor calificado como alto. La explicación consiste en que predominan pendientes empinadas y sólo 2.4 % representa el territorio plano, que sumado a una tasa de precipitación moderada generan condiciones naturales para que este fenómeno se presente. Asimismo, es probable que la erosión hídrica se haya intensificado debido a la presencia de actividades relacionadas al cambio de uso de suelo como el sobrepastoreo, la deforestación como la quema de bosques tropicales y el incremento de la frontera agrícola (Gobierno Regional de Cajamarca [GRC], 2010).

El Gobierno Regional de Cajamarca [GRC] (2013), publicó los resultados del estudio de Zonificación Ecológica Económica para la región Cajamarca, donde detalla que el 26.44 % del suelo estaba en sobreuso debido a que el uso actual no correspondía con la clasificación de uso mayor; siendo una de las zonas el norte de la región, donde predomina ecosistemas de bosque de neblinas como páramos que proveen de servicios ecosistémicos como regulación hidrológica, almacenamiento de carbono y biodiversidad (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado [SERNANP], 2015).

En ese sentido, en 1988 se creó el Santuario Nacional Tabaconas Namballe con la finalidad de garantizar la conservación de los ecosistemas descritos y algunas especies en vías de extinción (SERNANP, 2015). Sin embargo, esta iniciativa no es suficiente; puesto que se conoce a través de su plan maestro, que la gestión del mismo está orientada a la descripción de la diversidad biológica y a garantizar la intangibilidad de estos ecosistemas, no considerando el control de la erosión que se estaría extendiendo por la zona de amortiguamiento; puesto que, se ha evidenciado una gestión limitada enfocada en la reforestación y conservación en bosques residuales, sistemas de agroforestería en desarrollo, café orgánico y una población desorientada que para extender la frontera agropecuaria quema bosques aumentando los efectos de la erosión hídrica (Llerena *et al.*, 2010).

Sin embargo, para que los organismos competentes (en la gestión de la zona de amortiguamiento) ejerzan planes de acción enfocados en el control de la erosión hídrica, se necesita información detallada sobre la cuantificación de la erosión hídrica de la zona que es escasa (Quispe, 2018), existiendo un cálculo a nivel de cuencas (SENAHMI, 2017a). En ese sentido, la presente investigación es una contribución técnica en la estimación de la erosión hídrica en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe en dos escenarios considerando como variable de cambio la variación de la cobertura vegetal (sin cambios de uso de suelo y con cambios de uso de suelo) para lo que se usó el modelo propuesto por la ecuación universal de pérdida de suelos: primero se determinaron los factores erosivos, luego se calcularon las tasas de pérdida de suelo en ambos escenarios y finalmente se propusieron estrategias para la reducción de la erosión hídrica.

Para lograr los objetivos planteados, la investigación se dividió en cuatro etapas, primero se realizó una recopilación de data primaria, luego se construyeron los factores geoespaciales para calcular las tasas de erosión en dos escenarios (sin cambios de suelo y con cambios de uso de suelo), seguidamente se realizó el análisis de cambio en ambos escenarios y por último se realizó una visita de campo a la zona de estudio para corroborar a nivel cualitativo los resultados en la zona de estudio.

OBJETIVOS

Objetivo General

Estimar la afectación la erosión hídrica originada por el cambio de uso de suelo de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe a través del modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.

Objetivos Específicos

- Determinar los factores de erosividad, erodabilidad, longitud y magnitud de la pendiente y la cobertura vegetal asociados a la erosión hídrica de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe.
- Estimar la erosión hídrica efectiva (con cambios de uso de suelo) de la zona de amortiguamiento del área natural protegida.
- Estimar la erosión hídrica potencial (sin cambios de uso de suelo) de la zona de amortiguamiento del área natural protegida.
- Realizar un análisis comparativo entre la estimación generada por la erosión hídrica potencial respecto a la erosión hídrica efectiva del área natural protegida.
- Realizar una evaluación de la consistencia de los resultados en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Ámbito Internacional

Jumbo (2018) verificó cómo influía el cambio de uso de suelo en la erosión hídrica de la sub-cuenca de Catamayo ubicada en Ecuador. El enfoque de la investigación fue cuantitativa con un alcance descriptivo-correlativo y con un diseño de investigación no experimental. A nivel metodológico realizó tres procesos: primero ejecutó un análisis multitemporal de la cobertura vegetal en los periodos de 1997, 2017 y 2037 usando imágenes satelitales (Landsat) que fueron procesadas por el módulo *Land Change Modeler* del software Idrisi Selva; luego realizó una estimación cualitativa de la erosión hídrica usando un modelamiento geoespacial que integró las variables asociadas a aspectos físicos, socio económicos y de conflicto de uso de suelo. Finalmente, para la estimación de la erosión hídrica cuantitativa usó la ecuación universal de pérdida de suelos con variables como la precipitación, suelos, pendientes y el análisis de cobertura vegetal realizado previamente a nivel multitemporal. Respecto al análisis estadístico realizó pruebas como el análisis de regresión lineal, el índice de Cramer'V, índice de Moran'I y coeficiente de Kappa con la finalidad de comparar ambos escenarios de estimación (cuantitativa – cualitativa). Las pruebas mencionadas fueron trabajadas mediante el el módulo *Crosstab* y *Regress* del software Idrisi Selva. Según los resultados más relevantes, determinó que, para el año 2037, la erosión hídrica de la zona de estudio ascendería a $407.53 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ considerado este valor como un tipo de erosión *muy fuerte* según la FAO; asimismo, en relación a las pruebas estadísticas para ambos escenarios tuvo una correlación lineal de 0.84, el índice de kappa tuvo 0.81 de corelación, el índice de Cramer tuvo 0.54 de corelación, siendo este valor considerado como bueno. El autor concluyó que el potencial erosivo fue causado por el cambio de uso de suelos y que los modelos de estimación presentan un grado de corelación alta, pudiéndose usar para este tipo de investigación.

D'Amario (2016) realizó la estimación del riesgo de erosión hídrica, la distribución espacial y el efecto de la cobertura vegetal en la cuenca del río Tunuyán ubicada en Argentina. El enfoque de la investigación fue cuantitativo, su alcance descriptivo y el diseño de investigación fue no experimental. A nivel metodológico aplicó el modelo de la ecuación universal de la pérdida de suelos (EUPS) que dividió en tres etapas donde primero recopiló la información relacionada con las variables como la precipitación, clasificación de suelos, modelo de elevación digital y cobertura vegetal, luego a través del software QGIS construyó los factores de erosividad, erodabilidad, factor topográfico y cobertura vegetal para finalmente integrarlo en un mapa de erosión hídrica de la zona de estudio. Los resultados estimaron una tasa de erosión promedio de $110 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y una pérdida máxima de $350 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que correspondía a suelos desnudos. La investigación concluyó que había una mayor cobertura vegetal en zonas donde las tasas de erosión eran menores y que las zonas donde se presentaban tasas de erosión considerables estaban afectadas por los cambios de uso de suelo.

Ámbito Nacional

Álvarez (2019) estimó la erosión hídrica a nivel multitemporal (2013 y 2017) en la subcuenca de Ichu ubicada en la región de Huancavelica, Perú. El enfoque de la investigación fue cuantitativo con un alcance descriptivo y un diseño de investigación no experimental. Para este estudio, utilizó la ecuación universal de pérdida de suelos en tres etapas que consistió en una etapa de pre campo donde recopiló la información de las variables como precipitación, suelos, cobertura vegetal y modelo de elevación digital, dicha información fue recolectada del estudio de mesozonificación ecológica-económica de la región Huancavelica y el SENAHEMI; luego realizó una etapa de campo de 24 días con la finalidad de validar la información recolectada y finalmente una etapa de gabinete donde realizó el procesamiento geoespacial de las variables para estimar la erosión hídrica en el software ArcGIS 10.3. Entre los resultados más importantes, estimó que en el 2013 la erosión hídrica promedio fue de $0.46 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que correspondió a un área de 59.11 % y $406.98 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ a un área de 0.013 %. En cambio, para el año 2017 calculó 0.39 y $554.36 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ correspondiente a un área de 0.018 %. El autor concluyó que el incremento de la erosión hídrica entre el 2013 y 2017 del lugar se debe a cambios en la cobertura vegetal y los cambios en la precipitación.

Dioses y Pérez (2018) estudiaron la cuenca del río Piura ubicada en Piura, Perú para estimar la erosión hídrica en un periodo comprendido entre los años 1981 y 2016. El enfoque de la investigación fue cuantitativa con un alcance a descriptivo y un diseño de investigación no experimental. El trabajo aplicó la metodología propuesta por la ecuación universal de pérdida de suelos (EUPS); en ese sentido, primero recopilaron la información primaria como registros de precipitación recopilados del proyecto PISCO, tipos de suelos del proyecto SOLGRIDS, modelo de elevación digital del satélite Landsat y cobertura vegetal vegetal del Ministerio del Ambiente [MINAM]; luego realizaron la determinación de los factores de erosividad, erodabilidad, factor topográfico y cobertura vegetal y finalmente los resultados fueron integrados en un mapa de erosión hídrica a través del análisis en ArcGIS 10.3. Entre los resultados determinaron que la erosión hídrica multianual fue de $10.4 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$; asimismo, los años 1998 y 2001 fueron los años en los cuales se presentaron las máximas tasas de erosión hídrica registradas siendo $5356.47 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y $5706.02 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ respectivamente, debiéndose al fenómeno del niño. Los autores concluyeron en que la erosión hídrica es considerada como normal en base a la FAO.

Quispe (2018), evaluó los niveles de pérdida de suelo por la erosión hídrica en una ladera de la comunidad de San Mateo, Lima. El enfoque de la investigación fue cuantitativa con un alcance explicativo y un diseño de investigación experimental. El autor empleó cuatro tratamientos: T₁, suelo con cobertura vegetal nativa; T₂, suelo desnudo; T₃, suelo con cobertura mulch; T₄, suelo con cobertura en estado natural. Los tratamientos fueron distribuidos en cuatro bloques con 16 varillas por parcela que tuvo un área de 4 m^2 en una duración de 12 meses. Para estimar la erosión hídrica midió el desnivel (con una regla graduada) que generó en altura de las varillas (antes y después de las precipitaciones), específicamente midió los días 10 y 25 de cada mes ; asimismo, el diseño estadístico fue de bloques completamente al azar y fue procesado en el software Minitab V17 donde aplicó la prueba de Tukey para evaluar diferencias significativas entre los tratamientos. Los resultados principales de la investigación estimaron que en términos de pérdida de suelo el T₁ generó $10.9 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, el T₃ generó $17.1 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, T₄ generó $28.6 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y T₂ $44.8 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. La investigación concluyó que el T₂ (suelo desnudo) presentó mayor erosión; asimismo, el T₁ (Cobertura vegetal nativa) fue el que generó menos erosión.

Zúñiga (2017) realizó una investigación en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca para estimar la pérdida de suelo. El enfoque de la investigación fue cuantitativo con un alcance descriptivo y un diseño no experimental. El proyecto fue desarrollado a través de la aplicación de dos modelos de estimación: el MC78 que está basado en EUPS y NDVI (2014) y MC80 basado en EUPS e imágenes Landsat del 2001 en tres periodos comprendidos entre 2002 a 2006 (periodo 1), 2006 a 2010 (periodo 2) y 2010 a 2015 (periodo 3). Las variables involucradas en ambos modelos fueron la precipitación, edafología, pendiente, cobertura vegetal y prácticas de conservación de suelos, que fueron recolectadas a través de trabajo de campo o de estudios de zonificación previos. El análisis estadístico fue descriptivo. Los resultados mostraron que la tasa de erosión promedio para el modelo MC80 fue de 128.96 t. ha⁻¹. año⁻¹ y para MC78 fue 145.50 t. ha⁻¹. año⁻¹. Asimismo, en promedio (conjugando los dos modelos) para el periodo 1, la tasa de erosión fue 125.15 t. ha⁻¹. año⁻¹; 154.94 t. ha⁻¹. año⁻¹ para el periodo 2 y 162.73 t. ha⁻¹. año⁻¹ para el periodo 3. El autor concluyó que el periodo 3 presentó una mayor tasa de erosión promedio y que estos están dados porque el área de estudio presenta pendientes pronunciadas como suelos débiles.

Cabrejos (2016), estudió la microcuenca del río Atuen ubicada en Amazonas, Perú para determinar la cuantificación de la erosión hídrica. El enfoque de la investigación fue cuantitativo con un alcance descriptivo y un diseño de investigación no experimental. Para ello, realizó un modelamiento geoespacial usando el modelo de la ecuación universal de pérdida de suelos. Las variables analizadas fueron modelo de elevación digital obtenido del sensor Landsat 8, mapa de suelos, precipitación y cobertura vegetal obtenido a través del estudio de mesozonificación ecológica – económica de Amazonas. El análisis estadístico fue descriptivo, utilizando la herramienta de estadístico zonales del software ARCGIS 10.3. Los resultados obtenidos mostraron tasas de erosión promedias inferiores a 50 t. ha⁻¹. año⁻¹, siendo estos resultados definidos como ligeros a moderados. Asimismo, el autor realizó una clasificación espacial agrupando el tipo de erosión como alta que representó el 10.7 % del territorio analizado, medio que abarcó el 45.4 % y ligero que representó el 43.8 %. Según el autor, estos resultados se han dado porque la zona presentó una alta cobertura vegetal y existían pocas actividades antrópicas que daban origen al cambio de uso de suelo que correspondía con el estudio general realizado para todas las cuencas del Perú.

Solano (2016) desarrolló una investigación en la sub cuenca del río Shullcas ubicado en Huancayo, Perú. El objetivo fue determinar la erosión hídrica utilizando el modelo propuesto por la ecuación universal de la pérdida de suelos a nivel multi temporal en los años 2000 y 2013. El enfoque de la investigación fue cuantitativo con un alcance descriptivo y un diseño de investigación no experimental. Las variables usadas en el modelo fueron la precipitación obtenida de registros pluviométricos de la zona de estudio, tipo de suelo, obtenidas a través de un muestreo de suelos realizado, cobertura vegetal obtenida del estudio de zonificación ecológica-económica de Jύνin y el modelo de elevación digital obtenida a través del Instituto Geofísico del Perú. En relación al análisis estadístico fue descriptivo. Los resultados principales fueron que la mayor tasa de erosión hídrica fue en 2013 con 163.13 t. ha⁻¹. año⁻¹ originada en zonas desprovistas de cobertura vegetal. La tasa más baja fue generada en el año 2000 con un valor de 1.69 t. ha⁻¹. año⁻¹ y originada en zonas de bofedales. En relación a la tasa promedio en año 2000 se generó 29.29 t. ha⁻¹. año⁻¹ y en el año 2013 fue 30.91 t. ha⁻¹. año⁻¹. El autor concluyó que existen diferencias en las tasas de erosión en los años de 2000 y 2013, principalmente generado por la pérdida de cobertura vegetal y el aumento de cultivos en secano.

Flores (2015) estimó la tasa de erosión hídrica de la subcuenca de Shambillo ubicada en Tingo María, Perú. El enfoque de investigación fue cuantitativo con un alcance descriptivo y un diseño de investigación no experimental. Para ello, usó la ecuación universal de la pérdida de suelos cuyas variables en el modelo fueron erodabilidad, erosividad, factor topográfico y factor de cobertura vegetal. Respecto al análisis estadístico fue descriptivo. Los resultados mostraron una variación de 0 a 1132.64 t. ha⁻¹. año⁻¹, siendo la tasa promedio 26.87 t. ha⁻¹. año⁻¹. A nivel espacial encontró que el 99.8 % del área de estudio presenta una erosión entre ligera y moderada y solo el 0.2 % del área total estaba en riesgo de erosión hídrica calificada como crítica según la FAO. Asimismo, evidenció en el área de estudio existe un cambio de uso de suelo y la tendencia a la pérdida de vegetación, la erosión hídrica podría incrementarse hasta 71.46 t. ha⁻¹. año⁻¹. El autor concluyó que el área de estudio presenta bajas tasas de erosión llegando a ser en promedio como moderadas (valor esperado por la alta precipitación); sin embargo, este valor podría incrementarse debido a que el suelo está teniendo usos que no corresponden con su capacidad de uso mayor.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Erosión hídrica

Para Almorox *et al.* (2010), la erosión hídrica es el proceso de desprendimiento y transporte de material superficial del suelo que es causado principalmente por la acción de la energía cinética de las precipitaciones teniendo como unidad la gota de lluvia asociado al desgaste de los terrones del suelo, escorrentía asociado al desprendimiento producto de la fricción del suelo y la gravedad asociado al peso (por la masa acumulada) que ejerce las precipitaciones principalmente.

Este proceso natural depende de ciertas propiedades como la inclinación del terreno, la cantidad e intensidad de las precipitaciones, las propiedades edafológicas del suelo y las medidas de conservación de suelos existentes que realizan las poblaciones (Huerta y Loli, 2014, citado por Jumbo, 2018, p.4).

Tipos de erosión hídrica

a. Erosión por salpicadura

Es el tipo de erosión que se genera por el impacto de gotas de lluvias sobre agregados de suelo desnudo, está relacionada directamente a la intensidad de la lluvia y la energía cinética (velocidad de la lluvia) que se libera afectando directamente a las arenas finas (Cisneros *et al.*, 2012).

b. Erosión laminar

Se comprende como la remoción uniforme del suelo en estratos delgados como consecuencia del flujo superficial de la escorrentía (SENAMHI, 2017a). Precisar que a través de este tipo de erosión hídrica se genera una mayor pérdida neta de suelo en comparación por la erosión por salpicadura (Cisneros *et al.*, 2012).

c. Erosión por surcos

Es el tipo de erosión hídrica que se forma en lugares donde la precipitación aumenta, en consecuencia se incrementan los caudales, nivel del agua y velocidad, que en combinación con la micro topografía del lugar puede generar un desprendimiento del suelo incrementándose las tasas de erosión considerablemente. Los factores que se relacionan son la erodabilidad del suelo y la resistencia al corte crítico (Cisneros *et al.*, 2012).

d. Erosión en cárcavas

Se desarrolla a partir de la acción del escurrimiento y drenaje de sobre la superficie, la profundidad y forma que adoptan las cárcavas estarían determinadas por el tipo de material del suelo y su grado de cohesión. Este tipo de erosión es el más reconocible (Cisneros *et al.*, 2012).

e. Erosión en cursos permanentes

Se da principalmente en los bordes de los cauces de los ríos que se incrementa conforme se elimina la vegetación ribereña, haciendo que la corriente del cauce desestabilice la base generando desmoronamiento del suelo próximo. Está dado principalmente por el incremento de la frontera agropecuaria (Cisneros *et al.*, 2012).

Etapas de la erosión hídrica

a. Etapa de desprendimiento

Se da cuando la energía cinética de las lluvias caen en la superficie originando desprendimiento del material del suelo superficial debido a la densidad de estas, donde las partículas finas se mantienen en suspensión y las gruesas en rodamiento. Las partículas desprendidas van cubriendo los poros del suelo, ocasionando que la infiltración del agua en el sub-suelo se pueda dar (Asturias 1986, citado por Jumbo, 2018, p. 5; Cisneros *et al.*, 2012).

b. Etapa de transporte

La etapa de transporte, se da cuando el agua que no se infiltra arrastra el material del suelo por medio de la escorrentía superficial. El potencial erosivo está determinado por la cantidad, intensidad y distribución de la precipitación que en terrenos de pendientes pronunciadas aumenta su energía cinética (Asturias 1986, citado por Jumbo, 2018, p. 5; Cisneros *et al.*, 2012).

c. Etapa de sedimentación

Se produce cuando el flujo transportado disminuye su velocidad e incluso las partículas suspendidas del suelo se estabilizan, normalmente esto ocurre en valles donde las pendientes son menores o el periodo de lluvioso ha parado (Asturias 1986, citado por Jumbo, 2018, p. 5; Cisneros *et al.*, 2012).

Las actividades humanas y su vinculación con la erosión hídrica

Las actividades humanas ejercen una presión antrópica al sistema natural afectando los bienes como servicios ambientales. Dentro de estos cambios, se puede apreciar la disminución de la cobertura vegetal, el uso de los suelos que no está en compatibilidad con su capacidad de uso mayor como la agricultura, ganadería o ambas, están originando la aceleración de la erosión hídrica (Solano, 2016). Según se detalla:

a. Incineración de la cobertura vegetal

La quema o incineración de la cobertura vegetal está originada por la necesidad de realizar procesos de extensión de la frontera agrícola principalmente (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado [SERNANP], 2018; Llerena *et al.*, 2010) que tiene como consecuencia el aumento de la erosión hídrica; puesto que, al perder la humedad en el suelo y la capa protectora el suelo que normalmente tiene una alta concentración de materia orgánica, el suelo ya no tiene la capacidad para mitigar el impacto de la acción de la lluvia (Flores, 2015).

b. Ganadería

Una gestión deficiente en la ganadería tiene como consecuencia el sobrepastoreo de las tierras lo que origina la compactación del suelo y la pérdida de la cobertura vegetal alterando el equilibrio entre la materia orgánica y la vegetación por lo cual, el suelo pierde sus propiedades de protección frente a la erosión hídrica (Solano, 2016).

c. Deforestación

La deforestación es una problemática que se está extendiendo en todo el mundo y en Perú principalmente se manifiesta en la Amazonía. La finalidad de esta actividad es extraer el recurso maderero para comercializarlo, lo que origina que el equilibrio que existe entre el suelo y disminuyendo la materia orgánica llevando a que los procesos de erosión hídrica se manifiesten más, tal como se describen anteriormente (Llerena *et al.*, 2010).

d. Agricultura

La agricultura tiene un fuerte condicionamiento con el suelo, sobre todo cuando estos hacen perder nutrientes al suelo debido a técnicas agresivas e invasivas y como se describió anteriormente aceleran los procesos de erosión hídrica al compactar los suelos (Flores, 2015).

1.2.2. Cuenca hidrográfica

Es una unidad de gestión territorial del recurso hídrico originada por las precipitaciones pluviales que se van recogiendo en cauces de diversa magnitud y que estos fluyen hacia corriente condicionadas por aspectos naturales del terreno y a veces antrópicas, llegando a formar un sistema interconectado que se vierten en uno o varios puntos específicos (drenaje natural). En esta área se generan procesos a través de interacciones de uno o varios elementos biofísicos, socioeconómicos y culturales que se desarrollan en la cuenca (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2016; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2010).

1.2.3. La ecuación universal de pérdida de suelos (EUPS)

La ecuación universal de pérdida de suelos (EUPS) es un modelo paramétrico (García, 2006 citado por Jumbo, 2018, p.8) que nos sirve para estimar la tasa de erosión hídrica de una zona geográfica mediante la multiplicación de factores que condicionan su maximización (Cisneros *et al.*, 2012). Su ecuación y sus niveles se expresan de la siguiente manera:

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

Donde:

A: Pérdida anual de suelo expresada en t. ha⁻¹. año⁻¹.

R: Factor de erosividad de las lluvias en MJ.mm.ha⁻¹. año⁻¹

K: Factor de erodabilidad del suelo en función del tipo de suelo en t. ha. MJ⁻¹. mm⁻¹

LS: Factor topográfico en función de la longitud, inclinación y forma de la pendiente.

C: Factor de cobertura vegetal.

P: Factor de prácticas de conservación.

La distribución de la erosión hídrica según lo establecido por la FAO, se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 1

Niveles de erosión establecidos por la FAO

Nivel de erosión	Tasa (t. ha ⁻¹ . año ⁻¹)
Leve	0-5
Moderada	5 - 25
Media	25-50
Alta	50-100
Muy Alta	100-200
Crítica	>200

Fuente: Elaboración propia con base en Flores (2015).

Factor (R) erosividad de lluvias

Es el factor que representa la capacidad potencial de la lluvia de generar erosión en función a la energía cinética y la intensidad máxima durante 30 minutos (Cisneros *et al.*, 2012). El factor (R) se obtiene a partir de la multiplicación entre la energía por la intensidad de una lluvia de duración igual a 30 minutos (EI_{30}); definiéndose de la siguiente forma:

$$R = \sum_{i=1}^n EI_{30}$$

Donde:

R: Índice de erosividad de la lluvia expresada en

n: Es el número de aguaceros en el periodo considerado.

I_{30} : Es la intensidad de la lluvia durante 30 minutos para evento en mm. h^{-1}

E: Energía cinética de la lluvia en MJ. ha^{-1} .

Asimismo, según Cabrejos (2016) para estimar la energía cinética (E) generada por la lluvia, se tiene tomar en consideración las siguientes fórmulas en función a la intensidad (I_{30}):

Si $I \leq 76 \text{ mm/h}$, $E = 0.119 + 0.0873 \text{Log}I$.

Si $I > 76 \text{ mm/h}$, $E = 0.283$.

Sin embargo, el registro de las estaciones meteorológicas no se da en estos intervalos de tiempo, en el caso del SENAEMI, los registros son cada 12 horas, por ello para el presente proyecto se usará la siguiente forma de cálculo, utilizando el Índice Modificado de Fournier [IMF] (Dioses y Pérez, 2018; SENAEMI, 2017a):

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \log_{10}(\text{IMF}) - 0.08188)}$$

Donde:

IMF: Es el Índice Modificado de Fournier.

Asimismo, el Índice Modificado de Fournier está determinado por la siguiente ecuación:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$$

Donde:

Pi: Precipitación mensual del mes (mm)

P: Precipitación media anual (mm)

El Índice Modificado de Fournier [IMF] es una herramienta práctica en función a la información de precipitación disponible que se encuentran mensualmente y los valores que se estiman nos proporciona una alta correlación con el método de intensidad de la lluvia llegando hasta 0.89 en algunas regiones (SENAHMI, 2017a); asimismo, los resultados nos muestran cuánto estaría contribuyendo las precipitaciones al proceso erosivo, según la clasificación enunciada en la siguiente tabla:

Tabla 2

Clasificación del IMF para Latinoamérica

Tipo	Rango	Clasificación
1	Menor de 60	Muy bajo
2	60 a 90	Bajo
3	90 a 120	Moderado
4	120 a 160	Alto
5	Mayor a 160	Muy Alto

Fuente: Elaboración propia en base a Lobo *et al.* (2006) citado por Flores (2015).

Factor (K) o índice de erodabilidad

Cisneros *et al.* (2012), nos precisa que la erodabilidad es la vulnerabilidad que tienen los suelos a ser erosionados por la acción del agua. En general, se conoce que los suelos con bajo contenido de materia orgánica, texturas intermedias y degradación estructural son más erosivos. La erodabilidad está condicionada a cinco parámetros o características del suelo que son la fracción de limo más arena fina, fracción de arena, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad. Está representado por (Flores, 2015):

$$100K = 0.277 \times M^{1.14}(12 - MO) + 0.043(s - 2) + 0.0033(p - 3)$$

En donde:

MO: Materia orgánica (%).

s: Tipo de estructura del suelo.

p: Tipo de permeabilidad.

M: (% de Limo + % Arena muy fina) × (100 - % Arcilla)

Longitud y gradiente de la pendiente o factor topográfico (LS)

Para el SENAMHI (2017a), el factor topográfico es representado como el producto entre la gradiente de la pendiente que se entiende como el grado de inclinación expresado en porcentaje y longitud de la pendiente que es definido como la distancia entre el origen del flujo superficial y el punto más bajo donde comienza la deposición del flujo. Los factores se determinan unitariamente. El factor L está representado por la siguiente ecuación:

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

Donde:

λ : Longitud de la pendiente.

m: Exponente de la longitud de la pendiente.

Sin embargo, al trabajarse con modelo de elevación digital, la ecuación se escribe así:

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)}+D^2)^{m+1}-A_{(i,j)}^{m+1}}{X^m \times D^{m+2} \times 22.33^m}, \text{ donde:}$$

$A_{(i,j)}$: Área aportadora a una unidad de pixel.

D: Tamaño del pixel.

X: Factor de corrección.

Los factores “m” y “F” necesarios para determinar el Factor “L” están representadas por las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{F}{1 + F} \quad F = \frac{\frac{\sin \beta}{0.0896}}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Donde β es el ángulo de la pendiente.

El factor “S” representa en un término amplio los efectos que se podrían generar en relación a la inclinación, la representación matemática está dada por la siguiente ecuación:

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta - 0.5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases}$$

Considerar que en el uso del raster calculator de ArcGIS 10.7 debe convertirse de grados a radianes, teniendo en cuenta que 1 grado sexagesimal es equivalente a 0.01745 radianes.

Factor (C) de cobertura vegetal

Solano (2016), define al factor C como el grado de protección del suelo por un determinado tipo de vegetación. El valor de presentación estaría en una escala de 0 a 1, donde 0 representa el factor de mayor protección del suelo por la cobertura vegetal y 1 representa el valor de menor protección del suelo por la cobertura vegetal.

Factor (P) de prácticas de conservación

Es el factor que se asocia a las prácticas de conservación de suelos realizando trabajos culturales o disponiendo vegetación que está asociado básicamente a la forma de manejar los cultivos (SENAHMI, 2017a), cuando no se evidencia prácticas de conservación se coloca un valor de 1 (Sheikh *et al.*, 2011 citado por Jumbo, 2018, p. 60).

1.2.4. Ordenamiento territorial

Según El Ministerio del Ambiente [MINAM] (2016), define a ordenamiento territorial como un proceso político y técnico – administrativo promovido por El Estado orientado en la toma de decisiones en la gestión ordenada del territorio en coordinación con los actores o partes interesadas de una unidad territorial (debe entenderse que el proceso es descentralizado) fomentando el uso sostenible de los recursos naturales, regulando y promoviendo la identificación y crecimiento de grupos humanos, actividades de índole económica, integración social y el desarrollo geográfico teniendo en cuenta el reconocimiento de fortalezas y debilidades teniendo en cuenta criterios ambientales, económicos, socioculturales, institucionales y geopolíticos, entre sus procesos principales se ha identificado:

Zonificación Ecológica Económica (ZEE)

Es un proceso dinámico para la identificación del estado del territorio y fomentar la implementación de medidas y alternativas para el uso sostenible de un territorio basado en la evaluación de potencialidades y limitaciones bajo los criterios físicos, biológicos, sociales, económicos y culturales (Gobierno Regional de Cajamarca [GRC], 2010).

Estudios Especializados (EE)

Se define como instrumentos que se desarrollan para enfatizar el análisis de las dinámicas, relaciones y funcionalidad que se muestran en el territorio; asimismo, estos estudios complementan con información precisa sobre las condiciones físicas y biológicas a la ZEE (MINAM, 2016).

Diagnóstico Integrado de Territorio (DIT)

Es un instrumento que integra la información generada por la Zonificación Ecológica Económica (ZEE) y los Estudios Especializados (EE), aportando información sobre las variables que influyen en la ocupación del territorio, sustentadas sobre bases biofísicas, sociales, económicas, culturales, funcionales, institucionales y políticas (MINAM, 2016).

