

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“CUANTIFICACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA  
DEL RÍO AGUAQUIRÍ APLICANDO LA ECUACIÓN UNIVERSAL  
DE PÉRDIDA DE SUELOS REVISADA”**

Presentada por:

**JORGE DANIEL BERROCAL ALVARADO**

Tesis para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

**Lima – Perú**

**2024**

---

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

# Tesis Final Daniel Berrocal.pdf

## INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://pdfslide.es">pdfslide.es</a> Fuente de Internet	<1 %
2	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, UNAD Trabajo del estudiante	<1 %
3	<a href="http://repositorio.uraccan.edu.ni">repositorio.uraccan.edu.ni</a> Fuente de Internet	<1 %
4	<a href="http://ecopedia.cvc.gov.co">ecopedia.cvc.gov.co</a> Fuente de Internet	<1 %
5	<a href="http://revistas.unal.edu.co">revistas.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
6	Submitted to Universidad Politécnica de Madrid Trabajo del estudiante	<1 %
7	<a href="http://www.fceia.unr.edu.ar">www.fceia.unr.edu.ar</a> Fuente de Internet	<1 %
8	A. R. Vaezi, S. H. R. Sadeghi. "Evaluating the RUSLE model and developing an empirical equation for estimating soil erodibility factor"	<1 %

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“CUANTIFICACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL  
RÍO AGUAQUIRÍ APLICANDO LA ECUACIÓN UNIVERSAL  
DE PÉRDIDA DE SUELOS REVISADA”**

Presentada por:

**JORGE DANIEL BERROCAL ALVARADO**

Tesis para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

---

Dra. Rosemary Vela Cardich  
PRESIDENTE

---

Mg. Sc. Armando Javier Aramayo Bazzetti  
MIEMBRO

---

Mg. Sc. Juan Antonio Guerrero Barrantes  
MIEMBRO

---

Mg. Sc. Wilfredo Celestino Baldeón Quispe  
ASESOR

**DEDICADO DE TODO CORAZÓN A  
DIOS, MIS PADRES, MI HERMANO Y AMIGOS.**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por manifestarse en mi vida.

A mi familia y amigos por su apoyo incondicional.

Al Ing. Mg. Sc. Wilfredo Baldeón, por su apoyo, tiempo y consejos para la culminación de la presente tesis.

A mi alma máter UNALM por la formación brindada.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	viii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. ANTECEDENTES.....	4
2.2. EROSIÓN HÍDRICA.....	8
2.3. TIPOS DE EROSIÓN HÍDRICA .....	8
2.3.1. Erosión por Salpicadura .....	8
2.3.2. Erosión Laminar .....	9
2.3.3. Erosión por Surcos .....	9
2.3.4. Erosión por Cárcavas .....	10
2.4. DAÑOS CAUSADOS POR LA EROSIÓN HÍDRICA .....	10
2.5. FACTORES QUE DETERMINAN LA EROSIÓN HÍDRICA .....	10
2.6. DINÁMICA DE LA EROSIÓN HÍDRICA.....	11
2.7. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA.....	12
2.8. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS (USLE).....	14
2.8.1. Aplicación de ecuación USLE bajo condiciones de cambio climático...	15
2.9. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS REVISADA .....	16
2.9.1. Factor de erosividad por la precipitación pluvial (R).....	17
2.9.2. Factor de erodabilidad del suelo (K) .....	19
2.9.3. Factor topográfico (LS).....	25
2.9.4. Factor de cobertura vegetal del suelo (C).....	27
2.9.5. Factor de prácticas de conservación del suelo (P).....	29
2.9.6. Pérdida del suelo (A).....	30

2.10. CLIMATE HAZARDS GROUP INFRARED PRECIPITATION WITH STATION DATA (CHIRPS).....	31
2.10.1. Climate Hazards group Precipitation climatology (CHPclim).....	32
2.10.2. Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP).....	32
III. METODOLOGÍA .....	34
3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	34
3.1.1. Ubicación Geográfica.....	34
3.1.2. Ubicación Hidrográfica .....	34
3.1.3. Ubicación Política .....	34
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	35
3.2.1. Política.....	35
3.2.2. Hidrografía .....	35
3.2.3. Vías de comunicación .....	36
3.2.4. Clima .....	37
3.2.5. Suelos .....	37
3.2.6. Geomorfología .....	38
3.2.7. Geología .....	39
3.2.8. Pendientes.....	41
3.3. MATERIALES Y EQUIPOS.....	42
3.3.1. Información cartográfica .....	42
3.3.2. Información hidrológica.....	44
3.3.3. Información satelital.....	46
3.3.4. Hardware .....	47
3.3.5. Softwares.....	47

3.4. PROCEDIMIENTO .....	47
3.4.1. Delimitación de la cuenca .....	47
3.4.2. Determinación del factor de erosividad por la precipitación pluvial (R) .....	48
3.4.3. Determinación del factor de erodabilidad del suelo (K) .....	50
3.4.4. Determinación del factor topográfico (LS) .....	51
3.4.5. Determinación del factor de cobertura vegetal del suelo (C).....	52
3.4.6. Determinación del factor de prácticas de conservación del suelo (P).....	54
3.4.7. Determinación de la pérdida del suelo (A).....	54
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
4.1. FACTORES DEL MODELO RUSLE.....	56
4.1.1. Factor R.....	56
4.1.2. Factor K.....	57
4.1.3. Factor LS .....	59
4.1.4. Factor C .....	60
4.1.5. Factor P .....	61
4.2. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA .....	62
4.2.1. Pérdida del suelo (A).....	62
4.3. PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS .....	64
V. CONCLUSIONES .....	65
VI. RECOMENDACIONES .....	68
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	69
VIII. ANEXOS.....	73



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Modelos seleccionados basados en el concepto USLE o incorporando parámetros USLE .....	12
Tabla 2: Clasificación del Índice Modificado de Fournier para Latinoamérica .....	18
Tabla 3: Valores del código USDA para la estructura del suelo .....	20
Tabla 4: Valores del código USDA para permeabilidad del perfil.....	21
Tabla 5: Valores del índice de Erodabilidad del suelo aproximado en base a la textura y a la materia orgánica del suelo superficial .....	21
Tabla 6: Valores estimados de magnitud general del factor K de erodabilidad del suelo...	22
Tabla 7: Correlación entre las clases texturales de suelos, según el USDA, y las texturas.	23
Tabla 8: Valores del factor de erodabilidad (factor K) de acuerdo a la taxonomía y la textura de suelo.....	23
Tabla 9: Clasificación de grado de erodabilidad del USDA .....	24
Tabla 10: Valores del factor LS según la pendiente .....	27
Tabla 11: Índices del Factor de Cobertura Vegetal C .....	27
Tabla 12: Valores del Factor C según clase y calidad de la cobertura .....	28
Tabla 13: Valores del factor P de Prácticas de Conservación .....	29
Tabla 14: Valores experimentales del factor P .....	29
Tabla 15: Clasificación de los niveles de intensidad de pérdida de suelo.....	30
Tabla 16: Rango de pendiente (%) del reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor .....	41
Tabla 17: Información cartográfica .....	43
Tabla 18: Correlación de valores de NDVI y Factor C .....	53
Tabla 19: Rangos resultantes de la clasificación del Mapa del Factor R .....	57
Tabla 20: Resultados del Factor de Erodabilidad del Suelo (K) .....	58
Tabla 21: Grado de erodabilidad del suelo en la cuenca del río Aguaquirí.....	58
Tabla 22: Rangos resultantes de la clasificación del Factor LS .....	59
Tabla 23: Resultados del análisis de las pendientes de la cuenca del río Aguaquirí.....	60
Tabla 24: Valores del Factor C para los tipos de cobertura de la cuenca Aguaquirí.....	61
Tabla 25: Tipo de prácticas de conservación la cuenca del río Aguaquirí .....	61
Tabla 26: Tipo de prácticas de conservación la cuenca del río Aguaquirí .....	62
Tabla 27: Grado de erosión hídrica en la cuenca Aguaquirí .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Nomograma de estimación de valores del factor K .....	19
Figura 2: Esquema de elaboración de CHIRPS.....	31
Figura 3: Descripción esquemática del desarrollo de PISCOp V2.1.....	46
Figura 4: Procedimiento en GRASS GIS para la delimitación de la cuenca.....	48
Figura 5: Línea de regresión de correlación de valores de Factor C y NDVI .....	53
Figura 6: Combinación de Factores RUSLE para el cálculo de “A”.....	54
Figura 7: Histograma y distribución de la erosión hídrica en la cuenca del río Aguaquirí .	63

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA .....	74
Anexo 1.1 Ubicación de estaciones meteorológicas virtuales.....	74
Anexo 1.2 Datos de Precipitación media mensual (1981 – 2016).....	75
Anexo 1.3 Valores para el cálculo del Factor R .....	77
ANEXO 2: MAPAS .....	79
Anexo 2.1 Mapa de Ubicación .....	79
Anexo 2.2 Mapa Político .....	80
Anexo 2.3 Mapa de Suelos .....	81
Anexo 2.4 Mapa Geomorfológico .....	82
Anexo 2.5 Mapa Geológico.....	83
Anexo 2.6 Mapa de Pendientes .....	84
Anexo 2.7 Mapa de Isoyetas media anual .....	85
Anexo 2.8 Mapa de Factor de Erosividad por precipitación pluvial (Factor R) .....	86
Anexo 2.9 Mapa de Factor de Erodabilidad del suelo (Factor K).....	87
Anexo 2.10 Mapa de Factor Topográfico (Factor LS) .....	88
Anexo 2.11 Mapa de Factor de Cobertura Vegetal del Suelo (Factor C).....	89
Anexo 2.12 Mapa de Factor de Prácticas de Conservación del Suelo (Factor P) .....	90
Anexo 2.13 Mapa del Grado de Erosión Hídrica de la Cuenca Aguaquirí .....	91
Anexo 2.14 Mapa Altitudinal .....	92
ANEXO 3: CÁLCULOS .....	93
Anexo 3.1 Cálculos de número de zanjas de infiltración .....	93
Anexo 3.2 Cálculos de número de terrazas de formación lentas.....	94

## RESUMEN

Uno de los principales problemas que afectan a las cuencas hidrográficas de la sierra peruana es la erosión hídrica de sus suelos, en especial en zonas que presentan pendientes pronunciadas. Siendo el principal factor climático que influye en la erosión hídrica la precipitación, afectando con mayor intensidad en las cabeceras de cuencas. De allí que la erosión del suelo no solo provoca la pérdida de suelos en laderas, sino también la pérdida de fertilidad y baja productividad de cultivos, pasturas y forrajes; por lo que la evaluación del riesgo de erosión hídrica es primordial para promover estrategias de conservación. Para estimar la pérdida de suelo anual en la cuenca del río Aguaquirí se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE), con el apoyo de información cartográfica y satelital de la zona, y herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG). Utilizando programas como QGIS 3.22, SAGA-GIS y RStudio, como herramientas útiles para el análisis y geoprocesamiento de los factores de la ecuación RUSLE, se logró identificar las zonas prioritarias en la cuenca más afectadas por la erosión hídrica según la clasificación de la FAO, cuyo resultado fue plasmado en un mapa temático en donde se muestran los diversos niveles de erosión hídrica. Resultando que la mayor superficie en la cuenca se encuentra ocupada por suelos afectados por “Erosión Alta” (de 50 a 200 t/ha/año) que se extienden por 4885.494 hectáreas (53.68 % del ámbito de estudio), concentrándose en la parte media y alta de la cuenca; calculándose además una tasa promedio anual de erosión hídrica de 93.73 t/ha/año. A partir del mapa resultante de erosión se propuso la implementación de prácticas de conservación de suelos priorizando aquellas áreas con pendientes empinadas a extremadamente empinadas, con el fin de disminuir así la tasa de erosión presente en la cuenca.

**Palabras clave:** Erosión hídrica, Ecuación universal de pérdida de suelos revisada, cuenca Aguaquirí, Sistemas de información geográfica.

## ABSTRACT

One of the main problems affecting the watersheds of the Peruvian highlands is water erosion of their soils, especially in areas with steep slopes. The main climatic factor influencing water erosion is precipitation, which affects the headwaters of river basins with greater intensity. Hence, soil erosion not only causes the loss of soil on slopes, but also the loss of fertility and low productivity of crops, pastures and forage; therefore, the evaluation of the risk of water erosion is essential to promote conservation strategies. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) was used to estimate the annual soil loss in the Aguaquirí river basin, with the support of cartographic and satellite information of the area, and Geographic Information System (GIS) tools. Using programs such as QGIS 3.22, SAGA-GIS and RStudio, as useful tools for the analysis and geoprocessing of the RUSLE equation factors, it was possible to identify the priority areas in the basin most affected by water erosion according to the FAO classification, the result of which was captured in a thematic map showing the various levels of water erosion. As a result, the largest surface area in the basin is occupied by soils affected by "High Erosion" (from 50 to 200 t/ha/year), extending over 4885.494 hectares (53.68% of the study area), concentrated in the middle and upper part of the basin; also calculating an average annual water erosion rate of 93.73 t/ha/year. Furthermore, based on the resulting erosion map, the implementation of soil conservation practices was proposed, prioritizing those areas with steep to extremely steep slopes, in order to reduce the erosion rate present in the watershed.

**Keywords:** Water erosion, Revised Universal Soil Loss Equation, Aguaquirí basin, Geographic Information System.

## I. INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce el desprendimiento, transporte y depositación de las partículas del suelo por acción de agentes erosivos tales como la energía cinética de la gota de lluvia, la escorrentía en movimiento y la gravedad (Cisneros *et al.*, 2012); siendo este un proceso que degrada los suelos ya que hace desaparecer el suelo superficial a veces hasta dejar al descubierto la roca madre, representando así, según Taco (2021) una de las formas más completas de degradación del suelo englobando tanto la degradación física del suelo como química y biológica.

Según The German Advisory Council on Global Change (1994), a nivel mundial una de las principales formas de degradación del suelo se da por la erosión hídrica, la cual representa el 56%, seguida de la erosión eólica con 28%; la causa de esta degradación estaría explicada en un 35% por actividades sobre pastoreo, 29% por la deforestación y 28% por prácticas agrícolas inadecuadas. (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2014)

Asimismo, a través del proyecto Global Assessment of Human-Induced Soil Degradation (GLASOD, 1991) se realizó una evaluación global de la distribución geográfica de la degradación del suelo, resultando la erosión hídrica, con mucho, el tipo más importante de degradación de suelos y ocupando alrededor de 1094 millones de hectáreas o el 56% del área total afectada por la degradación del suelo inducida por el hombre a escala mundial, y 123.2 millones de hectáreas o el 50.6% del área total afectada por la degradación del suelo inducida por el hombre en América del Sur.

La erosión hídrica, definida por Molina *et al.* (2021), comprende diversos procesos tales como desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo debido a la acción de la lluvia y el escurrimiento superficial del agua. Para estimar la erosión se recurre a métodos y/o modelos de estimación de la erosión, los cuales son herramientas que permiten evaluar mediante un indicador cuantitativo el grado de erosión presente, y las posibilidades de control del proceso mediante un conjunto de técnicas de manejo.

Los modelos pueden dar una estimación en términos absolutos, cuando representan adecuadamente lo que ocurre en la realidad, o en términos relativos, cuando el interés de su uso está en las comparaciones entre situaciones, para ayudar a la toma de decisiones sobre el manejo. (Cisneros *et al.*, 2012)

Según estadísticas del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), en el Perú la superficie de suelo erosionado alcanza un área de 127 945 790 hectáreas, presentando el 6.4% de dicha extensión un nivel de erosión severa; siendo la región natural más afectada con este nivel de erosión la sierra con 4.2%, mientras que la erosión severa en la costa y selva representan el 2.0% y 0.2% respectivamente (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2022)

En la sierra peruana, uno de los principales problemas que afectan a las cuencas hidrográficas es la erosión hídrica de sus suelos, de acuerdo a INRENA (1996) citado por Taco (2021), principalmente en zonas que presentan pendientes pronunciadas. Asimismo, Cisneros *et al.* (2012) indica que el principal factor climático que influye en la erosión hídrica es la precipitación, siendo está de mayor intensidad en las zonas altas de la cuenca del río Mala según el Instituto Nacional de Recursos Naturales *et al.* (2007a); y según indica Molina *et al.* (2021), a futuro, los daños provocados por estos eventos climatológicos podrían ser aún mayores con el cambio climático, ya que las proyecciones actuales muestran cierta tendencia en un incremento de la frecuencia de eventos más fuertes.

Como consecuencias producto de la erosión hídrica en la región sierra se tienen la pérdida de suelos en laderas, sedimentación en el sistema fluvial, daños a la infraestructura civil (Molina *et al.*, 2021); la pérdida de fertilidad del suelo, baja productividad de los cultivos, baja producción de pasturas y forrajes para el ganado, bajos ingresos, problemas sociales, migración y sedimentación de embalses. (Zink 2005, citado por Taco 2021) Provocando así un impacto negativo sobre los servicios ecosistémicos proporcionados por las cuencas andinas como son el mantenimiento de la calidad del agua, el suministro de recursos y la protección frente a desastres naturales.

Para hacer frente a este problema en las áreas de interés, es que se hace necesario disponer de información adecuada sobre la cantidad de pérdida de suelo, así como, la identificación de áreas con alto riesgo de erosión. (Escobar, 2019) Es por ello que la presente investigación contribuirá a disponer de esta información mediante un análisis más detallado del problema de erosión hídrica de la zona de estudio, ya que, si bien existen estudios de erosión realizados para la cuenca del río Mala, a nivel local aún se desconoce el estado actual, la intensidad y el riesgo potencial de la erosión hídrica, como es el caso de la cuenca Aguaquirí, motivo de la presente investigación.

Para ello, se ha utilizado el modelo empírico de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE), metodología aplicada para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica, que corresponde a la versión modificada del modelo USLE con el fin de superar algunas de las limitaciones de su predecesor, teniendo buena aceptación en América y en países con problemas de erosión. (Sabino *et al.*, 2017)

Además, como indica D'Amario (2016), el conocimiento de la posible tasa de erosión en un sitio es fundamental para realizar un manejo sustentable del suelo, aplicando las medidas de conservación más adecuadas, es por ello que dicha investigación resultará útil como línea base para el planteamiento de medidas preventivas, correctivas y la elaboración de estrategias de conservación y protección del suelo en la cuenca del río Aguaquirí, ubicada en la región Lima; pudiendo además establecer mejoras en la seguridad de la población en riesgo, el sector productivo agrícola y las condiciones medioambientales.

El objetivo general del presente trabajo es estimar la pérdida de suelo media anual en la cuenca del río Aguaquirí, la misma que pertenece a la cuenca del río Mala, aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada utilizando Sistemas de Información Geográfica.

Los objetivos específicos son: (a) estimar los parámetros de la metodología R.U.S.L.E. para la cuenca del río Aguaquirí; (b) determinar la distribución espacial de la erosión hídrica media anual en la cuenca; y, (c) proponer alternativas de mitigación y/o conservación de suelos en las áreas afectadas por la erosión hídrica.



## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. ANTECEDENTES**

Dourojeanni Ricordi (1967), en su estudio titulado "La ecuación universal de pérdida de suelo y su aplicación al planeamiento del uso de las tierras agrícolas. Estudio del factor de las lluvias en el Perú", utiliza por primera vez la Ecuación universal de pérdida de suelo en el Perú, usándola para su aplicación en el planeamiento del uso de las tierras agrícolas.

Camargo *et al.* (2017) en su trabajo de investigación titulado "Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica" presenta una perspectiva general del estado situacional del conocimiento actual sobre la degradación del suelo ocasionada por la erosión hídrica, enfatizando en su evaluación y su representación cartográfica. Para lo cual consideró los fundamentos y aspectos históricos que cobraron importancia, donde explica la variedad de categorías metodológicas empleadas para su estudio y evaluación, incluyendo algunas experiencias de aplicación. Destacando la importancia del uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Discutiendo sobre el uso de imágenes satelitales, de importante apoyo para investigaciones y evaluaciones de los procesos de erosión, y de los SIG, evidenciando sus limitaciones y potencialidades dada su gran capacidad de representación cartográfica, de análisis y de ahorro de tiempo.

A la fecha, se han desarrollado diversos estudios de determinación de la erosión en cuencas del Perú utilizando el modelo (R)USLE con apoyo de herramientas SIG, tales como las realizadas por:

Nakaya Barzola (2018) en su trabajo de investigación titulado "Estimación de la pérdida de suelo media anual mediante el modelo R.U.S.L.E., en la cuenca del río Tingo – Cajamarca" determinó la vulnerabilidad a la erosión hídrica de la cuenca aplicando la Ecuación Universal de Perdida de Suelos Revisada (RUSLE) y un modelo geoespacial con el empleo de las

herramientas SIG. Mediante el cual identificó las zonas vulnerables a la erosión hídrica según la clasificación de la FAO para finalmente, de acuerdo a cada zona de vulnerabilidad erosiva, proponer alternativas de protección y/o conservación de suelos. Como resultado obtuvo un mapa temático el cual presenta la distribución espacial de la vulnerabilidad a la erosión hídrica en la cuenca, donde se presenta una mayor pérdida de suelos en las zonas con alta pendiente y con escasa cobertura vegetal. Concluyendo que la erosión hídrica en la cuenca se encuentra más influenciada por la pendiente y cobertura vegetal, que por la precipitación en la zona.