Plan de Ordenamiento Territorial (POT)

Es el instrumento que se articula sobre la base del Diagnóstico Integrado de Territorio (DIT) para establecer la planificación y gestión del territorio regulando los procesos de organización y gestión sostenible; asimismo, se articula con otros instrumentos y planes que pueden ser normativos y/o técnicos para integrarlos (MINAM, 2016).

1.2.5. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Para Montesinos (2002), nos precisa que un Sistema de Información Geográfica debe ser entendido como una base de datos relacional que cuenta con una base de datos gráfica y otra alfanumérica conectadas entre sí que nos permite modelizar escenarios al introducir ciertas variables ambientales. La característica más importante de un SIG es que tienen la capacidad de combinación entre la representación de la base de datos; es decir, datos espaciales con alfanuméricos. Siendo las bases usadas en la presente investigación:

Modelo de Elevación Digital

Dentro de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los Modelos de Elevación Digital se consideran como una representación de datos en forma raster de la elevación del terreno; es decir, considera un aspecto visual y numérico de la altura en relación al nivel del mar que puede permitirnos realizar una caracterización del relieve. Tiene dos características principales que son la exactitud en referencia a la información que puede mostrar de forma matemática y la resolución que está relacionada con el detalle en que se va a mostrar la información y que es recogida por un sensor (Olaya, 2014).

Base de datos raster

Es una representación digital de la información cartográfica (con atributos específicos) que guarda un valor numérico que describe el compartamiento de un fenómeno específico en una matriz de celdillas uniforme que están organizadas en filas y columnas, para este estudio de investigación se considera 12.5 por 12.5 metros (Montesinos, 2002).

Base de datos vectorial

Es un tipo de representación digital que representa entidades como puntos, polilíneas o polígonos y que contiene una georeferenciación; asimismo, esta información está organizada de la manera que se establecen límites en sus áreas representadas; es decir, se pueden diferenciar edificios, cursos de agua, cobertura vegetal, entre otras (Montesinos, 2002).

Base de datos alfanumérica

Es una base de datos que utilizan los SIG para mantener los atributos específicos vinculados a una zona territorial y que están disponibles para que el usuario pueda realizar distintas operaciones con propósitos específicos como añadir nuevos datos, eliminar datos no relevantes, actualizar información en función a la toma de datos observacionales, entre otras (Montesinos, 2002).

1.2.6. Área Natural Protegida

Según la Ley de Áreas Naturales Protegidas N° 26834 (1997), define área natural protegida como espacios continentales y/o marinos del territorio nacional que han sido declarados con el objetivo de conservar la diversidad biológica y demás valores asociados de interés cultural, paisajístico y científico. Estos espacios de conservación están clasificados en categorías de uso indirecto cuya característica principal es que no se pueden aprovechar los recursos naturales y también se clasifican como uso directo que se refiere a que se puede explotar los recursos naturales de manera sostenible (Calle y Brehaut, 2007). Los componentes más importantes de un ANP son:

Zona de Amortiguamiento (ZA)

Son zonas establecidas con el propósito fundamental de minimizar el impacto negativo de las actividades humanas en los valores de las Áreas Naturales Protegidas y facilitar su conectividad facilitando la interacción entre los actores y partes interesadas circundantes al área natural protegida que tiene categoría de conservación (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado [SERNANP], 2009).

Plan Maestro

Es el instrumento documentado de gestión de más alto nivel donde se define la planificación para lograr alcanzar las metas de los objetivos por lo cual ha sido establecida el área natural protegida generando estrategias, políticas y programas de acuerdo a la legislación que lo rige, cabe precisar que este instrumento es renovado cada cuatro años y es elaborado por la administración del ANP.

Zonificación del Área Natural Protegida

Para Calle y Brehaut (2007), la zonificación es una herramienta de planificación que consiste en delimitar en zonas que están convenientemente establecidas en conformidad con las características, necesidades y objetivos por lo que se ha establecido el área de conservación natural. En ese sentido, la zonificación dependerá de la clasificación de uso directo o uso indirecto.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

La investigación realizada tiene como objetivo la cuantificación de la erosión hídrica usando la ecuación universal de pérdida de suelos (EUPS) que es un modelo empírico como resultado de tratamiento estadístico a una base de datos que relaciona variables como la erodabilidad, erosividad, topografía, cobertura vegetal y prácticas de conservación de suelos del área de estudio (Cisneros *et al.*, 2012).

En ese sentido, el enfoque de la investigación fue cuantitativa; puesto que, cumple con todas las características como la medición de variables, el análisis de un problema específico, la recolección de datos basada en la medición de la información necesaria; asimismo, el alcance es descriptivo; debido a que se busca caracterizar y definir la erosión hídrica en el lugar de estudio y finalmente el diseño de investigación fue no experimental porque el investigador no intervino en el control de las variables que intervienen en el fenómeno que busca describir (Hernández *et al.* , 2014).

2.2. Lugar y fecha

El lugar de estudio corresponde con la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas-Namballe [SNTN] que se encuentra ubicado en la parte oriental de la Cordillera de los Andes. A nivel político está dentro de los distritos de San Ignacio, Tabaconas, Chirinos y Namballe de la provincia de San Ignacio, Cajamarca. Por el este se extiende hasta Huancabamba, provincia de Piura. El área de estudio en mención, abarca un área de 41808.04 ha (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado [SERNANP], 2015). El estudio se desarrolló en un periodo de 5 meses , iniciando en el mes de julio del 2020 y finalizando en diciembre del 2020. El mapa de ubicación se presenta en la Figura 1:

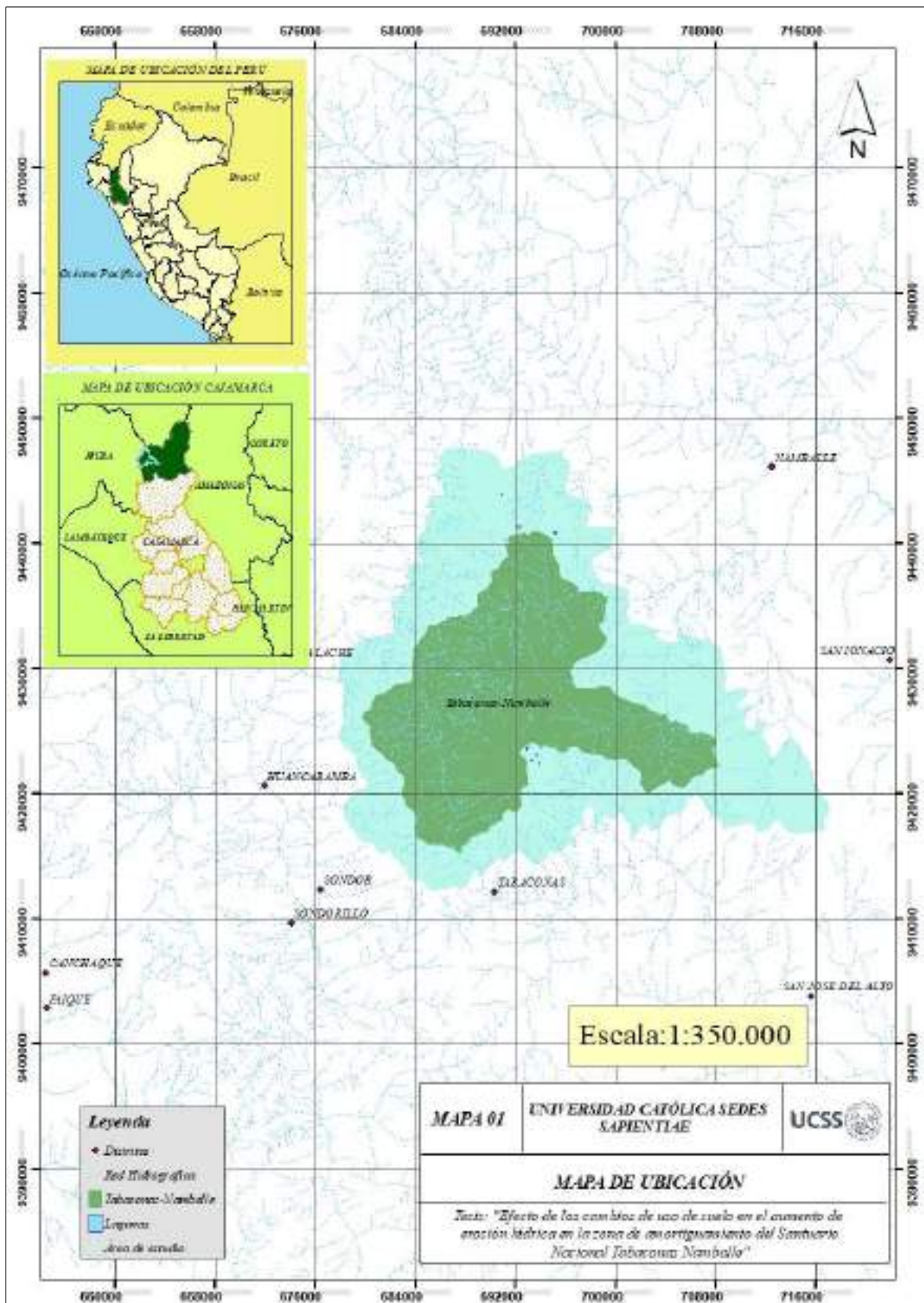


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas-Namballe. Fuente: Elaboración propia.

2.3. Características generales de la zona de estudio

2.3.1. Ecología

De acuerdo a la clasificación de Holdridge, la zona de amortiguamiento presenta cuatro zonas de vida: Bosque húmedo – Premontano Tropical (Bh-PT), Bosque húmedo – Montano Bajo Tropical (Bh-MBT), Bosque muy húmedo – Montano bajo tropical (Bmh-MBT) y Bosque pluvial – Montano tropical (Bp-MT) según (SERNANP, 2018).

2.3.2. Geografía

El relieve es montañoso en la mayoría de la zona de estudio. En las zonas más altas predominan el terreno desnudo con pendientes escarpadas, aunque también hay manifestaciones de terrenos planos donde se desarrollan ecosistemas como los páramos. En las partes más bajas se desarrollan ecosistemas como los bosques de neblina (SERNANP,2018).

2.3.3. Economía

En la zona de estudio, la principal actividad económica es la **agropecuaria** combinando cultivos permanentes (café, cacao y granadilla), cultivos intensivos (arroz y maíz) y ganadería vacuna (Llerena *et al.*, 2010).

2.4. Materiales

- Modelo de Elevación Digital (MED) con resolución de 12.5 m.
- Sistem Global Position (GPS)
- Software ArcGIS 10.7.
- Software Microsoft Excel 2019.
- Software Microsoft Word 2019.
- Cámara fotográfica.
- Libreta de notas.

2.5. Población y muestra

La zona de estudio presenta un área representativa aproximada de 41808.04 ha. Por la naturaleza de la investigación se ha usado información que abarca toda el área como el modelo de elevación digital y la cobertura vegetal; para sub-variables como la precipitación se ha conseguido registro pluviométrico de 20 años y para la edafología se han usado 18 muestras de suelo de la zona de estudio que han sido debidamente procesadas (revisar apartado 2.7).

2.6. Descripción de la investigación

La investigación se desarrolló en cuatro etapas: recopilación de datos que está relacionado con la obtención de la información primaria para el modelo de estimación; construcción de factores geoespaciales, análisis de cambio, y por último, se realizó trabajo de campo para realizar un análisis de consistencia entre lo modelado y lo que a nivel cualitativo muestra el paisaje del área de estudio. El flujograma de la Figura 2 muestra las etapas de estudio.

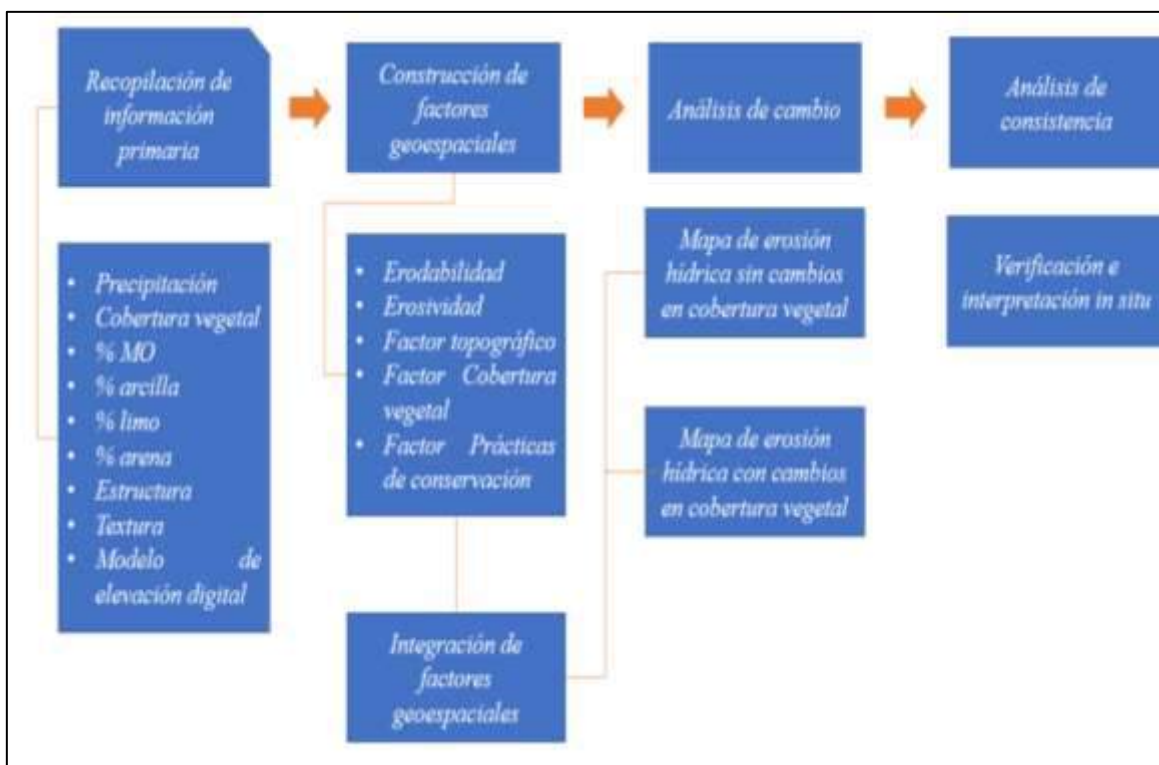


Figura 2. Flujograma metodológico de la investigación. Fuente: Elaboración propia.

Recopilación de información primaria

a. Precipitación

La recopilación de datos de precipitación se realizó en milímetros, en la zona de estudio en un periodo entre 1986 y 2010. Esta información fue tomada de las estaciones meteorológicas (ver Apéndice 1) aledañas a la zona de amortiguamiento del SNTN, según la Tabla 3:

Tabla 3

Estaciones meteorológicas con información de precipitación

Nombre de la estación	Ubicación	Altitud	Código
Tabaconas	5°18'54.83" S 79°17'5.73" O	1605 m.s.n.m.	105056
Namballe	4°59'58.29" S 79°5'19.03" O	722 m.s.n.m.	105107
Chirinos	5°18'30.59" S 78°53'51.32" O	1772 m.s.n.m.	105074
San Ignacio	5°8'42.49" S 78°59'42.44" O	1243 m.s.n.m.	105058
Sondorillo	5°20'21.2" S 79°24'56.7" O	1694 m.s.n.m.	220509

Fuente: Elaboración propia a partir de SENAEMI (2017a).

b. Modelo de Elevación Digital (MED)

El Modelo de Elevación Digital se descargó del satélite ALOS PANSAR con una resolución de 12.5 metros (ver Apéndice 5). Sus características se detallan en la Tabla 4 :

Tabla 4

Datos generales del Modelo de Elevación Digital

Escena	LC80100642018170LGN00
Fecha	28/11/2010
Proyección	UTM
Zona	17

Fuente: Elaboración propia.

c. Edafología

Los factores edáficos estudiados en el presente estudio son el % de arcilla, limo y arena del suelo; textura del suelo; estructura del suelo y materia orgánica. Esta información ha sido recopilada del informe de Microzonificación de la zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe realizado en el 2018. Según se detalla en la Tabla 5:

Tabla 5

Información edafológica por puntos de muestreo de la zona de amortiguamiento del SNTN

N.º de muestreo	Ubicación	% de Arena	% de Limo	% de Arcilla	% de MO	Textura del suelo
1	Pampa chiquita	84	16	0	0.39	Arena Franco
2	Puchua	58	25	14	9.19	Franco Arenoso
3	Higuerón monte	76	16	8	13.62	Franco Arenoso
4	Higuerón laderas	38	40	22	2.63	Franco
5	Higuerón humedal	38	40	22	9.55	Franco
6	Higuerón aluvial	64	18	18	4.84	Franco Arenoso
7	Higuerón Café	58	22	20	6.9	Franco Arcilloso Arenoso
8	San miguel	16	30	54	2.69	Arcilloso
9	Camino a Apacheta	82	12	6	0.37	Arena Franco
10	Romerillo	22	32	46	2.08	Arcilloso
11	Miraflores	48	24	28	3.02	Franco Arcilloso Arenoso
12	El sauce	62	28	10	6.37	Franco Arenoso
13	Pueblo libre	76	18	6	7	Franco Arenoso
14	Tayapampa	56	28	16	6.65	Franco Arenoso
15	Huachumo	52	6	12	0.05	Franco
16	Machete	56	34	10	2.65	Franco Arenoso
17	Pingula	42	30	28	19.7	Franco Arcilloso

Fuente: Elaboración propia con base en SERNANP (2018).

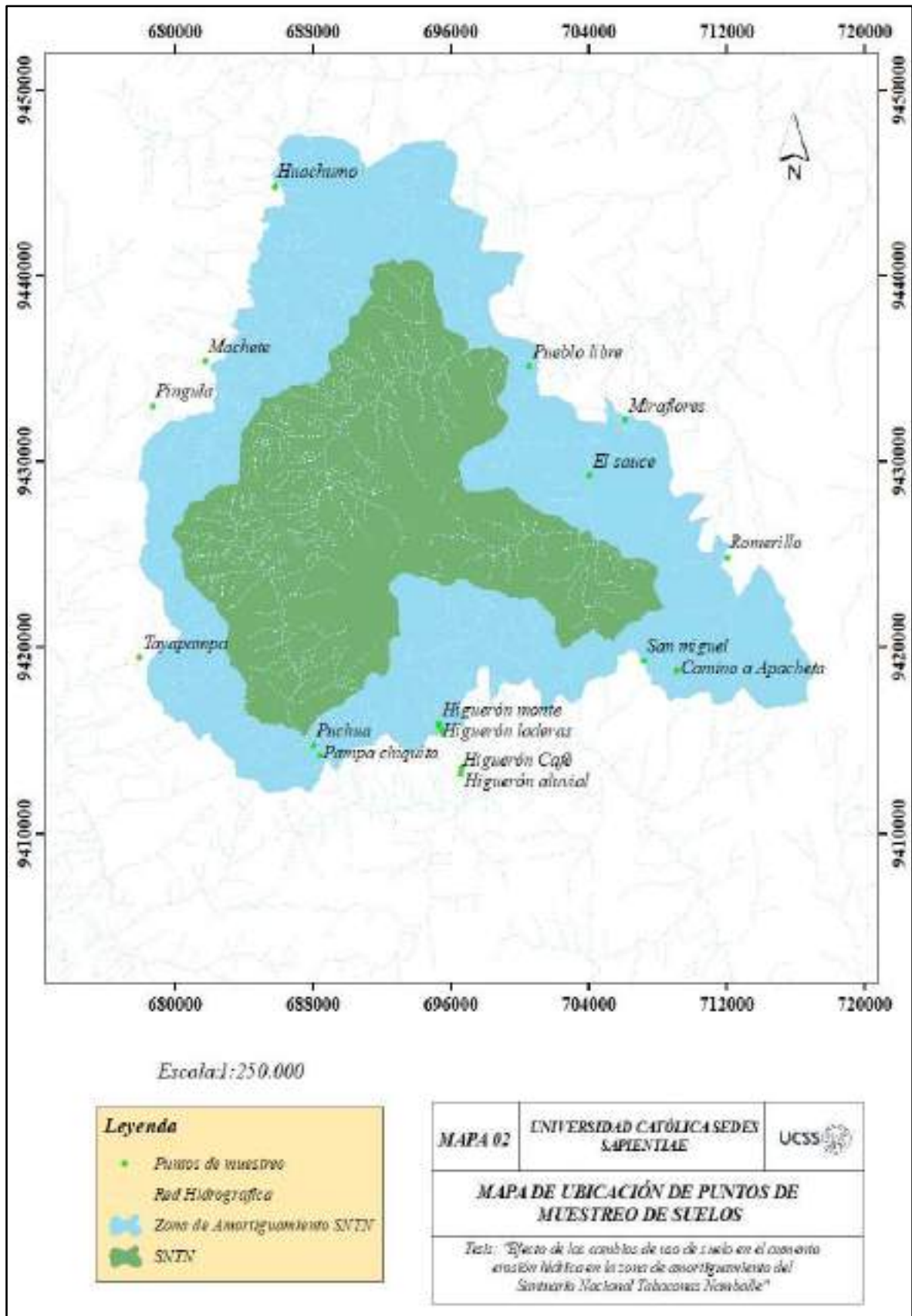


Figura 3. Distribución de puntos de muestreo de suelos en la zona de amortiguamiento del SNTN. Fuente: Elaboración propia con base en SERNANP (2018).

d. Cobertura Vegetal

La cobertura vegetal presente en el SNTN ha sido recopilada del informe de Microzonificación de la zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe realizado en el 2018, teniendo en cuenta que la adquisición de este insumo fue en formato vectorial (shapefile).

Construcción de factores geospaciales

La construcción de los factores geospaciales se realizó a través de un proceso individualizado para cada factor (erosividad, erodabilidad, factor topográfico, factor de cobertura vegetal y prácticas de conservación) según lo explica en la Figura 4:

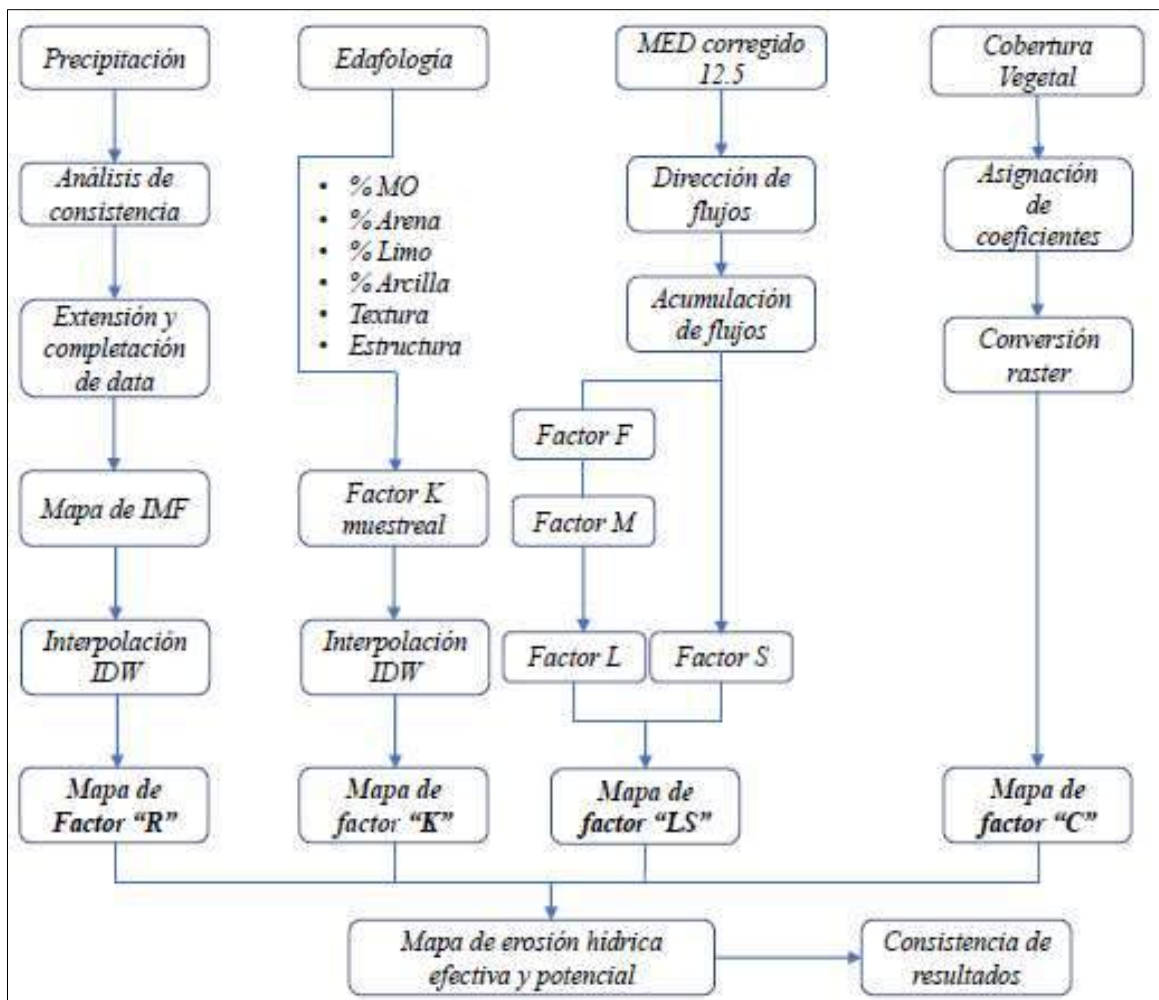


Figura 4. Diagrama metodológico de construcción de factores espaciales de erosión hídrica. Fuente: Elaboración propia.

a. Factor de Erosividad o factor “R”

Análisis de consistencia: El registro histórico de precipitaciones de 1986 a 2010 se le efectuó un análisis de consistencia con la finalidad de detectar anomalías sistemáticas e inconsistencias (Chereque, 1989). El proceso consiste de 03 sub análisis que consisten en el análisis gráfico que permite identificar los datos que podrían tener una variación en su tendencia dudosa a través de la representación gráfica de la serie hidrológica; luego se realiza un análisis doble de masa para verificar las inconsistencias relacionados a saltos y tendencias que se representan por quiebres respecto a una recta y por último se somete a un análisis estadístico con la finalidad de verificar si el análisis gráfico y de doble de masa son significativos. Para analizar los saltos de la data pluviométrica, se analizó la consistencia de la media de la serie de datos a través de la prueba de “T” de Student, a través de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{X}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} X_i \quad (1)$$

$$S_1(X) = \left[\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (X_i - \bar{X}_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\bar{X}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} X_j \quad (3)$$

$$S_2(X) = \left[\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{j=1}^{n_2} (X_j - \bar{X}_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Donde:

X_1 : Valores de la serie del periodo 1

X_2 : Valores de la serie del periodo 2

\bar{X}_1, \bar{X}_2 : Media de los periodos 1 y 2 respectivamente

$S_1(X), S_2(X)$: Desviación estándar de los periodos 1 y 2 respectivamente

n: Tamaño de la muestra

n_1, n_2 : Tamaño de las sub muestras

El análisis de consistencia de la desviación estándar se realizó a través de la prueba de “F” de Fischer, representada por las siguientes ecuaciones:

$$S_1^2(X) = \left(\frac{1}{n_1 - 1}\right) \sum_{i=1}^{n_1} (X_i - \bar{X}_1)^2 \quad (5)$$

$$S_2^2(X) = \left(\frac{1}{n_2 - 1}\right) \sum_{j=1}^{n_2} (X_j - \bar{X}_2)^2 \quad (6)$$

La serie pluviométrica que presentaba significancia tanto en las pruebas de “T” de Student como “F” de Fischer, fue corregida por las siguientes ecuaciones (Chereque, 1989):

$$X'_{(t)} = \frac{X_t - \bar{X}_1}{S_1(X)} [S_2(X) + \bar{X}_2] \quad (7)$$

$$X'_{(t)} = \frac{X_t - \bar{X}_2}{S_2(X)} [S_1(X) + \bar{X}_1] \quad (8)$$

Donde:

$X'_{(t)}$: Valor corregido de saltos

X_t : Valor a ser corregido

Realizado el análisis de saltos, se procedió con el análisis de tendencia en los parámetros determinísticos con la finalidad de verificar la significancia de la misma. Para ello, se empleó el coeficiente de correlación “R” mediante la prueba “T” de Student en relación a la media y la desviación estándar. En la tendencia de la media se empleó las siguientes ecuaciones:

$$T_m = A_m + B_m * t \quad (9)$$

Donde:

t: Tiempo en años, tomado como la variable independiente de la tendencia

T_m : Tendencia de la media

A_m, B_m : Coeficientes de los polinomios de regresión.

Para eliminar la tendencia se usó la siguientes ecuaciones:

$$Y_t = X'_{(t)} - T_m \quad (10)$$

$$T_t = X'_{(t)} - (A_m + B_m * t) \quad (11)$$

Donde:

- $X'_{(t)}$: Serie corregida de saltos
 T_m : Tendencias de la media
 Y_t : Serie sin tendencia en la media

La tendencia de la desviación estándar se analizó a través de las siguientes ecuaciones:

$$T_s = A_s + B_s * t \quad (12)$$

Donde:

- t : Tiempo en años, tomado como la variable independiente de la tendencia
 T_s : Tendencia de la desviación estándar
 A_s, B_s : Coeficientes de los polinomios de regresión

Para eliminar la tendencia se usó la siguiente ecuación:

$$Z_t = \frac{X'_{(t)} - T_m}{T_s} \quad (13)$$

Donde:

- Z_t : Serie sin tendencia en la media no desviación estándar

Completación y extensión de la data: La información pluviométrica extraída de las estaciones meteorológicas del SENAHMI no están completas debido a errores en la toma de información, falta de personal en la toma de datos y/o equipos no disponibles en la toma de datos; en ese sentido, se realizó una complementación a través de la transferencia entre estaciones cuya data cuente con un coeficiente de correlación superior al 0.88 (Chereque, 1989). Para ello se empleó el modelo de regresión simple, representado por las siguientes ecuaciones:

$$y_t = a + bX_t, \text{ donde:} \quad (14)$$

y_t : Variable hidrológica dependiente

X_t : Variable hidrológica independiente

a y b: parámetros de la ecuación de Regresión Lineal Simple

Cálculo del IMF: Para calcular el Índice Modificado de Fournier (IMF) se realiza en función a las precipitaciones mensuales y precipitaciones anuales multianuales para el periodo comprendido entre 1986 y 2010 usando la siguiente ecuación (Flores,2015):

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (15)$$

Donde:

Pi: Precipitación mensual del mes (mm)

P: Precipitación media anual (mm)

Cálculo de erodabilidad: Con el Índice Modificado de Fournier (IMF) se procede a estimar la erodabilidad o factor R para cada estación meteorológica, usando la siguiente ecuación (SENAHMI, 2017a):

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \log_{10}(IMF) - 0.08188)} \quad (16)$$

Donde:

R: Es el factor de erosividad que está expresado en (MJ . mm) / (ha . año).

IMF: Es el Índice Modificado de Fournier.

Interpolación IDW: Con el factor de erodabilidad calculado por cada estación meteorológica se usa la función IDW del módulo interpolation (3D Análisis) con la finalidad de interpolar los valores de erodabilidad en toda el área de estudio (zona de amortiguamiento del SNTN). El formato final de este producto es raster y las unidades de medida está expresada en MJ. mm.ha⁻¹.año⁻¹

b. Cálculo del Factor de erodabilidad o factor “K”

Para calcular el factor de erodabilidad se usa como insumos la información edáfica de 17 muestras de suelo realizada en la zona de amortiguamiento del SNTN. Para ello, primero se asignó los valores numéricos correspondientes a la permeabilidad según la clase textural encontrada en las muestras, usando la Tabla 6:

Tabla 6

Clase de permeabilidad del suelo según tipo de textura del suelo

Clase de permeabilidad	Clase de textura
1 (rápida y muy rápida)	Arenosa
2 (moderada a rápida)	Arenosa franca, Franco arenosa
3 (moderada)	Franca, Franco limosa, Limosa
4 (lenta a moderada)	Franco Arcillo arenoso, Franco arcillosa
5 (lenta)	Franco arcillo limosa, Arcillo arenosa
6 (muy lenta)	Arcillosa arcillo limosa

Fuente: Elaboración propia a partir de Flores (2015).

Luego se le asignó los valores numéricos correspondientes a la *estructura del suelo*, para lo que se consideró el primer horizonte correspondiente a una profundidad de 15 a 18 cm para poder realizar la comparación con la Tabla 7:

Tabla 7

Clase de estructura del suelo según descripción

Clase de estructura	Descripción
1	Granular y migajosa muy fina
2	Granular y migajosa
3	Granular y migajosa media
4	Granular y prismática muy grosera

Fuente: Elaboración propia a partir de Flores (2015).

Luego, se procedió a calcular para cada muestra de suelo el factor de erodabilidad usando la ecuación descrita en el punto 1.2.3 del presente documento (apartado de erodabilidad) apoyándose con el programa Microsoft Excel 2019. Luego los datos de erodabilidad por cada muestra son ingresados al software ArcGIS 10.7 para realizar una interpolación usando la herramienta IDW del módulo Interpolation (3D análisis) en el área de estudio (zona de amortiguamiento del SNTN). El formato requerido para este proceso de edición fue *raster*.

c. Cálculo de longitud y gradiente de la pendiente o factor topográfico (LS)

Para determinar la longitud y gradiente de la pendiente del área de estudio se usó como insumo el Modelo de Elevación Digital con una resolución de 12.5 m. El software ArcGIS 10.7, se usó de apoyo para realizar los siguientes procesos (Flores, 2015; Jumbo, 2018):

Llenado de sumideros: Se usó la herramienta *fill* del módulo Hydrology (Spatial Analyst) con la finalidad de corregir las discontinuidades generadas por los sumideros y picos del Modelo de Elevación Digital.

Cálculo de dirección de flujo: Al Modelo de Elevación Digital corregido y libre de sumideros se sometió a un proceso de estimación de dirección de flujo, usando la herramienta *flow direction* del módulo Hydrology.

Cálculo de acumulación de flujo: Teniendo la estimación de la dirección de flujo del Modelo de Elevación Digital corregido, se aplica la herramienta de *flow accumulation* del módulo *Hydrology* con la finalidad de identificar arroyos o cursos de agua a partir de la cantidad de celdas que fluyen hacia cada raster de salida.

Usando la herramienta *raster calculator* del módulo *map algebra* (Spatial Analyst) se procedió a calcular de la longitud y gradiente de la pendiente a partir de las ecuaciones enunciadas en el punto 1.2.3 (apartado longitud y gradiente de la pendiente o factor topográfico) del presente documento. Este proceso consideró la conversión de grados a radianes, teniendo en cuenta que 1 grado sexagesimal es equivalente a 0.01745 radianes. Teniendo los mapas de los factores L (Longitud) y S (gradiente) se procedió a realizar la multiplicación de estos factores usando el comando de *map algebra*.

d. Cálculo del factor de Cobertura Vegetal o factor “C”

Para determinar el factor de cobertura vegetal de la zona de estudio se usó como insumo el mapa temático de cobertura vegetal y capacidad de uso mayor de suelos (SERNANP, 2018) en formato vectorial. A cada tipo de cobertura vegetal se le asignó un valor numérico, que fueron comparados con los valores de la Tabla 8:

Tabla 8

Factor C según tipo de cobertura vegetal

Tipo de cobertura vegetal	Factor C
Cuerpos de agua	0
Bosque primario	0.003
Páramo y/o pastos naturales	0.0035
Tierra cultivada sin manejo	0.63
Sistemas de agroforestería de café (<i>valor promedio</i>)	0.072
Casco urbano	0.015
Vegetación arbustiva y/o áreas degradadas en transición	0.1
Suelo desnudo	1

Fuente: Elaboración propia a partir de Jumbo (2018); SENAHMI (2017a) , Flores (2015) y Pérez *et al.*, (2012)

e. Factor de prácticas de conservación de suelos o factor “P”

Para determinar el factor de prácticas de conservación se usa como insumo las prácticas culturales en los cultivos que se realizan en la zona de amortiguamiento del SNTN y se compara con la Tabla 9:

Tabla 9*Factor P según tipo de práctica de cultivo en función a la pendiente*

Pendiente (%)	Contorno	Cultivo en franjas	Terraza
0.0 - 7	0.55	0.27	0.10
7.0 - 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 - 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 - 26.8	0.90	0.45	0.18
26.8 >	1.00	0.50	0.20

Fuente: Elaboración propia a partir SENAHMI (2017a).

Estimación de tasas de erosión y análisis de cambio

Una vez obtenido el cálculo de los factores (en formato *raster*) que influyen en la erosión hídrica, se procedió a realizar el modelamiento geoespacial, usando la ecuación universal de pérdida de suelos, para ello, se empleó la herramienta *raster calculator* del módulo de álgebra de mapas que básicamente es una superposición de los *raster* generados. Los resultados generados fueron la tasa de erosión y su distribución en la zona de amortiguamiento del SNTN. Para el análisis de cambio se consideró dos escenarios basados en la cobertura vegetal. El primer escenario es cuando la cobertura vegetal está en correspondencia con la capacidad de uso mayor de suelos y el segundo escenario es cuando la cobertura vegetal está en relación al uso actual.

Análisis de consistencia de resultados

Se realizó un recorrido de campo entre los distritos de Tabaconas y Namballe con la finalidad de verificar mediante una inspección visual la manifestación de la erosión hídrica, se debe precisar que para efectuar esta actividad se tomó como referencia de tránsito las vías de tránsito cercanas. Para esta verificación se usó un GPS Garmin que permitió ubicar cada punto de muestreo y se generó un registro fotográfico de las visitas haciendo énfasis en las zonas donde se detecta la erosión hídrica generada para posteriormente en gabinete realizar un comparativo que nos permita validar que el modelo de erosión hídrica efectiva tiene validez o correlación.

2.7. Identificación de variables y su mensuración

En la presente investigación se consideró 5 variables independientes (erosividad, erodabilidad, factor topográfico, factor de cobertura vegetal y prácticas de conservación de suelos); cada una de estas variables fueron procesadas por procesos individuales sujetas a sub-variables que finalmente permitieron determinar la tasa de erosión hídrica. El resumen de esta mención se presenta en la siguiente Tabla 10:

Tabla 10

Variables de estudio y su metodología de determinación.

Variable	Subvariable	Unidad de medida	Metodología
Erosividad (R)	Precipitación	$\frac{\text{MJ. mm}}{\text{Ha. año}}$	(Jumbo, 2018; Flores, 2015)
Erodabilidad (K)	Clasificación del suelo	$\frac{\text{Tn. Ha. h}}{\text{Ha. MJ. mm}}$	(Jumbo, 2018)
Factor topográfico (LS)	Modelo de Elevación Digital	Adimensional	(SENAHMI, 2017a)
Cobertura Vegetal (C)	Clasificación de vegetación	Adimensional	(SENAHMI, 2017a)
Prácticas de conservación (P)	No aplica	Adimensional	(SENAHMI, 2017a)

Fuente: Elaboración propia.

2.8. Análisis de datos

Los resultados obtenidos fueron sometidos a la herramienta de estadísticos zonales del módulo de *Spatial Analyst* del software ArcGIS 10.7 con la finalidad de extraer las estadísticas de cada mapa generado en formato *raster* que posteriormente será presentada mediante tabla de datos o gráficos descriptivos que permitieron apreciar mejor la información generada.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Determinación de los factores de erosión hídrica

3.1.1. Determinación del factor de erosividad

Análisis de consistencia de precipitaciones

a. Análisis gráfico

El análisis gráfico de cada estación meteorológica de la zona de estudio se realizó con la finalidad de verificar a través del registro histórico entre los años de 1986 a 2010 de forma visual las inconsistencias generadas por falta de datos, picos y/o tendencias generadas por el error sistemático. Para ello, se graficó cada registro histórico pluviométrico de la data descargada del SENAHMI, obteniéndose las siguientes figuras:

Tabaconas

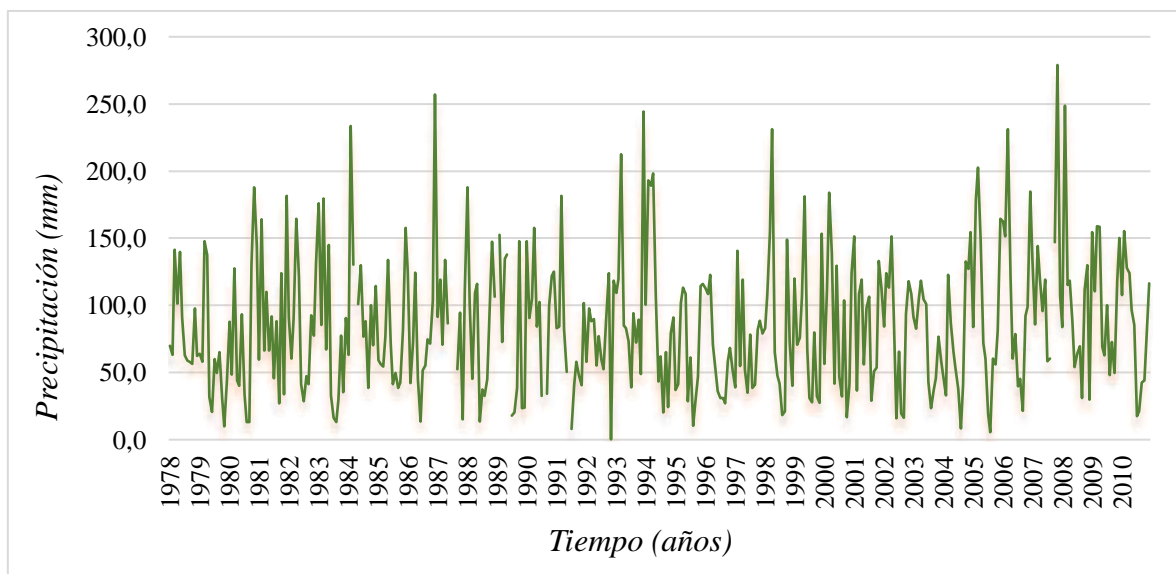


Figura 5. Análisis de precipitación de la estación meteorológica Tabaconas 1978-2010.

Fuente: Elaboración propia a partir de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAHMI] (2020a).

San Ignacio

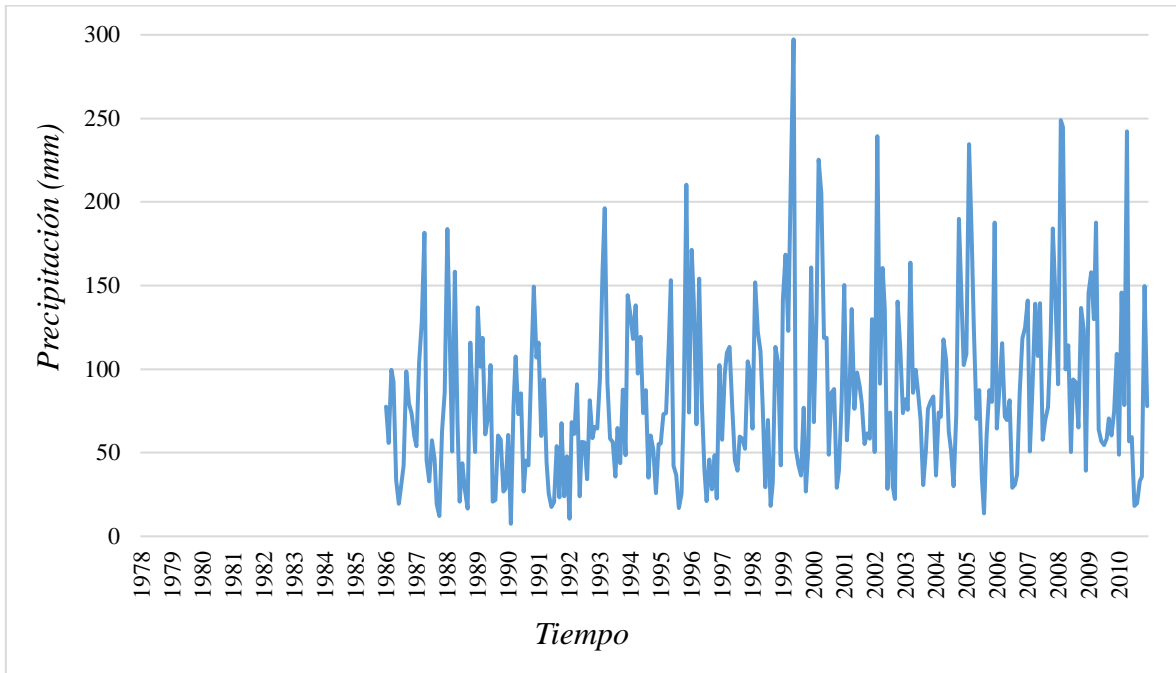


Figura 6. Análisis de precipitación de la estación meteorológica San Ignacio 1978-2010.
Fuente: Elaboración propia a partir de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (2020b).

Chirinos

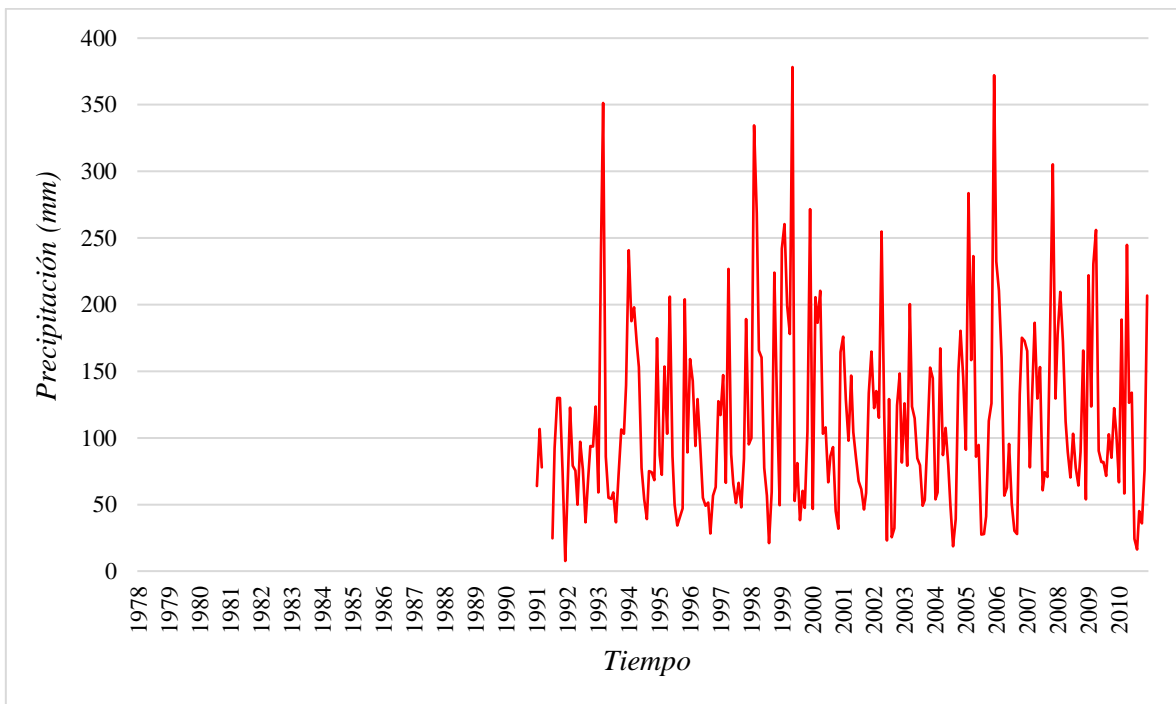


Figura 7. Análisis de precipitación de la estación meteorológica Chirinos 1978-2010.
Fuente: Elaboración propia a partir de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (2020c).

Huancabamba

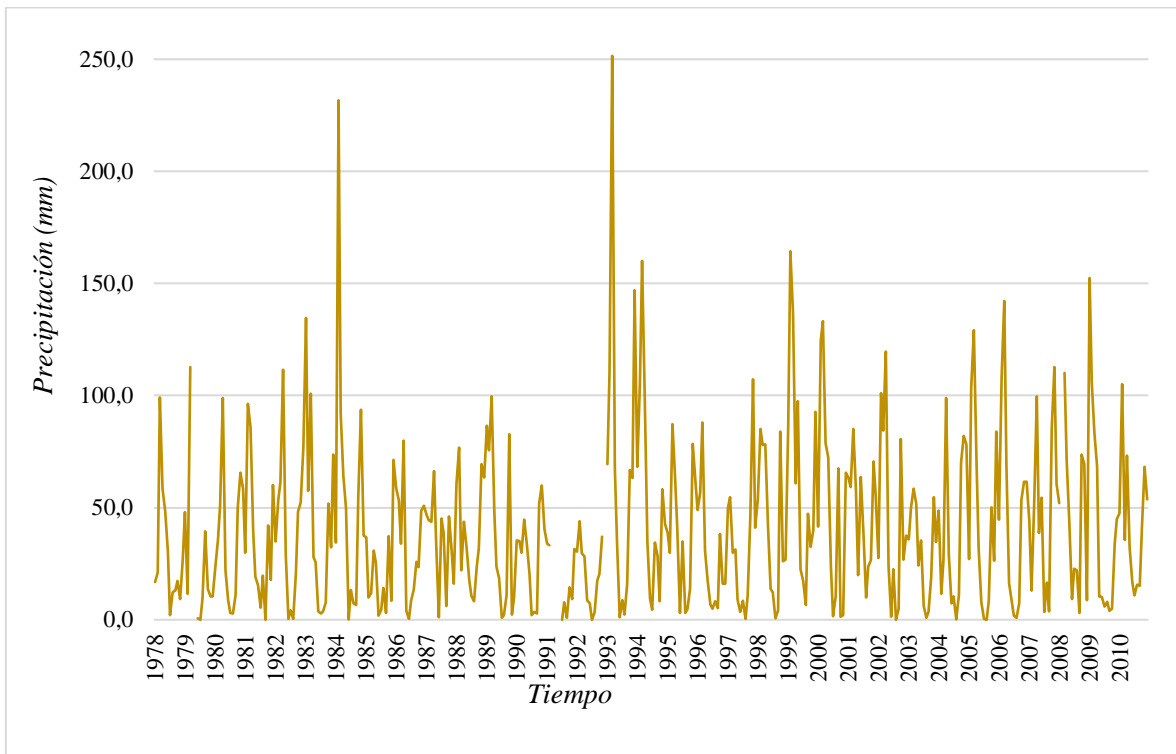


Figura 8. Análisis de precipitación de la estación meteorológica Huancabamba 1978-2010.
Fuente: Elaboración propia a partir de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (2020d).

Sondorillo

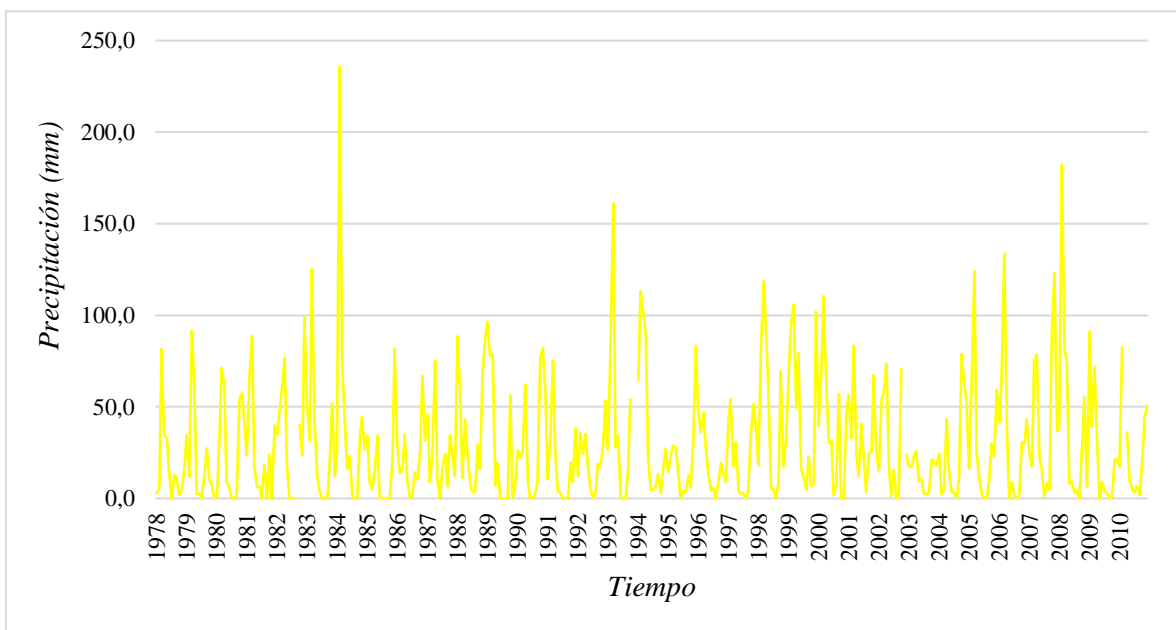


Figura 9. Precipitación histórica de la estación meteorológica Sondorillo 1978-2010.
Fuente: Elaboración propia a partir de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (2020e).

Salala

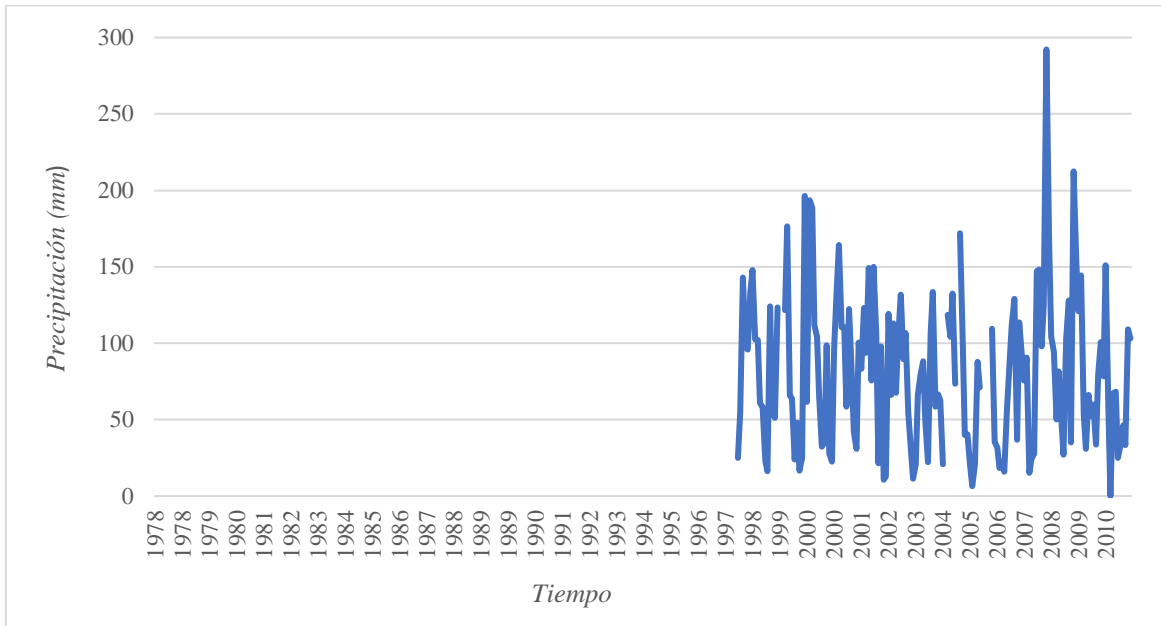


Figura 10. Precipitación histórica de la estación meteorológica Salala 1978-2010.

Fuente: Elaboración propia a partir de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (2020f).

b. Análisis doble de masa

Las estaciones meteorológicas de Tabaconas, Chirinos, Salala, Sondorillo y Huancabamba no cuentan con la data completa en el periodo de 1986 a 2010. En ese sentido, antes de realizar el análisis doble de masa se completó la serie histórica pluviométrica, para lo que se usó la correlación entre estaciones meteorológicas y regresión lineal, según Tabla 11:

Tabla 11

Índice de correlación entre estaciones meteorológicas

	Chirinos	Huancabamba	San Ignacio	Sondorillo	Tabaconas	Salala
Chirinos	1.00					
Huancabamba	0.72	1.00				
San Ignacio	0.77	0.69	1.00			
Sondorillo	0.70	0.88	0.66	1.00		
Tabaconas	0.72	0.72	0.67	0.76	1.00	
Salala	0.74	0.90	0.70	0.74	0.73	1.00

Fuente: Elaboración propia.

Con la data extendida y completa, se procedió a realizar el análisis de consistencia por medio del análisis de doble masa. En el eje de las abscisas se graficó el promedio multianual de las precipitaciones acumuladas de las estaciones consultadas y en el eje de las ordenas las precipitaciones acumuladas por cada estación meteorológica, según se muestra en la Figura 11:

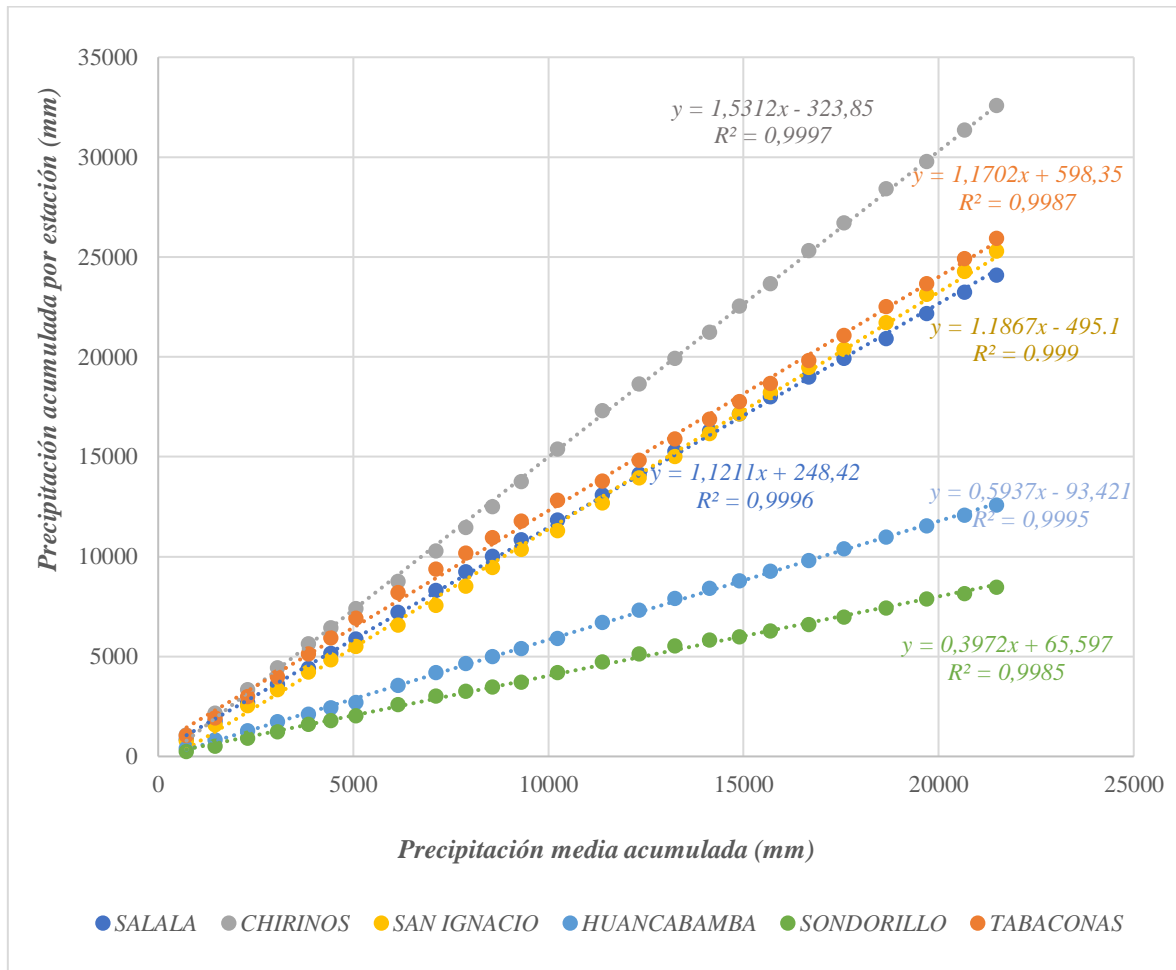


Figura 11. Análisis de doble masa con relación al promedio multianual según estaciones.
Fuente: Elaboración propia.