Alvarez (2019) en su investigación de título “Análisis temporal del nivel de la erosión hídrica de la subcuenca del río Ichu 2013 y 2017” en donde buscó estimar el nivel de erosión hídrica de la subcuenca del río Ichu para los años 2013 y 2017 utilizando para ello la metodología de Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y el análisis espacial con herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Obteniendo como resultados que la tasa de erosión hídrica promedio más alta para el año 2013 fue de 406.98 TM/ha/año en un área de 18.1 ha; y la más alta para el 2017 fue de 554.36 TM/ha/año en un área de 25 ha. Concluyendo que la variación resultante entre dichos años se debió principalmente a los factores de erosividad de la lluvia (Factor R) y el factor de manejo de cultivos (Factor C).

Escobar Soldevilla (2019) en cuya investigación titulada “Mitigación de la erosión hídrica para la conservación del suelo en la subcuenca del río Ichu, Huancavelica” presenta como objetivo plantear una propuesta de mitigación de la erosión hídrica para la conservación del suelo en la subcuenca del río Ichu; estimando la pérdida anual de suelo de la subcuenca a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), haciendo uso de teledetección y herramientas SIG para cuatro escenarios planteados bajo ciertas condiciones de modificación en el factor P y C para los años 2013 y 2018. Como resultados de la modelación, se observó que predomina la tasa de erosión de categoría moderada para los cuatro escenarios, lo que indica que para dichas áreas se estiman pérdidas de suelo entre 10 a 50 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>, seguida por la categoría ligera estimada en menos de 10 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>.

Taco (2021) con el tema de “Uso del Sistema de información geográfica para la cuantificación de la erosión hídrica potencial en la cuenca Chamaca – Lima”, tiene como propósito determinar el nivel de erosión hídrica en la cuenca de la quebrada Chamaca,

perteneciente a la cuenca del río Lurín, en la provincia de Huarochirí, región Lima. Para ello utilizó la metodología RUSLE, la cual es la una actualización de la metodología USLE, debido a la poca flexibilidad del modelado de erosión dentro de la USLE estándar. Concluyendo que las áreas con Erosión Hídrica Potencial Alta (de 50 a 200 toneladas por hectárea año) abarcaban una extensión de 267.96 hectáreas (3.02 % del área de estudio) las cuales se ubican principalmente en la parte alta de la cuenca, caracterizada por ser zonas donde ocurren mayores precipitaciones, de mayor pendiente y con cobertura vegetal escasa. Además, propuso medidas de control de la erosión de acuerdo a cada zona de erosión hídrica potencial determinado.

Roque & Santisteban (2021), en cuya investigación titulada “Evaluación del cambio morfológico en la cuenca del río Mala aplicando RUSLE y técnicas geoespaciales”, realizaron el análisis del cambio morfológico resultado de la pérdida de suelo durante el periodo de 1996 al 2016 de la cuenca del río Mala - Cañete. La metodología empleada fue la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), calculando los factores de la ecuación y las tasas de erosión a través del álgebra de mapas con la aplicación del software Arc-GIS. Como resultado se cuantificó la pérdida media de suelo en la cuenca del río Mala en  $248.44 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , presentando el 42.38% de la cuenca niveles de erosión extremadamente graves

Agama & Castillo (2022) en su trabajo de investigación titulado “Estimación de los factores que influyen en la pérdida de los suelos mediante la USLE en la microcuenca San Alberto del distrito de Oxapampa” presentó como objetivo obtener la estimación real y potencial de la pérdida de suelo mediante la Ecuación Universal de Erosión del Suelo (USLE) y modelamiento geoespacial en la microcuenca San Alberto, aplicando para ello técnicas SIG y de teledetección. Estimando la erosión potencial en un rango de 0.03204 a 3109.79 TM/ha/año y la erosión real entre 0.3204 a 176.3826 TM/ha/año para la microcuenca de estudio.

Dado que el presente trabajo de investigación hace uso de datos de precipitación del producto PISCO se consideró necesario mencionar algunos estudios de investigación relacionados a este producto además de su producto base CHIRPS, siendo estos:

Harrison *et al.* (2022) en su estudio titulado “Advancing early warning capabilities with CHIRPS-compatible NCEP GEFS precipitation forecasts” describe el producto creado CHIRPS-GEFS siendo un conjunto de datos de pronóstico de precipitaciones diseñado para respaldar la alerta temprana de sequías y anticipar los impactos climáticos en muchas regiones del mundo. Señalando que la compatibilidad de CHIRPS y CHIRPS-GEFS permite a los usuarios combinar observaciones de precipitación durante el pasado reciente y cantidades pronosticadas; y evaluar más fácilmente los riesgos a corto plazo de peligros agrometeorológicos al reducir en gran medida la necesaria corrección de sesgo, la reducción de escala espacial y los pasos de preprocesamiento temporal.

Huerta *et al.* (2022) en su investigación de título “High-resolution gridded hourly precipitation dataset for Peru (PISCOp\_h)” presenta un conjunto de datos cuadrículados de alta resolución (0,1°) de precipitación horaria en todo el Perú para el período 2015-2020, denominado PISCOp\_h, desarrollado a partir de una técnica de desagregación temporal que utiliza el conjunto de datos cuadrículados de precipitación diaria PISCOp, datos de 309 estaciones meteorológicas automáticas y los productos de precipitación satelitales IMERG-Early, PERSIANN-CCS y GSMaP\_NRT. Siendo de gran valor para la evaluación de impactos y riesgos de precipitaciones extremas en el Perú ya que proporciona una base útil para la realización de modelos en alta resolución en regiones montañosas con terreno complejo del país.

Fernandez-Palomino *et al.* (2022) en cuya investigación titulada “A Novel High-Resolution Gridded Precipitation Dataset for Peruvian and Ecuadorian Watersheds: Development and Hydrological Evaluation” desarrolla el conjunto de datos RAIN4PE de precipitación diaria corregido hidrológicamente para Perú y Ecuador, de resolución espacial de 0.1° para el período 1981-2015; fusionando datos de precipitación, tanto de origen satelital, de reanálisis y de precipitación terrestre, con la elevación del terreno utilizando el método random forest. A partir de resultados de evaluación hidrológica integral se muestra que RAIN4PE supera algunos conjuntos de datos de precipitación de última generación como CHIRP, ERA5, CHIRPS, MSWEP y PISCO en términos de simulaciones de caudal diarios y mensuales, siendo idóneo para aplicaciones hidrometeorológicas en las regiones ecuatorianas y peruanas. Además de poder usar el enfoque para la generación de RAIN4PE en otras regiones con escasez de datos.

## **2.2. EROSIÓN HÍDRICA**

En Cisneros *et al.* (2012) se define a la erosión hídrica como el proceso por el cual se produce el desprendimiento, transporte y depositación de las partículas del suelo por acción de agentes erosivos tales como: la energía cinética de la gota de lluvia, la escorrentía en movimiento y la gravedad. Por su parte, INETER *et al.* (2005), citado por del Aguila (2010), define la erosión hídrica como el proceso de separación y transporte de las partículas del suelo por acción del agua, siendo este un proceso que degrada los suelos ya que hace desaparecer el suelo superficial a veces hasta dejar al descubierto la roca madre.

Colomer (2001), citado por Taco (2021), hace énfasis en que la erosión hídrica representa una de las formas más completas de degradación del suelo englobando tanto la degradación física del suelo como química y biológica.

Alvarez (2019), señala que este proceso erosivo es influenciado por diversos factores tales como la estructura, textura y contenido de materia orgánica del suelo, el ángulo de inclinación de la pendiente del terreno y las condiciones climáticas. Entre estos destacan la intensidad de las precipitaciones, sumado a la conservación de los suelos y la cobertura vegetal.

Dentro de las formas como tiene lugar la erosión hídrica se distinguen las siguientes: Erosión por salpicaduras, erosión laminar, erosión por surcos y erosión por cárcavas.

## **2.3. TIPOS DE EROSIÓN HÍDRICA**

### **2.3.1. Erosión por Salpicadura**

Según Sabino, Felipe, & Lavado (2017) esta forma de erosión se origina cuando las gotas de lluvia caen directamente sobre las partículas de suelo o superficies de agua muy delgadas, salpicando cantidades enormes de suelo debido a la energía cinética de impacto. Las partículas se desplazan como máximo 150 cm, siendo las arenas finas las más afectadas. Además, dicho proceso puede dar origen a una costra superficial generando así una disminución de la infiltración. Efectos de este tipo de erosión son más evidentes cerca de las divisorias de aguas. (INETER *et al.* 2005, citado por del Aguila 2010)

Morgan y Rickson (1995), citado por Cisneros *et al.* (2012), señalan que esta forma de erosión se relaciona directamente con la intensidad de la lluvia y su energía cinética y de manera inversa con la estabilidad de los agregados superficiales y la cobertura de residuos. Además, la presencia de vegetación arbórea puede incrementar este tipo de erosión por la formación de gotas más grandes a partir del flujo de hojas.

### **2.3.2. Erosión Laminar**

Según Cisneros *et al.* (2012), corresponde a una forma de erosión superficial que se produce por acción del escurrimiento, perdiéndose una fina y uniforme capa de toda la superficie del suelo en forma de lámina. Indicando además que este proceso produce una mayor pérdida neta de suelo que la erosión por salpicadura, siendo el tamaño de partículas más afectado el que se desprende debido a la energía de la lluvia.

Algunos autores indican que dicho traslado de partículas de suelo puede ocurrir en forma difusa o uniforme; y cuando ocurre en forma difusa, se considera como un tipo de erosión poco perceptible. (Núñez Solís 2001, citado por Alvarez 2019)

Asimismo, Taco (2021), indica que esta es la forma más peligrosa de erosión hídrica ya que resulta imperceptible al principio y solo será visible cuando pasado un tiempo aumente su intensidad, quedando expuestas las raíces de las plantas, apareciendo piedras que antes no se notaban y empiece a evidenciarse cambios en el color del suelo de marrón a amarillo o rojo, quedando expuesto el subsuelo.

### **2.3.3. Erosión por Surcos**

INETER *et al.* (2005), citado por del Aguila (2010), menciona que es la pérdida de suelo por el agua de lluvia cuando esta se ha concentrado en pequeñas depresiones naturales y empieza a desplazarse ladera abajo arrastrando el suelo, formando así pequeñas zanjas con profundidades hasta de 50 cm.

Adicionalmente Taco (2021), indica que este tipo de erosión es fácilmente perceptible debido a la formación de surcos irregulares, teniendo presente que si este tipo de erosión no llegase a ser controlada podría llegar a la etapa de cárcava.

#### **2.3.4. Erosión por Cárcavas**

INETER *et al.* (2005), citado por del Aguila (2010), se refiere a las cárcavas como zanjas profundas en las laderas, mayores de 1 metro de profundidad, formadas por el arrastre de las partículas de suelo de manera casi completa hasta llegar incluso al lecho rocoso. Al ser las cárcavas de mayores dimensiones que los surcos estas no pueden desaparecer con actividades normales de labranza, además cabe señalar que estas comienzan a desarrollarse de la parte baja de la ladera hacia arriba. (Taco, 2021)

#### **2.4. DAÑOS CAUSADOS POR LA EROSIÓN HÍDRICA**

Ocampo *et al.* (1996), citado por del Aguila (2010), establece que los daños causados por la erosión pueden ser directos o indirectos, siendo los daños directos aquellos que afectan los cultivos o dañan la chacra, disminuyendo así la capacidad de producción y desvalorizando la propiedad. Por otro lado, los daños indirectos, los cuales son ocasionados por la suma o conjunto de problemas de erosión en varias zonas de cultivo, se manifiestan en desequilibrios hidrológicos y ecológicos, además de problemas de sedimentación y daños en las vías, acueductos y viviendas.

#### **2.5. FACTORES QUE DETERMINAN LA EROSIÓN HÍDRICA**

Según Vásquez (2000), citado por Cabrejos (2016), los factores determinantes para los sucesos de erosión hídrica son los siguientes:

- El suelo: Las características físicas del suelo (estructura, textura, contenido de materia orgánica, etc.) determinan el grado de resistencia de las partículas del suelo al desprendimiento y transporte por efecto del impacto del agua sobre el suelo, de la escorrentía y la capacidad de infiltración del suelo.
- La topografía: Las características topográficas que inciden en la erosión hídrica son la pendiente y la longitud de la ladera, así como la forma y tamaño del área de drenaje.
- El clima: Los factores climáticos que más inciden en la erosión hídrica son la precipitación, el viento y la temperatura. Existe una estrecha relación entre las características de la precipitación y la escorrentía, el viento en muchos casos cambia la velocidad de la lluvia y su ángulo de impacto sobre el suelo, afectando sobre su fuerza erosiva.

- La vegetación: La vegetación protege la superficie del suelo del impacto directo del agua, sea esta proveniente de la lluvia o escorrentía. La vegetación protege al suelo mediante:
  - La intercepción y disminución o anulación de la energía con la que caen las gotas de lluvia ya sea mediante las hojas, tallos o los residuos de las plantas.
  - La reducción de la velocidad del agua de escorrentía por efecto de la resistencia hidráulica debido al “colchón” que forman los residuos vegetales o cubierta vegetal.
  - El aumento de la capacidad de infiltración y almacenamiento del agua debido al mejoramiento de la estructura y porosidad del suelo por efecto de las raíces, los residuos vegetales y la actividad microbiana.
  
- El hombre: Factor principal y decisivo en todo proceso erosivo, debido fundamentalmente a su rol y participación en el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, agua, suelo y cubierta vegetal.

## **2.6. DINÁMICA DE LA EROSIÓN HÍDRICA**

De acuerdo con Cisneros *et al.* (2012) al caer las gotas de lluvia su energía se disipa sobre la superficie del suelo produciendo la ruptura de los terrones y agregados, generando las salpicaduras (erosión por salpicadura) que desprenden partículas que luego son arrastradas pendiente abajo. Luego, por acción de la escorrentía se produce el desprendimiento de nuevo suelo y el transporte del suelo removido, en una magnitud proporcional al caudal escurrido y a la velocidad que adquiere el flujo de agua sobre la superficie.

Pueden distinguirse dentro de la escorrentía dos tipos de flujo: el flujo laminar (erosión laminar), que se mueve con una velocidad lenta, y el flujo en surcos (erosión en surcos), con una velocidad que puede llegar a 4 m/s, y que es el responsable de la mayor parte del transporte de sedimentos. La erosión por surcos puede ser controlada caso contrario pasa a la etapa de cárcava que son surcos más grandes en forma de pequeños riachuelos por donde va a circular el agua de escorrentía llevando consigo todo el material erosionado. (Taco, 2021)



Viers (1974), citado por Sabino *et al.* (2017), indica que el transporte de las partículas del suelo provoca tarde o temprano una acumulación. Cuando esta se verifica en el fondo de las aguas de un lago o de un océano se denomina sedimentación. Siendo dicha operación muchas veces responsable de la modificación las formas del relieve terrestre.

## 2.7. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA

Los métodos de estimación de la erosión son herramientas que permiten evaluar mediante un indicador cuantitativo el grado de erosión presente, y las posibilidades de control del proceso mediante un conjunto de técnicas de manejo. Estos modelos pueden dar una estimación en términos absolutos, cuando representan adecuadamente lo que ocurre en la realidad, o en términos relativos, cuando el interés de su uso está en las comparaciones entre situaciones, para ayudar a la toma de decisiones sobre el manejo. (Cisneros *et al.*, 2012)

Según Morgan (1995), citado por Cisneros *et al.* (2012), desde el punto de vista de su concepción y su base de cálculo, los modelos de erosión pueden clasificarse en: Modelos físicos, son modelos a escala, desarrollados en laboratorio, que asumen una similitud entre el modelo y el mundo real; modelos analógicos, usan analogías entre el modelo a simular y modelos mecánicos o eléctricos; y modelos digitales, basados en el uso de computadores para procesar grandes cantidades de datos.

Dentro de los modelos más conocidos se encuentra el modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE); Alewell *et al.* (2019) presenta en la siguiente tabla otros modelos de estimación de la erosión basados en el concepto de USLE o incorporando alguno de sus parámetros:

**Tabla 1:** Modelos seleccionados basados en el concepto USLE o incorporando parámetros USLE

<b>Modelo</b>	<b>Nombre completo</b>	<b>Componentes USLE</b>	<b>Características adicionales en comparación con USLE</b>
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation	Componentes USLE para simular la erosión	Componentes auxiliares basados en procesos (erosionabilidad del suelo variable en el tiempo, crecimiento de plantas), valores actualizados de erosividad (R), nuevas relaciones para factores L y S, factores P adicionales

Continuación...

RULSE2	Revised Universal Soil Loss Equation 2	Componentes USLE para simular la erosión	Erosión y deposición neta, predicción híbrida de la erosión del suelo con la combinación de la USLE empírica basada en índices y ecuaciones basadas en procesos para el desprendimiento, transporte y deposición de partículas del suelo, cálculo diario, contabilidad de biomasa en el factor C
Adición de componentes tridimensionales			
RUSLE3D	Revised Universal Soil Loss Equation for Complex Terrain	Componentes USLE pero sustituyendo la longitud de pendiente por la contribución del área de pendiente ascendente	Considera la convergencia del flujo en la zona de ladera, mejorando así el impacto del flujo concentrado en el aumento de la erosión
USPED	Unit Stream Power Erosion and Deposition	Componentes USLE para simular la erosión	Considera la topografía tridimensional y predice la erosión y la deposición
Adición de factores que consideran el transporte de nutrientes, medidas de manejo o reemplazo de factores C que mejoren la dinámica biológica			
CSLE	Chinese Soil Loss Equation	USLE pero factor C y P sustituidos	El factor C se reemplazó por un factor de medidas de conservación biológicas (B) y un factor de medidas de conservación de ingeniería (E), así como un factor de medidas de conservación de labranza (T)
PERFECT	Productivity, Erosion and Runoff Functions to Evaluate Conservation Techniques	La producción de sedimentos se simula usando MUSLE	Balance hídrico y predicciones de escorrentía, erosión y crecimiento y rendimiento de los cultivos; incluidas las secuencias de siembra, cosecha y gestión de los rastrojos durante el barbecho.
G2	Geoland 2 erosion model	USLE pero factor C y P sustituidos	Factor C sustituido por un factor de retención de la vegetación que combina el uso del suelo y la cobertura vegetal fraccional; factor P sustituido por un factor de características del paisaje que cuantifica el efecto de los obstáculos para interrumpir la escorrentía de las precipitaciones.
Teniendo en cuenta la escorrentía, el transporte y la entrega de sedimentos			
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation	Componentes USLE para simular la erosión	Predicción de la producción de sedimentos; simulación de tormentas individuales
SWAT	Soil and Water Assessment Tool	Entrega de sedimentos basada en MUSLE	Simulación del balance hidrológico del agua y, a continuación, utilización de la escorrentía para simular la dinámica de los sedimentos.
WATEM/SEDEM	Water and Tillage Erosion and Sediment Model	Componentes USLE para simular la erosión	La producción de sedimentos, así como el transporte y las vías de sedimentación que derivan de las fuentes finales más importantes; considera la erosión del laboreo
SEDD	Sediment Delivery Distributed Model	Modelado tipo USLE para calcular tasas brutas de erosión	Las tasas brutas de erosión están acopladas a una herramienta de entrega de sedimentos para estimar el transporte y la entrega de sedimentos.

Continuación...

Teniendo en cuenta la dinámica de la escorrentía y los sedimentos, así como los nutrientes y/o contaminantes

CREAMS	Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems model	Componentes USLE para simular la erosión	Modelización de la escorrentía, erosión y sedimentación, erosión en cárcavas; química y contaminantes de fuentes difusas. Tormentas/eventos individuales y modelización a largo plazo
AGNPS	Agricultural Non-Point Source Model	USLE o RUSLE utilizados para modelar la erosión	Modelado de escorrentía y nutrientes
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator	USLE utilizado para modelar la erosión del agua	Además de la erosión hídrica, la hidrología, la dinámica de los nutrientes, el crecimiento de las plantas, la temperatura del suelo, el laboreo y la economía se simulan con módulos basados en la física.

FUENTE: Alewell *et al.* (2019)

## 2.8. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS (USLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE, por sus siglas en inglés) es una metodología utilizada para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en t/ha/año, presentada en sus inicios por Wischmeier y Smith en el año 1962 y publicada posteriormente en su forma definitiva en el Manual 534 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (Wischmeier & Smith 1978, citado por Sabino *et al.* 2017)

La ecuación del modelo USLE es la siguiente:

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

En donde:

- A: pérdida anual de suelo (t/ha\*año)
- R: factor de erosividad por la precipitación pluvial (MJ\*cm/ha\*h\*año)
- K: factor de erodabilidad del suelo (t\*ha\*h\*/MJ\*ha\*cm)
- L: factor longitud de la pendiente (adimensional)
- S: factor de gradiente de la pendiente (adimensional)
- C: factor de cobertura vegetal del suelo (adimensional)
- P: factor de prácticas de conservación de suelos (adimensional)

Castro Mendoza (2013) señala que cuando se consideran todos los factores de USLE, se dice que se ha calculado la erosión hídrica actual, en cambio cuando no se incluyen los factores C y P, entonces se calcula la erosión hídrica potencial, es decir, una estimación de cuánto suelo se perdería si no hubiera ninguna cobertura vegetal y no se realizara práctica de conservación alguna.