Respecto al análisis doble de masa se verificó que la estación meteorológica base es propicia para el estudio es Chirinos; puesto que, el coeficiente de correlación R^2 es igual a 0.9997, siendo superior al resto de estaciones. En ese sentido, se realizó el análisis doble de masa colocando la precipitación acumulada de la estación Chirinos en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas la precipitación acumulada de las estaciones Salala, San Ignacio, Huancabamba, Tabaconas y Sondorillo teniendo su representación gráfica en la Figura 12:

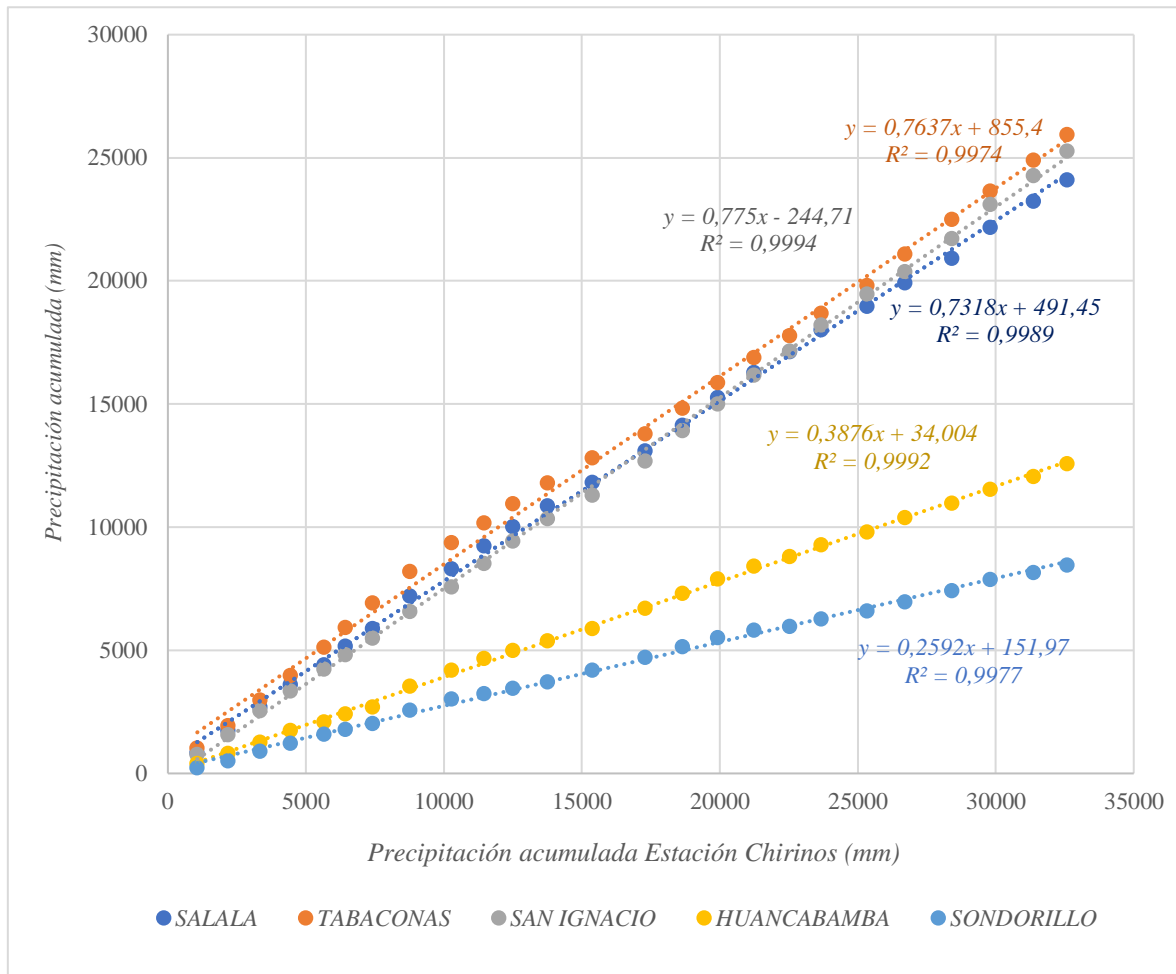


Figura 12. Análisis doble de masa con Estación Chirinos como referencia de estimación.
Fuente: Elaboración propia.

En base al gráfico se puede observar que existe un alto índice de correlación entre la precipitación acumulada de las estaciones meteorológicas de Salala, Tabaconas, San Ignacio, Huancabamba y Sondorillo con la estación base de Chirinos. Teniendo un R^2 de 0.9974, 0.9994, 0.9989, 0.9992 y 0.9977 respectivamente.

c. Análisis estadístico de saltos y tendencias

Análisis de saltos

Para el análisis de saltos se ejecutaron las pruebas de T de Student para la media y F de Fischer para la desviación estándar. El resumen de estos procesos se presenta en las tablas 12 y 13 respectivamente:

Tabla 12*Prueba T de Student para las medias por estación meteorológica*

	Salala	Tabaconas	Chirinos	San Ignacio	Huancabamba	Sondorillo
Periodo X ₁	1993-2010	1996-2010	1986-1998	1986-1998	1986-1992	1986-1991
Periodo X ₂	1986-1992	1986-1995	1999-2010	1999-2010	1993-2010	1992-2010
Promedio X ₁	70	87.57	82.20	72.40	44.28	25.01
Promedio X ₂	84.76	84.9	119.41	97.13	36.91	29.35
N ₁	84	180	156	156	216	228
N ₂	216	120	144	144	84	72
G.L N ₁	82	178	154	154	214	226
G.L N ₂	214	118	142	142	82	70
Varianza X ₁	1122.43	2494.36	1803.87	1803.87	1348.35	795.83
Varianza X ₂	2796.49	251.69	4970.59	3027.50	1279.90	1013.30
Sp	48.27	50.03	57.65	48.90	36.46	29.11
Sd	6.21	5.90	6.66	5.65	4.69	3.94
Tc	2.38	0.47	7.06	4.38	1.57	1.10
Tt (95%)	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97
Diferencias significativas	<i>Si</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>No</i>	<i>No</i>

Fuente: Elaboración propia.

Según la prueba estadística de T de Student al 95 % de confianza existen diferencias significativas en las medias para los periodos analizados en las estaciones meteorológicas de Salala, Chirinos y San Ignacio; asimismo, las estaciones de Tabaconas, Huancabamba y Sondorillo no presentaron diferencias significativas en la media. En relación a las diferencias de la desviación estándar se presenta la siguiente tabla:

Tabla 13*Prueba F de Fischer para la desviación estándar de las estaciones meteorológicas*

	Salala	Tabaconas	Chirinos	San Ignacio	Huancabamba	Sondorillo
<i>F_c</i>	2.49	1.01	2.76	1.68	1.05	1.27
<i>F_t</i>	1.37	1.31	1.31	1.31	1.37	1.40
<i>Diferencias significativas</i>	<i>Si</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>No</i>	<i>No</i>

Fuente: Elaboración propia.

Lo que correspondería realizar en este caso es la corrección del periodo que presenta saltos tanto en la media como en la desviación estándar; sin embargo, según la memoria descriptiva de climatología del informe de Zonificación Ecológica Económica en la Zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas – Namballe (SERNANP, 2018) indica que no es necesario realizar la corrección de la data; debido a que, estos saltos encontrados se deben al fenómeno del niño.

Análisis de tendencia

En el presente estudio se determinó la tendencia de la media y de la desviación estándar usando los valores determinísticos en cada estación meteorológica, para la evaluación de la significancia se usó el coeficiente de correlación. El resumen de estos procesos se detalla en las en las Tablas 14 y 15:

Tabla 14*Análisis de tendencia de la media por estación meteorológica*

	Salala	Tabaconas	Chirinos	San Ignacio	Huancabamba	Sondorillo
<i>R</i>	0.1	0.1	0.155	0.216	0.1	0.0
<i>R²</i>	0.0	0.0	0.024	0.047	0.007	0.001
<i>T_c</i>	1.15	1.5	2.7	3.82	1.46	0.537
<i>T_t</i>	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97
<i>Diferencias significativas</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>No</i>	<i>No</i>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15

Análisis de tendencia para la desviación estándar por estación meteorológica

	Salala	Tabaconas	Chirinos	San Ignacio	Huancabamba	Sondorillo
<i>R</i>	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2
<i>R</i> ²	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
<i>Tc</i>	0.3	0.4	1.7	1.5	1.4	1.1
<i>Tt</i>	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
<i>Diferencias significativas</i>	No	No	No	No	No	No

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados, las estaciones meteorológicas de *Chirinos* y *San Ignacio* presentan diferencias significativas en la tendencia de la media ($Tc > Tt$), respecto a la tendencia de la desviación estándar no se evidenciaron diferencias significativas ($Tc < Tt$). La inconsistencia de la media se corrigió mediante regresión simple. En general, el análisis de consistencia nos permite contar con data con un nivel de confianza del 95 %, que para fines de este estudio se resume en la precipitación media multianual, según la siguiente Figura 13:

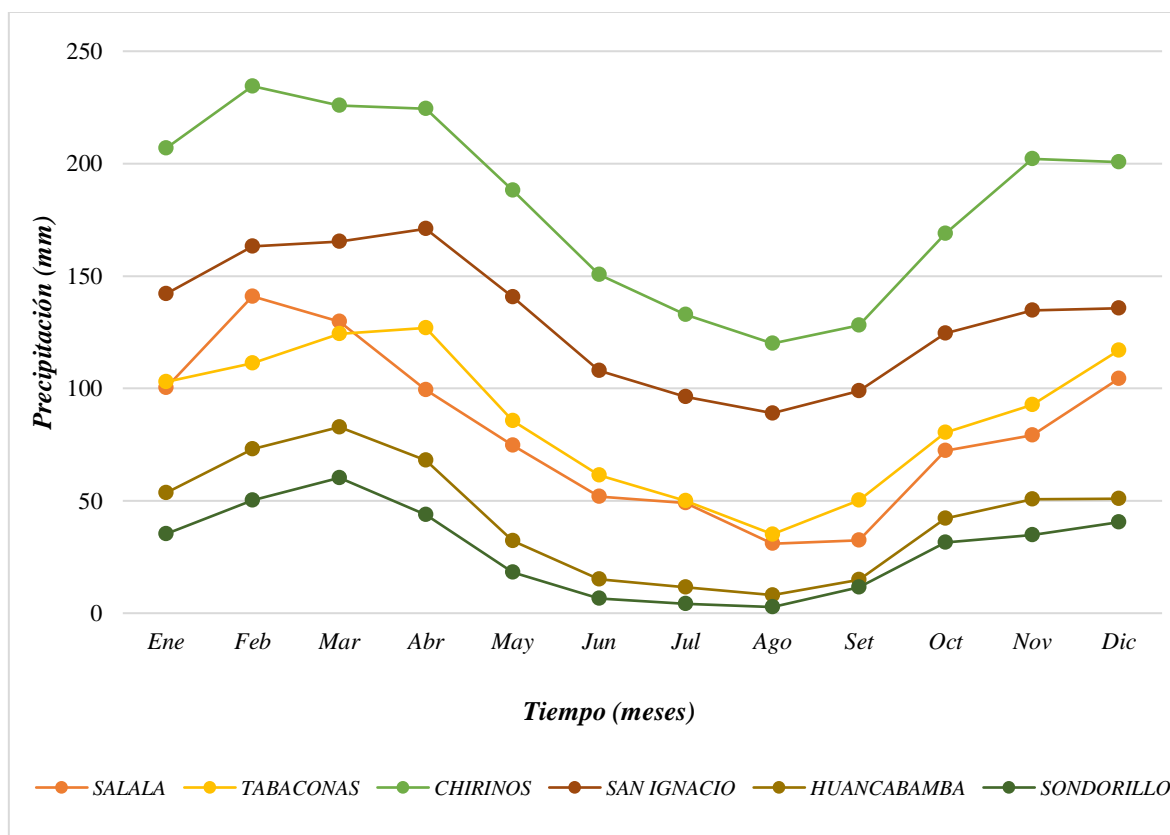


Figura 13. Precipitación media mensual periodo 1986-2010 por estación meteorológica.

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del Factor de Erosividad o Factor “R”

Con la precipitación media y anual se calculó el Índice Modificado de Fournier (IMF) por medio de la función *map algebra* de ArcGIS 10.7. Teniendo como resultado el mapa de la Figura 14:

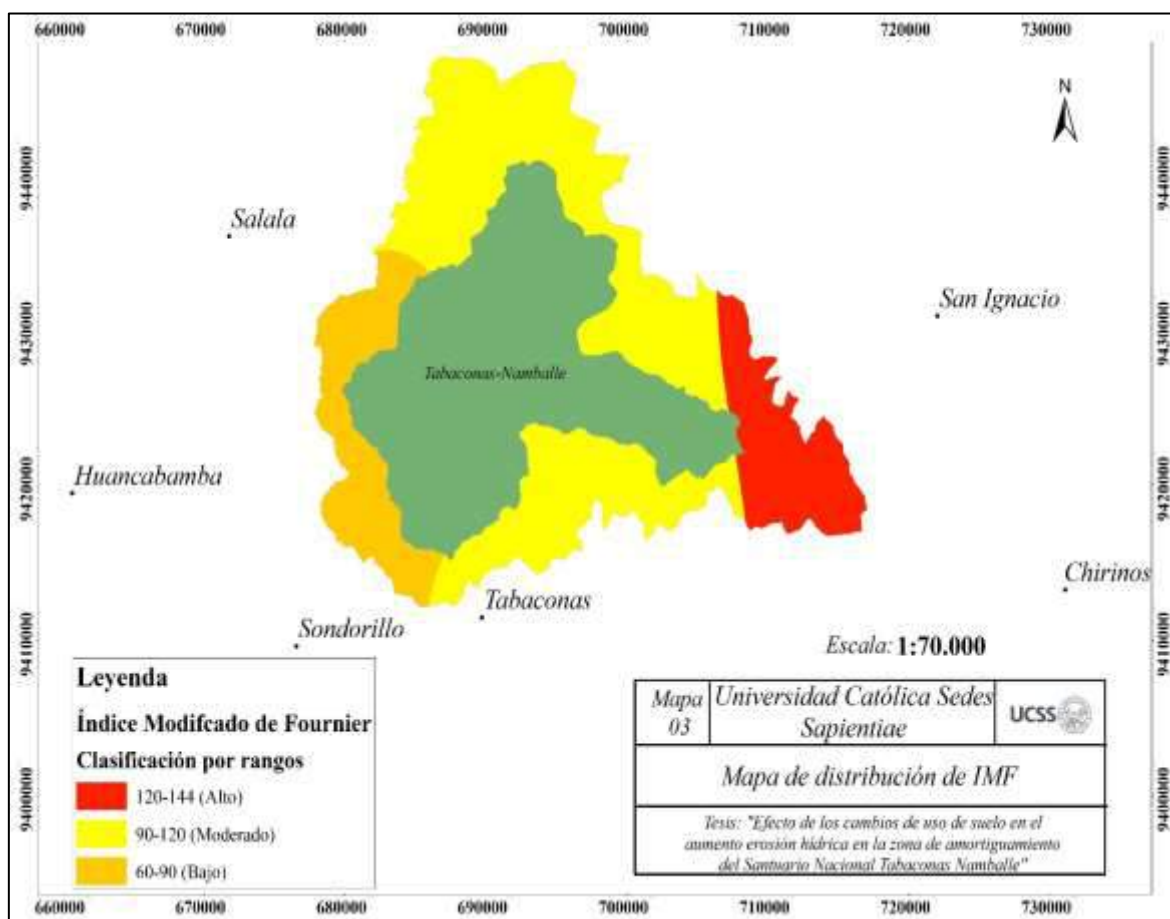


Figura 14. Mapa de distribución del IMF en la Zona de Amortiguamiento del SNTN.

Fuente: Elaboración propia.

El valor promedio de la distribución del IMF es 101.33 que corresponde con un indicador de agresividad climática definido como *moderado* al realizar la comparación con la Tabla 2. Cabe precisar que las zonas más orientadas de la Zona de Amortiguamiento del SNTN hacia Huancabamba (Sontor y El Carmen) presentan menor agresividad climática con valores entre 60-90 y la parte más orientada hacia San Ignacio (Tabaconas y Namballe) presenta mayor agresividad climática con valores entre 90 y 144. Con el IMF, se procede a calcular el Factor de Erosividad o Factor “R” (ver Apéndice 2 y 3) teniendo como resultado la siguiente Figura 15 :

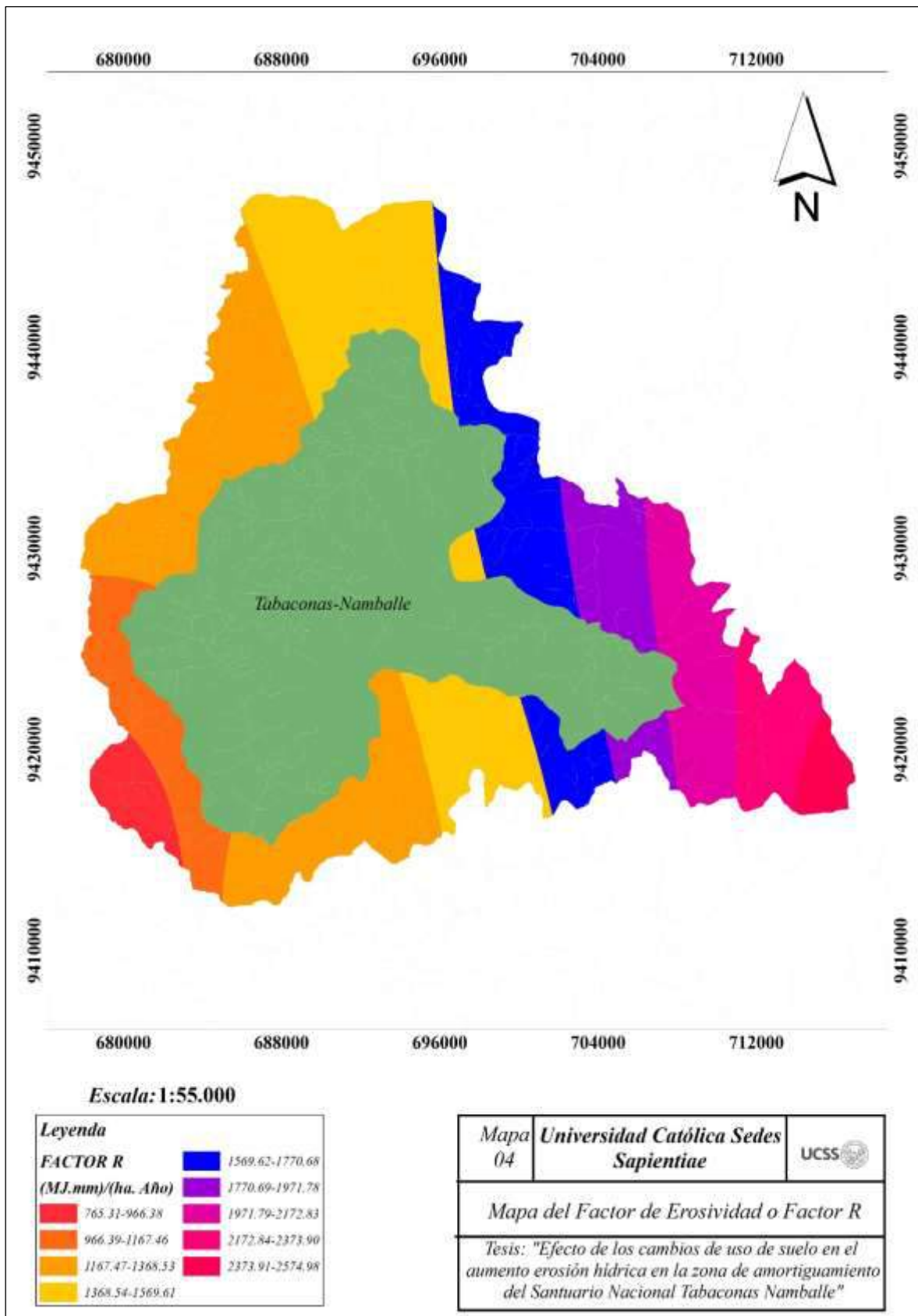


Figura 15. Mapa de Erosividad o Factor "R" en la Zona de Amortiguamiento del SNTN.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 15 se aprecia que los valores de erosividad en unidades $\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ varían entre 765.63 y 2573.98 respectivamente para el área de estudio, correspondiendo con lo calculado a través del IMF, según se observa en la Figura 16:

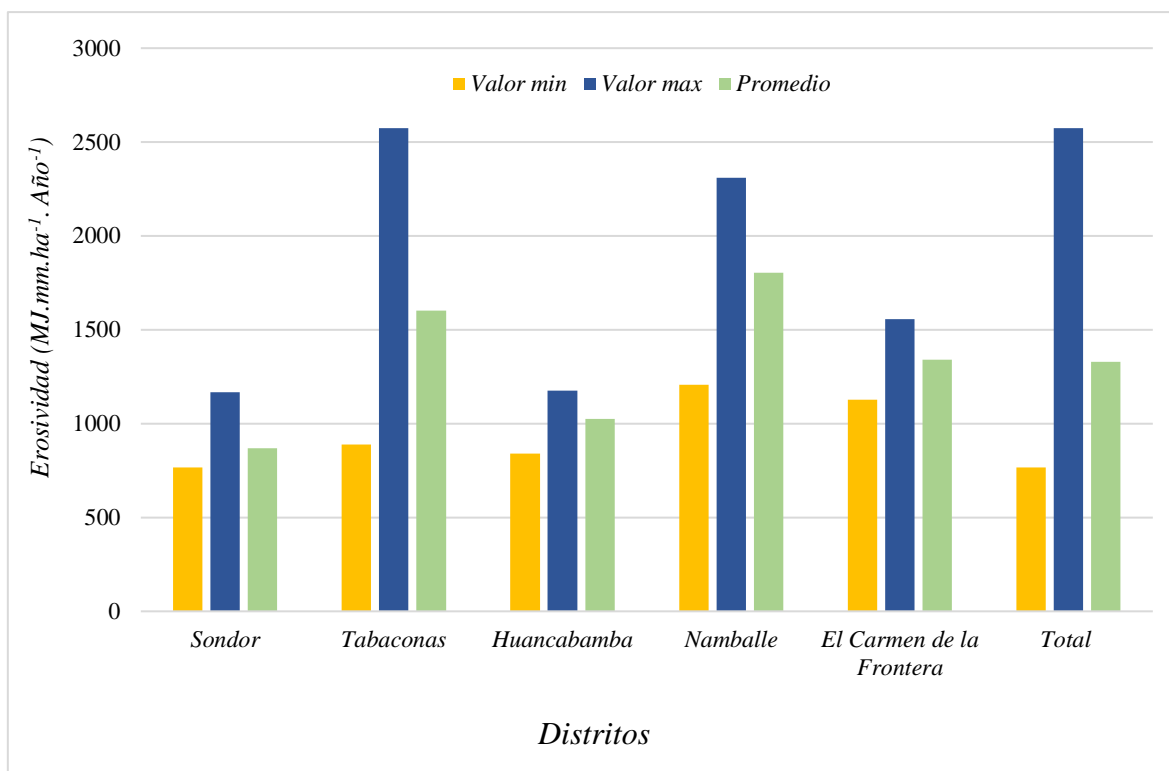


Figura 16. Distribución del factor de erosividad por distritito de la zona de amortiguamiento del SNTN. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la distribución de la erosividad por distrito se presenta La Figura 16 que indica que el valor promedio para toda la Zona de Amortiguamiento del SNTN para el factor de erosividad es $1328.22 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$; asimismo, el valor mínimo es $761.31 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ correspondiendo al distrito de Sondor que pertenece a la provincia de Huancabamba y el valor máximo es $2573.98 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{Año}^{-1}$ y corresponde con el distrito de Tabaconas que se encuentra en la provincia de San Ignacio.

Los valores mostrados anteriormente guardan una relación estricta con la precipitación media generada en por ubicación geográfica; es decir, las zonas orientadas más al este (Huancabamba) tienen una menor precipitación promedio y las zonas orientadas hacia el oeste (San Ignacio) presentan una precipitación promedio superior.

3.1.2. Determinación del factor de erodabilidad

Para determinar el factor de erodabilidad o factor “K” se usó la información de edafología de las muestras descritas en tabla 5 del presente documento. En ese sentido se usó la ecuación para determinar el Factor de erodabilidad por punto de muestreo, según la Tabla 16:

Tabla 16

Cálculo del factor de erodabilidad por punto de muestreo de suelos

Lugar	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	MO (%)	Clase textural	Permeabilidad	Estructura	K t. ha. MJ ⁻¹ . mm ⁻¹
Pampa Chiquita	84	16	0	0.39	Arena Franco	0.9755	1	0.106
Puchua	58	30	12	9.19	Franco Arenoso	0.0855	2	0.010
Higuerón monte	76	16	8	13.62	Franco Arenoso	0.0855	2	0.001
Higuerón laderas	38	40	22	2.63	Franco	0.3050	2	0.045
Higuerón humedal	38	40	22	9.55	Franco	0.3050	2	0.016
Higuerón aluvial	64	18	18	4.84	Franco Arenoso	0.0855	2	0.036
Higuerón Café	58	22	20	6.9	Arcilloso Arenoso	0.3050	3	0.026
San Miguel	16	30	54	2.69	Arcilloso	0.0240	5	0.019
Camino a Apacheta	82	12	6	0.37	Arena Franco	0.9755	2	0.095
Romerillo	22	32	46	2.08	Arcilloso	0.0240	5	0.027
Miraflores	48	24	28	3.02	Franco Arcilloso Arenoso	0.3050	2	0.034
El sauce	62	28	10	6.37	Franco Arenoso	0.0855	2	0.035
Pueblo Libre	76	18	6	7	Franco Arenoso	0.0855	2	0.034
Tayapampa	56	28	16	6.65	Franco Arenoso	0.0855	2	0.027
Huachumo	52	36	12	0.05	Franco	0.3050	2	0.047
Machete	56	34	10	2.65	Franco Arenoso	0.0855	2	0.064
Pingula	42	30	28	19.7	Franco Arcilloso	0.0855	2	0.001

Fuente: Elaboración propia.

Con los factores “K” calculados por cada punto de muestro de suelos se procedió a emplear la herramienta IDW del software ArcGIS 10.7 (ver Apéndice 4) para realizar la interpolación por toda el área que corresponde a la Zona de Amortiguamiento del SNTN, según la Figura 17:

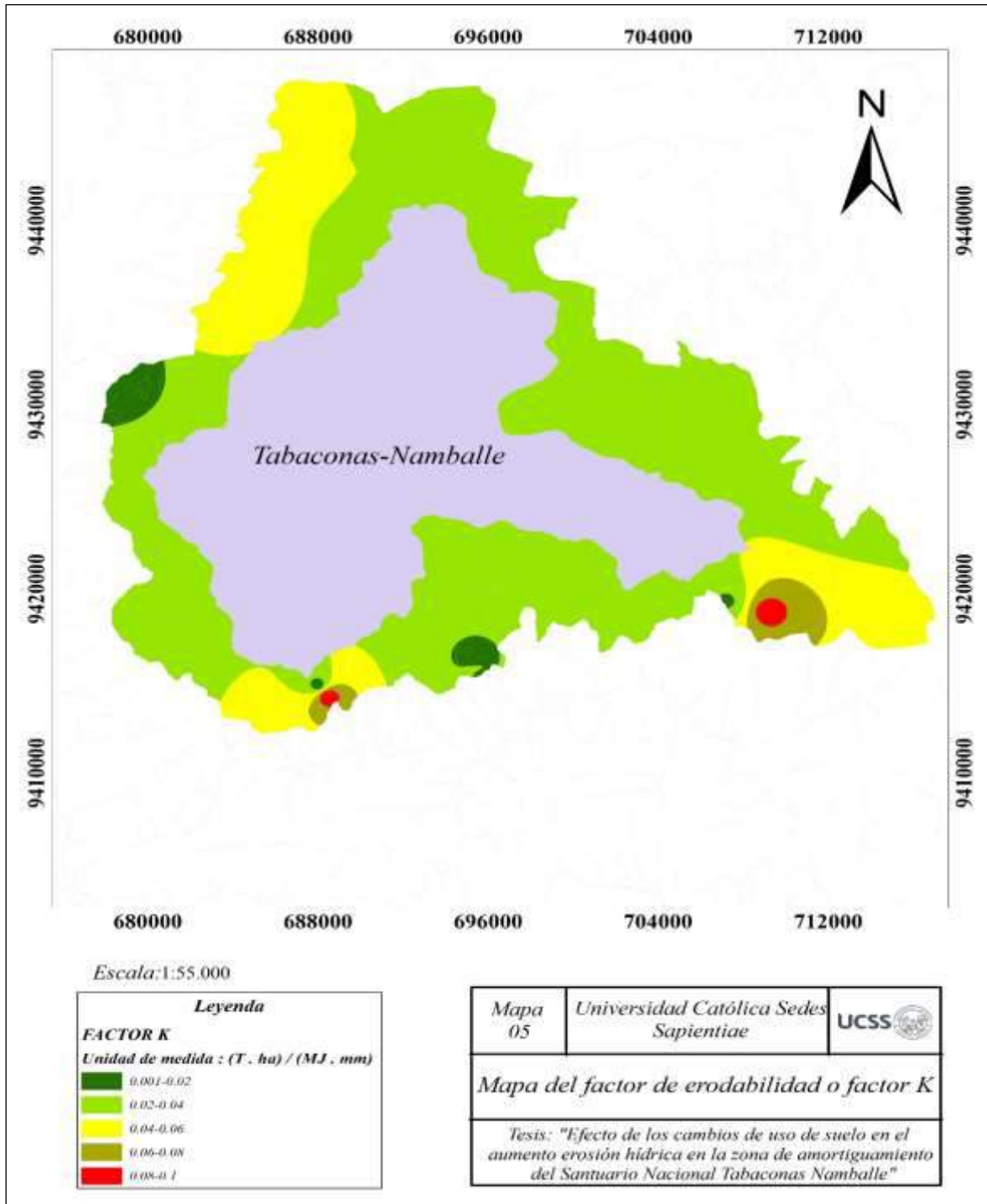


Figura 17. Mapa del factor de erodabilidad de la Zona de Amortiguamiento del SNTN.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17 precisa como se distribuye el valor de erodabilidad en la zona de amortiguamiento del SNTN que varían entre valores de 0.001 y 0.1 t. ha. MJ⁻¹. mm⁻¹ respectivamente. Respecto a las estadísticas por zona geográfica, según se presenta en la Figura 18:

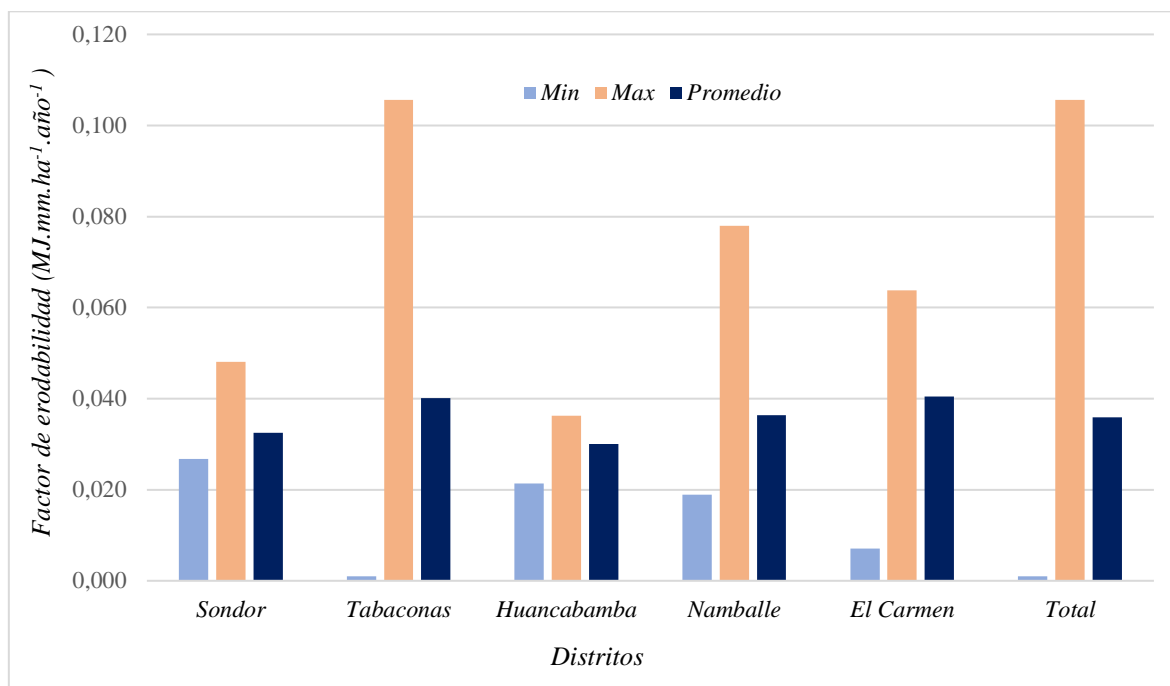


Figura 18. Distribución del factor de erodabilidad por distrito en la zona de amortiguamiento del SNTN. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 18 nos muestra la distribución del factor de erodabilidad por distrito de la zona de amortiguamiento del SNTN. Cabe precisar que el valor promedio es de 0.036 t. ha. MJ⁻¹. mm⁻¹ para toda el área de estudio. Asimismo, el valor mínimo es de 0.001 t. ha. MJ⁻¹. mm⁻¹ y el valor máximo es 0.01 t. ha. MJ⁻¹. mm⁻¹ ubicados en el distrito de Tabaconas, provincia de San Ignacio.

Cabe precisar que los bajos valores se deben principalmente al tipo de suelo que están colindantes donde se observa un alto contenido de materia orgánica y por lo general suelen ser arcillosos que son propicios en la reducción de la erosión. Por otra parte, los valores más altos se encuentran en zonas donde tienen alto contenido de arenas y que tendrían un efecto sinérgico con la manifestación de la erosión hídrica.

3.1.3. Determinación del factor de cobertura vegetal

Estimación del Factor de Cobertura Vegetal con cambios de uso de suelo

En relación a la estimación del factor de cobertura vegetal se consideró el mapa de cobertura vegetal actual donde se asignaron los ratios según tipo de cobertura, según la Tabla 17:

Tabla 17

Factor de Cobertura Vegetal con cambios de uso de suelo

<i>N.º</i>	<i>Tipo de cobertura vegetal</i>	<i>FACTOR C</i>
1	Áreas sin o con poca vegetación o degradadas	1
2	Bosque abierto alto	0.003
3	Bosque denso alto	0.003
4	Bosque denso bajo	0.003
5	Bosque fragmentado	0.1
6	Cuerpo de agua	0
7	Cultivos agrícolas	0.63
8	Casco urbano	0.015
9	Páramo	0.035
10	Pastos naturales	0.04
11	Tierras desnudas	1
12	Tierras desnudas	1
13	Vegetación arbustiva / herbácea	0.1
14	Vegetación secundaria o en transición	0.1

Fuente: Elaboración propia a partir de Flores (2015), Jumbo (2018) y Álvarez (2019).

La Tabla 17 muestra qué tipo de cobertura vegetal está presente actualmente en la zona de amortiguamiento del SNTN, donde los valores del factor de cobertura vegetal varían en un rango entre 0 a 1. Asimismo, valores más cercanos a 0 corresponden al tipo de cobertura vegetal que tiene características en la reducción de la erosión hídrica y en su defecto valores cercanos a 1 indican su amplificación. Seguidamente se realizó la conversión del formato vectorial a raster, interpolando el valor de “C”, cuyos resultados se muestran en la siguiente Figura 19:

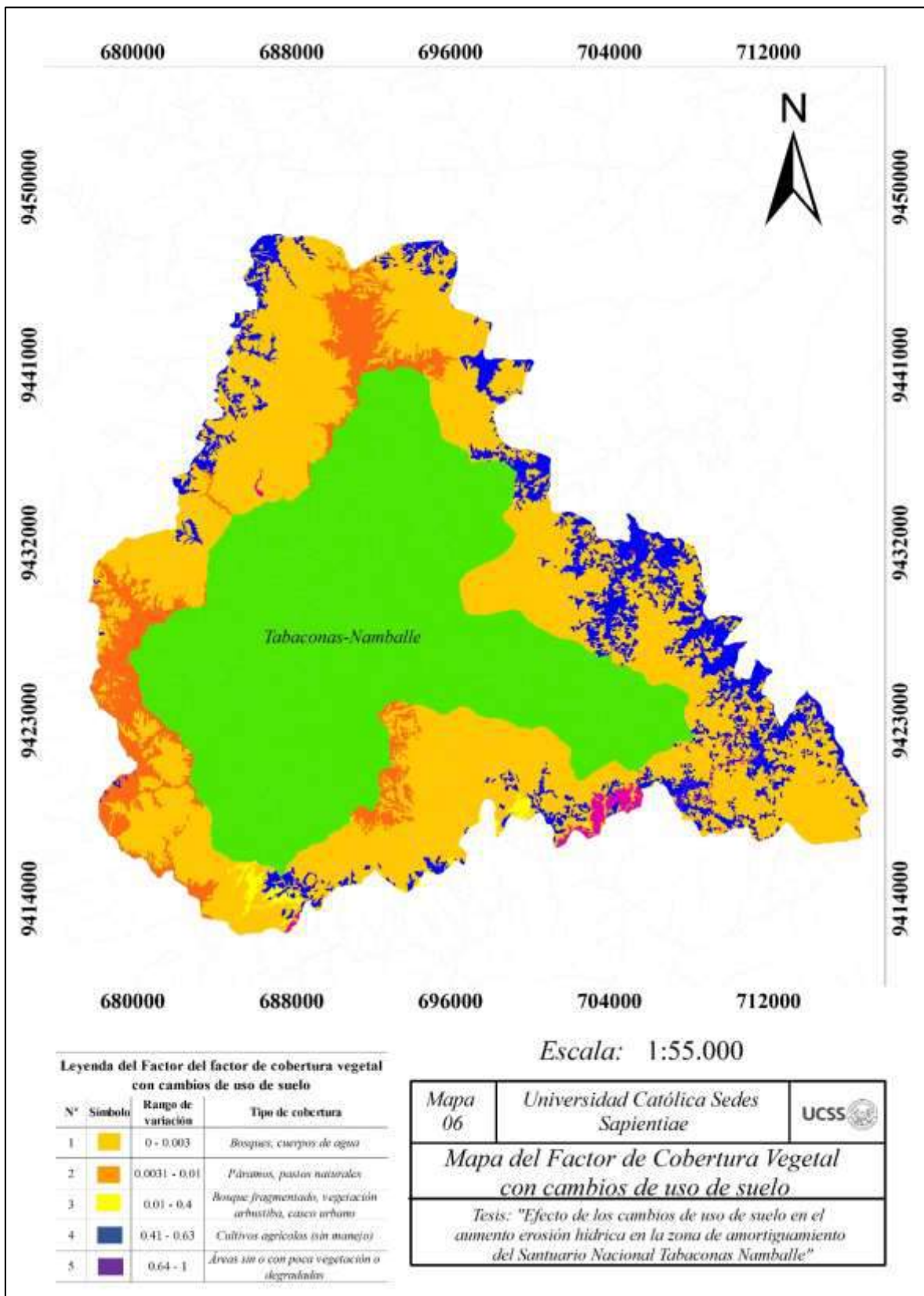


Figura 19. Mapa de distribución del Factor de Cobertura Vegetal con cambios de uso de suelo en la zona de amortiguamiento del SNTN. Fuente: Elaboración propia.

Estimación del Factor de cobertura vegetal sin cambios de uso del suelo

Para la estimación de este factor se usó el mapa de capacidad de uso mayor de suelos que indica que uso debe tener el suelo y por consecuencia el tipo de vegetación que debe estar presente, seguidamente se le asignó la ratio por tipo de cobertura, según la Tabla 18:

Tabla 18

Factor de Cobertura Vegetal sin cambios de uso de suelo

N.º	Tipo de Cobertura	Descripción	FACTOR C
1	Tierras aptas para forestales	Tierras aptas para forestales, con calidad agrológica media con limitaciones de suelo	0.003
2	Tierras de protección	Tierras aptas para protección, con limitación de suelo (pastizales, páramos)	0.0037
3	Tierras aptas para cultivos permanentes (agroforestería)	Tierras aptas para cultivos permanentes, con calidad agrológica baja, con limitaciones de suelo y pendiente	0.0072
4	Tierras aptas para cultivos en limpio (agroforestería)	Asociación de tierras aptas para cultivos en limpio con tierras de protección	0.0072
5	Cuerpos de agua	Cuerpos de agua	0

Fuente: Elaboración propia.

Según la Tabla 18, el tipo de cobertura vegetal que correspondería para el escenario de estudio *sin cambios de uso de suelo* corresponde a tierras aptas para forestales, tierras para protección y tierras para cultivos permanentes o limpios, considerándose para el presente estudio como sistemas agroforestales. Los valores varían entre 0.003 y 0.072 respectivamente, considerando que valores cercanos a 0 son un indicativo de tipo de cobertura vegetal que reduce la erosión hídrica y valores cercanos a 1 son un indicativo potenciador de la erosión hídrica.

En ese sentido, se procedió a realizar la conversión del polígono en formato vectorial a raster, interpolando el valor de “Factor C”, donde los resultados de este proceso se detallan en el mapa según la Figura 20:

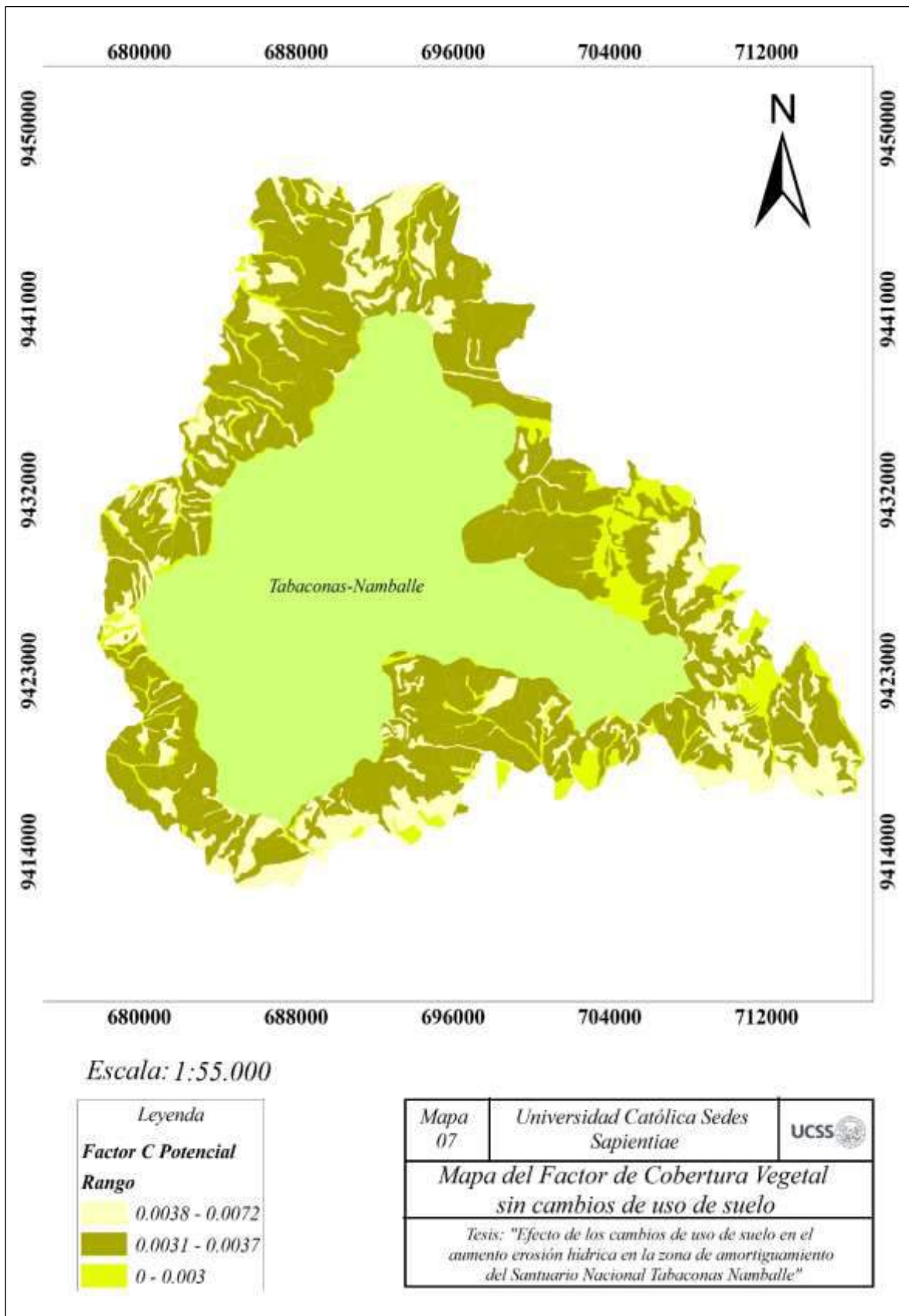


Figura 20. Mapa de distribución del Factor de Cobertura Vegetal sin cambios de uso de suelo en la zona de amortiguamiento del SNTN. *Fuente:* Elaboración propia.

Análisis de cambio de la Cobertura Vegetal

Respecto al factor de Cobertura Vegetal o factor “C” en los dos escenarios analizados (con cambios de uso de suelo y sin cambios de uso de suelo) representados en las figuras 19 y 20, se pueden apreciar diferencias, como se explica en la Figura 21:

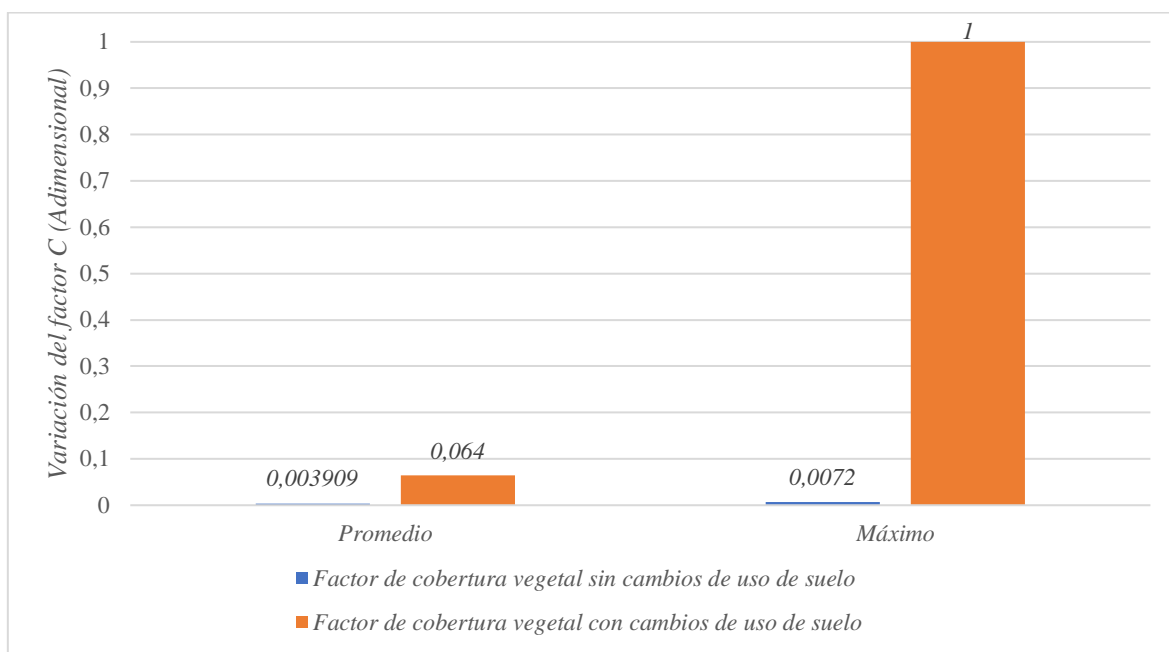


Figura 21. Comparación de los promedios y máximos en la variación de cobertura vegetal.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 21 muestra que el valor promedio es 0.064 y 1 el valor máximo para el factor de cobertura vegetal con cambios de uso suelo; en relación factor de cobertura vegetal sin cambios de uso de suelo es 0.0039 para el promedio y 0.0072 para el valor máximo.

En ese sentido, el mapa de cobertura vegetal con cambios de uso de suelo presenta valores más altos en relación a potenciación de la erosión hídrica y el mapa de cobertura vegetal sin cambios de uso de suelo presenta valores más bajos. Adicionalmente cabe precisar que el mapa de cobertura vegetal sin cambios de uso de suelo tiene carácter “potencial” al estar basado en la capacidad de uso mayor de suelos, en cambio el mapa de cobertura vegetal con cambios de uso de suelo tiene un carácter real al corresponder la vegetación con el uso actual del suelo.

3.1.4. Determinación del factor topográfico

Respecto a la determinación del factor topográfico (LS) que está conformado por la superposición entre longitud de la pendiente (L) y gradiente de la pendiente (S) se realizaron los siguientes procedimientos:

Pendientes

Se realizó la clasificación de las pendientes de la zona de amortiguamiento del SNTN usando el Modelo de Elevación Digital con una resolución de 12.5 metros, teniendo como resultado las siguientes variaciones en pendiente, considerando el reglamento de clasificación de Uso Mayor de suelos, según lo muestra la Tabla 19:

Tabla 19

Variación de las pendientes en la zona de amortiguamiento del SNTN

N.º	Variación en la pendiente	Tipo de pendiente
1	0 - 4 %	Nula o casi al nivel
2	4 - 8 %	Ligeramente inclinada
3	8 - 15 %	Ligeramente inclinada a moderada
4	15 - 25 %	Moderadamente inclinada
5	25 - 50 %	Empinada
6	50 - 75 %	Muy empinada
7	> 75 %	Extremadamente empinada

Fuente: Elaboración propia a partir de Álvarez (2019).

Aplicando este criterio, se realizó la clasificación en los rangos descritos de % de pendiente a través de la herramienta de reclasificación en el software ArcGIS 10.7 donde el producto generado es el mapa de pendientes de la zona de amortiguamiento del SNTN, la distribución espacial del mismo se representa en la Figura 22:

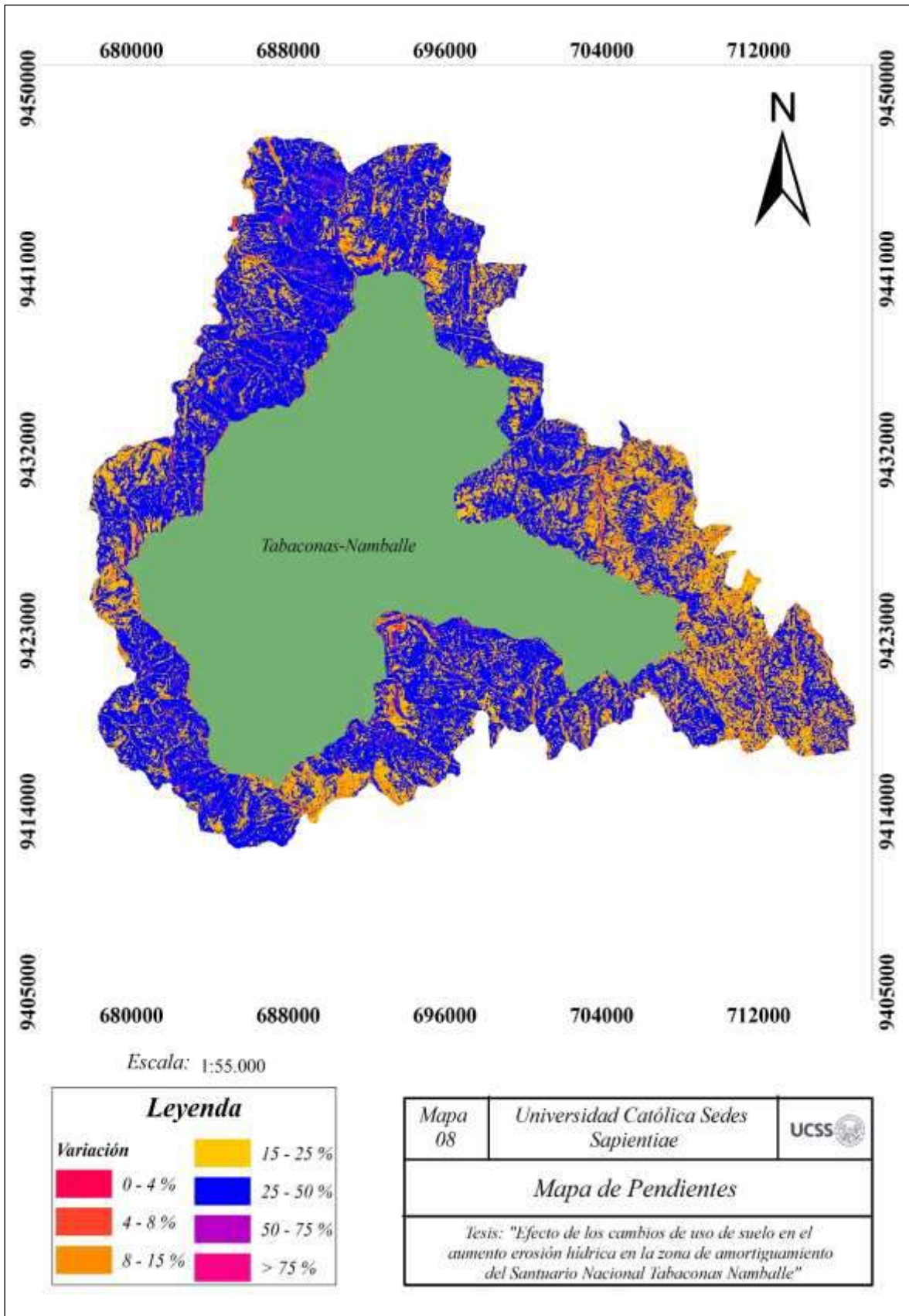


Figura 22. Mapa de pendientes de la zona de amortiguamiento del SNTN. Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del factor topográfico

Se realizaron los procedimientos (revisar apéndice 5) descritos en la metodología para realizar el cálculo del factor topográfico o factor “LS” que comprende la multiplicación entre la longitud de la pendiente (L) y la gradiente o inclinación de la pendiente (S) teniendo como resultado la Tabla 20:

Tabla 20

Variación del factor topográfico por área en la zona de amortiguamiento del SNTN

Variación	Área (Ha)	% de Área
0.02 - 16.34	43958.04	98.1212
16.35 - 97.94	740.19	1.6522
97.95 - 261.13	84.49	0.1886
261.14 - 522.23	12.90	0.0288
522.24 - 946.52	2.73	0.0061
946.53 - 1599.28	0.95	0.0021
1599.29 - 2562.10	0.32	0.0007
2562.11 - 4161.35	0.06	0.0001

Fuente: Elaboración propia.

En base a la Tabla 20 la distribución del factor topográfico varía entre 0.09 y 4161.35, entre las variaciones por área representativas tenemos que el rango de 0.009 a 16.34 abarca 43958.04 hectáreas correspondiendo al 98.1212 % de toda la zona de estudio; el rango de 16.35 a 97.94 abarca 740.19 hectáreas correspondiendo al 1.6522 % del área total; el rango comprendido entre 97.95 y 261.13 abarca 84.49 hectáreas correspondiente al 0.1886 % del área total. El resto de rangos no son representativos para el área total.

El mapa temático de este factor está representado por la Figura 23:

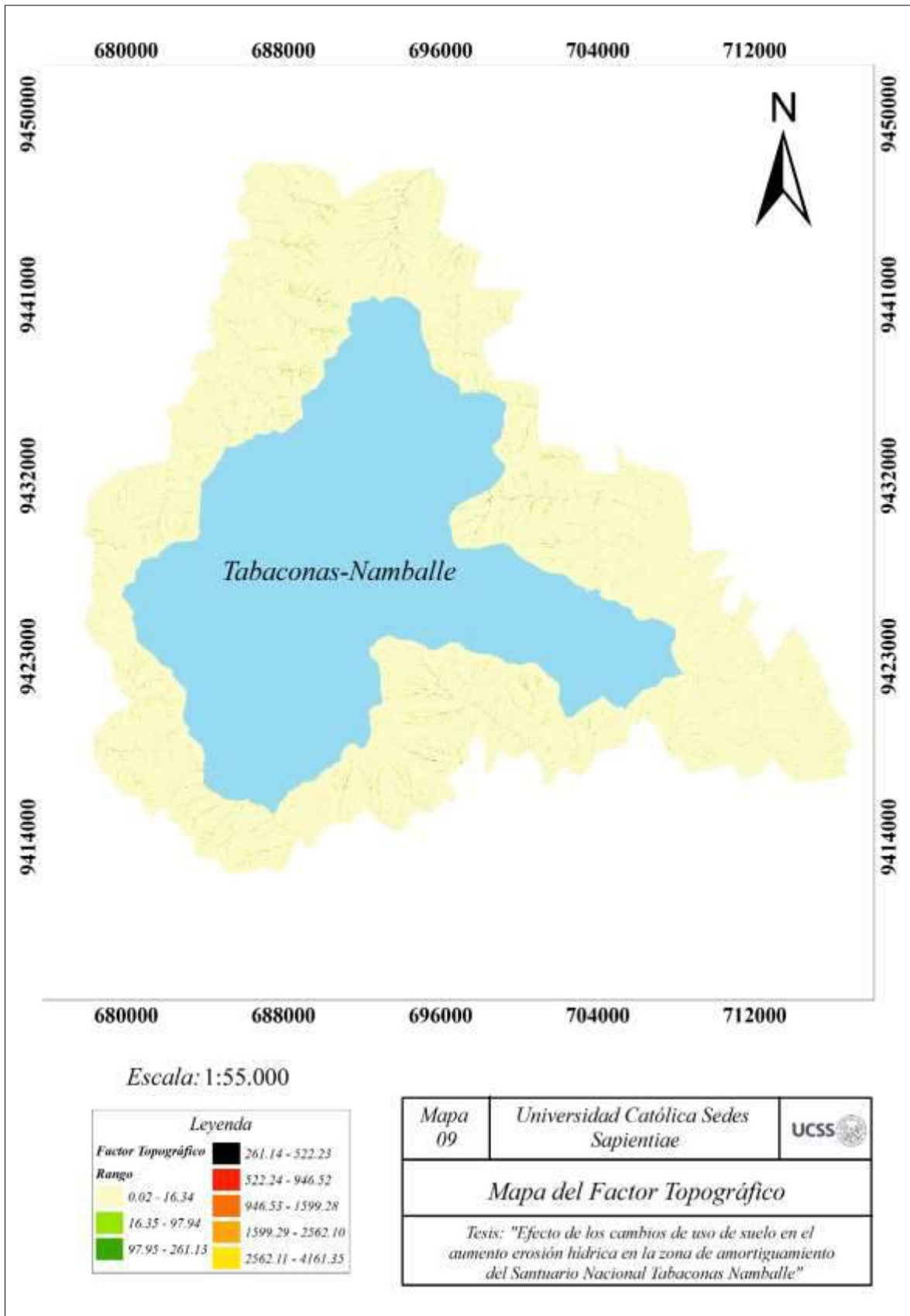


Figura 23. Mapa de distribución del factor topográfico en la zona de amortiguamiento del SNTN. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Determinación de la erosión hídrica efectiva

la sobreposición de los mapas de erodabilidad, erosividad, factor topográfico y factor de cobertura vegetal con cambios de uso de suelo se realizó para determinar la erosión hídrica efectiva en $t. ha^{-1}. año^{-1}$ cuya distribución se detalla en la Figura 24:

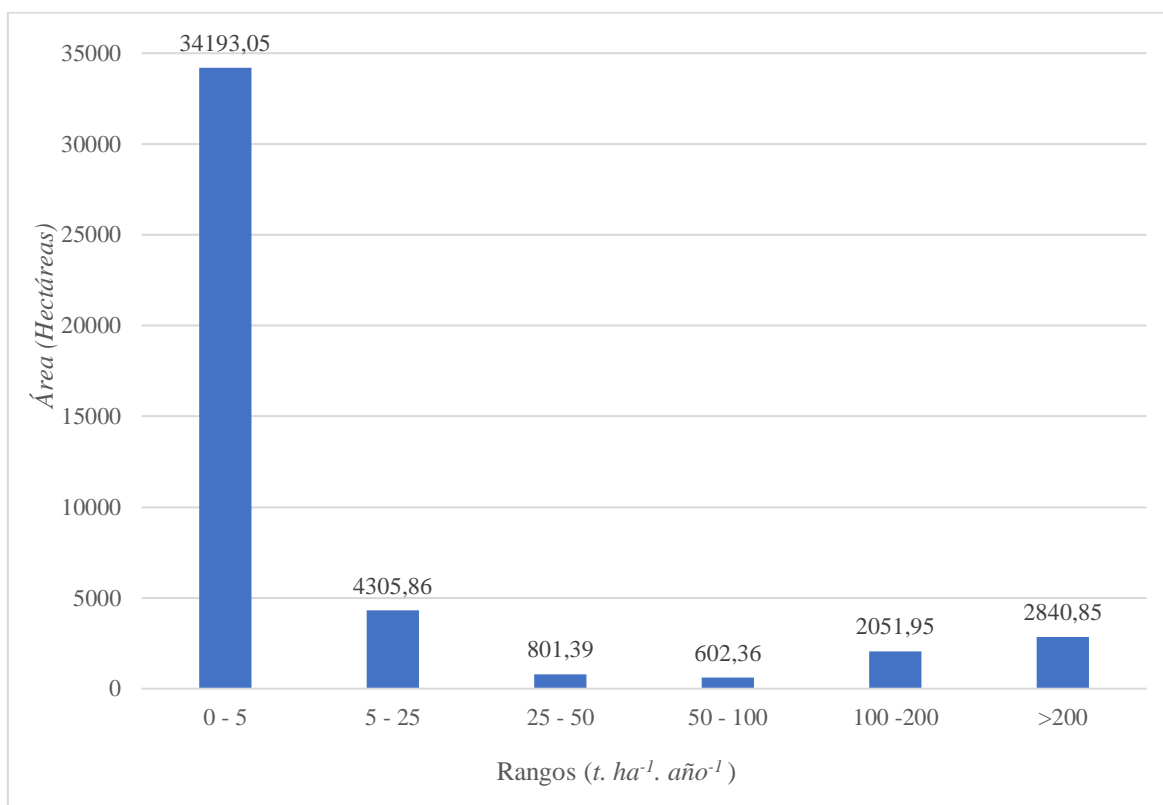


Figura 24. Distribución de la erosión hídrica efectiva aproximada por rangos. Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura 24, la erosión hídrica efectiva en el rango de 0 a 5 $t. ha^{-1}. año^{-1}$ abarca 34193.05 hectáreas; el rango de 5 a 25 $t. ha^{-1}. año^{-1}$ abarca 4305.86 hectáreas; el rango de 25 a 50 $t. ha^{-1}. año^{-1}$ abarca 801.39 hectáreas; el rango de 50 a 100 hectáreas abarca 602.36 hectáreas y valores mayores a 200 $t. ha^{-1}. año^{-1}$ abarca 2840.85 hectáreas.