De acuerdo a Kirby y Morgan (1994), citado por Cisneros *et al.*, (2012), la USLE puede utilizarse para:

- Estimar la pérdida anual promedio de suelo de una pendiente, en un campo con condiciones específicas de uso y manejo de la tierra.
- Apoyar la toma de decisiones en la selección de sistemas de uso y manejo, y de prácticas de conservación para condiciones específicas de suelos y pendientes.
- Estimar el cambio en la pérdida de suelo que resultaría de un cambio en el uso o de las técnicas de conservación sobre una situación dada.
- Determinar cómo pueden aplicarse o alternarse las prácticas de conservación para permitir un uso más intensivo de las tierras, manteniendo una pérdida de suelo tolerable.
- Obtener estimaciones de pérdida de suelo para que los entes responsables de la Conservación de Suelos determinen las necesidades de conservación.

### **2.8.1. Aplicación de ecuación USLE bajo condiciones de cambio climático**

Según Kim (2020), citado por Kang *et al.* (2021), producto del cambio climático se genera una tendencia de clima anormal con el aumento de la intensidad de las lluvias y el número de días de lluvia; y de acuerdo a Jung *et al.* (2016), un aumento en la precipitación acumulada anual o la intensidad de la lluvia aumenta el factor de erosión por lluvia (factor R de la ecuación USLE). Sin embargo, Woo *et al.* (2010), citado por Kang *et al.* (2021), consideraron que existe una limitación en el cálculo del factor de erosión por lluvia (factor R de la ecuación USLE) para reflejar las características que se concentran en un período corto de tiempo, como tifones o lluvias intensas localizadas, debido a precipitaciones anuales o mensuales, y la USLE tiene limitaciones porque se calcula a nivel de parcela en lugar de a nivel de cuenca.

En consecuencia, se evalúa que calcular el factor de erosión por lluvia reflejando las características de la lluvia sobre una base diaria en lugar de sobre una base anual o mensual resultaría más efectivo para estimar la pérdida de suelo en una cuenca hidrográfica.

Por ello, Kang *et al.* (2021) considera que la aplicación de ecuaciones convencionales de erosión del suelo como USLE para la estimación de la erosión del suelo bajo el cambio climático no es apropiada, indicando que la técnica de estimación más efectiva y práctica de la erosión del suelo debe desarrollarse aún más para garantizar los efectos del cambio climático.

## **2.9. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS REVISADA**

Modelo desarrollado por Renard y Foster en 1989 que corresponde a la versión modificada del modelo USLE con el fin de superar algunas de las limitaciones su predecesor, teniendo buena aceptación en América y en países con problemas de erosión. (Sabino *et al.*, 2017)

Dicho modelo fue formulado de manera similar pero incorporando importantes cambios en la manera de estimar cada uno de sus parámetros, siendo para el factor R la incorporación de nuevos mapas de isolíneas para el índice de erosividad; el factor K incorpora aspectos relacionados con procesos de heladas; el factor LS se estima según nuevas fórmulas; el factor C incluye nuevos subfactores y el factor P incluye nuevas consideraciones de prácticas agrícolas. (Taco, 2021)

Entre otros cambios en el modelo RUSLE señalados por Taco (2021) se tienen:

- La computarización de algoritmos para facilitar los cálculos.
- Nuevos valores de erosividad de lluvias-escurrimientos (R) en el oeste de los Estados Unidos (condiciones áridas), basado en más de 1200 localidades.
- El desarrollo de un término de susceptibilidad del suelo a la erosión estacionalmente variable (K) y métodos alternativos de estimación del factor K cuando el nomograma no es aplicable.

- Un nuevo método para calcular el factor cubierta-manejo (C), utilizando subfactores que incluyen uso previo de la tierra, cubierta de cultivos, cubierta vegetal del suelo (incluyendo fragmentos de roca en la superficie), y rugosidad del terreno.
- Nuevas formas de estimar los factores de largo y magnitud de la pendiente (LS) que consideran porcentajes de erosión en surcos e ínter-surcos.
- La capacidad de ajustar el factor LS para pendientes de forma variable.
- Nuevos valores de prácticas de conservación (P) para cultivos en fajas alternadas, uso de drenaje subterráneo, y praderas.

En Sabino *et al.* (2017) también aclara que en función al RUSLE se estiman las pérdidas de suelo anuales como valor promedio de un periodo representativo de años. Teniendo en cuenta que la hipótesis de partida del modelo RUSLE se centra en considerar a las precipitaciones como el principal agente activo de esta erosión superficial.

### **2.9.1. Factor de erosividad por la precipitación pluvial (R)**

De acuerdo con Wischmeier & Smith (1978), citado por Sabino *et al.* (2017), el factor de erosividad de la lluvia es un índice numérico que expresa la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo.

#### **Índice Modificado de Fournier**

Echeverri, citado en Alvarez (2019), propone el uso del Índice Modificado de Fournier (IMF) propuesto por Arnoldus (1977) ya que lo considera como un requisito básico para la elaboración del mapa del factor R. La ecuación del índice modificado de Fournier es la siguiente:

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

Dónde:

IMF = Índice modificado de Fournier, en (mm)

P<sub>i</sub> = Precipitación media mensual del mes (mm)

P = Precipitación media anual (mm)

En Taco (2021) se menciona que Arnoldus (1978), basado en trabajos de Fournier (1960), utiliza una fórmula obtenida por regresión lineal en la cual se correlacionaron valores conocidos de R con lluvias medias anuales, siendo la fórmula la siguiente:

$$R = a * \left( \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \right) + b$$

Donde:

R = Factor de erosividad de las lluvias

P<sub>i</sub> = Precipitación media mensual del mes i.

P = Precipitación media anual.

a y b = Son constantes que consideran las condiciones climáticas locales.

Para las regiones con precipitaciones mayores a 200 mm anuales se adoptará las constantes climáticas de USA a = 4,17 y b = -152.

Para las regiones con precipitaciones menores a 200 mm anuales se adoptará las constantes climáticas de USA a = 0.66 y b = - 3 (Ramírez 2010, citado por Taco, 2021)

**Tabla 2:** Clasificación del Índice Modificado de Fournier para Latinoamérica

Clase	Rango	Calificación
1	Menor de 60	Muy Bajo
2	60 a 90	Bajo
3	90 a 120	Moderado
4	120 a 160	Alto
5	Mayor de 160	Muy Alto

**FUENTE:** Lobo *et al.* (2006), citado por Taco (2021).

Según Arnoldus (1980) y Hoyos *et al.* (2005), citados por Taco (2021), se determinó que el índice modificado de Fournier resulta ser un buen estimador de la erosividad de las lluvias para el modelamiento de los procesos erosivos en zonas tropicales.

### 2.9.2. Factor de erodabilidad del suelo (K)

Para Gisbert Blanquer, Ibáñez Asensio, & Moreno Ramón (2012) el factor erosionabilidad del suelo o factor K expresa la susceptibilidad del suelo a sufrir pérdidas por erosión; siendo función de características edáficas tales como textura, estructura, estabilidad de agregados, pedregosidad superficial, entre otros. Alvarez (2019) aclara que suelos con textura donde los valores del limo o arena son altos son susceptibles a la erosión. Esta erosión se ve limitada cuando la arcilla y el limo incrementan. El factor K se ve limitado por la presencia de arcilla. Suelos con texturas medias como los francos, tienen un valor moderado de K, cerca de 0,25 a 0,4 ya que son moderadamente susceptible. Y suelos con textura de limo son más erodables.

Taco (2021), sostiene que en un principio el factor K se determinaba experimentalmente (Smith y Wischmeier 1962), años después (Wischmeier y Mannering 1969) obtienen una ecuación empírica basándose en las características del suelo obtenidas en el campo y en el laboratorio; posteriormente, Wischmeier *et al.* (1971) proponen la utilización de un sencillo nomograma para su estimación, en función de cinco parámetros del suelo: porcentaje de limo + arena muy fina (0,002 - 0,1 mm), porcentaje de arena (0,1 - 0,2 mm), porcentaje de materia orgánica, estructura y permeabilidad.

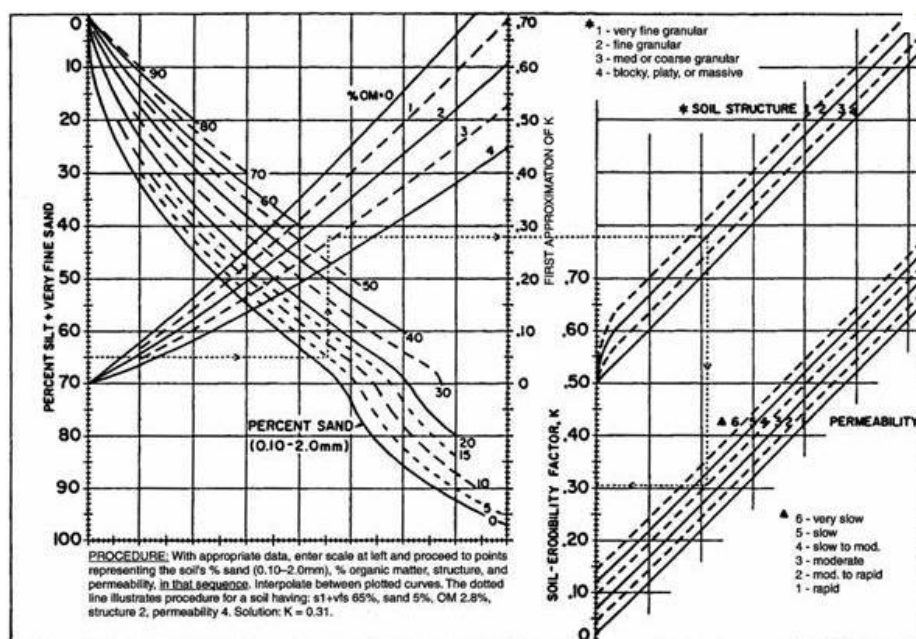


Figura 1: Nomograma de estimación de valores del factor K

FUENTE: Wischmeier y Smith (1978) citado por Gisbert Blanquer *et al.* (2012)



La ecuación empírica de regresión utilizada para el cálculo del factor K se encuentra en función de las variables representativas de sus propiedades físicas, siendo expresada por la siguiente fórmula:

$$100K = 10^{-4} * 2.71 * M^{1.14} * (12 - a) + 4.20 (b - 2) + 3.23(c - 3)$$

Donde:

M = Factor representativo de la textura (100 - %arcilla) (%limo + arena fina)

a: % materia orgánica







b: Número correspondiente a la estructura del suelo según:

- 1: Gránulo muy fino y grumo muy fino (< 1 mm)
- 2: Gránulo fino y grumo fino (1 - 2 mm)
- 3: Gránulo y grumo medio (2 -5 mm) y gránulo grueso (5 - 10 mm)
- 4: Gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso (> 10 mm)

c: Clase de permeabilidad del perfil, según la codificación del USDA.

Los valores de textura, materia orgánica y estructura se refieren a los 15 - 20 cm superiores del suelo, y los de permeabilidad a todo su perfil. Los valores del código USDA para la estructura del suelo y la permeabilidad del perfil se han establecido cualitativamente a partir de la descripción de campo y de los valores de la granulometría. (Taco, 2021)

**Tabla 3:** Valores del código USDA para la estructura del suelo

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

**FUENTE:** Mancilla (2008), citado por Taco (2021).

**Tabla 4:** Valores del código USDA para permeabilidad del perfil

Código USLE	Permeabilidad	Textura
1	Muy rápida	Arena franca gruesa y arenas
1	Rápida	Arena franca
2	Moderadamente rápida	Franco arenoso
3	Moderada	Franco limoso, Franco, Franco arcillo arenoso
4	Moderadamente lenta	Franco arcillo limoso, Franco arcilloso, Arcillo arenoso, limoso
5	Lenta	Arcillas, Arcillo limoso
6	Muy lenta	Arcillas finas

**FUENTE:** Soil Survey Manual (1993), citado por Taco (2021).

Además, Taco (2021), indica que otra alternativa para determinar el factor K es tomar sus valores correlacionados con el tipo de suelo (textura y porcentaje de materia orgánica), o el material original (litología).

**Tabla 5:** Valores del índice de Erodabilidad del suelo aproximado en base a la textura y a la materia orgánica del suelo superficial

Clases texturales	Contenido de materia orgánica		
	0.5%	2%	4%
	K	K	K
Arena	0.07	0.04	0.03
Arena Fina	0.21	0.18	0.13
Arena muy fina	0.55	0.47	0.36
Arena franca	0.16	0.13	0.10
Arena fina franca	0.31	0.26	0.21
Arena muy fina franca	0.57	0.49	0.39
Franco arenoso	0.31	0.31	0.25
Franco arenoso fino	0.46	0.39	0.31
Franco arenoso muy fino	0.61	0.53	0.43
Franco	0.49	0.44	0.38
Franco limoso	0.62	0.55	0.43
Franco arcillo arenoso	0.35	0.33	0.27
Franco arcilloso	0.36	0.33	0.27
Franco arcillo limoso	0.48	0.42	0.34
Limo	0.78	0.68	0.55

Continuación...

Arcillo arenoso	0.18	0.17	0.16
Arcillo limoso	0.33	0.30	0.25
Arcilla	0.17-0.38		

FUENTE: ARS (1973), citado por Taco (2021).

**Tabla 6:** Valores estimados de magnitud general del factor K de erodabilidad del suelo

Clase de textura	Contenido de materia orgánica		
	<i>0.5 por ciento</i>	<i>2 por ciento</i>	<i>4 por ciento</i>
	<i>K</i>	<i>K</i>	<i>K</i>
Arena	0.05	0.03	0.02
Arena Fina	0.16	0.14	0.10
Arena muy fina	0.42	0.36	0.28
Arena migajosa	0.12	0.10	0.08
Arena fina migajosa	0.24	0.20	0.16
Arena muy fina migajosa	0.44	0.38	0.30
Migajón arenoso	0.27	0.24	0.19
Migajón arenoso fino	0.35	0.30	0.24
Migajón arenoso muy fino	0.47	0.41	0.33
Migajón	0.38	0.34	0.29
Migajón limoso	0.48	0.42	0.33
Limo	0.60	0.52	0.42
Migajón arcillo arenoso	0.27	0.25	0.21
Migajón arcilloso	0.28	0.25	0.21
Migajón arcillo limoso	0.37	0.32	0.26
Arcilla arenosa	0.14	0.13	0.12
Arcilla limosa	0.25	0.23	0.19
Arcilla	0.13-0.29		

Los valores que se indican son promedios estimados de escalas ampliadas de valores específicos del suelo. Cuando una textura se halla cerca de la línea limítrofe de dos clases de texturas, utilícese el promedio de los valores K. Unidades: t\*ha\*h/MJ\*cm\*ha.

FUENTE: ARS (1975), citado por Gisbert Blanquer *et al.* (2012).

En Sabino *et al.* (2017) se indica que cuando no se cuente con los datos necesarios de suelos para utilizar el nomograma de estimación de valores del factor K (Figura 1), la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) ha propuesto un método alternativo para la estimación del Factor K, donde se utiliza la unidad de clasificación del suelo FAO/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) y las clases texturales del suelo según el tamaño de partículas (Tabla 7) como parámetros para determinar el factor de erodabilidad (Tabla 8).

**Tabla 7:** Correlación entre las clases texturales de suelos, según el USDA, y las texturas generales de partículas (gruesa, media y fina)

Nombre de los suelos (textura general)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	Nº	Textura
Suelos francos (textura moderadamente fina)	0-45	0-40	40-100	Arcilloso	1	Fina
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso	2	
	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso	3	
Suelos arcillosos (textura fina)	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso	4	
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso	5	
	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso	6	
Suelos francos (textura mediana)	0-20	88-100	0-12	Limoso	7	Media
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso	8	
	23-52	28-50	7-27	Franco	9	
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenoso	10	Gruesa
	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso	11	
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	70-86	0-30	0-15	Arenoso franco	12	

**FUENTE:** Sabino *et al.* (2017)

**Tabla 8:** Valores del factor de erodabilidad (factor K) de acuerdo a la taxonomía y la textura de suelo

Unidades de suelo de acuerdo a la clasificación de Grupos de Suelos de Referencia (GSR)			Textura (t*ha*h/MJ*mm*ha)		
Cód	Tipo de Suelo	Breve descripción	Gruesa	Media	Fina
AC	ACRISOLES	Muy ácido. Suelos fuertemente meteorizados con baja saturación con bases en alguna profundidad.	0.026	0.04	0.013
AL	ALISOLES	Suelo con baja saturación con bases en alguna profundidad.	0.026	0.04	0.013
AN	ANDOSOLES	Suelos negros de paisajes volcánicos, se desarrollan en eyecciones o vidrios volcánicos bajo casi cualquier clima.	0.026	0.04	0.013
AR	ARENOSOLES	En la zona seca hay poco desarrollo del perfil. Los Arenosoles en los trópicos perhúmedos desarrollan horizontes eluviales albos.	0.013	0.02	0.007
CL	CALCISOLES	Suelos con sustancial acumulación de calcáreo secundario. Los Calcisoles típicos tienen un horizonte superficial pardo pálido.	0.053	0.079	0.026
CM	CAMBISOLES	Suelos con por lo menos un principio de diferenciación de horizontes en el subsuelo evidentes por cambios en la estructura y color.	0.026	0.04	0.013
CH	CHERNOZEM	Suelos negros ricos en materia orgánica. Horizonte superficial mólico pardo oscuro a negro.	0.013	0.02	0.007
DU	DURISOLES	Suelos fuertemente meteorizados con una capa dura de sílice secundaria (horizonte petrodúrico) o nódulos de sílice secundaria (horizonte dúrico).	0.053	0.079	0.026
FR	FERRALSOLES	Suelos rojos y amarillos tropicales con alto contenido de sesquióxidos.	0.013	0.02	0.007
FL	FLUVISOLES	Suelos desarrollados en depósitos aluviales. Perfiles con evidencia de estratificación; débil diferenciación de horizontes.	0.026	0.04	0.013

Continuación...

GL	GLEYSOLES	Suelos con signos claros de influencia del agua freática. Evidencia de procesos de reducción con segregación de compuestos de Fe.	0.026	0.04	0.013
GY	GIPSISOLES	Suelos con acumulación de sulfato de calcio, con o sin carbonatos, concentrada en el subsuelo. Horizonte superficial de color claro.	0.053	0.02	0.007
HS	HISTOSOLES	Suelos de turba y pantanos. La mineralización es lenta y la transformación de restos vegetales a través de la desintegración bioquímica crea una capa superficial de moho.	0.053	0.02	0.007
KS	KASTANOZEMS	Suelos pardos oscuros ricos en materia orgánica. Los Kastanozems tienen un perfil similar a los Chernozems pero el horizonte superficial rico en humus es más delgado.	0.026	0.04	0.013
LP	LEPTOSOLES	Suelos someros, finos. Los Leptosoles son suelos azonales y particularmente comunes en regiones montañosas.	0.013	0.02	0.007
LX	LIXISOLES	Suelos con diferenciación pedogenética de arcilla (migración de arcilla) entre el suelo superficial con menor y el subsuelo con mayor contenido de arcilla.	0.013	0.02	0.007
LV	LUVISOLES	Diferenciación pedogénica del contenido de arcilla.	0.026	0.04	0.013
NT	NITISOLES	Suelos tropicales rojos, profundos, bien drenados con un horizonte subsuperficial arcilloso nítico que tiene elementos estructurales de bordes planos o nuciformes.	0.013	0.02	0.007
PH	PHAEZEMS	Suelos ricos en materia orgánica. Los Phaeozems son muy parecidos a Chernozems y Kastanozems pero están más intensamente lixiviados.	0.013	0.02	0.007
PL	PLANOSOLES	Suelos con un horizonte superficial de textura gruesa abruptamente sobre un subsuelo denso y de textura más fina, típicamente en tierras planas.	0.053	0.079	0.026
PT	PLINTOSOLES	Fuerte meteorización con segregación subsecuente de plintita a la profundidad de fluctuación del agua freática o drenaje superficial impedido.	0.026	0.04	0.013
PZ	PODZOLES	Suelos con un horizonte iluvial spódico debajo de un horizonte subsuperficial con apariencia de ceniza y cubierta por una capa orgánica.	0.053	0.079	0.026
RG	REGOSOLES	Suelos débilmente desarrollados en material no consolidado, que no tienen un horizonte mólico o úmbrico, no son muy someros.	0.026	0.04	0.013
LX	SOLONCHAKS	Suelos salinos. Desde débil a fuertemente meteorizados, muchos Solonchaks tienen un patrón de color gléyico a cierta profundidad.	0.053	0.04	0.013
LV	SOLONETZ	Suelos con alto contenido de Na y/o Mg intercambiables.	0.053	0.079	0.026
UM	UMBRISOLES	Suelo superficial oscuro. Horizonte superficial úmbrico o cámbico con baja saturación de bases.	0.026	0.04	0.013
VR	VERTISOLES	Suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expansibles. Estos suelos forman grietas anchas y profundas cuando se secan.	0.053	0.079	0.026

FUENTE: Sabino *et al.* (2017)

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) propuso el cuadro siguiente donde se clasifica los valores del factor K de acuerdo al grado de erodabilidad en el suelo.