la erosión hídrica efectiva promedio es 35.92 $t. ha^{-1}. año^{-1}$ correspondiendo con una tasa de erosión media para la FAO; sin embargo, el valor máximo de erosión hídrica es 92924.49 $t. ha^{-1}. año^{-1}$. La distribución de lo mencionado se representa en el mapa de la Figura 25:

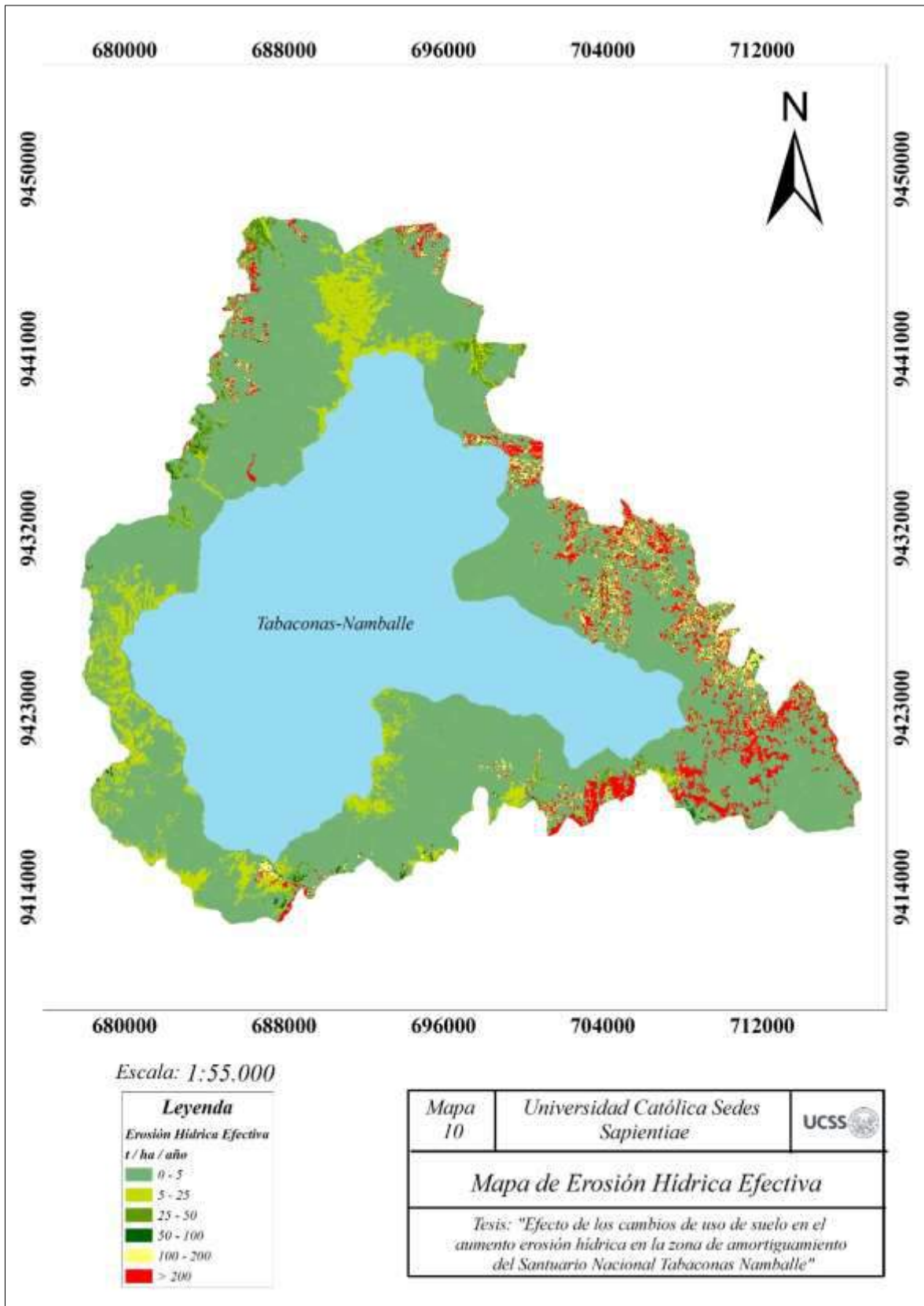


Figura 25. Mapa de erosión hídrica efectiva en la zona de amortiguamiento del SNTN.
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Estimación de la erosión hídrica potencial

la sobreposición de los mapas de erodabilidad, erosividad, factor topográfico y cobertura vegetal sin cambios de uso de suelo Se realizó para determinar la erosión hídrica potencial en $t. ha^{-1}. año^{-1}$ cuya distribución se detalla en la Figura 26:

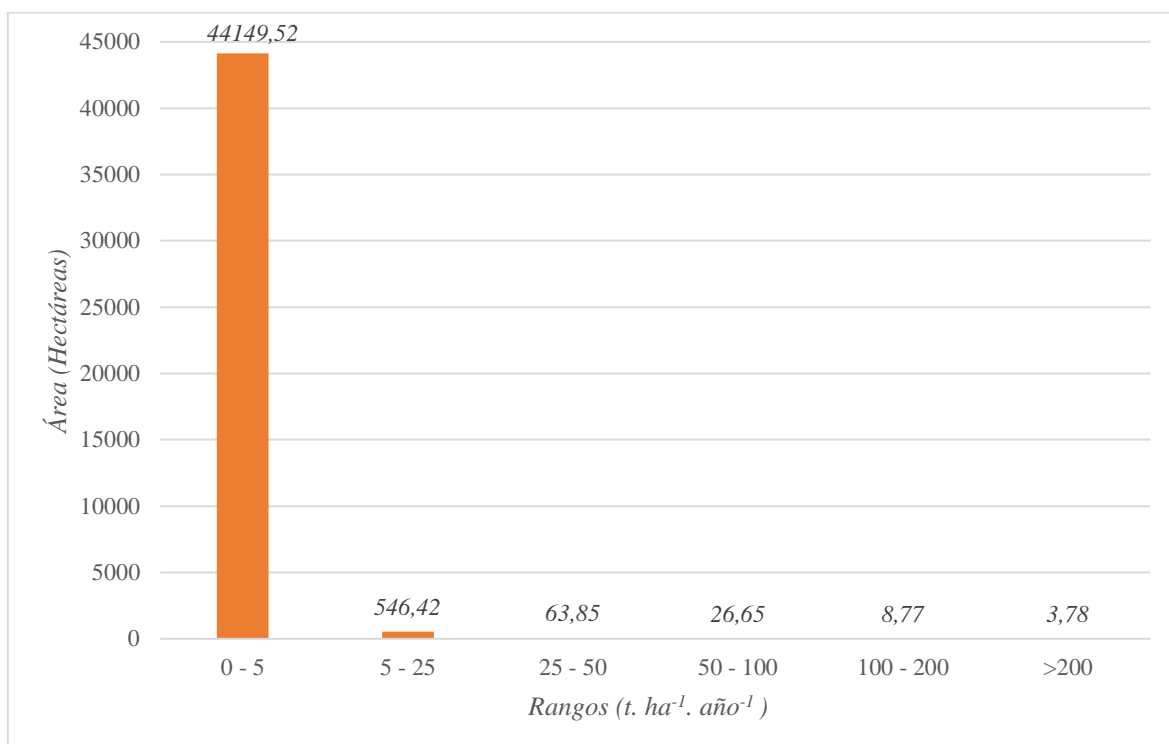


Figura 26. Distribución de la erosión hídrica potencial aproximada por rangos. Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura 26, la erosión hídrica potencial en el rango de 0 a 5 $t. ha^{-1}. año^{-1}$ abarca 44149.52 hectáreas; el rango de 5 a 25 $t. ha^{-1}. año^{-1}$ abarca 546.42 hectáreas; el rango de 25 a 50 $t. ha^{-1}. año^{-1}$ abarca 63.85 hectáreas; el rango de 50 a 100 hectáreas abarca 26.65 hectáreas; el rango de 100 a 200 $t. ha^{-1}. año^{-1}$ abarca 8.77 hectáreas y valores mayores a 200 $t. ha^{-1}. año^{-1}$ abarca 3.78 hectáreas.

la erosión hídrica potencial promedio es $1.52 t. ha^{-1}. año^{-1}$ correspondiente a una tasa de erosión normal para la FAO; sin embargo, el valor máximo de erosión hídrica es $1377.35 t. ha^{-1}. año^{-1}$. La distribución de lo mencionado se representa en la Figura 27:

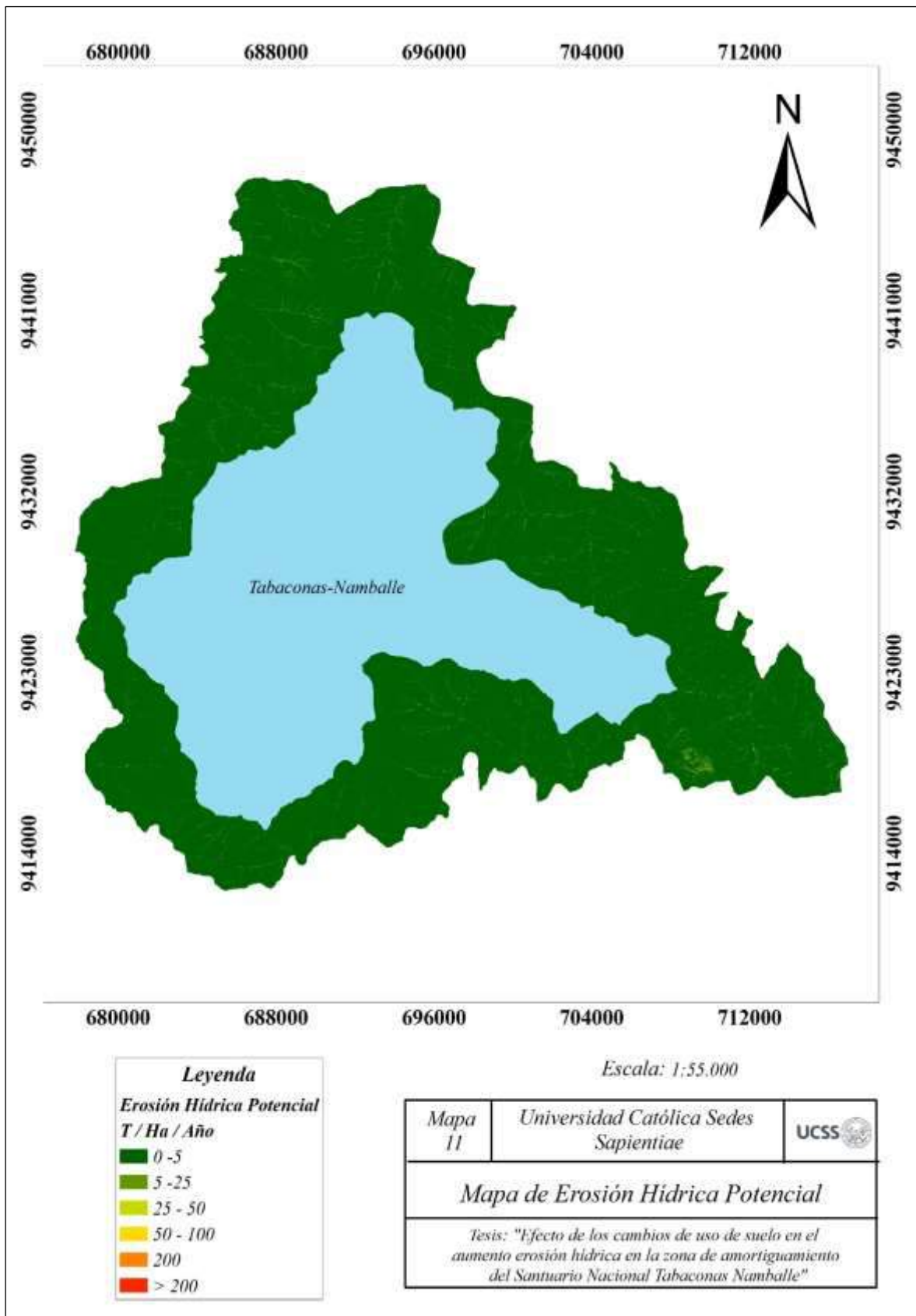


Figura 27. Mapa de erosión hídrica efectiva en la zona de amortiguamiento del SNTN.
 Fuente: Elaboración propia.

3.4. Análisis del cambio en la erosión hídrica potencial y efectiva

Los mapas ilustrados en las Figuras 25 y 27 nos explican los escenarios de erosión hídrica efectiva y potencial, respectivamente; en ese sentido, a nivel gráfico ambos mapas se logra apreciar diferencias en lo que respecta a las tasas de erosión; sin embargo, para comprobar la apariencia se realizó la prueba de T de Student en las medias para ello, considerando como diferencias significativas si $T_c > T_t$ teniendo los resultados expresados en la e Tabla 21:

Tabla 21

Prueba de T de Student para la erosión hídrica potencial y efectiva

	Promedio (t. ha ⁻¹ . año ⁻¹)	N.º de datos	Varianza	Desviación estándar	Tc	Tt
Mapa de erosión hídrica efectiva	35.92	2867186	67469.78	259.75	224.08	1.96
Mapa de erosión hídrica potencial	1.53	2865446	26.81	5.18		

Fuente: Elaboración propia.

En base a la Tabla 21 se puede observa que el $T_c > T_t$; en ese sentido, si existen diferencias significativas en ambos mapas con respecto a los valores de cada celda de pixel, cuyos valores están expresados en t. ha⁻¹. año⁻¹.

3.5. Evaluación de consistencia de resultados

Con la finalidad de contrastar los resultados encontrados, se realizó un trabajo de campo que constó con la verificación de zonas que presentan tasas de erosión hídrica anómalas al promedio a nivel cualitativo; es decir, a nivel visual. En ese sentido, se ejecutó un recorrido entre los distritos de Tabaconas y Namballe, donde se tomó un registro fotográfico de esta identificación apoyado con un GPS Garmin Etrex 10. El recorrido constó de 17 puntos de muestreo que se representa en la Figura 28:

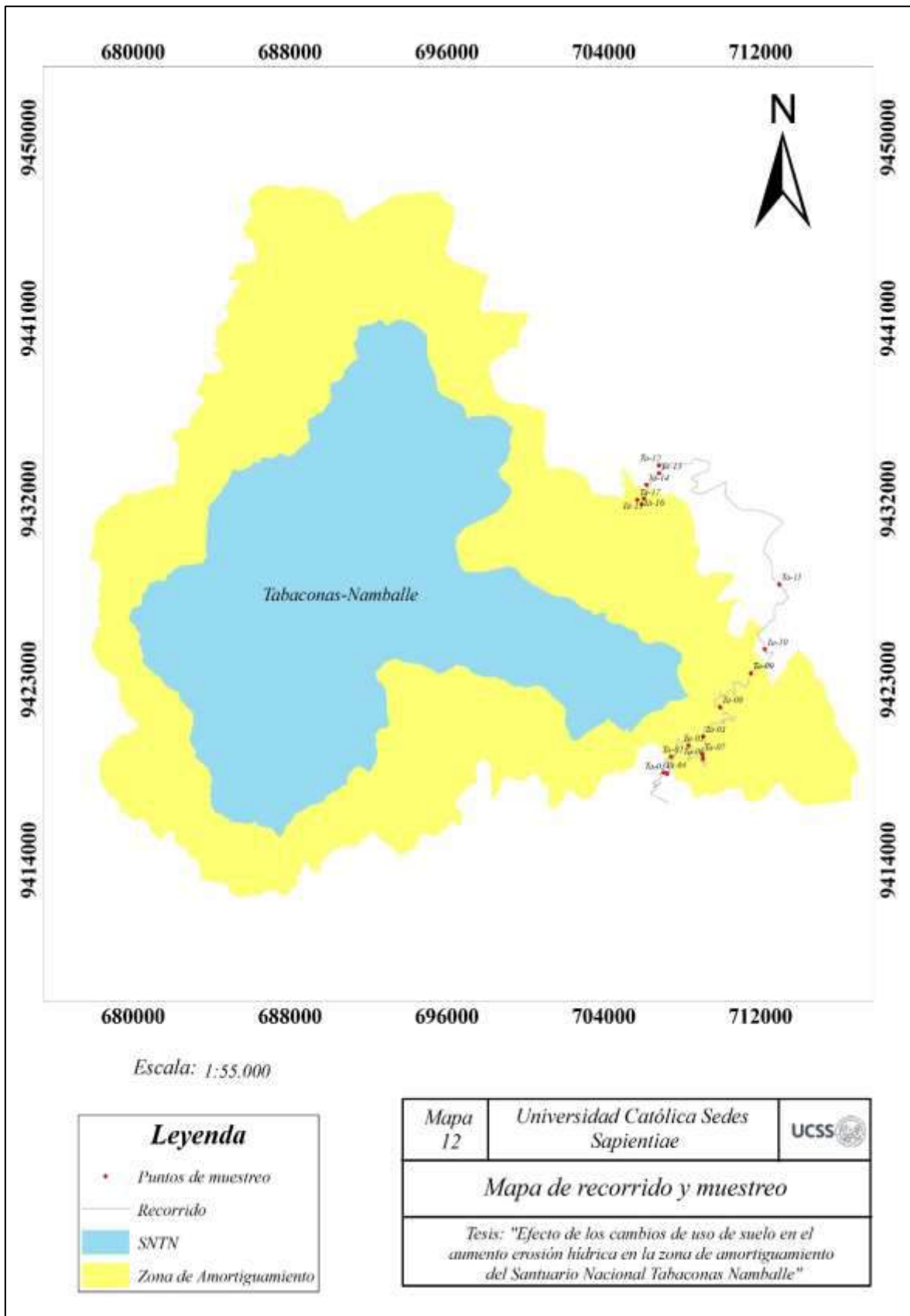


Figura 28. Mapa de recorrido realizado en la zona de amortiguamiento del SNTN. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 28 muestra el recorrido seguido por la zona de amortiguamiento del SNTN entre los distritos de Tabaconas y Namballe donde se lograron identificar a través de fotografías la manifestación cualitativa de la erosión hídrica. Cabe mencionar que algunos de los puntos muestreados no corresponden a la zona que abarca el presente estudio; sin embargo, proporcionan información relevante en concordancia con el presente estudio. Las características de los puntos de muestreo se detallan en la Tabla 22:

Tabla 22

Caracterización de los puntos de muestreo para el análisis de consistencia de erosión hídrica

Punto de muestreo	Referencia geográfica		Altura (msnm)
	X	Y	
P-01	709103,7	9420184,6	2278
P-02	707250,3	9418316,2	1713
P-03	707065,7	9418378,2	1664
P-04	706415,8	9417335,6	1423
P-05	707282,3	9418715,5	1705
P-06	708332,4	9419726,1	1884
P-07	709100,3	9419047,9	2131
P-08	709039,5	9419293,9	2179
P-09	709970,4	9421626	1938
P-10	711515,5	9423311	1936
P-11	708404,8	9433765,9	1636
P-12	706832,4	9433278,9	1437
P-13	706183,9	9432697,1	1481
P-14	706058,7	9432021,6	1463
P-15	705934,7	9431745,4	1427
P-16	705719,7	9431961,1	1407

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 22 presenta la ubicación geográfica en coordenadas UTM de los puntos de muestreo que se han generado considerando su altitud. En relación a la correspondencia con el mapa de erosión hídrica efectiva, tenemos los siguientes resultados por cada punto:

Punto de muestreo 01:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe, la tasa de erosión para el pixel de este punto en el mapa de erosión hídrica efectiva (Figura 25) es $582.43 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que al ser comparada con la Tabla 1 corresponde con un nivel de tasa de erosión *crítica* lo cuál corresponde visualmente y se puede apreciar que tiene el potencial de ser una zona de deslizamientos de tierra, lo indicado se expresa en la Figura 29:



Figura 29. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-01. *Fuente:* Elaboración propia.

Punto de muestreo 02:

La ubicación de este punto de muestreo se encuentra en el distrito de Tabaconas; sin embargo, no se cuenta con el valor de la tasa de erosión hídrica debido a que no pertenece a la zona de estudio, pero nos muestra el panorama de incineración de la cobertura vegetal con objetivo de aperturar cultivos y/o invernadas para ganado. Según se evidencia en la Figura 30:



Figura 30. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-02. Fuente: Elaboración propia.

Punto de muestreo 03:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Tabaconas; sin embargo, no corresponde con el área de estudio. Pero visiblemente es una zona que puede presentar tasas de erosión altas al no contar con vegetación; asimismo, se puede apreciar que la zona a nivel de textura de suelo presenta arcillas y arenas; además, se puede apreciar pendientes con gran inclinación, según se evidencia en la Figura 31:



Figura 31. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-03. Fuente: Elaboración propia.

Punto de muestreo 04:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Tabaconas, pero no corresponde con la zona de estudio. Sin embargo, se evidencia la práctica de cambiar la cobertura vegetal predominante como boscosa para la habilitación de cultivos. Asimismo, estas zonas desprovista de vegetación están en las partes más altas donde se observa que ya han realizado una transición hacia cultivos que han sido habilitados generando quema de la cobertura vegetal y esta situación pondría en riesgo a las viviendas que están acondicionadas en la parte más bajas. Según se evidencia en la Figura 32:



Figura 32. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-04. Fuente: Elaboración propia.

Punto de muestreo 05:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Tabaconas, pero no corresponde con la zona de estudio. Sin embargo, se evidencia la práctica de quema de bosques o pérdida de la cobertura vegetal para para la habilitación de cultivos, en la fotografía tomada se puede apreciar que la vegetación incinerada es reciente, siendo una confirmación de que esta actividad sigue presente en la población. Asimismo, se observa que, una fragmentación del ecosistema marcada producto de estas actividades. Lo indicado se observa en la Figura 33:



Figura 33. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-05. *Fuente:* Elaboración propia.

Punto de muestreo 06:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe, la tasa de erosión para el pixel de este punto en el mapa de erosión hídrica efectiva (Figura 25) es $597.09 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que si comparamos con la tabla 1 corresponde con nivel de tasa de erosión crítico lo cual no se podría determinar si existe esta correspondencia, al menos a nivel visual, dado que si bien es cierto se observan pendientes pronunciadas y terreno desprovisto de vegetación, no se visualiza que exista arraste de material, según se muestra en la Figura 34:



Figura 34. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-06. *Fuente:* Elaboración propia.

Punto de muestreo 07:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe, la tasa de erosión para el pixel de este punto en el mapa de erosión hídrica (Figura 25) es $1.76 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que si comparamos con la tabla 1 corresponde con nivel de tasa de erosión leve. Al realizar la inspección visual se puede corroborar que no se evidencia algún tipo de fragmentación del ecosistema y este dato sería consistente con al menos a nivel visual, lo indicado se puede apreciar en la Figura 35:



Figura 35. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-07. Fuente: Elaboración propia.

Punto de muestreo 08:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe, la tasa de erosión para el pixel de este punto en el mapa de erosión hídrica (Figura 25) es $796.25 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que si comparamos con la tabla 1 corresponde con nivel de tasa de erosión crítico. Se puede evidenciar en esta zona la vegetación es limitante y a nivel de textura de suelo es arenoso lo que corresponde como un potenciador de la erosión hídrica; asimismo, la zona descrita puede presentar deslizamientos de tierras en épocas de precipitaciones máximas tal como se aprecia en la Figura 36:



Figura 36. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-08. *Fuente:* Elaboración propia.

Punto de muestreo 09:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe, la tasa de erosión para el pixel de este punto en el mapa de erosión hídrica (Figura 25) es $348.54 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que si comparamos con la tabla 1 corresponde con nivel de tasa de erosión crítico. Se puede evidenciar en esta zona la vegetación es limitante y a nivel de textura de suelo es arenoso; asimismo, por las altas pendientes, es vulnerable a concentración de precipitaciones, generando deslizamientos de terreno, como se deja en evidencia en la Figura 37:



Figura 37. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-09. *Fuente:* Elaboración propia.

Punto de muestreo 10:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe, la tasa de erosión para el pixel de este punto en el mapa de erosión hídrica (Figura 25) es $346.76 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que si comparamos con la tabla 1 corresponde con nivel de tasa de erosión crítica. Se puede evidenciar en la zona que la vegetación de la zona ha sido quemada recientemente, por lo que el valor calculado por el modelo de la EUPS está generando estimaciones como crítico; debido a prácticas como la quema de cobertura vegetal, según se muestra en la Figura 38:



Figura 38. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-10. *Fuente:* Elaboración propia.

Punto de muestreo 11:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe; sin embargo, la zona de afluencia no corresponde con la zona de estudio, pero se realizó la identificación de la zona; puesto que, puede evidenciarse la habilitación de un cultivo de maíz en una ladera después de haber realizado la quema de la cobertura vegetal boscosa. Asimismo, también se evidencia terrenos abandonados que han sido usado anteriormente para cultivos; debido a que, estos pierden su capacidad productiva generado por las malas prácticas de manejo agropecuarios, tal como se evidencia en la siguiente Figura 39:



Figura 39. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-11. *Fuente:* Elaboración propia.

Punto de muestreo 12:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe; sin embargo, la zona de afluencia no corresponde con la zona de estudio, pero se realizó la identificación porque la cobertura boscosa del área había sido quemada para la apertura de cultivos, siendo reciente esta actividad, según lo muestra la Figura 40:



Figura 40. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-12. *Fuente:* Elaboración propia.

Punto de muestreo 13:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe; sin embargo, la zona de afluencia no corresponde con la zona de estudio, pero se realizó la identificación porque la cobertura boscosa del área había sido quemada para la apertura de cultivos; asimismo, se debe considerar que esta zona presenta pendientes pronunciadas y terreno arcilloso que son indicadores de potenciar la erosión hídrica, al igual que el punto de muestreo anterior se puede apreciar que estos han sido recientes, según se muestra en la Figura 41:



Figura 41. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-13. *Fuente:* Elaboración propia.

Punto de muestreo 14:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe; sin embargo, la zona de afluencia no corresponde con la zona de estudio, pero se realizó la identificación porque la cobertura boscosa del área había sido quemada para la apertura de cultivos; al igual que los puntos de muestreo P-12 y P-13 esta zona tiene tendencia a manifestar pendientes pronunciadas como la textura del suelo del tipo arcilloso, siendo indicadores de potenciar la erosión hídrica. Asimismo, estos puntos evidencian que los agricultores están migrando a estas zonas recientemente para ampliar la frontera agropecuaria, tal como se observa en la Figura 42:



Figura 42. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-14. Fuente: Elaboración propia.

Punto de muestreo 15:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe, la tasa de erosión para el pixel de este punto en el mapa de erosión hídrica (Figura 25) es $0.81 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que si comparamos con la tabla 1 corresponde con nivel de tasa de erosión normal. Sin embargo, a nivel visual se evidencia que ha existido quema de cobertura vegetal recientemente; lo que no corresponde con el modelo de estimación, según la Figura 43:



Figura 43. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-15. Fuente: Elaboración propia.

Punto de muestreo 16:

El punto de muestreo se encuentra ubicado en el distrito de Namballe, la tasa de erosión para el pixel de este punto en el mapa de erosión hídrica (Figura 25) es $218.78 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que si comparamos con la Tabla 1 corresponde con nivel de tasa de erosión crítico. Según se evidencia en la Figura 44:



Figura 44. Fotografía panorámica del punto de muestreo P-16. *Fuente:* Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

4.1. Determinación de los factores de erosión hídrica

En relación a la estimación del factor de erosividad o factor R utilizando el IMF (Índice Modificado de Fournier) resulta ser un buen estimador para zonas tropicales y de precipitaciones de moderadas a altas (Flores, 2015); debido a que, tiene una alta correlación con modelos de estimación más directos como el uso de la sub variable de intensidad de la lluvia, llegando a una correlación de 0.89, siendo este valor de confianza en los resultados (Álvarez, 2019).

El rango de erosividad es de 765.31 a 2574.98 MJ.mm.ha⁻¹. año⁻¹, el cual está condicionado principalmente a la distribución de la precipitación en la zona de amortiguamiento del SNTN, donde el área más direccionada a la provincia de Huancabamba en Piura presenta menores precipitaciones con un clima semiseco y cálido (SENAMHI, 2020d; SENAMHI, 2020e y SENAMHI, 2020f) y las áreas más direccionadas a la provincia de San Ignacio ubicada en Cajamarca con altas precipitaciones con un clima húmedo (SENAMHI, 2020a; SENAMHI, 2020b y SENAMHI, 2020c) . Se puede considerar a nivel promedio que la erosividad es moderada.

El factor de erodabilidad varía entre 0.001 y 0.1 t. ha. MJ⁻¹. mm⁻¹. Al comparar estos valores con los resultados de la investigación realizada por Flores (2015) presenta una variación entre 0.0027 y 0.048 t. ha. MJ⁻¹. mm⁻¹. siendo estos valores similares; debiéndose principalmente a que en ambas zonas de estudio existen suelos de tipo arcillo arenosos o franco arcillo arenosos con un alto contenido de materia orgánica (valores superiores a 4 %); siendo este último un componente importante para indicar que este tipo de suelos generan menor susceptibilidad a la erosión hídrica porque tienen mejor capacidad de infiltración.

La misma afirmación se puede visualizar en el resultado para la investigación realizada por Jumbo (2018) que presenta dentro de sus resultados variaciones en la erodabilidad entre 0.05 y 0.055 t. ha. MJ⁻¹. mm⁻¹ debido a que los suelos de esta zona de estudio presentaba alto contenido de materia orgánica (5.44 – 11.24 %), proporción de arcilla aceptable y una alta tasa de drenaje hídrica. En ese sentido, en base a estas comparaciones se puede indicar que la erodabilidad en la zona de estudio no representa un factor determinante en la erosión hídrica.

En relación a la determinación del factor topográfico o factor LS, el rango calculado para la zona de amortiguamiento del SNTN es 0.02 y 4161.35 (adimensionales). Estos resultados guardan correlación con otros estudios (SERNANP, 2018; GRC, 2010 y SENAMHI, 2017a) que nos indican que en general para la cuenca del Marañón (incluida la zona del presente estudio) presentan pendientes pronunciadas y terreno montañoso, siendo considerados estos factores como amplificadores respecto a la erosión hídrica que se presenta en el área en mención.