**Tabla 9:** Clasificación de grado de erodabilidad del USDA

Valor de K (T acre H/T-P acre PG.)	Valor de K (t*ha*h/MJ*ha*cm)	Clasificación
< 0.06	< 0.0775	Muy poco erodable
0.06 – 0.13	0.0775 – 0.1680	Débilmente erodable
0.13 – 0.25	0.1680 – 0.3230	Medianamente erodable
0.26 – 0.52	0.3230 – 0.6784	Fuertemente erodable
0.52 – 0.78	0.6784 - 1	Extremadamente erodable

FUENTE: Amezquita (1990), citado por Taco (2021)

### 2.9.3. Factor topográfico (LS)

#### A) Método de Renard *et al.* (1997)

##### Factor longitud de la pendiente (L)

El factor L que corresponde a la longitud de la pendiente se define como la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición o donde la escorrentía fluye a un canal definido (Foster *et al.* 1977, citado por Taco 2021). Para su cálculo se utilizan las siguientes ecuaciones:

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

Donde:

$\lambda$  = Longitud de la pendiente (en metros)

m = Exponente de la longitud de la pendiente (adimensional)

García Rodríguez & Giménez Suárez (2008), citando a Renard *et al.* (1996), donde indica que en el modelo RUSLE, “m, se define como una función continua” que se incrementa con el ángulo de pendiente  $\beta$  (en grados) y “la relación esperada de erosión en regueros a interregueros”, y es de la forma:

$$m = \frac{F}{1 + F}$$

Donde, F, es la relación de erosión en surcos a erosión en entresurcos calculada a partir de:

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

Donde:

$\beta$  = Ángulo de la pendiente (en grados)

El factor L con el área de drenaje aportadora (Desmet & Govers 1996, citado por Alvarez 2019).

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m}$$

Donde:

$L_{(i,j)}$  = Factor de longitud de pendiente para la celda de cuadrícula con coordenadas (i,j)

$A_{(i,j)}$  = Área de contribución en la entrada de una celda de cuadrícula con coordenadas (i, j)  
(en  $m^2$ )

(Nota: En un DEM basado en cuadrícula, la superficie se subdivide en celdas de cuadrícula cuadradas. Si se tiene que calcular el factor LS, se debe conocer el área contribuyente superior de cada celda, así como la pendiente de la celda de la cuadrícula, es decir, el área pendiente arriba de la celda de la cuadrícula que drena en la celda.)

D = tamaño de celda de la cuadrícula (en metros)

x = Factor de corrección de forma (x = 1 para sistemas pixelados)

### **Factor gradiente de la pendiente (S)**

El factor S corresponde a la gradiente de la pendiente. García Rodríguez & Giménez Suárez (2008), indica que RUSLE utiliza las ecuaciones de McCool *et al.* (1987), para el cálculo del factor S, quién derivó dos relaciones para pendientes moderadas ( $s < 9\%$ ) y de mayor inclinación ( $s \geq 9\%$ ) como se muestra a continuación:

$$S = \begin{cases} 10.8 * \sin \beta + 0.03 & \text{si: } \tan \beta < 0.09 \\ 16.8 * \sin \beta - 0.5 & \text{si: } \tan \beta \geq 0.09 \end{cases}$$

Donde  $\beta$ , es el ángulo de la pendiente en grados.

Velásquez (2008), citado por Taco (2021), indica que cuando se aplica esta fórmula haciendo uso de la herramienta “*Raster Calculator*” en la plataforma de ArcGis se debe trabajar con el valor del ángulo convertido en radianes (1 grado sexagesimal = 0,01745 radianes), para que pueda ser multiplicado por los demás componentes de la ecuación.

## B) Método de Mintegui

Según García (2005), citado por Taco (2021), dicho método, elaborado por la cátedra de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid, basa sus resultados en función a la correlación con el mapa de pendientes, dando como resultado la elaboración de una tabla que asigna directamente el valor del factor LS en función de la pendiente, la cual se muestra a continuación:

**Tabla 10:** Valores del factor LS según la pendiente

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

**FUENTE:** García (2005), citado por Taco (2021)

### 2.9.4. Factor de cobertura vegetal del suelo (C)

Para Taco (2021), el factor C mide el grado de protección ejercida por los cultivos y la vegetación natural en el proceso de erosión. Para su determinación muchos autores proponen el uso de tablas de valores de C para diversos usos del suelo.

**Tabla 11:** Índices del Factor de Cobertura Vegetal C

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1
Bosque o matorral denso (alto mulch)	0.001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Pradera sobre pastoreada	0.1
Pradera herbácea	0.01 – 0.025
Arbolado denso	0.01 – 0.003



Continuación...

Arbolado forestal clareado	0.003 – 0.009
Matorral con buena cobertura	0.003 – 0.013
Matorral ralo y eriales	0.20 – 0.013
Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Pasturas	0.15
Cubierta escasa (60 %)	0.15 – 0.09
Cubierta inapreciable	0.45

FUENTE: Wischmeier (1978), citado por Taco (2021)

**Tabla 12:** Valores del Factor C según clase y calidad de la cobertura

Tipo y altura de la cobertura	Porcentaje de cubrimiento del suelo					
	Coeficiente C					
	0	20	40	60	80	95-100
Cobertura de pastos bajos	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
Cobertura de pastos y hierbas (0.5m)	0.36	0.17	0.09	0.038	0.012	0.003
Arbustos (2m)	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
Árboles (4m)	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003

FUENTE: Suarez (2001), citado por Taco (2021)

Escobar Soldevilla (2019) menciona que el factor C en el modelo RUSLE presenta valores que oscilan entre cero y uno, como se puede apreciar en los cuadros anteriores.

Correspondiendo el valor de uno a áreas sin vegetación o suelos desnudos, y observándose que con el incremento de la densidad de la cobertura vegetal el valor del factor C tiende a disminuir, reduciendo así el efecto de las precipitaciones en el suelo.

Actualmente, con el uso de sistemas de información geográfica es posible estimar de manera efectiva el factor de cobertura vegetal haciendo uso del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el cual según Kabo-bah *et al.* (2013), citado por Escobar Soldevilla (2019), parte de los valores de brillo basado en la absorción diferencial, la transmisión y la reflectancia de la energía por la vegetación en las porciones del espectro electromagnético pertenecientes al rojo e infrarrojo cercano, lo cual se correlaciona significativamente con la cantidad de biomasa de hoja verde en el suelo.

Por lo que Karaburun (2010) resalta que dada esa correlación entre valores de NDVI con el factor C es posible realizar un análisis de regresión para estimar los valores del factor C para las clases de cobertura terrestre en la evaluación de la erosión. En donde dichos modelos de regresión lineales o no lineales se construyen mediante el análisis de correlación entre los valores NDVI obtenidos de la imagen de detección remota y los valores del factor C correspondientes obtenidos a partir de tablas guía USLE/RUSLE o calculados mediante la observación de campo.

### 2.9.5. Factor de prácticas de conservación del suelo (P)

Sabino *et al.* (2017), indica que este factor recoge la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión, ya sea realizando trabajos culturales o disponiendo la vegetación siguiendo curvas de nivel, en fajas o en terrazas para cortar las líneas de escorrentía. Siendo la influencia de las prácticas de conservación consistentes en disminuir la longitud del declive efectivo para la escorrentía. En las Tablas 13 y 14 se muestran los valores experimentales del factor P para distintas prácticas de conservación:

**Tabla 13:** Valores del factor P de Prácticas de Conservación

Pendiente (%)	Contorno	Cultivo en franjas	Terraza
0.0 - 7.0	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:** Kim (2006), citado por Sabino *et al.* (2017)

Nakaya Barzola (2018) menciona que en aquellas zonas donde no se observe que se realice ninguna practica de conservación de suelos, el valor asignado al Factor P será de 1.

**Tabla 14:** Valores experimentales del factor P

Práctica de conservación	Factor P
Cultivo a nivel $s = 0 - 1^\circ$	0.50
Cultivo a nivel $s = 2 - 5^\circ$	0.50
Cultivo a nivel $s = 6 - 7^\circ$	0.60
Cultivo a nivel $s = 8 - 9^\circ$	0.70
Cultivo a nivel $s = 10 - 11^\circ$	0.80

Continuación...	
Cultivo a nivel $s = 12 - 14^\circ$	0.90
Bancales a nivel	0.14
Bancales a contra pendiente	0.05
Bancales con pendiente, siguiendo la pendiente	0.35
Bancales a nivel con referencia de agua	0.01
Caballones enlazados	0.10 – 0.20

**FUENTE:** Ramos (2001), citado por Nakaya Barzola (2018)

### 2.9.6. Pérdida del suelo (A)

Núñez (2001), citado por del Aguila (2010), menciona que el concepto de "pérdidas tolerables" o niveles aceptables de erosión puede ser instrumento valioso en la identificación de problemas erosivos y en la selección de métodos de control para minimizar dichas pérdidas. El límite de erosión aceptado internacionalmente como admisible oscila en torno a las 10 - 12 t/ha/año, aunque se cree que en zonas húmedas esta cifra puede elevarse hasta las 25 t/ha/año.

Por encima de esta cifra no se garantiza la conservación de los suelos, ya que la destrucción es más rápida que la creación de suelo (Ramos 2001, citado por del Aguila 2010). Según los valores de erosión aceptables se clasifica la pérdida de suelo por erosión de acuerdo a los siguientes rangos:

**Tabla 15:** Clasificación de los niveles de intensidad de pérdida de suelo

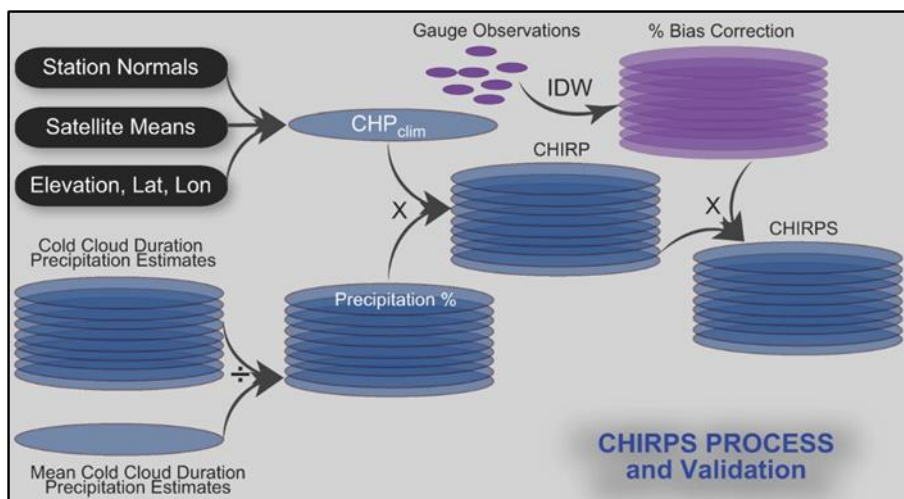
Categoría	Perdida de suelo (t/ha/año)
Ninguna o ligera	< 10
Moderada	10 – 50
Alta	50 – 200
Muy Alta	> 200

**FUENTE:** FAO, UNESCO, PNUMA (1980), citado por Ramos (2001), Taco (2021)

## 2.10. CLIMATE HAZARDS GROUP INFRARED PRECIPITATION WITH STATION DATA (CHIRPS)

CHIRPS es el acrónimo del conjunto de datos de Precipitación Infrarroja con Estaciones del Grupo de Peligros Climáticos, que de acuerdo con Harrison *et al.* (2022) es un producto de datos de precipitación de estaciones satelitales fusionados en cuadrícula con un registro de más de 40 años, de extensión cuasi global (50°S-50°N), de alta resolución espacial (0,05°), y de latencia bastante baja. CHIRPS se utiliza ampliamente para alerta temprana de sequías, monitoreo agroclimatológico y evaluaciones históricas de impacto y tendencias climáticas. Combina estimaciones de precipitación basadas en la duración de las nubes frías infrarrojas térmicas satelitales con observaciones in situ de un archivo grande y de calidad controlada de informes de estaciones meteorológicas de redes meteorológicas globales, regionales y nacionales. CHIRPS incorpora una red de ancho relativamente densa en lugares típicamente subrepresentados, y con una latencia baja de 2 días para pentadas preliminares (períodos de ~5 días) y una latencia de ~2,5 semanas para la versión final de los datos del mes anterior.

Funk *et al.* (2015) muestra el esquema general de elaboración de CHIRPS en la figura 2, el cual involucra tres componentes principales: i) la climatología de precipitación del grupo de peligros climáticos (CHP<sub>clim</sub>), ii) la precipitación infrarroja del grupo de peligros climáticos solo por satélite (CHIRP) y iii) el procedimiento de combinación de estaciones que produce el CHIRPS.



**Figura 2:** Esquema de elaboración de CHIRPS.  
**FUENTE:** Funk *et al.* (2015)

### **2.10.1. Climate Hazards group Precipitation climatology (CHPclim)**

Según Funk *et al.*, (2015) corresponde a la climatología global de precipitación mensual del Centro de Riesgos Climáticos con una alta calidad de resolución de ~5 km, el cual fue creado a partir de dos conjuntos de medias históricas mensuales a largo plazo, siendo estas las de las estaciones del Grupo Agromet de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), y de las estaciones de la versión 2 de la Red de Climatología Histórica Global (GHCN).

Dicho producto permite que el algoritmo CHIRPS logre tener un bajo sesgo durante la estimación de anomalías según Harrison *et al.*, (2022), en donde también indica que el producto CHPclim utiliza regresiones locales de ventana móvil para predecir las normales climáticas mensuales de las estaciones utilizando atributos geográficos y medias a largo plazo a partir de estimaciones de precipitación satelitales. Las estimaciones se refinan en un proceso de dos pasos en donde los modelos se ajustaron a las normales climáticas de la FAO y los residuos de estas normales climáticas de la FAO se interpolaron utilizando ponderación de distancia inversa (IDW), y se agregaron a los campos de regresión para hacer una estimación preliminar. Luego se utilizaron los datos medias mensuales observadas de la versión 2 de la Red de Climatología Histórica Global (GHCN) de 1980-2009 para estimar los sesgos de proporción en cada estación. Estas proporciones se interpolaron y se utilizaron para producir un campo CHPclim final que representa las condiciones climáticas normales de 1980 a 2009.

### **2.10.2. Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP)**

De acuerdo a Funk *et al.*, (2015) los campos CHIRP son variaciones de la media CHPclim, cuyo enfoque se basa en utilizar calibración local de estimaciones de precipitación satelitales con estadísticas de duración de nubes frías con infrarrojo térmico (TIR CCD), en donde se utilizan datos históricos de lluvia diaria para i) definir un umbral de temperatura de duración de la nube fría (CCD) óptimo para una región determinada, y ii) desarrollar las relaciones de regresión que traducen los valores duración de la nube fría (CCD) en estimaciones de precipitación en milímetros.

Indicando que el procedimiento de estimación para CHIRP utiliza un umbral de duración de la nube fría fijo de  $235^{\circ}\text{K}$ , y calibra las regresiones de duración de la nube fría usando precipitación pentadal de una cuadrícula de  $0,25^{\circ}$  del producto TMPA 3B42 (Análisis de Precipitación Multisatélite de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales 3B42) del 2000 al 2013. Luego las pendientes e intersecciones mensuales de las cuadrículas de  $0,25^{\circ}$  se vuelven a muestrear en una cuadrícula de  $0,05^{\circ}$  y se utilizan para producir estimaciones de precipitación pentadal de 1981 al presente, que posteriormente se dividen por el valor de la estimación de precipitación media de su correspondiente celda de cuadrícula para el período 1981-2013. Dicha fracción, multiplicada por el valor CHPclim correspondiente, produce las estimaciones CHIRP. De esta manera, los datos duración de la nube fría se utilizan para estimar variaciones alrededor de la media CHPclim, lo que reduce el sesgo sistemático de CHIRP.

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

##### **3.1.1. Ubicación Geográfica**

El ámbito de estudio de la cuenca Aguaquirí se encuentra ubicada entre las coordenadas UTM de la zona 18 Sur que va desde los 365575 m a 376863 m Este; y 8661085 m a 8676132 m Norte. De acuerdo al estudio realizado por el Instituto Nacional de Recursos Naturales *et al.* (2007b) la cuenca abarca una superficie aproximada de 90.85 km<sup>2</sup>, con alturas que varían desde los 2870 m.s.n.m., punto ubicado en la entrega de aguas del río Aguaquirí al río Mala, hasta los 4960 m.s.n.m. en el cerro Jupay Grande, punto más alto de la cuenca.

##### **3.1.2. Ubicación Hidrográfica**

La cuenca de estudio forma parte de la cuenca del río Mala, limita por el norte con la cuenca Alto Mala, por el este con la cuenca Acacache, y por el sur con la intercuenca Medio Alto Mala y al oeste con la cuenca Alto Mala. Mencionándose además que los principales afluentes del río Aguaquirí desde sus inicios son la quebrada Sicsa que ingresa por la margen derecha y las quebradas Atunga, Singatana y Huaiquiancha que ingresan por la margen izquierda. (Anexo 2.1 Mapa de Ubicación)

##### **3.1.3. Ubicación Política**

La cuenca Aguaquirí se ubica políticamente en la provincia de Huarochirí, en el departamento de Lima, abarca gran parte de los distritos de Santiago de Anchucaya y San Pedro de Huancayre, y en muchísimo menor proporción parte del distrito de San Juan de Tantaranche, todos pertenecientes a la Provincia de Huarochirí. (Anexo 2.2 Mapa Político)

## **3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **3.2.1. Política**

La cuenca Aguaquirí presenta una extensión de 9101.12 hectáreas de acuerdo a la delimitación realizada; desde el punto de vista político-administrativo se encuentra dividido en tres distritos: Santiago de Anchucaya con una superficie de 6158.27 hectáreas (67.66 %), San Pedro de Huancayre con una superficie de 2890.43 hectáreas. (31.76 %) y San Juan de Tantaranche con una superficie de 52.42 hectáreas (0.58 %).

De acuerdo al estudio del Instituto Nacional de Recursos Naturales *et al.* (2007b) no se encuentra asentado ningún centro poblado urbano dentro de la cuenca del río Aguaquirí, sin embargo, cercano a la parte baja de la cuenca se encuentra el centro poblado urbano de Santiago de Anchucaya, el cual registra un total de 380 habitantes de acuerdo Sistema de consulta de centros poblados del INEI. Producto de la información obtenida del Censo 2017 de Población-Vivienda del INEI, dentro de la delimitación de la cuenca del río Aguaquirí se encuentran alrededor de 13 centros poblados rurales, tales como Huaylla, Corpataza y Cochanché ubicados en la parte baja de la cuenca; y Abacho, Aguaquire y Siete Corrales ubicados en la parte media. (Anexo 2.2 Mapa Político)

### **3.2.2. Hidrografía**

La cuenca del río Aguaquirí, según el Instituto Nacional de Recursos Naturales *et al.* (2007a), corresponde a una cuenca de nivel 7, la cual abarca una extensión de 91.01 Km.<sup>2</sup> lo que representa el 3.9% del área del ámbito de la cuenca del río Mala, con un perímetro de 49.59 Km. La cuenca presenta alturas que varían desde los 2870 m.s.n.m., punto ubicado en la entrega de aguas del río Aguaquirí al río Mala, hasta los 4960 m.s.n.m., punto más alto de la cuenca, en el cerro Jupay Grande. Cuenta con una longitud de curso de 18.397 Km. y una pendiente promedio calculada, según la fórmula propuesta por Taylor Schwarz, de 11.03% desde su nacimiento hasta la unión de sus aguas con el río Mala.



De acuerdo a Instituto Nacional de Recursos Naturales *et al.* (2007b) el río Aguaquirí tiene sus nacientes en el cerro Jupay Grande a 4745 m.s.n.m., desde donde discurre sus aguas por la quebrada Atunga en dirección suroeste hasta unirse con la quebrada Llajopampa, punto en el cual cambia de nombre a río Aguaquirí, continuando en dirección suroeste hasta el Kilómetro 4 + 665, punto en el cual cambia a dirección Sur hasta entregar sus aguas en el río Mala.

Los principales afluentes del río Aguaquirí son, desde sus inicios, la quebrada Sicsa que ingresa por la margen derecha y las quebradas Atunga, Singatana y Huaiquicanha que ingresan por la margen izquierda. En el ámbito de la cuenca del río Aguaquirí existen un total de dos lagunas, siendo la más importante la laguna Cochanche la cual cuenta con un área de aproximadamente 13945 m<sup>2</sup>.

### **3.2.3. Vías de comunicación**

Partiendo del distrito de Mala con dirección Noreste se cuenta con una carretera afirmada de 60 Km. Hasta llegar al distrito de Calango, de allí siguiendo el sentido de la quebrada del río Mala, se llega a los poblados de Minay, Viscas, Cochas, hasta llegar al distrito de Huarochirí, con un recorrido aproximado de 110 Km. Del distrito de Huarochirí se inician tramos carreteros que unen los poblados de San Lorenzo de Quinti, San Pedro de Huancayre, Santiago de Anchucaya y San Juan de Tantarache, por los cuales se puede tener acceso a la cuenca a través de caminos de herradura.

Otra forma para llegar al distrito de Huarochirí corresponde al tramo carretero que parte por el distrito de Cieneguilla y pasa por los poblados de Antioquia, San José de Chorrillos, Buena Vista y de esta hasta llegar al distrito de Huarochirí, recorriendo aproximadamente 150 Km. de distancia. Del distrito de Huarochirí se podría ir a través de los 3.067 Km. de la trocha carrozable que la une con Santiago de Anchucaya para tener un acceso más cercano a la cuenca del río Aguaquirí, otra forma sería ir desde San Pedro de Huancayre por 0.654 Km. de vía hasta Santiago de Anchucaya.

### **3.2.4. Clima**

Según el estudio de Autoridad Nacional del Agua *et al.* (2015), la cuenca del río Aguaquirí presenta una temperatura media multianual de 8.6°C, una temperatura máxima mensual de 16.9°C con los registros más altos presentes en los meses de agosto a octubre y una temperatura mínima mensual de 5.5°C con los registros más bajos presentes en los meses de junio y julio. Respecto a la variable precipitación el estudio calcula una precipitación acumulada media anual para la cuenca de 885.8 mm/año.

Además, de un promedio anual de la humedad relativa del 68%, presentando un valor máximo de 80 % en marzo y un valor mínimo de 57.6 % en julio.

### **3.2.5. Suelos**

Los suelos presentes en la cuenca del río Aguaquirí fueron clasificados por la ONERN de acuerdo a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (World Reference Base for Soil Resources - WRB) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2008) identificándose dos grupos de suelos en el ámbito de estudio. (Anexo 2.3 Mapa de Suelos)

#### **a) Leptosol dístico - Afloramiento lítico (LPd-R)**

Corresponde a suelos someros que tienen una profundidad menor o igual a los 25 cm, con una alta pedregosidad y puede contener una gran cantidad de material calcáreo, lo cual limita el desarrollo radicular de las plantas. Además, su capacidad de almacenamiento de agua es baja, presentando un alto riesgo de erosión. Por sus características se dificulta su aprovechamiento agrícola, siendo un recurso potencial para el pastoreo en estación húmeda y tierra forestal. Ocupan una extensión de 7057.267 hectáreas (77.54 %) en el ámbito de la cuenca del río Aguaquirí.

#### **b) Regosol dístico - Afloramiento lítico (RGd-R)**

Corresponden a suelos muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados, no son muy someros ni muy ricos en gravas, arenosos o con materiales flúvicos, además de ser poco profundos y con pobre contenido de materia orgánica. Tienen baja capacidad de retención de humedad, por lo que requieren de riegos frecuentes para lograr la producción agrícola.

Muchas veces se asocian con afloramientos de tepetate, lo que dificulta la infiltración y favorece la escorrentía superficial, así como la erosión. Los Regosoles son particularmente comunes en áreas áridas y en regiones montañosas y son generalmente usados para el pastoreo extensivo. Ocupan una extensión de 2043.853 hectáreas (22.46 %) en el ámbito de la cuenca del río Aguaquirí.

### **3.2.6. Geomorfología**

La información sobre la geomorfología en el ámbito de la cuenca del río Aguaquirí fue recopilada a partir de la base de datos del GEOCATMIN – INGEMMET, producto de ello se aprecian cinco unidades geomorfológicas. (Anexo 2.4 Mapa Geomorfológico)

#### **a) Montaña en roca volcánica (RM-rv)**

Esta unidad geomorfológica se encuentra ubicada en la parte baja, media y alta de la cuenca del río Aguaquirí, con pendientes medias a fuertes entre los 25 % a 75 %; siendo la forma principal del terreno las grandes montañas. Es debido a las elevadas pendientes en esta zona que ocurren la mayoría de los procesos de remoción en masa. Esta unidad geomorfológica representa el 59.37 % de la superficie de la cuenca, ocupando un área de 5403.50 hectáreas.

#### **b) Valle glaciar (VII-gl)**

Los Valles Glaciares se encuentran ubicados en la parte media y alta de la cuenca del río Aguaquirí, con pendientes que van de 15 % a 50 %; corresponden a áreas restringidas a las zonas más altas, generalmente por encima de los 3900 m.s.n.m. Se caracterizan por conformar incisiones de laderas rectas con una típica sección transversal en U, que generalmente se presentan hacia su cabecera circos glaciares. Esta unidad geomorfológica representa el 17.09 % de la superficie de la cuenca, ocupando un área de 1555.36 hectáreas

#### **c) Colina y lomada en roca volcánica (RCL-rv)**

Ubicada en la parte media y alta de la cuenca del río Aguaquirí, corresponden a afloramientos de rocas volcánicas, presentan formas irregulares, con cimas agudas y laderas con pendientes medias a altas que están entre los 25 % a 50 %; representan el 16.93 % de la superficie de la cuenca, ocupando un área de 1540.28 hectáreas.

#### **d) Meseta volcánica lávica (M-vl)**

Esta unidad presenta un relieve llano en la cima, aunque con ligeros ondulamientos conformado por secuencias de rocas volcánicas; dentro del área de estudio se ubica en la parte media de la cuenca con pendientes entre los 15 % a 50 %, representado el 4.53 % de la superficie de la cuenca, ocupando un área de 412.64 hectáreas.

#### **e) Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial (V-cd)**

Corresponden a acumulaciones de laderas originadas por procesos de movimientos en masa (derrumbes y caídas de rocas), las cuales se encuentran ubicados en la parte baja de la cuenca del río Aguaquirí, con pendientes que van de 50 % a 75 %; también se dan por acumulación de material fino y detrítico, caídos o lavados por escorrentía superficial, acumulados sucesivamente al pie de las laderas; representado el 2.08 % de la superficie de la cuenca, ocupando un área de 189.34 hectáreas.

### **3.2.7. Geología**

La información sobre la geología en el ámbito de la cuenca del río Aguaquirí fue recopilada a partir de la base de datos del GEOCATMIN – INGEMMET, producto de ello se aprecia que la variable geológica presenta once unidades geológicas. (Anexo 2.5 Mapa Geológico)

#### **a) Formación Millotingo (Nm-m/lv,bx)**

Unidad geológica de la era Cenozoica, periodo del Neógeno, época del Mioceno inferior, presenta secuencia de lavas andesíticas y andesitas porfíricas de color gris, y brechas volcánicas de color gris con clastos andesíticos. Ocupa una extensión 4904.83 hectáreas (53.89 %).

#### **b) Grupo Rímac (P-r)**

Unidad geológica de la era Cenozoica, periodo del Paleógeno, época del Eoceno superior; consiste en brechas volcánicas, lavas andesíticas, tobas de cristales y ceniza, volcano-sedimentarios de color gris violáceo. Ocupa una extensión 1349.47 hectáreas (14.83 %).

**c) Formación Huarochirí (Nm-h)**

Unidad geológica de la era Cenozoica, periodo del Neógeno, época del Mioceno; constituido por tobas de pómez y ceniza intercalada con tobas líticas de color gris rosáceo. Ocupa una extensión 1023.44 hectáreas (11.25 %).

**d) Andesita (N-and)**

Unidad geológica de la era Cenozoico, periodo del Neógeno, constituido por afloramientos de la roca ígnea volcánica andesita, caracterizada por presentar color gris verdoso, con textura porfirítica, con cristales de plagioclasas inmersos en una matriz afanítica. Ocupan una extensión 655.73 hectáreas (7.21 %).

**e) Depósito glaciar (Q-gl)**

Unidad geológica de la era Cenozoica, periodo Cuaternario, época del Pleistoceno; constituye acumulaciones de bloques rocosos, subangulosos a redondeados con matriz de arcillas, limos y arenas. Ocupan una extensión 559.60 hectáreas (6.15 %).

**f) Diorita (N-di)**

Unidad geológica de la era Cenozoico, periodo del Neógeno, constituido por la roca ígnea intrusiva diorita. Ocupan una extensión 215.12 hectáreas (2.36 %).

**g) Depósito aluvial (Qh-al)**

Unidad geológica de la era Cenozoica, periodo Cuaternario, época del Holoceno; constituyen depósitos de gravas y arenas con matriz limoarenosa formando terrazas. Ocupan una extensión 130.01 hectáreas (1.43 %).

**h) Formación Chimú (Ki-chi)**

Unidad geológica de la era del Mesozoico, del periodo Cretácico inferior; consta de cuarzoarenitas de color gris blanquecino, de grano fino a medio, presentando laminación paralela y oblicua de bajo ángulo intercalado con lutitas grises oscura. Ocupa una extensión 80.69 hectáreas (0.89 %).

### **i) Riodacita (N-rda)**

Unidad geológica de la era Cenozoico, periodo del Neógeno, constituido por afloramientos roca volcánica riodacita. Ocupan una extensión 72.29 hectáreas (0.79 %).

### **j) Depósito coluvial (Qh-cl)**

Unidad geológica de la era Cenozoica, periodo Cuaternario, época del Holoceno; constituye depósitos de bloques subangulosos con matriz de limos y arenas. Ocupa una extensión 56.88 hectáreas (0.62 %).

### **k) Formación Pacococha (N-p)**

Unidad geológica de la era Cenozoica, periodo del Neógeno, época del Mioceno-Plioceno; consta de lavas andesíticas de color gris a gris verdosa de textura afanítica, compacta y dispuestas en pseudoestratos. Ocupa una extensión 53.06 hectáreas (0.58 %).

## **3.2.8. Pendientes**

A partir del modelo digital de elevación (DEM) y las curvas de nivel de la carta nacional se pudo realizar el análisis de pendientes en el ámbito de la cuenca del río Aguaquirí clasificando las pendientes en siete rangos tomando como referencia el Anexo IV: Guía de Clasificación de los Parámetros Edáficos, del Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (SENACE, 2009) aprobado por D.S. N° 017-2009/AG. (Anexo 2.6 Mapa de Pendientes)

**Tabla 16:** Rango de pendiente (%) del reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor

Pendientes cortas (Laderas cortas)	Pendientes largas (Laderas largas)
0 – 4	0 – 2
4 – 8	2 – 4
8 – 15	4 – 8
15 – 25	8 – 15
25 – 50	15 – 25
50 – 75	25 – 50
+75	50 – 75
	+75

**FUENTE:** SENACE (2009)

**a) Ligeramente Inclinado (de 0 a 4 %)**

Ocupa una extensión de 70.27 hectáreas y representa el (0.77 %) del territorio.

**b) Inclinado (de 4 a 8 %)**

Ocupa una extensión de 197.64 hectáreas y representa el (2.17 %) del territorio.

**c) Fuertemente Inclinado (de 8 a 15 %)**

Ocupa una extensión de 723.01 hectáreas y representa el (7.94 %) del territorio.

**d) Moderadamente Empinado (de 15 a 25 %)**

Ocupa una extensión de 1840.76 hectáreas y representa el (20.23 %) del territorio.

**e) Empinado (de 25 a 50 %)**

Ocupa una extensión de 4525.61 hectáreas y representa el (49.73 %) del territorio.

**f) Muy Empinado (de 50 a 75 %)**

Ocupa una extensión de 1450.52 hectáreas y representa el (15.94 %) del territorio.

**g) Extremadamente Empinado (mayor a 75 %)**

Ocupa una extensión de 293.31 hectáreas y representa el (3.22 %) del territorio.

### **3.3. MATERIALES Y EQUIPOS**

#### **3.3.1. Información cartográfica**

La descripción general de la información cartográfica utilizada en el presente trabajo de investigación se muestra en la Tabla 17.

**Tabla 17:** Información cartográfica

Información	Fuente	Descripción	Formato
Mapa Base del Perú	Instituto Geográfico Nacional - IGN	Cartografía del Perú Escala 1/25000	Ráster
Red hídrica	Autoridad Nacional del Agua - ANA	Información de ríos, lagos y quebradas	Vector
Cuencas hidrográficas	Autoridad Nacional del Agua - ANA	Delimitación de cuencas hidrográficas menores	Vector
Mapa Geológico	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET	Información de unidades geológicas del Perú Escala 1/50000	Vector
Mapa de Cobertura Vegetal	Ministerio del Ambiente - MINAM	Información de cobertura vegetal del Perú (2015) Escala 1/100000	Vector
Mapa Geomorfológico	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET	Información de unidades geomorfológicas del Perú Escala 1/250000	Vector
Mapas de Porcentaje de arena, limo y arcilla	SoilGrids 2.0 ISRIC - World Soil Information	Mapas de propiedades del suelo en seis intervalos de profundidad. Resolución espacial: 250 m	Ráster
Mapa de Suelos	Ministerio del Ambiente - MINAM	Información de grupos de Suelos en el Perú Escala 1/250000	Vector
ALOS PALSAR DEM	Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA)	Modelo de Elevación Digital Resolución espacial: 12.5 m	Ráster
Sentinel-2A	Agencia Espacial Europea ESA del programa espacial Copernicus	Imágenes de satélite corregidas atmosféricamente Resolución espacial: 10 m	Ráster



### 3.3.2. Información hidrológica

Para la presente investigación se hizo uso del producto grillado de precipitación “PISCOp V2.1”, el cual es parte de los datos grillados PISCO (Peruvian Interpolated data of SENAMHI’s Climatological and hydrological Observations) producidos por el SENAMHI, se trata de un conjunto de datos grillados de lluvia diaria y mensual de alta resolución, desarrollado para el período 1981 hasta la actualidad, con una latencia promedio de ocho semanas a una resolución espacial de  $\sim 10$  km ( $0.1^\circ$ ) para todo el territorio peruano. (Aybar *et al.*, 2020)

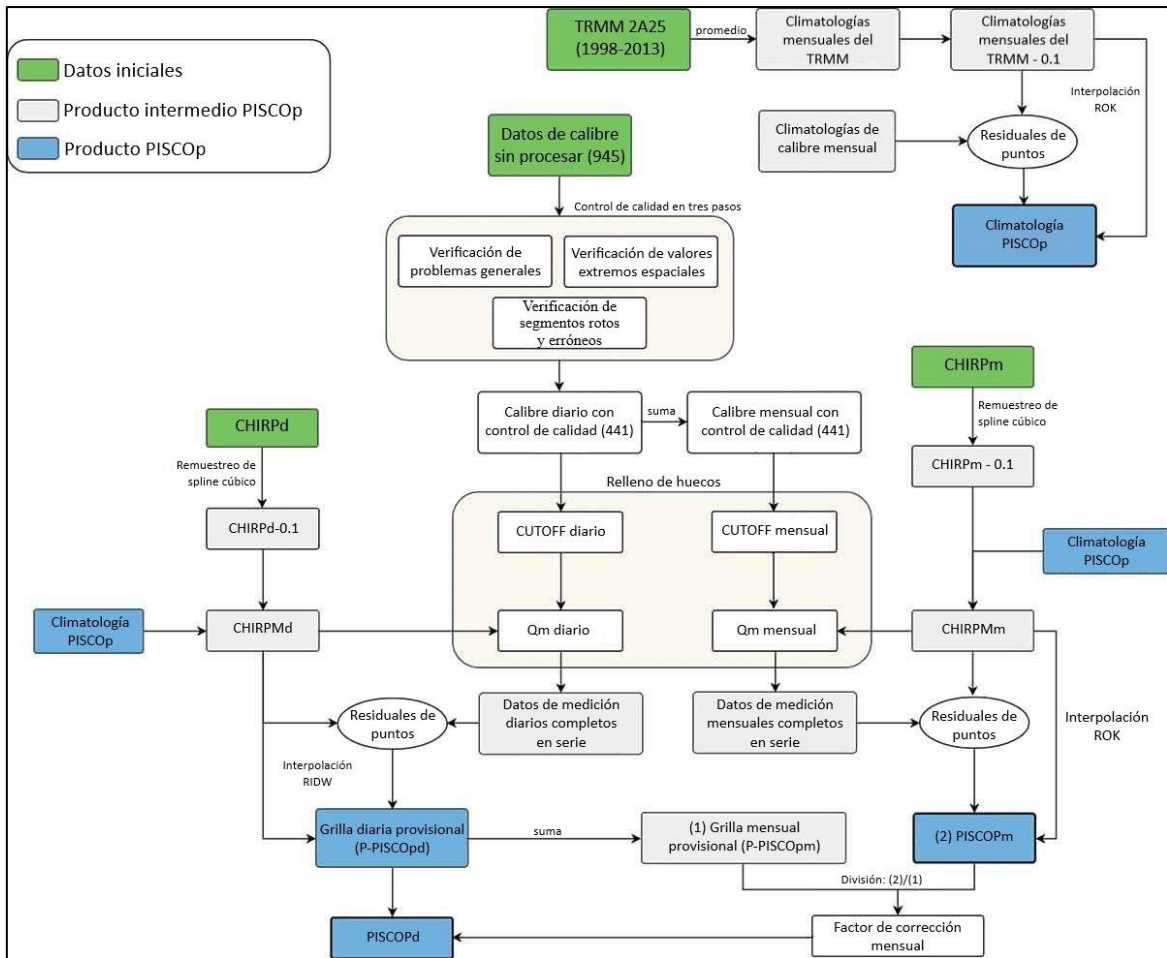
De acuerdo con Aybar *et al.* (2020) el algoritmo de fusión para la construcción de PISCOp V2.1 se basa en métodos de interpolación geoestadística y determinista que incluyen tres fuentes de precipitación diferentes: (i) datos pluviométricos completos y con control de calidad provenientes de la red nacional de estaciones meteorológicas del SENAMHI, (ii) el conjunto de datos grillados de precipitación del producto CHIRP V2.0 (Climate Hazards Group Infrared Precipitation), y (iii) observaciones radar de precipitación derivadas de satélites de la TRMM 2A25 (Tropical Rainfall Measurement Mission).

La primera fuente de precipitación correspondiente al conjunto de datos pluviométricos se obtuvo partiendo de 945 datos brutos de observación diaria proporcionados por el SENAMHI, los cuales abarcan el período 1981-2019 y se caracterizan por una gran cantidad de valores faltantes y numerosos problemas de calidad, a los que se les aplicó un enfoque de control de calidad en tres pasos correspondientes a: (i) verificación de problemas generales, (ii) verificación de valores extremos espaciales, y (iii) verificación de segmentos rotos y erróneos, reduciendo así a 441 el número de estaciones siendo estos denominados “Red de precipitaciones PISCOp”; para luego completar los conjuntos de datos faltantes mediante la combinación entre los métodos CUTOFF y la corrección del sesgo de mapeo de cuantil ( $Q_m$ ), llenando con éxito las lagunas del conjunto de datos de precipitaciones.

Del conjunto de datos grillados de precipitación infrarroja del grupo de peligros climáticos solo por satélite (CHIRP V2.0) se utilizan los productos CHIRP de paso de tiempo mensual (CHIRPm) y diario (CHIRPd), los cuales son calculados a partir del producto “CHPclim” que son las climatologías de precipitación mensual generadas por Funk *et al.* (2015b) indicado en Aybar *et al.* (2020); sin embargo, ya que para el Perú dicho predictor sobreestima extremadamente la precipitación (>500%) en la costa peruana entre los 8° y 18° S, además de no representar adecuadamente los puntos críticos de lluvia orográfica sobre la transición Andes-Amazonía considerando pluviómetros con poca confiabilidad, este fue reemplazado por una climatología elaborada por Aybar *et al.* (2020) denominada “Climatología PISCOp” o también llamada “PISCOpclim”, dando como resultado una forma modificada de CHIRP denominada CHIRPM, el cual aplicando a estimaciones mensuales y diarias da como resultado CHIRPMm y CHIRPMd, respectivamente.

El producto PISCOpclim, de climatologías mensuales con una resolución espacial de 0.1°, fue construido en base a las observaciones radar de precipitación derivadas de satélites de la TRMM 2A25 (Tropical Rainfall Measurement Mission) correspondientes al periodo 1998-2013, siendo esta la fuente de datos de precipitación más adecuada para identificar la variabilidad espacial de la precipitación y los patrones estacionales, e incluso para los complejos puntos críticos de lluvia orográfica ubicados en los Andes orientales según indica Aybar *et al.* (2020).

Obtenidas las fuentes de precipitación anteriormente mencionadas, Aybar *et al.* (2020) divide la fase de fusión para la obtención de PISCOp V.2.1 en cuatro pasos: En primer lugar, el producto provisional P-PISCOpd se crea fusionando CHIRPMd y conjuntos de datos de medición diarios completos en serie aplicando Ponderación de Distancia Inversa Residual (RIDW). En segundo lugar, PISCOpm se estima fusionando CHIRPMm y conjuntos de datos de medición mensuales completos utilizando la interpolación Kriging Ordinario Residual (ROK). En tercer lugar, se deriva un Factor de Corrección Mensual (Mcf) de la comparación de PISCOpm y P-PISCOpd agregados en un intervalo de tiempo mensual. Finalmente, PISCOpd se estima multiplicando el Factor de Corrección Mensual por P-PISCOpd.