El factor de cobertura vegetal o factor C se determinó teniendo en cuenta dos escenarios: con cambios de uso de suelo y sin cambios de uso de suelo, donde se observaron valores superiores para el escenario de cobertura vegetal con cambios de uso de suelo se encontraron valores con una variación entre 0 y 1 con un valor promedio de 0.064, guardando este valor correspondencia por lo indicado en otros estudios (Álvarez, 2019; Jumbo, 2018 y SENAMHI, 2017a) que afirman que estos valores se asocian con la intervención humana con la presencia de actividades que no corresponden con la capacidad natural de los suelos, siendo este un factor determinante en el aumento de la erosión hídrica. En cambio, en el escenario que no comprende cambios en el uso del suelo los valores varían entre 0 y 0.0072 con un valor promedio de 0.0039, según la indicación dada por Pérez *et al.* (2012) estos rangos se deben a la capacidad de este tipo de vegetación en garantizar mecanismos en el control de la erosión hídrica, siendo un factor predominante.

Cabe precisar que, en general, la comparación con otros estudios respecto a los factores de la erosión hídrica determinados deben considerar las limitantes como el alcance del área de estudio que para el presente estudio tiene un alcance de microzonificación; es decir, un estudio muy detallado, en cambio otros estudios como SENAMHI (2017a) consideran un alcance nacional; es decir, presenta resultados sin detalle.

Otro detalle importante que limita la comparación con otros estudios es la recolección de datos; a pesar que, se usa el mismo modelo, normalmente las investigaciones consultadas tienen su propia forma de acceder a la información, por ejemplo el estudio de Jumbo (2018) usa data de precipitación multianual ya generada en otros antecedentes, en cambio en la presente investigación se tuvo que procesar la información directamente proporcionada por el SENAMHI, teniendo otro proceso estadístico de validación.

4.2. Erosión hídrica efectiva

Respecto a las tasas de erosión hídrica efectiva promedio es de $35.92 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ siendo un valor considerado como *medio* según lo mencionado en la Tabla 1 del presente documento. Sin embargo, al comparar con SENAMHI (2017a) resulta un valor inferior para la zona de la cuenca del Maraón cuyo valor promedio fue $162 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. Este contraste se debe a que la zona de estudio presenta una alta densidad boscosa y presencia del Santuario Nacional Tabaconas - Namballe; asimismo, el alcance de la investigación es diferente.

4.3. Erosión hídrica potencial

En relación a la tasa de erosión hídrica potencial promedio calculado fue $1.52 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ siendo un valor normal o ligero según la Tabla 1 del presente documento. Este valor está condicionado porque considera una vegetación con sistema agroforestal en los cultivos; según lo demuestra Pérez *et al.* (2012), este tipo de sistemas combinados con el cultivo de café tienen una alta correlación con la conservación de suelos, especialmente disminuyendo el impacto erosivo de las precipitaciones y generando una capa protectora frente a deficiencias en la calidad de los suelos.

4.4. Análisis de cambios en las tasas de erosión hídrica

En relación a la estimación de las tasas de erosión hídrica para los escenarios planteados se pudo evidenciar que el valor promedio para el escenario de estimación de erosión con cambios de uso de suelo es $35.92 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y para el escenario comprendido sin cambios de uso de suelo es $1.53 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. Dentro de la clasificación de la FAO (Flores, 2015) sobre los límites de la erosión hídrica, el valor determinado en el escenario de cambios de uso de suelo es moderado; sin embargo, en el escenario sin cambios de uso de suelo se puede considerar como normal.

La explicación de estos cambios en ambos escenarios tiene como factor predominante el factor de “cobertura vegetal”, donde las tasas de erosión hídrica se intensifican drásticamente cuando existe una incompatibilidad en el tipo de vegetación con el terreno que se caracteriza por tener pendientes normalmente inclinadas y precipitaciones altas. Asimismo, estas altas tasas corresponden a zonas donde existe un cambio en la cobertura vegetal, originada principalmente por la quema de la cobertura boscosa con la finalidad de aperturar la frontera agropecuaria, tal cuál se evidenció en el trabajo de campo en los puntos de muestreo (P-05, P-12, P-13, P-14, P-15 y P-16) detallado en el apartado 3.5.4 del presente documento.

Al analizar ambos modelos de estimación en una prueba de T de Student se evidencia que existen diferencias significativas en su valor medio, lo cuál comprueba que el modelo de erosión hídrica que contempla cambios de uso de suelo está generando una intensificación de la erosión hídrica que no sucedería si el suelo tendría un uso compatible con su capacidad de uso mayor.

4.5. Consistencia de resultados

Respecto a la evaluación de consistencia de resultados realizada a través de una verificación in situ a nivel cualitativo, se comprobó a nivel pasajístico que donde se estimaron valores de erosión hídrica de medios a altos muestra una correspondencia con los mapas de erosión hídrica generada con el uso actual del suelo de la zona de amortiguamiento del Santuario

Nacional Tabaconas Namballe, principalmente al manifestarse pérdida de cobertura vegetal debido a la práctica de incineración de la cobertura vegetal. Asimismo, en algunos casos se sigue extendiendo esta práctica por toda la zona de amortiguamiento del SNTN, según fotografías presentadas (en el apartado 3.5.4) donde se evidencia lo reciente de la mayoría de casos. Por otro lado, aquellos datos que posiblemente estén sobrestimados puede deberse a que la información recolectada fue en el 2018 y la verificación in situ se realizó en el 2020.

4.5.1. Mecanismos de control de la erosión hídrica

Institucionalidad y ordenamiento territorial

Una de las causas de que no exista una gestión en el control de la erosión del recurso suelo es la falta de articulación entre organismos competentes como el ANA, Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), MINAM, MNAGRI y los gobiernos locales y regionales dando lugar a políticas que están sesgadas a la gestión de cuencas privilegiando al recurso agua y no a sus interrelaciones con otros componentes que forman parte del territorio como el suelo, el entorno sociocultural y económico.

Es decir, no se cumple lo estipulado en la Resolución Ministerial N° 026-2010-MINAM “Lineamientos de Política para el Ordenamiento Territorial” y si no existe esta *articulación* ninguna propuesta técnica para el control de erosión será eficaz en el tiempo tal como lo señala Cisneros *et al.*, (2012). Otra cuestión de orden político es hacer cumplir con el Decreto Supremo N° 017-2009 y su reglamento que precisan la capacidad de uso mayor de suelos, dado que si el suelo no es usado según su capacidad, no se puede establecer un marco de control del problema de la presente investigación.

Control de erosión

Como se observa en los resultados, el modelo de estimación ha calculado que existen áreas con tasas de erosión superiores a $200 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ que requieren medidas de control urgentes, en este caso existe consenso en que se tienen que emplear técnicas multidisciplinarias como la bio-ingeniería (Cantero *et al.*, 1998 y Cisneros *et al.*, 2012) que tiene entre sus procesos

la estabilización y control de las laderas en pendientes con revegetación, construcción de terraplenes, estabilización de cabeceras de montaña con reforestación nativa y creación de fajas buffer cuya función es la captura de material sedimentable y contaminado provenientes de actividades agropecuarias. En el caso del manejo de cultivos, la estrategia orientada con el sistema de producción agroforestal y silvopastoril; puesto que, se ha evidenciado que este sistema de producción contribuye con el control de la erosión hídrica según lo revisado en estudios (Pérez *et al.*, 2012 y Rojas, 2017) y que estos, presentan características climáticas similares a la zona de estudio de la presente investigación, guardando compatibilidad con los cultivos como el café, cacao y maíz.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

- Se realizó la estimación de la erosión hídrica en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe considerando los efectos de los cambios de uso de suelo a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.
- Se realizó la determinación de los factores de erosividad , erodabilidad, factor de longitud y gradiente de la pendiente y cobertura vegetal c con cambios de uso de suelo y sin cambios de uso de suelo de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas-Namballe que nos sirvió para construir la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.
- Se estimó la erosión hídrica potencial (sin cambios de uso de suelo) de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas-Namballe teniendo un valor promedio de $1.53 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.
- Se estimó la erosión hídrica efectiva (con cambios de uso de suelo) de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas-Namballe con un valor promedio de $35.92 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.
- Se realizó el análisis comparativo entre la erosión hídrica generada en ambos escenarios de estimación, donde se comprobó estadísticamente que el escenarios de cambios de uso de suelo presenta mayores tasas de erosión que el escenario donde no se consideran cambios de uso de suelo.
- Se realizó el análisis de consistencia de los resultados respecto al mapa de erosión hídrica efectiva .

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

- Para estimaciones del factor de erosividad en cuencas del Perú, utilizar método comprendido por el IMF dado que la data de precipitación no se toma en los tiempos que indica la fórmula principal.
- La data de precipitación debe estar sometido a un análisis de consistencia para tener confiabilidad estadística; asimismo, debe realizarse la completación de la información no disponible.
- En relación a la información edafológica es necesario plantear o basarnos en estudios que tengan una confiabilidad en relación a procedimientos de muestreo y procesos en laboratorio.
- Para la estimación del factor topográfico es conveniente contar un modelo de elevación digital que nos proporcione una resolución máxima posible, siendo óptimo contar con una resolución de 12.5 metros.
- En la verificación en campo ayudaría para una mejor toma fotográfica la utilización de drones que nos permitan reconocer el paisaje en relación a la fragmentación del ecosistema.

REFERENCIAS

- Almorox, J; López, F y Rafaelli, S. (2010). La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/280830913> La degradacion de los suelos por erosion hidrica Metodos de estimacion.
- Álvarez, A. (2019). *Análisis temporal del nivel de la erosión hídrica de la subcuenca del río Ichu 2013 y 2017.* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Huancavelica. Huancavelica, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2603>.
- Aprueban Reglamento de Clasificación de Tierras por su capacidad de Uso Mayor. Decreto Supremo N° 017-2009 – A.G. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 02 de septiembre del 2009, pp. 14-31.
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Priorización de cuencas para la gestión de los recursos hídricos.* Recuperado de: <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/priorizacion-de-cuencas-para-la-gestion-de-los-recursos-hidricos>.
- Cabrejos, V.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.* (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Amazonas, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1951>.
- Calle, I y Brehaut, I. (2007). *Manual educativo: El ABC de las áreas naturales protegidas y la superposición de los lotes de hidrocarburos.* Recuperado de: https://spda.org.pe/wpfb-file/20070619143053_-pdf/.
- Chereque, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil.* Recuperado de: <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/28689>.
- Cisneros, J; Cholaky, C.; Cantero, Alberto; Gonzales, J; Reynero, M; Diez, A; y Bersegio, A. (2012). *Erosión hídrica: Principios y técnicas de manejo.* Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/261950035> Erosion Hidrica Principios y Tecnicas de Manejo.

- D'Amario, F.M. (2016). *Evaluación del riesgo de erosión hídrica, su distribución espacial y el efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo, en la cuenca hidrográfica del Río Tunuyán Superior*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Cuyo. Recuperado de: https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitaes/7814/tesis-irnr-damario-mara-julieta.pdf.
- Dioses, J y Pérez, C. (2018). *Estimación de la erosión hídrica mediante la aplicación de la metodología RUSLE en la cuenca del río Piura*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. Recuperado de: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/10055>.
- Elliot, J; Coello, J; y Alcalde, M. (2009). *Los bosques de la cuenca transfronteriza del río Mayo-Chinchi (Perú-Ecuador)*. Recuperado de: http://www.sancristoballibros.com/libro/los-bosques-de-la-cuenca-transfronteriza-del-rio-mayo-chinchi-peru-ecuador_26273.
- Flores, V. A. (2015). *Aproximación de riesgo por erosión hídrica aplicando un sistema de información geográfica en la subcuenca Sambillo, distrito de Padre Abad*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1477>.
- Food and Agriculture Organization. (2016). *El estado mundial del recurso suelo*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>.
- Gobierno Regional de Cajamarca. (2009). *Estrategia Regional de Biodiversidad al 2021*. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/48017597.pdf>.
- Gobierno Regional de Cajamarca. (2010). *Plan de Desarrollo Regional Concertado: Cajamarca al 2021*. Recuperado de: https://www.mesadeconcertacion.org.pe/sites/default/files/archivos/2015/documento_s/11/6_pdrc_cajamarca_2010_2021.pdf.
- Gobierno Regional de Cajamarca. (2013). *Zonificación Ecológica-Económica: Base para el ordenamiento territorial de Cajamarca*. Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/zonificacion-ecologica-economica-base-ordenamiento-territorial>.
- Jumbo, F.D. (2018). *Estimación cualitativa y cuantitativa de la erosión hídrica vinculada al cambio de uso del suelo en la subcuenca Catamayo, Ecuador*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina. Catamayo, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3689>.

Ley de Áreas Naturales Protegidas N° 26834. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 04 de julio de 1997, pp. 01-07.

Llerena, C; Cruz-Burga, Z; Durt, É; Marcelo-Peña, J; Martínez, K y Ocaña, J. (2010). *Gestión Ambiental de un ecosistema frágil. Los bosques nublados de San Ignacio, Cajamarca, cuenca del río Chinchipe*. Recuperado de: <http://bibliotecaopac.unas.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=211>.

Ministerio del Ambiente. (2009). *Guía de evaluación de riesgos ambientales*. Recuperado de: https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/guia_riesgos_ambientales.pdf.

Ministerio del Ambiente. (2012). *Glosario de términos para la gestión ambiental peruana*. Recuperado de: <http://siar.minam.gob.pe/puno/download/file/fid/59577>.

Ministerio del Ambiente. (2015). *Orientaciones básicas sobre el ordenamiento territorial en el Perú*. Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/ordenamientoterritorial/wp-content/uploads/sites/129/2017/02/Orientaciones-basicas-OT-1.pdf>.

Ministerio del Ambiente. (2016). *Instrumentos técnicos-normativos del ordenamiento territorial*. Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/ordenamientoterritorial/wp-content/uploads/sites/129/2017/02/Gu%C3%ADa-Metodol%C3%B3gica.pdf>.

Montesinos, A.S. (2002). *Desarrollo metodológico para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en el área mediterránea utilizando técnicas de teledetección y GIS*. (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid. Recuperado de: <http://biblioteca.ucm.es/tesis/19911996/X/4/X4003601.pdf>.

Olaya, V. (2014). *Sistemas de información geográfica*. Recuperado de: https://geoinnova.org/wp-content/uploads/2018/07/Libro_SIG-victor-olaya-PARTE-I.pdf.

Pérez, N; Valdés, J & Ordaz, V. (2012). *Cobertura vegetal y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra*. Terra Latinoamérica, 30 (3), 249-259. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792012000300249.

Programa de Las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2010). *Informe sobre el Desarrollo Humano, Perú-2009*. Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/informe-desarrollo-humano-peru-2009-vol-2-una-vision-las-cuencas>.

Quispe, O.T. (2018). *Influencia de la cobertura vegetal en la erosión hídrica del suelo en la comunidad de San Mateo, Perú*. (Tesis de maestría). Universidad Agraria La Molina. Lima, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3600>.

Rojas, Z. I. (2017). *Erosión hídrica bajo tres estadios de sucesión de bosque dentro del Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica*. (Tesis de grado). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Recuperado de: <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/3425>.

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. (2009). *Plan Director: Estrategia Nacional*. Recuperado de: https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/d.s.016-plan_director.pdf.

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. (2013). *Los impactos del cambio global en las áreas naturales protegidas y sus zonas de influencia. El caso del Parque Nacional Huascarán y la cuenca del río Santa*. Recuperado de: https://www.cambioclimatico-bolivia.org/archivos/20130728193402_0.pdf.

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. (2015). *Plan Maestro del Santuario Nacional Tabaconas Namballe 2015-2019*. Recuperado de: http://old.sernanp.gob.pe/sernanp/archivos/biblioteca/planes_maestros_2015/tabaconas/Plan%20Maestro%202015-2019%20SN%20Tabaconas%20Namballe.pdf.

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. (2018). *Estudios básicos para la zonificación ecológica y económica de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas-Namballe y de los distritos Tabaconas, Namballe y San Ignacio* (Informe N° 011-2016-SERNANP-OA). San Ignacio, Perú.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2017a). *Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú*. Recuperado de: https://idsep.senamhi.gob.pe/portalesidsep/files/tematica/atlas/erosi%C3%B3n_de_suelo/Atlas_Erosion_Suelos_por_Regiones_Hidrologicas_Peru.pdf.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2017b). *Atlas de zonas de vida del Perú. Guía explicativa*. Recuperado de: <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/259>.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (10 de octubre, 2020a). *Precipitación acumulada por 12 horas de la estación meteorológica Tabaconas*. [Fichero de datos]. Recuperado de: <https://cutt.ly/3jgUARv>.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (10 de octubre, 2020b). *Precipitación acumulada por 12 horas de la estación meteorológica San Ignacio*. [Fichero de datos]. Recuperado de: <https://cutt.ly/CjgIcm8>.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (10 de octubre, 2020c). *Precipitación acumulada por 12 horas de la estación meteorológica Chirinos*. [Fichero de datos]. Recuperado de: <https://cutt.ly/hjgIY9P>.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (10 de octubre, 2020d). *Precipitación acumulada por 12 horas de la estación meteorológica Huancabamba*. [Fichero de datos]. Recuperado de: <https://cutt.ly/cjgINnJ>.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (10 de octubre, 2020e). *Precipitación acumulada por 12 horas de la estación meteorológica Sondorillo*. [Fichero de datos]. Recuperado de: <https://cutt.ly/ajgOkKy>.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (10 de octubre, 2020f). *Precipitación acumulada por 12 horas de la estación meteorológica Salala*. [Fichero de datos]. Recuperado de: <https://cutt.ly/IjgPixJ>.

Solano, P.R. (2016). *Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la subcuenca del río Shullcas 2000 – 2013, Huancayo*. (Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro. Recuperado de: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/3486>.

Zúñiga, H. J. (2017). *Determinación de la pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse aguada Blanca-Arequipa, aplicando USLE y técnicas geoespeciales*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3072>.

TERMINOLOGÍA

Bosque de protección. Es una categoría del Sistema de Áreas Naturales Protegidas de Uso Directo con el objeto de garantizar la protección de cuencas altas o colectoras, las riberas de los cursos de agua y en general para la protección de los suelos (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2012).

Bosque húmedo montano. Es un tipo de bosque que se caracteriza por una alta concentración de humedad y precipitación; asimismo, presentan una abundante cobertura vegetal y musgos (Elliot *et al.*, 2009).

Capacidad de uso mayor de suelos. Es un sistema de clasificación del *uso del suelo*, tomando en consideración su vocación de uso; es decir, a tierras que representan características y cualidades similares para conservación y/o aprovechamiento (D.S. N° 017-2009-AG, 2009).

Conflicto de uso de tierra. Es el producto de la superposición del mapa de capacidad de uso mayor de suelos con el uso actual de suelos, las actividades que no corresponden a su capacidad de uso mayor son consideradas en conflicto de uso (GRC, 2009).

Divorcium aquarum (divisoria de aguas). Es la línea imaginaria que separa dos vertientes o cuencas fluviales limítrofes, determinante para referenciar una organización territorial (Elliot *et al.*, 2009).

Enfoque ecosistémico. Según MINAM (2012), es una estrategia para la gestión integrada de tierras, agua y recursos vivos que promueve la conservación y utilización sostenible de los recursos naturales con interacción del ser humano.

Manejo forestal. Son aquellas actividades que se realizan para gestionar los recursos maderables que incluye la evaluación, planificación, aprovechamiento, regeneración y aprovechamiento de los mismos, asegurando la sostenibilidad del bosque (Elliot *et al.*, 2009)

Páramo. Es un tipo de ecosistema que se distribuye en la parte del territorio alto andino (En Perú entre Cajamarca y Piura) sobre los 3000 metros de elevación, generalmente está rodeado de bosques montanos (GRC, 2009).

Riesgo Ambiental. Ministerio del Ambiente [MINAM] (2009), define riesgo ambiental como la probabilidad de ocurrencia que un peligro afecte directa o indirectamente al ambiente y a su biodiversidad, en un lugar y tiempo determinado, el cual puede ser de origen natural o antropogénico.

Servicios ecosistémicos. Son los procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies como parte de ellos, ayudan a sostener y satisfacer la vida humana, brindándole los beneficios para desarrollarse (GRC, 2009).

Territorio. Para el punto de vista ecosistémico (de interés del presente proyecto), el territorio es el espacio físico de interacción del ser humano que lo habita, ocupa, transforma, lo aprovecha y disfruta de acuerdo a sus intereses, identidad, cultura, entre otros; con el conjunto de condiciones físicas y biológicas del medio natural que conforman un ecosistema (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2015).

Zonas de vida. Una zona de vida es un grupo de unidades naturales básicas que tiene regiones con crecimiento similar de plantas dentro de un rango definido de condiciones climáticas similares (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI], 2017b).

APÉNDICES

Apéndice 1. Información histórica de precipitación por estación meteorológica (SENAHMI).

Tabaconas

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1986	119	40	65	118	46	9	45	47	70	67	97	246
1987	78	109	66	128	78				49	88	13	105
1988	175	92	40	104	109	12	30	29	40	96	141	99
1989		140	68	130	130		15	18	34	140	21	22
1990	140	86	98	147	76	96	28		27	94	113	114
1991	75	72	174	79	47		7	37	52	39	37	95
1992	52	94	75	79	48	63	62	47	87	118	0	116
1993	102	110	205	78	74	66	31	87	61	80	43	228
1994	87	177	131	235	96	35	56	15	49	29	72	79
1995	26	33	92	102	102	21	56	8	23	33	112	106
1996	106	101	110	55	49	33	27	25	20	44	66	41
1997	32	129	49	111	39	29	74	30	35	77	78	65
1998	71	94	141	218	54	38	35	13	19	124	78	34
1999	112	64	63	91	172	59	21	25	74	27	22	143
2000	46	107	138	157	14	118	38	25	90	12	33	110
2001	140	29	97	106	45	90	95	19	43	43	123	107
2002	73	96	106	145	84	8	51	13	12	86	98	96
2003	78	72	90	105	88	89	36	18	30	35	66	50
2004	42	25	106	80	55	41	28	6	34	123	116	143
2005	75	162	185	132	58	50	16	3	52	46	76	154
2006	134	151	219	105	58	69	26	44	17	83	90	155
2007	128	78	128	103	87	92	61	53		138	264	99
2008	75	234	103	87	98	48	53	56	28	101	120	27
2009	138	96	147	128	76	52	88	39	65	42	103	137
2010	95	141	109	95	109	74	15	18	37	37	70	109
2011	67	144	135	112								

San Ignacio

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1986	77,5	56	99,7	88,3	37,7	19,4	31,9	42,6	98,5	79,6	73,3	59,9
1987	52,5	105	128	170	57,5	32,8	57,6	46,4	19,2	12,1	62,8	73,2
1988	197	126	50,8	158	68,3	20,7	43,8	27,4	16,6	116	85,6	50,3
1989	137	99,9	110	65,1	77,2	102	20,7	14,5	67,4	57,7	26,9	28,4
1990	59	9,1	78,2	108	73,1	85,4	26,8	43,5	43,4	99	149	107
1991	116	60	93,7	44,2	25,4	17,5	20,4	53,8	22,8	67,6	24,2	47,9
1992	10,4	68,3	61,3	90,9	12,5	68	54,6	35,8	81,4	58,6	65,3	64,6
1993	94,4	132	225	65,1	85,7	56,4	35,8	64,9	43,8	87,8	48,4	144
1994	133	118	138	97,3	119	73,8	87,4	35,1	59,5	52,9	25,7	55,2
1995	55,4	71,2	75,6	115	153	41,2	36,7	16,8	25,6	75,4	210	74,1
1996	171	140	66,9	154	80,1	38,9	21,1	45,9	28,2	48,6	22,7	103
1997	57,7	97,1	110	107	83,8	45,4	39,1	59,6	58,5	50,7	106	98,9
1998	64,6	152	122	111	78,9	29,4	69,5	18,1	31,9	113	104	42,6
1999	142	169	123	205	307	54,3	42,8	34,5	78,7	26,9	51,5	164
2000	68,3	125	230	208	119	119	48,8	81,6	92,3	27,4	40,9	77,9
2001	152	57,6	87,5	134	77,8	98,1	89,8	79,2	55,1	61,7	58,5	129
2002	47,9	243	90	155	138	30,3	77,1	28,9	23,1	140	108	78,1
2003	81,1	76,3	164	85,9	99,7	87,6	70,3	30,6	49,6	78	80,8	82
2004	38,2	74	71,5	118	105	52,6	61,8	30,1	68,6	194	140	102
2005	109	235	179	124	69,8	88	34,9	13,7	61,1	86,6	81,1	181
2006	70,9	89,5	116	60,6	75,1	86,7	28	32	36,9	86,4	118	114
2007	152	50,6	89,9	139	108	115	82,5	64,4	82,6	116	188	142
2008	90,9	249	245	93,6	120	50,4	93,8	89	68,3	137	124	39,3
2009	146	158	130	162	88,6	56,1	54,9	59	70,5	54,3	73,6	110
2010	48,7	145	75,7	246	88,8	62,5	18,3	19,7	33	35,8	150	77,9
2011	85	73,6	102	72,4	89,2	58,1	82,5	29,6	63,5	55,2	128	192
2012	101	95,2	138	90,7	76,5	65,1	77,6	74,5	57,2	98,6	62	107
2013	69,8	46,5	124	71,5	180	59	63,9	48,2	59,2	131	39,1	81
2014	73,6	114	296	118	120	68,4	59,9	87,3	43,3	132	91,3	93,8
2015	140	85,7	199	73,6	67,5	108	99,9	0	25,1	83,4	64,9	84,6
2016	0,3											
2017		64,2	401	153	3,5	55,4	52,2	68,4	31,4	40,8	50,8	155
2018	159	94,2	93,9	141	125	54						

Chirinos

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1988			83	136	132	18	49	41	46	121	87	58
1990												26
1991	64	106	79				25	91	132	130	74	7,6
1992	58	123	75	80	44	103	76	37	70	94	94	123
1993	59	241	351	88	55	54	59	37	73	76	123	140
1994	241	188	188	181	153	77	54	39	75	74	68	175
1995	87	72	158	103	206	86	50	34	41	43	208	89
1996	149	153	91	132	94	55	49	52	26	59	63	127
1997	118	147	66	227	88	65	51	66	48	84	189	95
1998	100	335	268	166	160	77	58	21	60	218	130	50
1999	242	261	199	178	378	53	64	55	60	48	104	273
2000	45	198	191	217	103	108	67	86	93	44	33	153
2001	187	127	100	146	106	85	68	62	46	59	134	165
2002	119	139	115	247	122	25	129	25	34	124	142	88
2003	125	80	200	124	114	85	79	49	52	102	153	141
2004	57	59	167	87	106	63	67	19	36	153	181	146
2005	91	284	158	237	79	101	27	28	41	113	126	372
2006	210	230	164	51	64	99	47	34	28	133	175	140
2007	198	78	130	188	129	145	69	71	74	182	306	130
2008	178	210	172	107	95	70	103	66	76	90	166	54
2009	221	125	231	227	119	81	80	75	103	85	122	104
2010	66	189	58	204	166	135	24	16	45	36	76	206
2011	73	196	130	165	161	116	122	48	87	33	202	279
2012	232	140	107	142	100	86	103	65	52	136	99	152
2013	101	69	153	92	187	89	69	82	67	159	12	112
2014	132	129	291	109	107	129	67	130	41	92	164	189
2015	169	114	291	95	90	91	89	0	35	77	91	108
2016	0,1											
2017		130	282	247		88	56	69	36	71	84	169
2018	96	127	85	228	160	67						

Huancabamba

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1980	24	36	51	99	22	8,7	2,9	2,8	11	50	64	60
1981	30	95	87	39	19	16	5,3	19	0,5	42	18	60
1982	35	54	61	111	29	0,5	4,2	0,5	21	47	54	77
1983	135	58	101	28	26	3,8	2,8	3,7	7,8	52	31	70
1984	40	232	92	64	50	0	13	7,3	6,5	55	94	38
1985	34	13	12	31	25	1,9	4,4	14	2,9	37	8,5	71
1986	59	53	34	80	4,2	0,4	8,5	14	26	24	49	51
1987	47	44	44	66	34	1	43	39	7,8	46	29	18
1988	61	77	22	44	32	12	16	8,2	24	32	70	63
1989	85	77	100	48	24	18	1	2,1	11	83	2,2	9,9
1990	35	35	30	44	33	21	2,1	3,6	2,8	52	60	41
1991	33	35					0	7,8	0,8	15	9,1	32
1992	30	44	30	28	3,9	12	0	3,3	18	20	37	
1993	69	110	252	67	35	1,2	8,7	2,4	16	67	63	145
1994	65	111	119	141	35	9,1	4,5	34	26	11	58	43
1995	39	28	89	63	41	3,1	35	3,1	4,7	14	79	65
1996	47	53	90	34	17	6,9	4,8	8,3	5,2	38	17	16
1997	50	55	30	31	9	3,6	8,6	0,5	11	46	107	41
1998	54	80	82	79	42	14	12	0,6	4,2	68	42	23
1999	91	164	137	58	100	22	18	6,6	47	33	39	94
2000	42	125	133	79	72	24	1,5	9,1	69	1,4	2	66
2001	63	55	89	57	20	64	39	10	24	27	71	55
2002	27	101	85	120	24	1,4	23	0	5	81	27	38
2003	35	50	59	52	24	35	6,1	0,9	3,5	19	55	35
2004	49	12	27	99	29	7,2	10	0,2	9,3	72	82	78
2005	27	104	129	70	31	8,1	0,3	0	8,5	50	26	84
2006	41	112	139	70	20	8,3	1,9	0,8	7,3	53	62	61
2007	45	13	51	100	39	55	3,4	16	4,6	85	113	61
2008	52		104	71	50	9,1	23	20	4,9	74	69	8,8
2009	150	108	83	66	13	8,8	7,2	8	3,9	4,9	34	45
2010	48	105	32	66	43	17	11	2,6	28	41	68	54
2011	39	139	62	162	30	19	36	4,4	53	52	117	122
2012	144	158	71	43	22	17	6,5	11	2,8	138	104	70
2013	53	49	43	15	86	11	15	3,5	9,5	97	0,5	
2014	28	23	166	14	87	26	3	18	3,4	59	64	60
2015	93	22	157	53	14	22	9,2	0,5	1	21	27	7,4
2016	80	71	68	82	5,9	21	16	0	25	5,6	13	82
2017	69	64	247					7,2	4,2			