**Figura 3:** Descripción esquemática del desarrollo de PISCOp V2.1

FUENTE: Aybar *et al.* (2020)

### 3.3.3. Información satelital

#### a) Modelo de Elevación Digital (DEM)

El modelo de elevación digital (DEM) utilizado fue obtenido a partir del sensor ALOS PALSAR de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), el cual se descargó del sitio web Alaska Satellite Facility en formato TIFF a una resolución espacial de 12,5 m. La escena descargada que cubre el ámbito la cuenca fue: AP\_27001\_FBS\_F6940\_RT1

## **b) Imágenes de satélite Sentinel-2**

Se trabajó con imágenes de satélite Sentinel-2, proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA) a través del programa Espacial Copernicus; las imágenes fueron descargadas con un nivel de procesamiento 2A (ortorectificadas y con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera) y se trabajó con las bandas de resolución espacial de 10 metros (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) de las siguientes escenas:

- S2B\_MSIL2A\_20230425T151709\_N0509\_R125\_T18LUM\_20230425T190701
- S2B\_MSIL2A\_20220907T151709\_N0400\_R125\_T18LUM\_20220908T134842
- S2A\_MSIL2A\_20220714T151721\_N0400\_R125\_T18LUM\_20220715T002257
- S2B\_MSIL2A\_20220609T151709\_N0400\_R125\_T18LUM\_20220609T191447

### **3.3.4. Hardware**

- Computadora (procesador Intel Core i7 y Windows 10)

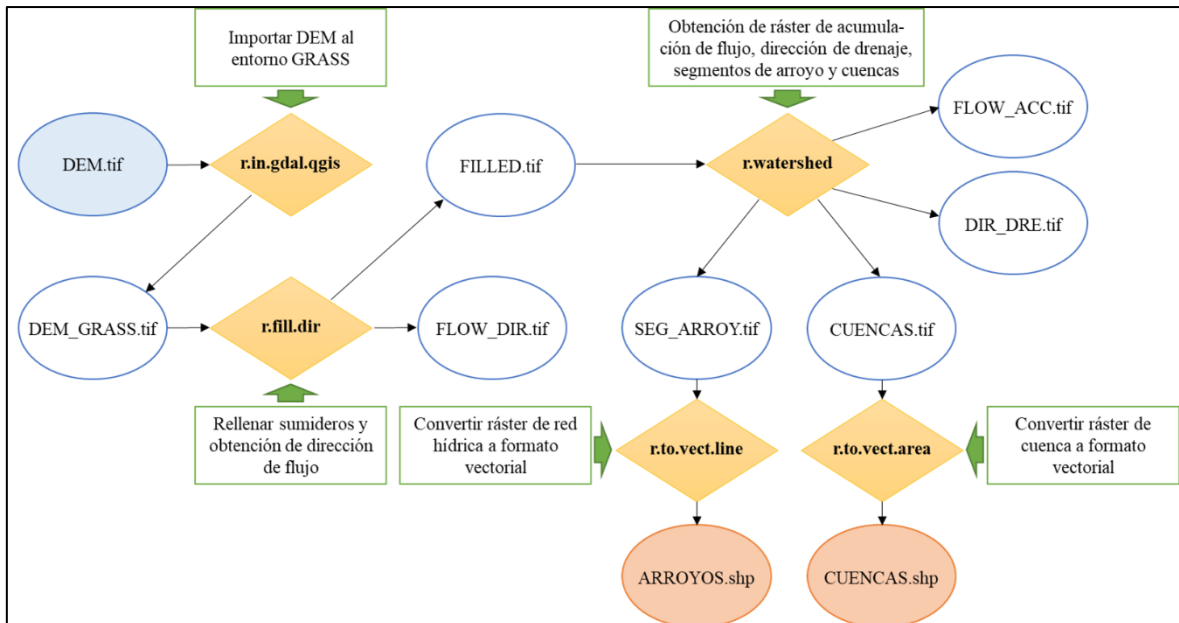
### **3.3.5. Softwares**

- Microsoft Word 2016
- Microsoft Excel 2016
- QGIS Desktop 3.22 Białowieża
- SAGA-GIS
- RStudio 2022.02.1+461
- Google Earth Pro

## **3.4. PROCEDIMIENTO**

### **3.4.1. Delimitación de la cuenca**

La delimitación de la cuenca del río Aguaquirí se realizó a partir del Modelo de Elevación Digital obtenido del satélite ALOS PALSAR, descargado de la web Alaska Satellite Facility (ASF), el cual fue procesado en la plataforma de QGIS haciendo uso del software integrado GRASS GIS, mediante la siguiente secuencia metodológica:



**Figura 4:** Procedimiento en GRASS GIS para la delimitación de la cuenca

El resultado de la delimitación fue contrastado y validado con imágenes aéreas de BingMaps y Google Satellite, y el mapa de Subcuencas Hidrográficas proporcionado por la Autoridad Nacional de Agua (ANA) para dar como resultado un Mapa de la cuenca con los límites definitivos.

### 3.4.2. Determinación del factor de erosividad por la precipitación pluvial (R)

#### a) Selección de base de datos de precipitación

La información de precipitación media mensual que se utilizó fue proveniente del producto PISCO, Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations por sus siglas en inglés, cuyos registros de precipitación fueron descargados en la página web del SENAMHI del producto PISCO v.2.1 de precipitación (PISCOpm) en su versión estable, la cual tiene un área de influencia nacional y consiste de datos grillados mensuales desde enero de 1981 hasta diciembre del 2016, con una resolución espacial de 0.1°~10km en la versión 2.1 en formato "nc".

## **b) Extracción de datos de precipitación mensual del programa PISCO**

Para la extracción de los datos de precipitación mensual en formato “nc” se utilizó un script en lenguaje de programación R proporcionado por el programa PISCO, el cual permitió la extracción de los datos en formato CSV. La información fue descargada para las coordenadas de los 49 centroides del grillado de PISCOpm considerados en función al ámbito de estudio, siendo el centroide de cada grilla el punto más representativo el cual simbolizaría una estación meteorológica virtual. (Anexo 1.1 Ubicación de estaciones meteorológicas virtuales)

## **c) Elaboración del mapa de isoyetas**

Extraídos los datos de precipitación mensual, para el periodo comprendido entre 1981 al 2016, se procedió a calcular la “Precipitación media anual” y el “Índice modificado de Fournier” para cada estación virtual (centroide) usando el software Microsoft Excel. Calculados dichos parámetros, se procedió a exportar los datos resultantes al software QGIS obteniéndose así una capa vectorial de puntos equivalentes a cada estación meteorológica virtual. Luego, en el mismo entorno de QGIS, se realizó la interpolación de los datos de “Precipitación media anual” de las estaciones virtuales aplicando el método “Kriging”, obteniéndose un producto en formato ráster denominado “Precipitacion\_Aguaquiri”, a partir del cual haciendo uso de la herramienta “*Curvas de nivel...*” se extrajeron las isoyetas cada 10 metros lo que permitió la elaboración del mapa de isoyetas. (Anexo 2.7)

## **d) Determinación del factor R en la cuenca del río Aguaquirí**

Para ello se realizó primero la interpolación de los datos de “Índice modificado de Fournier” de las estaciones meteorológicas virtuales, aplicando la interpolación “Kriging”, obteniéndose el ráster “IMF\_Aguaquiri”. A partir de dicho ráster se determinó el Factor R de erosividad de las precipitaciones aplicando la Fórmula de Arnoldus (1978), representada por la siguiente ecuación:

$$R = a * \left( \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \right) + b$$

Donde:

R: Factor de erosividad de las lluvias

Pi: Precipitación media mensual del mes i.

P: Precipitación media anual.

a y b: Constantes que consideran las condiciones climáticas locales (Para precipitaciones mayores a 200 mm anuales: a = 4,17 y b = -152; y menores a 200 mm anuales: a = 0.66 y b = - 3) (Ramírez 2010, citado por Taco 2021).

Siendo la expresión  $(\sum_{i=1}^{12}(P_i)^2/P)$  la ecuación del índice modificado de Fournier.

A partir del mapa de isoyetas se constató que las precipitaciones medias anuales en toda la extensión de la cuenca de estudio son mayores a los 200 mm por lo que se trabajó con los valores de las variables: a = 4,17 y b = -152.

Asegurados los valores de las variables “a” y “b” y el ráster de la interpolación de los valores del "Índice modificado de Fournier", se utilizó la herramienta “*Ráster calculator*” para calcular la Fórmula de Arnoldus dando como resultado la capa en formato ráster denominada “Factor\_R”. Dicho ráster fue recortado con la herramienta “*Cortar ráster por capa de máscara*” en función a la delimitación de la cuenca del río Aguaquirí, siendo posteriormente clasificado en siete rangos a fin de poder elaborar el Mapa de erosividad de la lluvia. (Anexo 2.8)

### **3.4.3. Determinación del factor de erodabilidad del suelo (K)**

Para la determinación del factor K se utilizó la información provista por SoilGrids 2.0, una colección de mapas globales de propiedades del suelo a una resolución espacial de 250 metros, los cuales fueron descargados desde el portal de servicios web <https://soilgrids.org/>, en formato ráster GeoTIFF.

Del entorno de SoilGrids 2.0 fueron descargados los ráster del contenido de arena, limo y arcilla de profundidades “0-5 cm”, “5-15 cm” y “15-30 cm” en (g/kg) para el ámbito de estudio, los cuales fueron utilizados como base para la elaboración de los ráster de porcentaje de arena, limo y arcilla de los suelos en la cuenca.

Para ello se contó con la ayuda del software SAGA GIS donde se pudo realizar la clasificación textural del suelo con la herramienta “*Soil texture classification*” dando como resultado el “Ráster de clases texturales” de los suelos de la cuenca del río Aguaquirí; siendo luego exportado a la plataforma de QGIS.

Cargado el “Ráster de clases texturales” en el entorno de QGIS, se le realizó una Clasificación Supervisada haciendo uso del panel “*SCP Dock*” con el fin de obtener el resultado como ráster monobanda. Posteriormente al resultado se le realizó una reclasificación en función al tamaño de las partículas de suelo (grueso, medio y fino), como se observa en la Tabla 7, para obtener el “Ráster de texturas”.

A partir del “Ráster de texturas” y la información provista por el “Mapa de suelos” de la cuenca del río Aguaquirí, previamente transformando este último a formato ráster, se procedió a integrar dichas imágenes haciendo uso de la herramienta “*Raster calculator*”, obteniendo así el ráster del “factor K”, cuyos valores para cada pixel fueron asignados en función de la Tabla 8: Valores del factor de erodabilidad (factor K) de acuerdo a la taxonomía y la textura de suelo.

Posteriormente se elaboró el Mapa del factor de erodabilidad del suelo (Anexo 2.9), cuyos resultados fueron comparados con la Tabla 9: Clasificación del grado de erodabilidad en el suelo según USDA.

#### **3.4.4. Determinación del factor topográfico (LS)**

Para determinar el Factor LS (Factor topográfico) se optó por usar el método de Mintegui siguiendo el siguiente proceso:

A partir del producto del Modelo de Elevación Digital (DEM) del satélite ALOS PALSAR cuyos sumideros fueron rellenados durante el proceso de delimitación de la cuenca Aguaquirí haciendo uso de GRASS GIS, se elaboró el ráster de pendientes (expresado en porcentaje) del ámbito de estudio, denominado “*Pendientes\_porcentaje*”, en la plataforma de QGIS.



Dicho ráster fue reclasificado en función al rango de pendientes presentes en la Tabla 10: Valores del factor LS según la pendiente, para posteriormente reasignar los valores de los píxeles con sus respectivos valores de factor LS presentes en la Tabla 10 haciendo uso de la herramienta “*r.recode*”. En base al ráster resultante se elaboró el Mapa del factor topográfico. (Anexo 2.10)

#### **3.4.5. Determinación del factor de cobertura vegetal del suelo (C)**

Para la determinación del factor C fue necesario contar con escenas de imágenes satelitales de la Agencia Espacial Europea (ESA) del programa Espacial Copernicus (Sentinel 2B), de fecha 25 de abril del 2023 y de resolución espacial de 10 metros; las cuales fueron procesadas y realizadas las correcciones atmosféricas y geométricas correspondientes con la ayuda de la herramienta QGIS. A partir de dichas imágenes se calculó el ráster del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de la cuenca haciendo uso de la herramienta “*Raster Calculator*” siguiendo la siguiente ecuación para su cálculo:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR: Banda infrarrojo cercano

RED: Banda roja visible

Posteriormente se hizo uso de la ecuación de regresión calculada por Escobar Soldevilla (2019), el cual siguiendo la metodología de Karaburun (2010), realizó un análisis de correlación entre los valores NDVI y los valores del factor C para RUSLE, el cual se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 18:** Correlación de valores de NDVI y Factor C

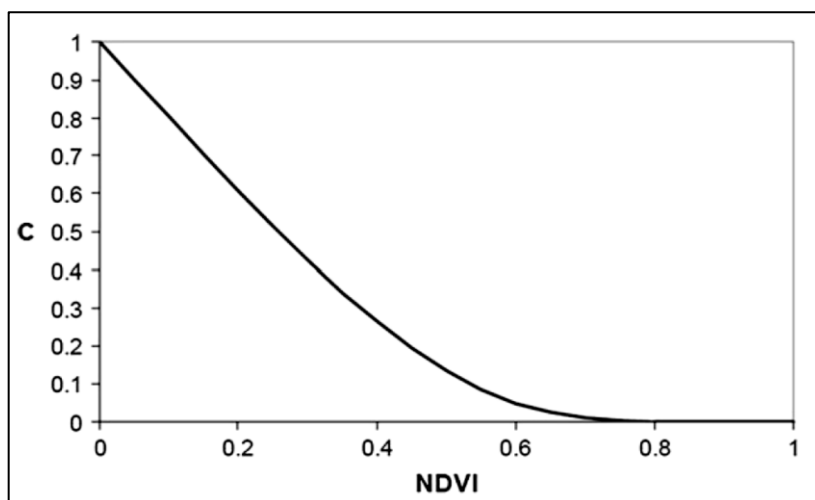
NDVI	Factor C
0	1.0
0.1	0.9
0.2	0.7
0.3	0.4
0.4	0.2
0.5	0.1
0.6	0.001
0.7	0.0001
0.8	0.00001
0.9	0.000001
1.0	0

**FUENTE:** Escobar Soldevilla (2019)

Del gráfico de correlación entre los valores de NDVI y el factor C, Escobar Soldevilla (2019) obtiene una línea de tendencia de tipo polinomial de quinto orden la cual es representada por la siguiente ecuación:

$$\text{Factor C} = 11.288 \times (\text{NDVI})^5 - 35.785 \times (\text{NDVI})^4 + 40.316 \times (\text{NDVI})^3 - 17.326 \times (\text{NDVI})^2 + 0.5099 \times (\text{NDVI}) + 0.9977$$

La línea de regresión que describe la relación entre los valores C y NDVI se muestra en la Figura 5, la cual presenta un  $R^2$  de 0.99 evidenciando una buena relación entre las variables NDVI y el Factor C.



**Figura 5:** Línea de regresión de correlación de valores de Factor C y NDVI  
**FUENTE:** Escobar Soldevilla (2019)

A partir del ráster de valores del factor C obtenido de la correlación con los valores NDVI se realizó una clasificación supervisada mediante el uso del complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), reclasificando el ráster de valores del factor C en seis rangos, a partir del cual se elaboró el Mapa del factor de cobertura (Anexo 2.11)

### 3.4.6. Determinación del factor de prácticas de conservación del suelo (P)

La determinación del factor P se realizó con la identificación de zonas donde se hayan realizado prácticas de conservación de suelos, como en contorno o terrazas, habiéndose realizado a través de imágenes de servicios de mapas web como Google Satellite o Bing Maps dentro de la plataforma QGIS, siendo almacenadas en un archivo en formato shapefile. Luego, siguiendo la metodología propuesta por Sabino *et al.* (2017), a partir de la reclasificación del “Mapa de porcentajes de pendientes” de la zona en estudio, junto al shapefile de prácticas identificadas, se logró estimar el “Mapa del factor de prácticas de conservación de suelos” en la cuenca en función a los valores asignados en la Tabla 13 del ítem 2.9.5. (Anexo 2.12)

### 3.4.7. Determinación de la pérdida del suelo (A)

La determinación de la pérdida del suelo media anual por erosión hídrica se realizó a través del software QGIS mediante la combinación de los cinco factores que componen la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE) previamente calculados, a través de la herramienta “*Raster Calculator*”.

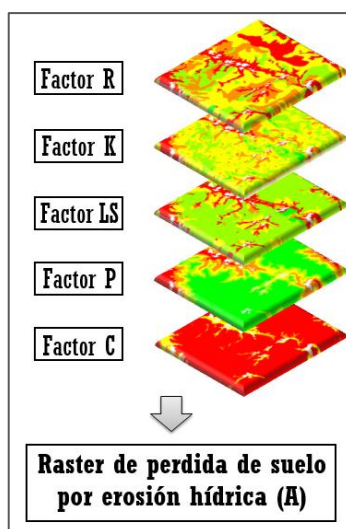


Figura 6: Combinación de Factores RUSLE para el cálculo de “A”

Para ello fue necesario hacer uso de la siguiente expresión en la calculadora ráster:

$$A = \text{"Factor\_R"} * \text{"Factor\_K"} * \text{"Factor\_LS"} * \text{"Factor\_C"} * \text{"Factor\_P"}$$

Donde:

A = Raster de pérdida del suelo media anual por erosión hídrica

Factor\_R = Raster resultante del factor de erosividad por la precipitación pluvial

Factor\_K = Raster resultante del factor de erodabilidad del suelo

Factor\_LS = Raster resultante del factor topográfico

Factor\_C = Raster resultante del factor de cobertura vegetal del suelo

Factor\_P = Raster resultante del factor de prácticas de conservación de suelos

A partir del ráster resultante de pérdida del suelo (A) se realizó una reclasificación de los valores en función a la Tabla 15 del ítem 2.9.6., para posteriormente elaborar el mapa del Grado de Erosión Hídrica de la cuenca Aguaquirí (Anexo 2.13) aplicando la representación gráfica tomada de la FAO.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. FACTORES DEL MODELO RUSLE

#### 4.1.1. Factor R

Posteriormente de la aplicación del procedimiento metodológico mencionado en el ítem 3.4.2, el cual permitió trabajar con la información de precipitación mensual del Producto PISCO v.2.1, se pudo elaborar el ráster de la erosividad de la lluvia para la cuenca del río Aguaquirí (denominado "*Factor\_R*") el cual fue clasificado en siete rangos, realizando la transformación de este a formato vectorial para el cálculo de las áreas de cada rango.

También se elaboró el mapa de isoyetas de la cuenca del río Aguaquirí (Anexo 2.7), en donde se aprecia la distribución espacial de la precipitación media anual en milímetros, observándose que en la parte baja de la cuenca con precipitaciones menores a los 700 mm/año representan zonas con menores valores de erosividad; mientras que en zonas de la parte alta de la cuenca con precipitaciones mayores a los 800 mm/año se asocian a zonas con mayores valores de erosión.

El ráster resultante del Factor R de la cuenca obtenido se representó en el mapa de erosividad de la lluvia (Anexo 2.8), el cual presenta valores de factor R en el rango de 316.45 a 514.98 MJ\*cm/ha\*h, así como también valores de Índice Modificado de Fournier entre 112 a 160 mm, que de acuerdo al cuadro de Clasificación del Índice Modificado de Fournier para Latinoamérica (Tabla 2) la cuenca presentaría valores de IMF entre Moderados (de 90 a 120) y Altos (de 120 a 160). Dichos valores indican que la lluvia como agente erosivo puede afectar los suelos debido a una fuerte agresividad climática.

**Tabla 19:** Rangos resultantes de la clasificación del Mapa del Factor R

Rango del Factor R (MJ*cm/ha*h)	Área (ha)	%
< 360	80.25	0.88
360 – 400	248.96	2.74
400 – 440	315.79	3.47
440 – 460	2944.60	32.35
460 – 480	2017.05	22.16
480 – 500	2266.00	24.90
> 500	1228.48	13.50
Total	9101.12	100.00

De acuerdo a la teoría, en la región andina a medida que aumenta la altitud se incrementan las precipitaciones por lo que también se incrementa el valor del factor de erosividad de las lluvias, ello se puede apreciar en el mapa de erosividad de las precipitaciones (Anexo 2.8) donde en la parte baja de la cuenca se tiene que la fuerza erosiva de las precipitaciones es menor a los 440 MJ\*cm/ha\*h, abarcando un área de 645.00 hectáreas (7.09 % de la cuenca); y los mayores valores del factor R que corresponden al rango superior a los 500 MJ\*cm/ha\*h se presentan en la parte alta de la cuenca abarcando 1,228.48 hectáreas (13.50 % de la cuenca).

Por otro lado, la mayor parte de la cuenca correspondiente a la parte media presenta valores entre los 440 - 500 MJ\*cm/ha\*h abarcando una extensión de 7,227.65 hectáreas, lo que representa el 79.41 % de la cuenca, siendo la zona media oeste de la cuenca la que presenta mayores valores de erosividad por precipitación de 460-500 MJ\*cm/ha\*h en comparación con la zona este con un rango de 440-460 MJ\*cm/ha\*h.

#### 4.1.2. Factor K

Después de procesar la información proveniente de SoilGrid 2.0 aplicada al área de estudio y obtener el ráster con los valores del factor K acorde a la metodología indicada en el ítem 3.4.3 se elaboró el mapa del factor de erodabilidad del suelo (Anexo 2.9), cuyos resultados fueron comparados con la Tabla 9 de Clasificación del grado de erodabilidad en el suelo según el USDA como se muestra en la Tabla 20.

**Tabla 20:** Resultados del Factor de Erodabilidad del Suelo (K)

Tipo de Suelo	Textura	Valor del Factor K (t*ha*h/MJ*ha*cm)	Área (ha)	%
Leptosoles (LP)	Fina	0.07	1512.77	16.62
Leptosoles (LP)	Media	0.20	5518.53	60.64
Regosoles (RG)	Media	0.40	2069.82	22.74
Total			9101.12	100.00

En función a los resultados observados en el mapa del factor de erodabilidad del suelo (Anexo 2.9) se aprecia que los mayores valores de K corresponden a áreas que presentan textura media y los valores más bajos a áreas con textura fina. Asimismo, se observa que el tipo de suelo predominante en la cuenca del río Aguaquirí son los Leptosoles (LP), caracterizados por ser suelos someros y finos, particularmente comunes en regiones montañosas, ocupando una mayor extensión los de textura media (60.64 %) en comparación con los de textura fina (16.62 %).