Sondorillo

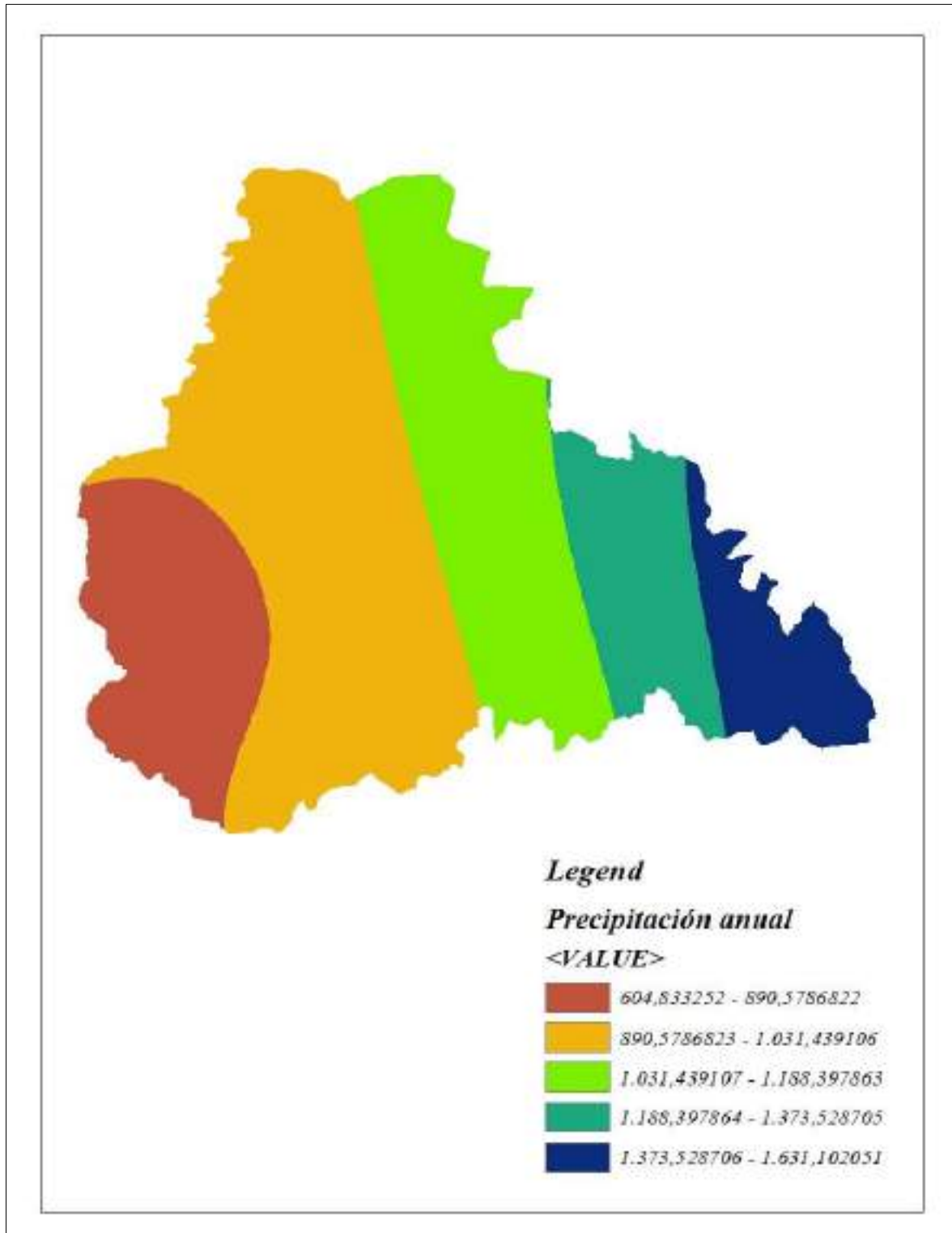
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1980	1,1	29	67	66	9,4	5,7	0	0	1,1	54	57	43
1981	24	66	89	17	6,4	6,7	0	19	0	24	0	40
1982	35	47	61	77	19	0	0	0		40	24	99
1983	51	32	125	42	12	4,4	0	0	0	18	52	12
1984	27	236	72	46	18	23	0	0	0	34	45	27
1985	28	16	5,3	16	34	0	0	0	0	0	20	82
1986	30	14	17	35	9,5	0	1,3	14	10	26	67	32
1987	46	9	24	75	11	0	12	15	22	35	14	20
1988	89	57	11	43	23	0	11	3,9	30	16	68	83
1989	92	87	65	21	19	0	0	0	0	56	0	7
1990	27	23	25	62	8,9	0	0	0	12	77	82	56
1991	10	28	81	27	3,7	3,2	0	0	0	19	9	38
1992	12	36	16	44	15	9,7	0	3,5	19	17	29	53
1993	20	70	183	28	34	0	0	0	17	54		
1994	63	115	70	121	25	4,7	4,9	6,1	12	4,6	10	35
1995	14	24	29	28	14	0	4,2	3,5	13	5,9	31	83
1996	49	36	47	29	14	4,8	5,7	0	8,6	17	17	9,4
1997	43	54	17	31	3,6	2,9	2,8	0	4,2	36	52	40
1998	18	75	127	95	57	5,6	5,3	0	9,4	58	29	31
1999	69	95	106	43	86	17	11	4,4	23	6,8	6,9	102
2000	37	70	110	69	30	32	2	8	57	0	0	48
2001	56	33	82	24	12	41	21	3,4	25	25	67	25
2002	15	54	58	74	16	1,2	15	0	0	71		24
2003	17	18	24	26	9,2	11	2,8	2	3,4	21	20	18
2004	24	2,4	5,1	43	16	3,8	3,2	0	10	79	62	54
2005	16	65	124	26	11	1,9	0	0	11	30	23	59
2006	42	66	134	38	0	9	2,1	0	2	31	30	43
2007	25	18	75	79	22	16	1,3	6,6	6,5	88	124	37
2008	39	182	81	64	19	9	3	2,8	1,2	30	56	6,4
2009	89	42	72	26	5,3	8,8	3,8	3	0	0	21	21
2010	18	81	27	39	23	5,3	3,3	0	8,8	17	44	50
2011	24	50	23	56	22	4,5	3,2	0	24	33	74	77
2012	75	98	46	41	5,6	9,6	0	1,7	0	57	56	18
2013	9,3	16	30	13	49	0	8,2	3,6	3,2	60	0	34
2014	9,6	17	97	23	7,2	1,2	0	4,5	0	45	22	12
2015	76	6,3	124	33	22	8,3	4,5	0	0	12	29	0

Salala

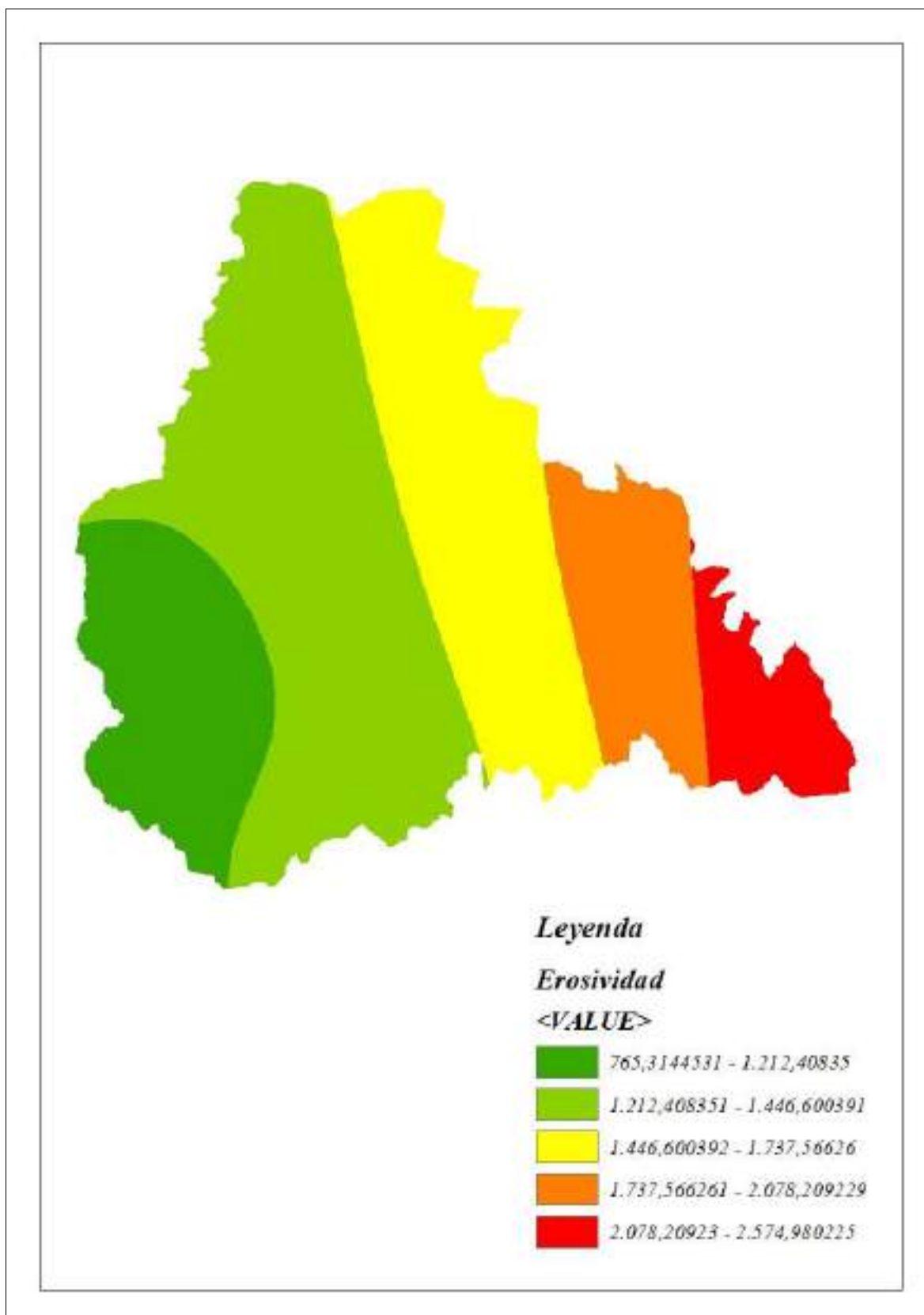
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1997									25,1	55,7	142,5	97,5
1998	96	133,4	152,4	97,6	102,1	60,9	58	23,1	16,3	124	55,5	51,3
1999	123,5			121,6	176,6	66,1	63,2	23,9	47,9	16,6	24	199,3
2000	65,5	188,4	189,1	109,6	104,3	65,9	31,1	36,2	97,7	27,7	22,4	96,5
2001	135,9	164,4	110,4	110,9	58,6	121,9	80,6	41,7	30,9	100,5	83,3	124,5
2002	95,2	147,6	74,9	149,7	105,6	22,3	97,1	10,8	12,7	119,2	68	110,9
2003	69,6	101,2	131,8	94,3	106,4	50,1	30,3	11,4	20,3	66	79,3	88,7
2004	47,6	22,2	106,6	133,6	58,7	66,3	62,5	20,8		118,7	104,2	132,6
2005	73,4		172	102,8	40,8	39,3	19,6	6,5	20,8	87,7	71	
2006				110,3	38,1	28,1	19,9	20,4	15,9	56,9	86,9	111,9
2007	129,1	37,1	113,5	91,9	75,7	92,2	13,5	30,4	24,5	138,4	147,7	99
2008	123,7	292,2	175,8	109,2	83,6	47,6	81,5	50,3	27,3	102,7	127,6	35,1
2009	214,6	151,6	120,9	144,3	53,6	30,4	59,4	52,7	59,9	33,8	79,6	100,7
2010	78,5	151,2	57,9		67,2	68,3						

Apéndice 2. Subprocesos sin editar para determinar el factor de erosividad.

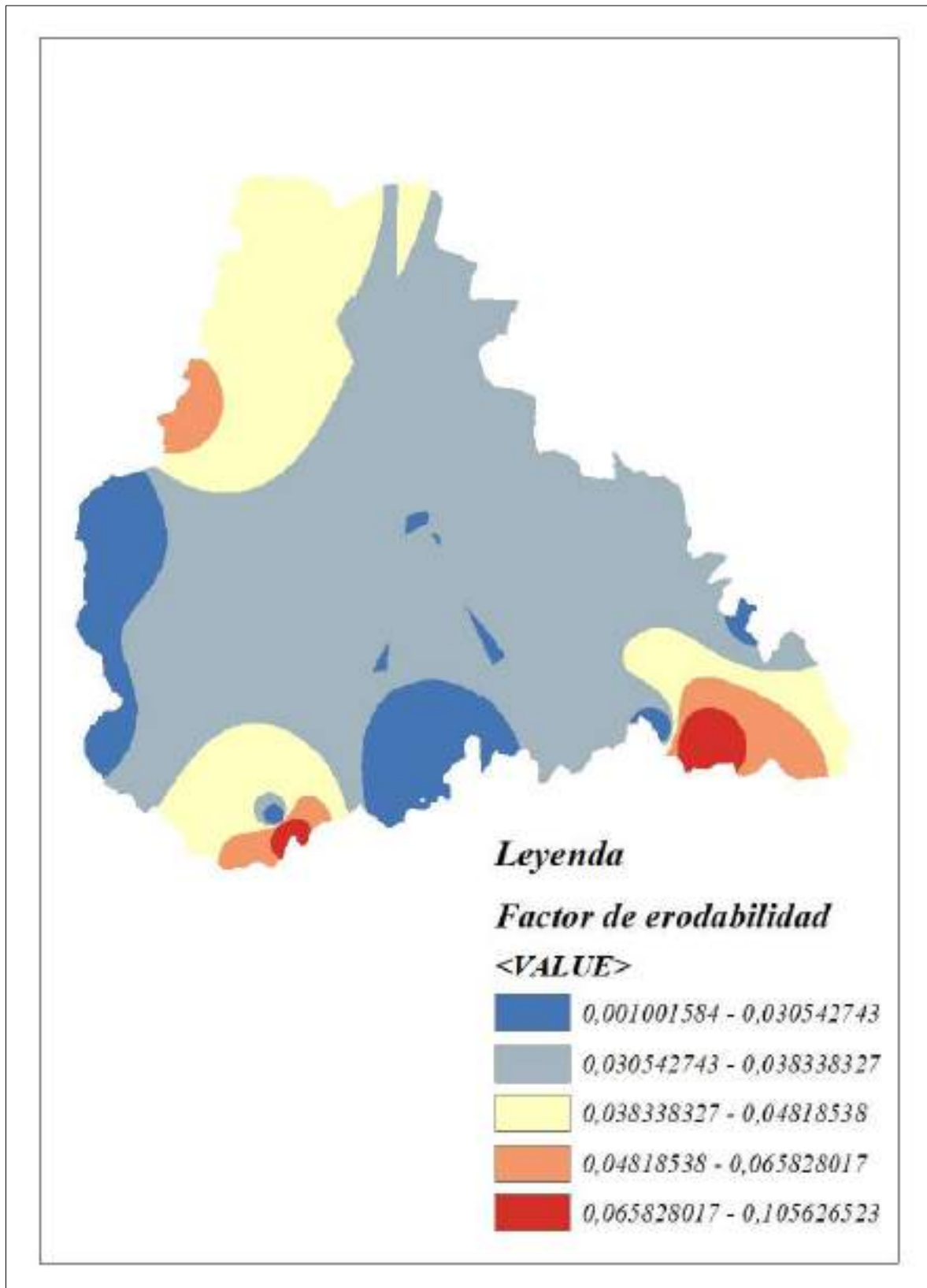
Raster de Precipitación sin editar



Raster de erosividad sin editar

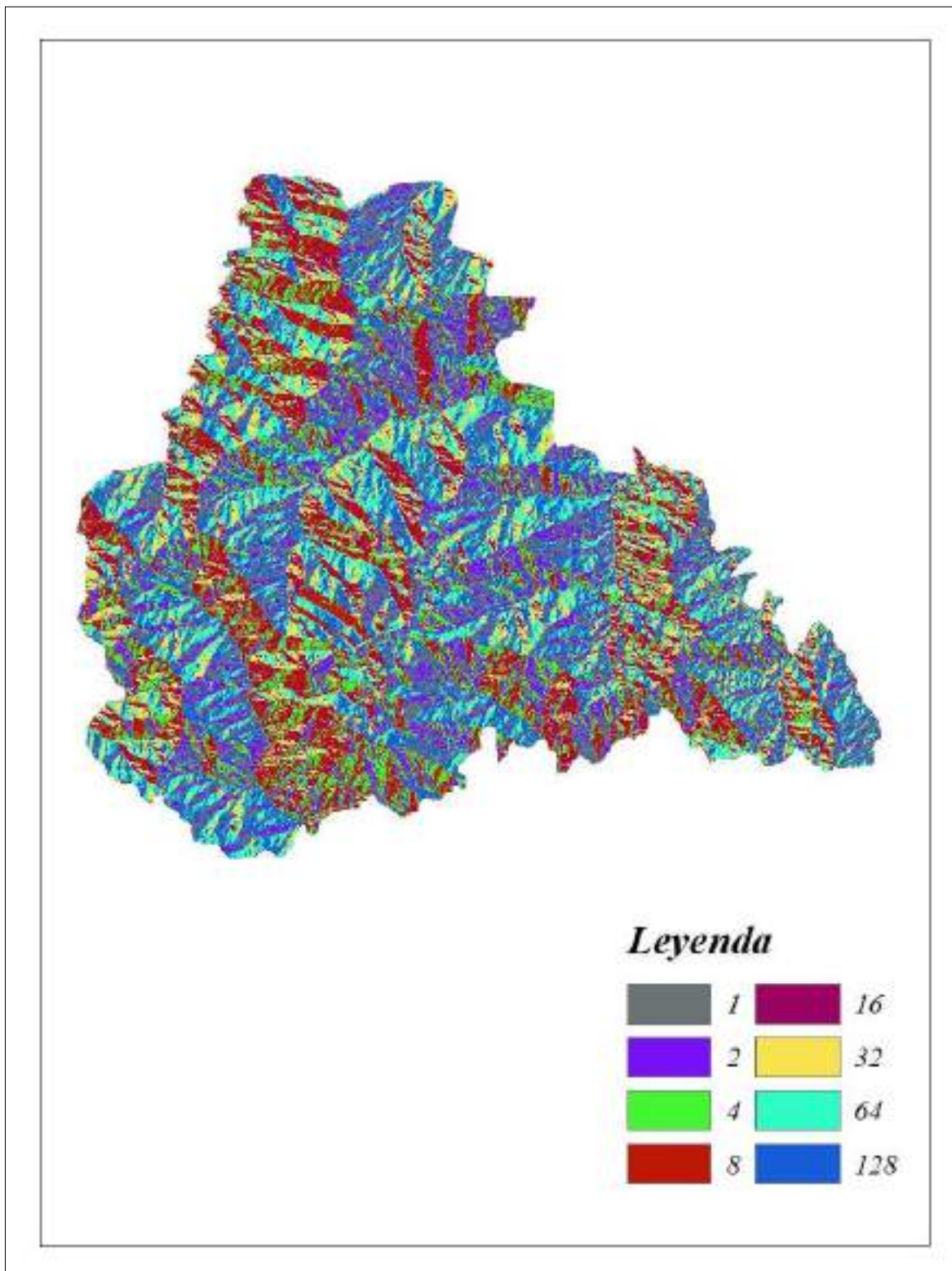


Apéndice 3. Raster del factor de erodabilidad

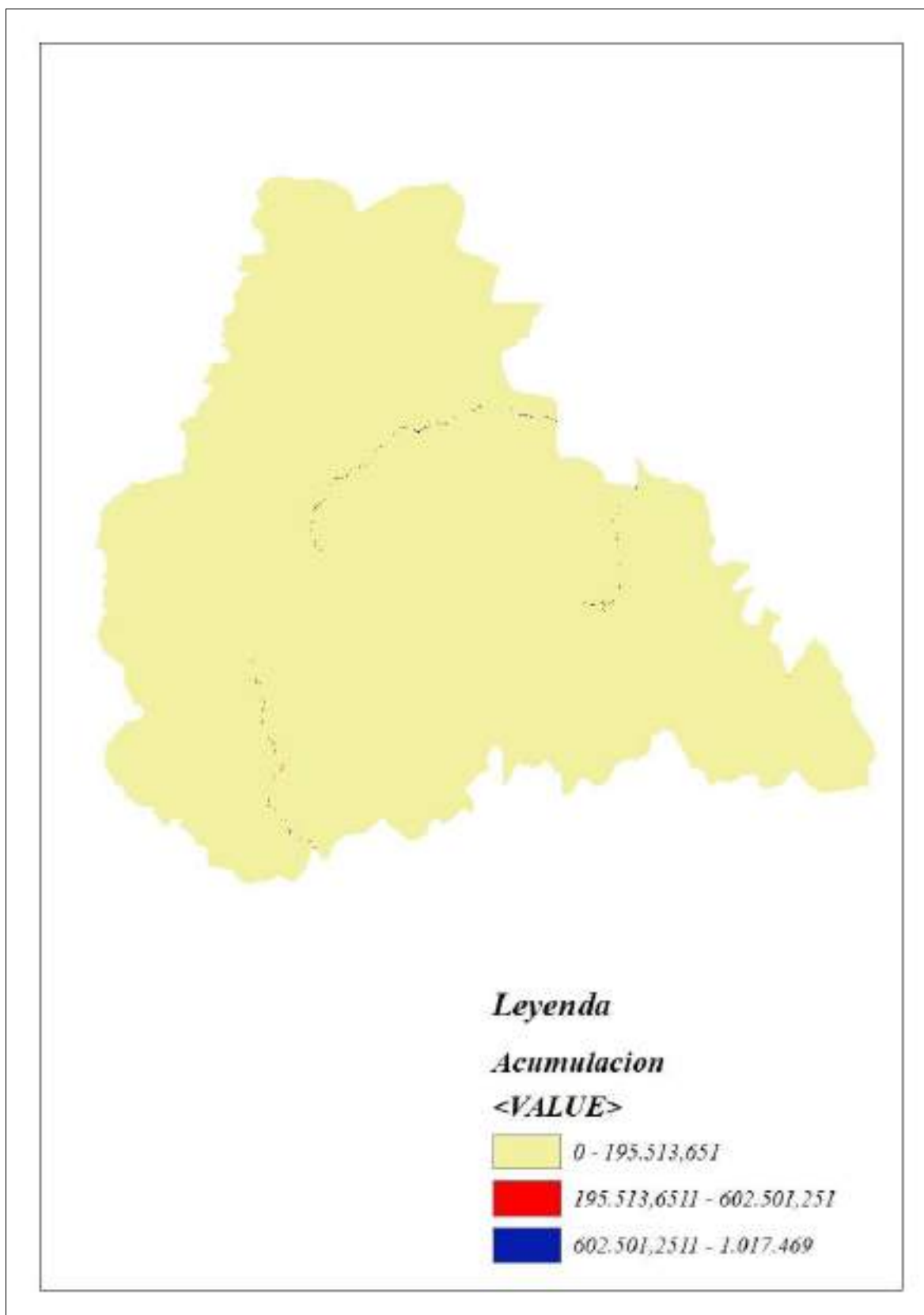


Apéndice 4. Subprocesos para determinar el factor topográfico

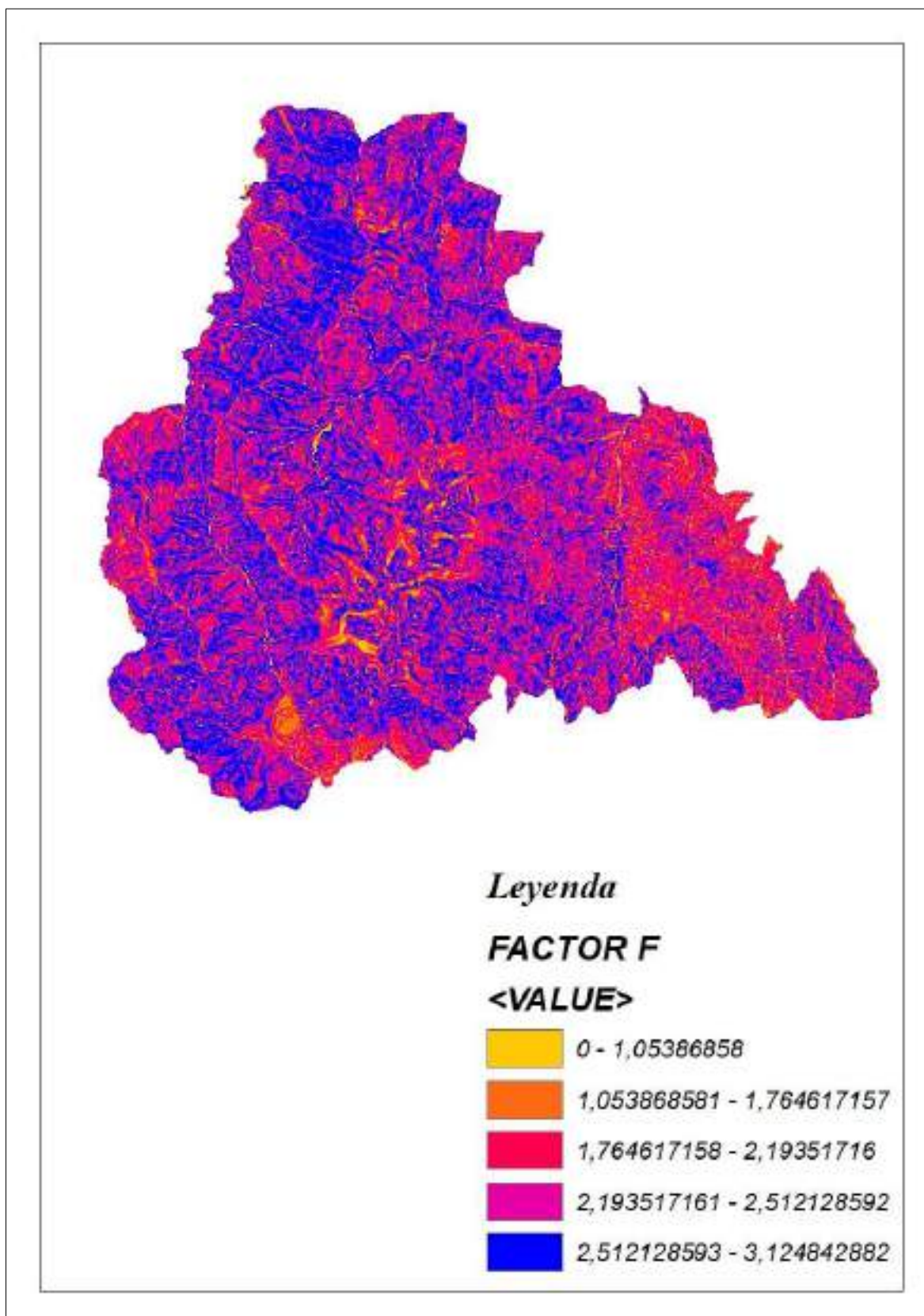
Raster sin editar de dirección de flujos



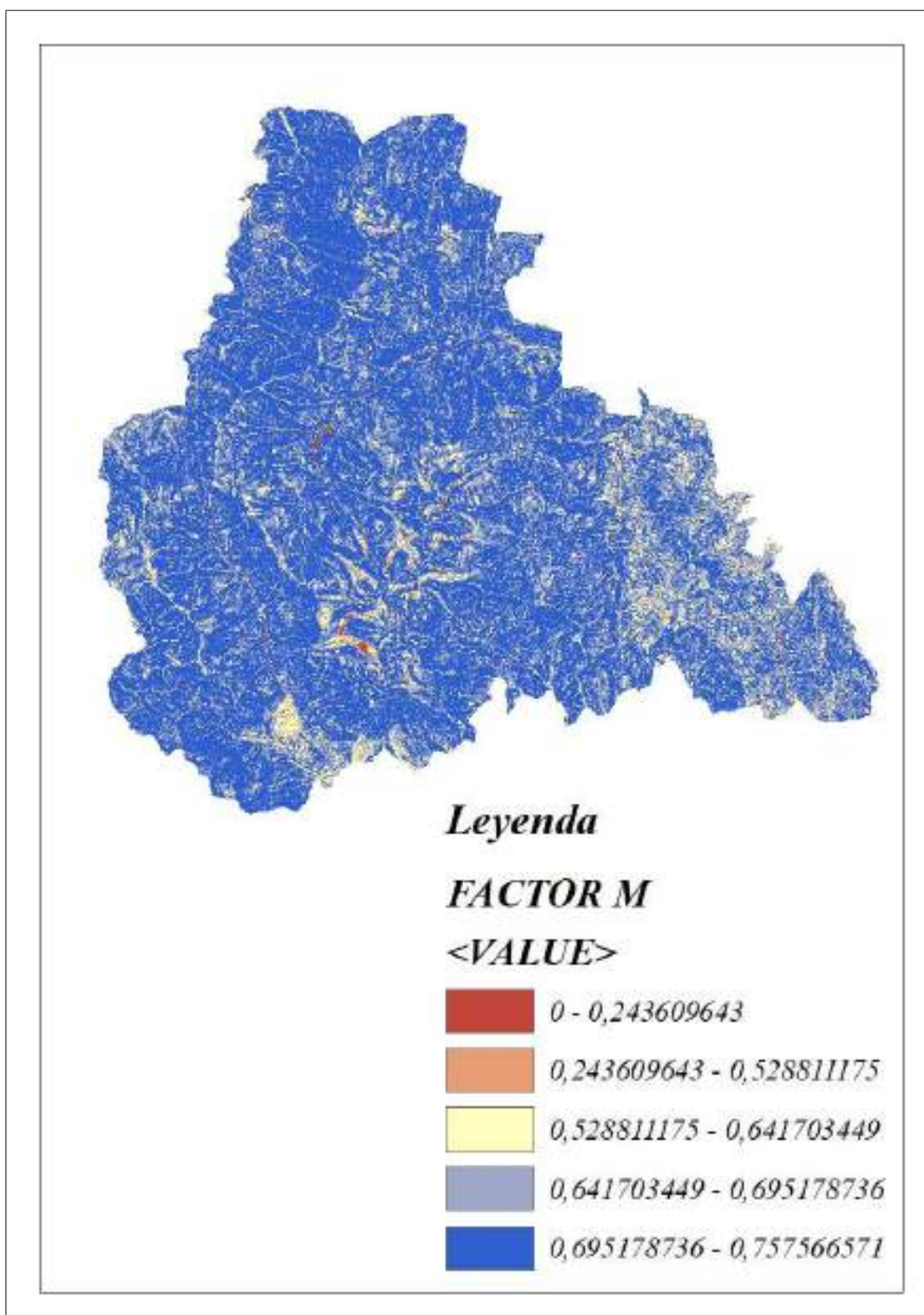
Raster sin editar de acumulación de flujos



Raster sin editar del Factor F



Raster sin editar del factor M.



Apéndice 5. Modelo de elevación digital de la zona de estudio