En la tabla 21 se aprecia que en la cuenca se presentan tres de los cinco rangos de clasificación de erodabilidad propuesto por USDA, siendo estos: “Muy poco erodable”, “Medianamente erodable” y “Fuertemente erodable”. Siendo el nivel de erodabilidad “Medianamente erodable” el que presenta mayor extensión en la cuenca, ocupando un área que representa el 60.64 % de la cuenca, lo que permite afirmar que el factor erodabilidad del suelo será moderadamente relevante al aplicar el modelo RUSLE para la estimación de la erosión en el área de estudio.

**Tabla 21:** Grado de erodabilidad del suelo en la cuenca del río Aguaquirí

Clasificación Factor K	Valor de K (t*ha*h/MJ*ha*cm)	Área (ha)	%
Muy poco erodable	< 0.0775	1512.77	16.62
Medianamente erodable	0.1680 – 0.323	5518.53	60.64
Fuertemente erodable	0.3230 – 0.6784	2069.82	22.74
Total		9,101.12	100

### 4.1.3. Factor LS

Una vez obtenidos el mapa de pendientes (en porcentajes), a partir del modelo de elevación digital ALOS PALSAR de 12.5m, se siguió el proceso metodológico del ítem 3.4.4 con el que se consiguió generar el ráster del factor LS; el cual fue clasificado en nueve rangos como se observa en la tabla 22.

**Tabla 22:** Rangos resultantes de la clasificación del Factor LS

Pendiente	Factor LS	Área (ha)	%
0 – 3 %	0.3	40.71	0.45
3 – 12 %	1.5	581.28	6.39
12 – 18 %	3.4	836.25	9.19
18 – 24 %	5.6	1160.48	12.75
24 – 30 %	8.7	1279.46	14.06
30 – 60 %	14.6	4318.33	47.45
60 – 70 %	20.2	462.21	5.08
70 – 100 %	25.2	374.76	4.12
> 100 %	28.5	47.64	0.52
Total		9101.12	100.00

De los resultados mostrados en la tabla 22, y tomando como base la clasificación de pendientes descrita en el punto 3.2.8, se aprecia que el 16.02 % (1,458.24 hectáreas) del territorio de la cuenca presenta valores de factor LS por debajo de 3.4, los cuales corresponderían a superficies con pendientes ligeramente inclinadas a fuertemente inclinadas; valores de LS de 5.6 a 14.6 en el 74.26 % (6758.27 hectáreas) de la cuenca que corresponderían a superficies con pendientes entre moderadamente empinadas a empinadas; y valores de LS por encima de 20.2 corresponden al 9.72 % (884.61 hectáreas) del territorio, caracterizado por presentar pendientes muy empinadas a extremadamente empinadas.

De acuerdo al análisis de pendientes realizado en el ámbito de la cuenca en estudio, basado en el “Anexo IV: Guía de Clasificación de los Parámetros Edáficos” del Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (SENACE, 2009), se aprecia que la cuenca presenta un gran número superficies con pendientes moderadamente empinadas a muy empinadas, que en conjunto ocuparían el 85.9 % del área de la cuenca del río Aguaquirí, por lo que se asume que el factor LS en la cuenca resultaría relevante.



**Tabla 23:** Resultados del análisis de las pendientes de la cuenca del río Aguaquirí

Término descriptivo	Rango de pendiente (%)	Área (ha)	% Cuenca
Ligeramente inclinado	0 – 4	70.27	0.77
Inclinado	4 – 8	197.64	2.17
Fuertemente inclinado	8 – 15	723.01	7.94
Moderadamente empinado	15 – 25	1840.76	20.23
Empinado	25 – 50	4525.61	49.73
Muy empinado	50 – 75	1450.52	15.94
Extremadamente empinado	> 75	293.31	3.22

#### 4.1.4. Factor C

Para la determinación del factor de cobertura del suelo (Factor C) se utilizó la metodología descrita en el ítem 3.4.5, generándose el ráster de valores del factor C a partir de su correlación con el ráster de valores de NDVI de la imagen satelital del área de estudio, para posteriormente obtener el Mapa del Factor de cobertura. (Anexo 2.11) Del cálculo del NDVI de la zona de estudio se obtuvo como resultado que dicho parámetro se encontraba en el rango de valores entre -0.29 a 0.73, siendo las áreas con valores cercanos a cero zonas de suelo desnudo o escasa vegetación; en comparación con las áreas que presentan valores alrededor de los 0.73 siendo estas de densa cobertura vegetal pero no completamente vigorosa al no ser un valor cercano a uno.

En función al ráster resultante del factor C se pudo identificar el tipo de cobertura en la cuenca Aguaquirí a partir de la propuesta de las Tablas 11 y 12 del ítem 2.9.4, y contrastando el resultado con imágenes aéreas de Google Satellite; siendo los valores del factor C en el rango de 0.9 a 1.0 correspondientes a “Áreas sin vegetación”, de 0.7 a 0.9 correspondientes a zonas de “Pajonal altoandino”, 0.4 a 0.7 áreas cubiertas de “Matorral ralo y eriales”, zonas con valores entre 0.2 a 0.4 áreas de “Matorral arbustivo”, valores mayores de 0 a 0.2 a zonas de “Cultivos anuales y herbáceos”, y valores de factor C de 0 “Cuerpos de agua” y “Asentamientos”. Siendo las zonas de “Pajonal altoandino” las de mayor extensión en la cuenca con un porcentaje de cobertura de 43.77% (3983.963 Ha), siguiéndole las “Áreas sin vegetación” con un porcentaje de cobertura de 31.36% (2854.274 Ha) las cuales se encuentran distribuidas indistintamente alrededor de toda el área de estudio.

**Tabla 24:** Valores del Factor C para los tipos de cobertura de la cuenca Aguaquirí

Factor C	Área (ha)	%
0.0	80.01	0.88
0.0 – 0.2	452.30	4.97
0.2 – 0.4	692.43	7.61
0.4 – 0.7	1038.15	11.41
0.7 – 0.9	3983.96	43.77
0.9 – 1.0	2854.27	31.36
<b>Total</b>	<b>9101.12</b>	<b>100.00</b>

#### 4.1.5. Factor P

Habiendo identificado las zonas que presentan prácticas de conservación de suelos con ayuda de imágenes satelitales procesadas y siguiendo con la metodología descrita en el ítem 3.4.6, asignando los valores del factor P en función de las Tablas 13 y 14, se obtuvo el mapa del factor de prácticas de conservación de suelos (Anexo 2.12).

En el mapa resultante se observa que casi la totalidad de la cuenca carece de prácticas de conservación, ya que la mayor parte de la cuenca del río Aguaquirí es pastizal altoandino y montañas rocosas, siendo el 0.51% de la extensión de la cuenca el área que posee prácticas de conservación de suelos. Dentro de las principales prácticas de conservación de suelos se logró identificar prácticas como siembras en contorno (39.891 Ha) y cultivo en terrazas (6.768 Ha).

**Tabla 25:** Tipo de prácticas de conservación la cuenca del río Aguaquirí

Tipo de Práctica de Conservación	Área (ha)	Área (%)
Cultivo en contorno	39.891	0.44
Cultivo en terrazas	6.768	0.07
Ninguna	9054.461	99.49
<b>Total</b>	<b>9101.120</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 26:** Tipo de prácticas de conservación la cuenca del río Aguaquirí

Tipo de Práctica de Conservación	Pendiente (%)	Factor P	Área (ha)
Cultivo en contorno	0 - 7 %	0.55	0.031
Cultivo en contorno	7 - 11.3 %	0.60	0.141
Cultivo en contorno	11.3 - 17.6 %	0.80	1.360
Cultivo en contorno	17.6 - 26.8 %	0.90	5.158
Cultivo en contorno	26.8 % >	1.00	33.201
Cultivo en terrazas	7 - 11.3 %	0.12	0.125
Cultivo en terrazas	11.3 - 17.6 %	0.16	0.109
Cultivo en terrazas	17.6 - 26.8 %	0.18	0.203
Cultivo en terrazas	26.8 % >	0.20	6.331
Ninguna		1.00	9054.461
<b>Total</b>			<b>9101.120</b>

## 4.2. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA

### 4.2.1. Pérdida del suelo (A)

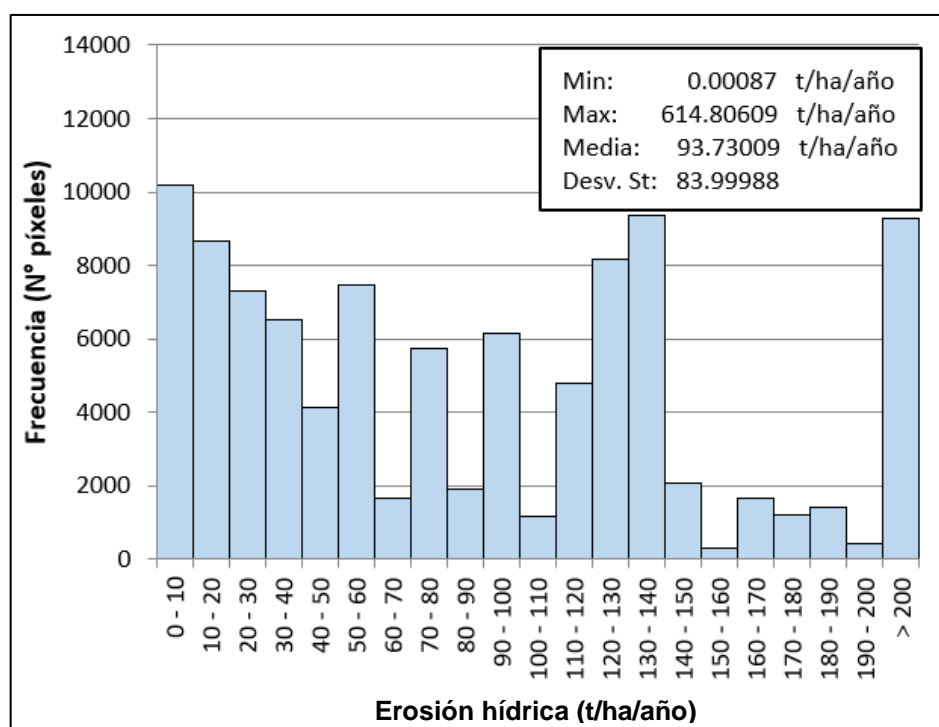
La estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica se llevó a cabo utilizando la metodología descrita en el ítem 3.4.7, integrando las capas ráster de todos los factores que componen la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE) a través de la herramienta “*Raster Calculator*”, generándose así el ráster resultante denominado factor A. Con el ráster resultante se realizó la clasificación de la erosión por rangos propuesta por la FAO (Tabla 15) a fin de elaborar el Mapa del grado de erosión hídrica de la cuenca Aguaquirí (Anexo 2.13).

Los resultados de la estimación de la Erosión Hídrica en la cuenca Aguaquirí se muestran en la Tabla 27 y su distribución en la figura 7, donde se observa que la intensidad de “Erosión Alta” es la que ocupa la mayor superficie en la cuenca siendo esta de 4885.494 hectáreas (53.68 %), seguida de la “Erosión Moderada” con 2428.707 hectáreas (26.69 %), ocupando ambas casi la totalidad de la parte media de la cuenca. Además, se aprecia en el mapa del Grado de Erosión Hídrica de la Cuenca que las áreas de “Erosión Muy Alta” se encuentran ubicadas principalmente en la parte alta de la cuenca, zonas caracterizadas por presentar altas precipitaciones, escasa cobertura vegetal y suelos muy débilmente desarrollados como son los regosoles.

**Tabla 27:** Grado de erosión hídrica en la cuenca Aguaquirí

Calificación de la intensidad de pérdida de suelo	Rango de valores de Erosión Hídrica (t/ha/año)	Área (ha)	%
Erosión Nula o ligera	< 10	928.486	10.20
Erosión Moderada	10 – 50	2428.707	26.69
Erosión Alta	50 - 200	4885.494	53.68
Erosión Muy alta	> 200	847.982	9.32
Lagunas		1.97	0.02
Planicie fluvial de río intermitente		8.48	0.09
Total		9101.12	100.00

De acuerdo a la figura 7, la tasa de erosión hídrica media anual presente en la cuenca es de 93.73 t/ha/año, el cual se encuentra dentro del rango de “Erosión Alta” propuesto por la FAO. Cabe señalar que este resultado resulta ser muy cercano al valor de 87.43 t/ha/año correspondiente a la tasa media bruta de erosión para la subcuenca Aguaquirí obtenido por Roque & Santisteban (2021) en su investigación de la Evaluación del cambio morfológico en la cuenca del río Mala.



**Figura 7:** Histograma y distribución de la erosión hídrica en la cuenca del río Aguaquirí

### 4.3. PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS

A partir del Mapa del grado de erosión hídrica de la cuenca Aguaquirí (Anexo 2.13) fue posible identificar las áreas con un alto grado de erosión en donde implementar prácticas de conservación de suelos para el control de la erosión de dichas zonas, priorizando aquellas áreas con pendientes empinadas a extremadamente empinadas, con el fin de disminuir así la tasa de erosión.

En áreas de la cuenca que presentan erosión "Alta" y "Muy Alta" ubicadas a más de 3800 metros de altura se recomienda incorporar zanjas de infiltración con la finalidad de que estas permitan la infiltración de las aguas de lluvia hacia el perfil suelo, disminuyendo la erosión y permitiendo la regeneración de la cubierta vegetal de la zona. Siendo la extensión del área afectada a conservar de 5647.32 hectáreas de suelo. Es así que siguiendo los criterios técnicos de construcción de zanjas de infiltración indicados en Ministerio de agricultura y riego (2014) se estimó necesaria la construcción de 2440.2 kilómetros lineales de zanjas de infiltración de dimensiones: 40 cm de ancho de base, 40 cm de profundidad, una longitud de zanja de 10 m. Se ha considerado una separación de tabiques de tierra de 10 m horizontales y una separación de 15 m verticales entre cada zanja de infiltración en función a una pendiente promedio de la cuenca de aproximadamente 30%.

Por otro lado, en las zonas de la cuenca ubicadas por debajo de los 3800 metros de altura con potencial agrícola y que presenten una erosión "Alta" o "Muy Alta" se propone realizar prácticas de asociación agroforestal, como terrazas de formación lentas con barreras vivas para así proteger y conservar el área agrícola evitando la erosión de la zona. Requiriendo la conservación de 12.42 hectáreas se estima la construcción de 690 terrazas de formación lentas, que de acuerdo a FAO & IITA (2000) tratándose de suelos de textura fina con una pendiente de 30 %, se estimó trabajar con: muro de 1.5 metros de altura, ancho de terraza de 5 metros, longitud de terraplén de 20 metros y 1 metro de separación entre terrazas. Para las barreras vivas se recomiendan especies de matorral arbustivo al ser el tipo de cobertura vegetal predominante, siendo *Baccharis tricuneata*, *Lomanthus yauyensis*, *Senecio collinus*, *Bidens Andicola*, *Valeriana interrupta* y *Lomanthus calachaquensis* algunas especies herbáceas características de dicha zona de acuerdo al trabajo de composición florística de Aquino *et al.* (2018).

## V. CONCLUSIONES

- Se estimó la pérdida de suelo media anual en la cuenca del río Aguaquirí, ubicada entre las coordenadas UTM 18 Sur que va desde los 365575 a 376863 Longitud Oeste; y 8661085 a 8676132 Latitud Sur, aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE) a partir de la estimación de los siguientes parámetros:
- El parámetro de Erosividad por precipitación pluvial (R) estimado obtuvo valores por debajo de los 440 MJ\*cm/ha\*h en la parte baja de la cuenca, de 440 - 500 MJ\*cm/ha\*h en la parte media de la cuenca y valores superiores a 500 MJ\*cm/ha\*h en la parte alta de la cuenca, mostrándose un aumento de la fuerza erosiva de las lluvias a medida que aumenta la altitud.
- El parámetro de Erodabilidad del suelo (K) obtuvo valores en la parte baja de la cuenca de 0.07 t\*ha\*h/MJ\*ha\*cm (suelos muy poco erodables), en la parte media de la cuenca de 0.20 t\*ha\*h/MJ\*ha\*cm (suelos medianamente erodables) y en la parte alta de la cuenca de 0.40 t\*ha\*h/MJ\*ha\*cm (suelos fuertemente erodables).
- El parámetro de Factor topográfico (LS) exhibe resultados cuyos valores se encuentran entre 0.3 (superficies con pendientes de 0 a 3 %) a 28.5 (superficies con pendientes superiores al 100 %); presentando valores altos en la mayor parte de la cuenca debido a la presencia de extensas superficies con topografía accidentada, teniendo un valor promedio para la cuenca de 11.49 correspondiente a superficies con pendientes clasificadas como “Empinadas”.

- El parámetro de Cobertura vegetal del suelo (C) en la parte baja de la cuenca presenta mayormente valores superiores de 0 a 0.4 correspondiente a zonas de “Cultivos anuales y herbáceos” y áreas de “Matorral arbustivo”, mientras que en las partes media y alta de la cuenca predominan valores de 0.7 a 1.0 correspondientes a zonas de “Pajonal altoandino” y “Áreas sin vegetación”. Se observa que se cuenta con una mejor protección frente a la erosión hídrica aguas abajo de la cuenca al manifestar una mayor densidad de cobertura vegetal
  
- El parámetro de Prácticas de conservación del suelo (P) solo se pudo identificar en la parte baja de la cuenca, ocupando un total de 46.66 hectáreas, cuyos valores obtenidos corresponden a prácticas de “Siembra en contorno”, con valores que oscilan desde 0.55 (en zonas con pendientes de 0 a 7 %) hasta 1.0 (en zonas con pendientes mayores a 26.8 %), y “Cultivo en terrazas”, con valores desde 0.12 (en zonas con pendientes de 7 a 11.3 %) a 0.20 (en zonas con pendientes mayores a 26.8 %). Resultando dentro de estas prácticas la de “Cultivo en terrazas” la que ofrece una mejor reducción en la pérdida de suelos.
  
- Se determinó que la pérdida del suelo por erosión hídrica media anual en la parte alta de la cuenca es de 141.25 t/ha/año, en la parte media de la cuenca es de 90.80 t/ha/año y en la parte baja de la cuenca es de 37.28 t/ha/año; estimándose para toda la cuenca una pérdida promedio de 93.73 t/ha/año de suelo, que de acuerdo a la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) correspondería a un nivel de erosión Alta. Identificándose que las áreas con Erosión Alta (Erosión hídrica de 50 a 200 t/ha/año) predominan en la cuenca ocupando el 53.68% de su extensión, seguida en extensión por las áreas con Erosión Moderada (Erosión hídrica de 10 a 50 t/ha/año) presentes en el 26.69% de la cuenca.
  
- Se identificó las áreas con alto riesgo de erosión hídrica en la cuenca Aguaquirí siendo estas aquellas con valores altos del producto de los parámetros de la ecuación RUSLE, correspondientes a zonas caracterizadas por presentar fuertes precipitaciones, suelos fuertemente erodables, pendientes empinadas, poca cobertura vegetal, e inexistencia de prácticas de conservación de suelos; situadas principalmente en la parte alta de la cuenca Aguaquirí, correspondientes al distrito de Santiago de Anchucaya.

- Las alternativas de mitigación propuestas para las zonas de la cuenca con erosión "Alta" y "Muy Alta" son zanjas de infiltración y terrazas de formación lentas con barreras vivas. Requiriéndose la construcción de aproximadamente 2440.2 kilómetros lineales de zanjas de infiltración, y de 690 terrazas de formación lentas y utilizando especies herbáceas propias de la zona.



## **VI. RECOMENDACIONES**

- En áreas de estudio donde no se cuentan con suficientes estaciones pluviométricas se recomienda el uso del programa PISCO del SENAMHI.
- Para el cálculo del valor de R tener especial cuidado cuando se tienen eventos extremos, como los relacionados con ENOS, siendo recomendable trabajar por periodos o no tomar en cuenta si son eventos aislados ya que su consideración afectará el valor de R.
- Se recomienda integrar en la metodología de cálculo del factor de erodabilidad del suelo el uso de información de "Capacidad de uso mayor de las tierras" presentes en el área de estudio, a fin de perfeccionar el ráster resultante del factor K.
- De igual manera, para el cálculo del factor de cobertura vegetal (Factor C) es recomendable constatar los resultados con un "Mapa de uso actual de tierras" de la zona actualizado.
- Se recomienda realizar visitas a campo con el objetivo de: realizar muestreos de suelos para validar los resultados del factor K; identificar en campo el tipo de cobertura vegetal predominante de la zona para un resultado más preciso del factor C; y constatar la presencia de prácticas de conservación de suelos en la zona.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Agama, M. F., & Castillo, H. J. (2022). *Estimación de los factores que influyen en la pérdida de los suelos mediante la USLE en la microcuenca San Alberto del distrito de Oxapampa* [Tesis de bachiller]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 203–225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- Alvarez, 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.
- Aquino, W., Condo, F., Romero, J., Yllaconza, R., & La Torre, M. I. (2018). Composición florística del distrito de Huarochirí, provincia de Huarochirí (Lima, Perú). *Arnaldoa*, 25(3). <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.253.25305>
- Autoridad Nacional del Agua, Consorcio Tyspa - Tecnomia - Engecorps, & Grupo Inclam. (2015). *Evaluación de recursos hídricos en las cuencas Mala, Omas y Chilca. Informe Final*.
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Cabrejos, M. (2016). *Modelamiento geoespacial en la determinación del riesgo, vulnerabilidad y de la cuantificación de la erosión hídrica en la microcuenca del río Atuén - Amazonas* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Camargo, C., Pacheco, C., & López, R. (2017). Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Gestión y Ambiente*, 20(2), 265–280. <https://doi.org/10.15446/ga.v20n2>.

- Castro Mendoza, I. (2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), 3–16. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382013000200001&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382013000200001&lng=es&tlng=es)
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero, A., González, J., Reynero, M., Diez, A., Bergesio, L., Cantero, J. J., Nuñez, C., Amuchástegui, A., & Degioanni, A. (2012). *Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo* (UniRío editora, Ed.; 1a ed). Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Del Aguila, M. (2010). *Aplicación del modelo USLE/RUSLE para estimar la pérdida de suelos por erosión hídrica en la microcuenca Puente Pérez - Tingo María* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Dourojeanni Ricordi, A. (1967). *La ecuación universal de pérdida de suelo y su aplicación al planeamiento del uso de las tierras agrícolas. Estudio del factor de las lluvias en el Perú* (Facultad de Ingeniería Agrícola., Ed.; No. HD111 D6-T). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Escobar Soldevilla, M. Y. (2019). *Mitigación de la erosión hídrica para la conservación del suelo en la subcuenca del río Ichu, Huancavelica* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- FAO, & IITA. (2000). Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. *Boletín de tierras y aguas de la FAO*, 8.
- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2022). A Novel High-Resolution Gridded Precipitation Dataset for Peruvian and Ecuadorian Watersheds: Development and Hydrological Evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23(3), 309–336. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0285.1>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- García Rodríguez, J., & Giménez Suárez, M. (2008). Determinación del Factor Topográfico LS en los Modelos RUSLE y RUSLE3D mediante el SIG Sextante. *Cuadernos del CURIHAM*, 14, 67–74.
- Gisbert Blanquer, J. M., Ibáñez Asensio, S., & Moreno Ramón, H. (2012). *El Factor K de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE)*.

- GLASOD. (1991). *World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note* (2nd revised edition). UNEP.
- Harrison, L., Landsfeld, M., Husak, G., Davenport, F., Shukla, S., Turner, W., Peterson, P., & Funk, C. (2022). Advancing early warning capabilities with CHIRPS-compatible NCEP GEFS precipitation forecasts. *Scientific Data*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01468-2>
- Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., & Felipe-Obando, O. (2022). High-resolution gridded hourly precipitation dataset for Peru (PISCOp\_h). *Data in Brief*, 45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108570>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2014). *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2013*.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2022*.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales, Intendencia de Recursos Hídricos, Dirección de Recursos Hídricos e Irrigaciones, & Administración Técnica del Distrito de Riego Mala - Omas - Cañete. (2007a). *Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río Mala. Estudio Hidrológico*.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales, Intendencia de Recursos Hídricos, Dirección de Recursos Hídricos e Irrigaciones, & Administración Técnica del Distrito de Riego Mala - Omas - Cañete. (2007b). *Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río Mala. Inventario de fuentes de agua superficiales*.
- Kang, M. W., Kim, D. J., Lim, K., & Lee, S. S. (2021). Rainfall Erosivity Factor of Korean Soils Estimated by Using USLE under Climate Change. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 54(3), 265–275. <https://doi.org/10.7745/kjssf.2021.54.3.265>
- Ministerio de agricultura y riego. (2014). Cartillas para la conservación del suelo. Zanjas de infiltración. *Programa Presupuestal 0089 Reducción de la Degradación de los Suelos Agrarios*. [www.minagri.gob.pe](http://www.minagri.gob.pe)
- Molina, A., Vanacker, V., Rosas Barturen, M., Bonnesoeur, V., Román, F., Ochoa-Tocachi, B. F., & Buytaert, W. (2021). Infraestructura natural para la gestión de riesgos de erosión e inundaciones en los Andes: ¿Qué sabemos? *Forest Trends*, 32.
- Nakaya Barzola, D. E. (2018). *Estimación de la pérdida de suelo media anual mediante el modelo R.U.S.L.E., en la cuenca del río Tingo - Cajamarca* [Tesis de grado]. Universidad Nacional Agraria La Molina.

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo: Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Roque, G. P., & Santisteban, C. N. (2021). *Evaluación del cambio morfológico en la cuenca del río Mala aplicando RUSLE y técnicas geoespaciales* [Tesis de grado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Sabino, E., Felipe, O. G., & Lavado, W. S. (2017). Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú. Nota Técnica 002. SENAMHI-DHI-2017. *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*, 130.
- SENACE. (2009). *Anexo IV: Guía de Clasificación de los Parámetros Edáficos - Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor*. 10–13. <https://spij.minjus.gob.pe/Graficos/Peru/2009/setiembre/02/DS-017-2009-AG.pdf>
- Taco, M. F. (2021). *Uso del sistema de información geográfica para la cuantificación de la erosión hídrica potencial en la cuenca Chamacha – Lima* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Agraria La Molina.

## **VIII. ANEXOS**

**ANEXO 1: INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA**

**ANEXO 2: MAPAS**

**ANEXO 3: CÁLCULOS**

## ANEXO 1: INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA

### ANEXO 1.1 Ubicación de estaciones meteorológicas virtuales

Estación	Longitud	Latitud
E-01	-76.2698966	-11.9475652
E-02	-76.2700443	-11.9792093
E-03	-76.2701924	-12.0108534
E-04	-76.2703410	-12.0424973
E-05	-76.2704899	-12.0741412
E-06	-76.2706393	-12.1057850
E-07	-76.2707891	-12.1374288
E-08	-76.2377589	-11.9477086
E-09	-76.2379029	-11.9793531
E-10	-76.2380472	-12.0109975
E-11	-76.2381920	-12.0426419
E-12	-76.2383372	-12.0742862
E-13	-76.2384828	-12.1059304
E-14	-76.2386288	-12.1375745
E-15	-76.2056208	-11.9478483
E-16	-76.2057610	-11.9794932
E-17	-76.2059016	-12.0111380
E-18	-76.2060426	-12.0427827
E-19	-76.2061841	-12.0744274
E-20	-76.2063259	-12.1060720
E-21	-76.2064681	-12.1377165
E-22	-76.1734823	-11.9479843
E-23	-76.1736187	-11.9796296
E-24	-76.1737556	-12.0112748
E-25	-76.1738929	-12.0429199

Estación	Longitud	Latitud
E-26	-76.1740305	-12.0745649
E-27	-76.1741686	-12.1062099
E-28	-76.1743070	-12.1378548
E-29	-76.1413433	-11.9481167
E-30	-76.1414761	-11.9797623
E-31	-76.1416092	-12.0114079
E-32	-76.1417427	-12.0430533
E-33	-76.1418766	-12.0746987
E-34	-76.1420109	-12.1063440
E-35	-76.1421455	-12.1379893
E-36	-76.1092041	-11.9482454
E-37	-76.1093331	-11.9798913
E-38	-76.1094624	-12.0115372
E-39	-76.1095922	-12.0431831
E-40	-76.1097223	-12.0748288
E-41	-76.1098528	-12.1064745
E-42	-76.1099836	-12.1381201
E-43	-76.0770644	-11.9483704
E-44	-76.0771897	-11.9800167
E-45	-76.0773153	-12.0116629
E-46	-76.0774413	-12.0433091
E-47	-76.0775676	-12.0749552
E-48	-76.0776943	-12.1066012
E-49	-76.0778214	-12.1382471

**ANEXO 1.2 Datos de Precipitación media mensual (1981 – 2016)**

Estación	Pmm Ene	Pmm Febr	Pmm Mar	Pmm Abr	Pmm May	Pmm Jun	Pmm Jul	Pmm Ago	Pmm Set	Pmm Oct	Pmm Nov	Pmm Dic	Suma de Pmm
E-01	168.4199	187.3416	193.2664	36.6434	4.0773	0.9302	0.7701	2.5870	4.9223	17.2865	31.7738	84.3894	732.4079
E-02	168.4199	187.3416	193.2664	36.6434	4.0773	0.9302	0.7701	2.5870	4.9223	17.2865	31.7738	84.3894	732.4079
E-03	160.3118	202.6798	182.0806	40.4469	3.1006	0.6501	0.6752	1.7658	3.0953	13.1151	24.7157	86.0265	718.6635
E-04	160.3118	202.6798	182.0806	40.4469	3.1006	0.6501	0.6752	1.7658	3.0953	13.1151	24.7157	86.0265	718.6635
E-05	160.3118	202.6798	182.0806	40.4469	3.1006	0.6501	0.6752	1.7658	3.0953	13.1151	24.7157	86.0265	718.6635
E-06	103.8667	145.5511	155.0856	40.8666	2.3564	0.3318	0.3041	0.7246	2.4221	13.5396	25.6241	72.9484	563.6211
E-07	103.8667	145.5511	155.0856	40.8666	2.3564	0.3318	0.3041	0.7246	2.4221	13.5396	25.6241	72.9484	563.6211
E-08	168.4199	187.3416	193.2664	36.6434	4.0773	0.9302	0.7701	2.5870	4.9223	17.2865	31.7738	84.3894	732.4079
E-09	168.4199	187.3416	193.2664	36.6434	4.0773	0.9302	0.7701	2.5870	4.9223	17.2865	31.7738	84.3894	732.4079
E-10	160.3118	202.6798	182.0806	40.4469	3.1006	0.6501	0.6752	1.7658	3.0953	13.1151	24.7157	86.0265	718.6635
E-11	160.3118	202.6798	182.0806	40.4469	3.1006	0.6501	0.6752	1.7658	3.0953	13.1151	24.7157	86.0265	718.6635
E-12	160.3118	202.6798	182.0806	40.4469	3.1006	0.6501	0.6752	1.7658	3.0953	13.1151	24.7157	86.0265	718.6635
E-13	103.8667	145.5511	155.0856	40.8666	2.3564	0.3318	0.3041	0.7246	2.4221	13.5396	25.6241	72.9484	563.6211
E-14	103.8667	145.5511	155.0856	40.8666	2.3564	0.3318	0.3041	0.7246	2.4221	13.5396	25.6241	72.9484	563.6211
E-15	168.4199	187.3416	193.2664	36.6434	4.0773	0.9302	0.7701	2.5870	4.9223	17.2865	31.7738	84.3894	732.4079
E-16	168.4199	187.3416	193.2664	36.6434	4.0773	0.9302	0.7701	2.5870	4.9223	17.2865	31.7738	84.3894	732.4079
E-17	160.3118	202.6798	182.0806	40.4469	3.1006	0.6501	0.6752	1.7658	3.0953	13.1151	24.7157	86.0265	718.6635
E-18	160.3118	202.6798	182.0806	40.4469	3.1006	0.6501	0.6752	1.7658	3.0953	13.1151	24.7157	86.0265	718.6635
E-19	160.3118	202.6798	182.0806	40.4469	3.1006	0.6501	0.6752	1.7658	3.0953	13.1151	24.7157	86.0265	718.6635
E-20	103.8667	145.5511	155.0856	40.8666	2.3564	0.3318	0.3041	0.7246	2.4221	13.5396	25.6241	72.9484	563.6211
E-21	103.8667	145.5511	155.0856	40.8666	2.3564	0.3318	0.3041	0.7246	2.4221	13.5396	25.6241	72.9484	563.6211
E-22	192.5002	232.9018	187.1335	54.1792	8.6418	1.7114	1.2983	4.5163	10.4305	30.9700	66.3193	133.7646	924.3668
E-23	192.5002	232.9018	187.1335	54.1792	8.6418	1.7114	1.2983	4.5163	10.4305	30.9700	66.3193	133.7646	924.3668
E-24	164.5692	209.9816	157.6698	48.4378	5.9211	1.0763	1.0654	3.4035	6.8384	22.9811	42.8552	110.1053	774.9046



Continuación...

E-25	164.5692	209.9816	157.6698	48.4378	5.9211	1.0763	1.0654	3.4035	6.8384	22.9811	42.8552	110.1053	774.9046
E-26	164.5692	209.9816	157.6698	48.4378	5.9211	1.0763	1.0654	3.4035	6.8384	22.9811	42.8552	110.1053	774.9046
E-27	127.6785	182.6428	161.1151	36.9632	4.5176	0.5465	0.5861	1.7525	4.6360	18.6659	32.0914	74.3660	645.5616
E-28	127.6785	182.6428	161.1151	36.9632	4.5176	0.5465	0.5861	1.7525	4.6360	18.6659	32.0914	74.3660	645.5616
E-29	192.5002	232.9018	187.1335	54.1792	8.6418	1.7114	1.2983	4.5163	10.4305	30.9700	66.3193	133.7646	924.3668
E-30	192.5002	232.9018	187.1335	54.1792	8.6418	1.7114	1.2983	4.5163	10.4305	30.9700	66.3193	133.7646	924.3668
E-31	164.5692	209.9816	157.6698	48.4378	5.9211	1.0763	1.0654	3.4035	6.8384	22.9811	42.8552	110.1053	774.9046
E-32	164.5692	209.9816	157.6698	48.4378	5.9211	1.0763	1.0654	3.4035	6.8384	22.9811	42.8552	110.1053	774.9046
E-33	164.5692	209.9816	157.6698	48.4378	5.9211	1.0763	1.0654	3.4035	6.8384	22.9811	42.8552	110.1053	774.9046
E-34	127.6785	182.6428	161.1151	36.9632	4.5176	0.5465	0.5861	1.7525	4.6360	18.6659	32.0914	74.3660	645.5616
E-35	127.6785	182.6428	161.1151	36.9632	4.5176	0.5465	0.5861	1.7525	4.6360	18.6659	32.0914	74.3660	645.5616
E-36	192.5002	232.9018	187.1335	54.1792	8.6418	1.7114	1.2983	4.5163	10.4305	30.9700	66.3193	133.7646	924.3668
E-37	192.5002	232.9018	187.1335	54.1792	8.6418	1.7114	1.2983	4.5163	10.4305	30.9700	66.3193	133.7646	924.3668
E-38	164.5692	209.9816	157.6698	48.4378	5.9211	1.0763	1.0654	3.4035	6.8384	22.9811	42.8552	110.1053	774.9046
E-39	164.5692	209.9816	157.6698	48.4378	5.9211	1.0763	1.0654	3.4035	6.8384	22.9811	42.8552	110.1053	774.9046
E-40	164.5692	209.9816	157.6698	48.4378	5.9211	1.0763	1.0654	3.4035	6.8384	22.9811	42.8552	110.1053	774.9046
E-41	127.6785	182.6428	161.1151	36.9632	4.5176	0.5465	0.5861	1.7525	4.6360	18.6659	32.0914	74.3660	645.5616
E-42	127.6785	182.6428	161.1151	36.9632	4.5176	0.5465	0.5861	1.7525	4.6360	18.6659	32.0914	74.3660	645.5616
E-43	196.6287	231.4530	176.8477	71.8324	10.9089	3.4254	2.8568	7.2198	20.7809	59.1150	100.8661	165.2819	1047.2168
E-44	196.6287	231.4530	176.8477	71.8324	10.9089	3.4254	2.8568	7.2198	20.7809	59.1150	100.8661	165.2819	1047.2168
E-45	188.1222	219.5487	161.2319	74.0117	10.0939	1.8801	1.8717	6.1299	19.0779	49.9691	99.5122	182.9324	1014.3817
E-46	188.1222	219.5487	161.2319	74.0117	10.0939	1.8801	1.8717	6.1299	19.0779	49.9691	99.5122	182.9324	1014.3817
E-47	188.1222	219.5487	161.2319	74.0117	10.0939	1.8801	1.8717	6.1299	19.0779	49.9691	99.5122	182.9324	1014.3817
E-48	172.9832	207.4758	184.4766	70.0791	9.1942	1.0723	1.3061	3.9029	14.9359	47.0606	73.6306	147.2270	933.3442
E-49	172.9832	207.4758	184.4766	70.0791	9.1942	1.0723	1.3061	3.9029	14.9359	47.0606	73.6306	147.2270	933.3442

### ANEXO 1.3 Valores para el cálculo del Factor R

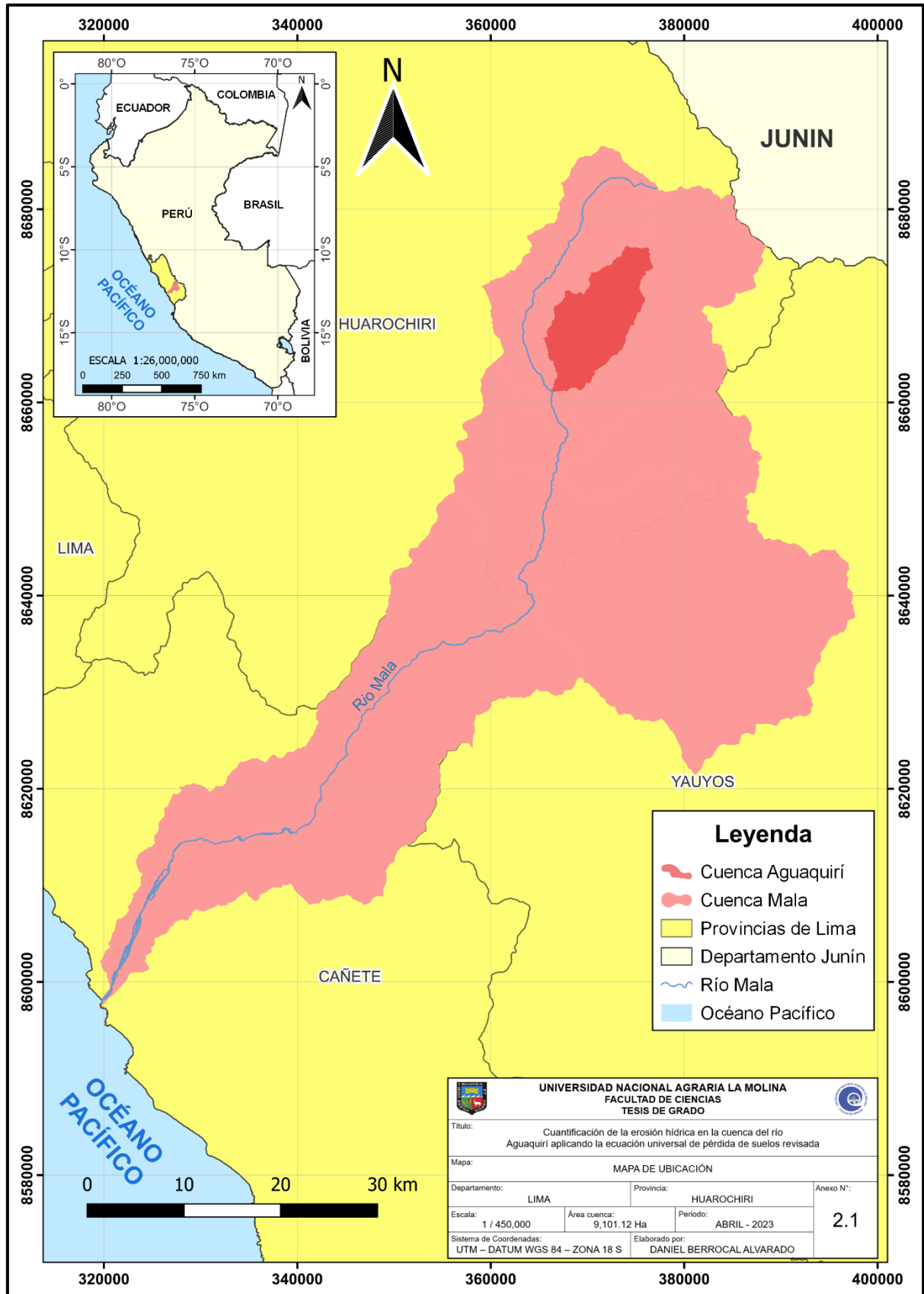
Estación	Pma 1981 - 2016	Índice Modificado de Fournier (IMF)	Factor R
E-01	732.408	151.058	477.910
E-02	732.408	151.058	477.910
E-03	718.663	152.749	484.962
E-04	718.663	152.749	484.962
E-05	718.663	152.749	484.962
E-06	563.621	113.318	320.537
E-07	563.621	113.318	320.537
E-08	732.408	151.058	477.910
E-09	732.408	151.058	477.910
E-10	718.663	152.749	484.962
E-11	718.663	152.749	484.962
E-12	718.663	152.749	484.962
E-13	563.621	113.318	320.537
E-14	563.621	113.318	320.537
E-15	732.408	151.058	477.910
E-16	732.408	151.058	477.910
E-17	718.663	152.749	484.962
E-18	718.663	152.749	484.962
E-19	718.663	152.749	484.962
E-20	563.621	113.318	320.537
E-21	563.621	113.318	320.537
E-22	924.367	165.208	536.917
E-23	924.367	165.208	536.917
E-24	774.905	145.779	455.899
E-25	774.905	145.779	455.899
E-26	774.905	145.779	455.899
E-27	645.562	130.024	390.201

Continuación...

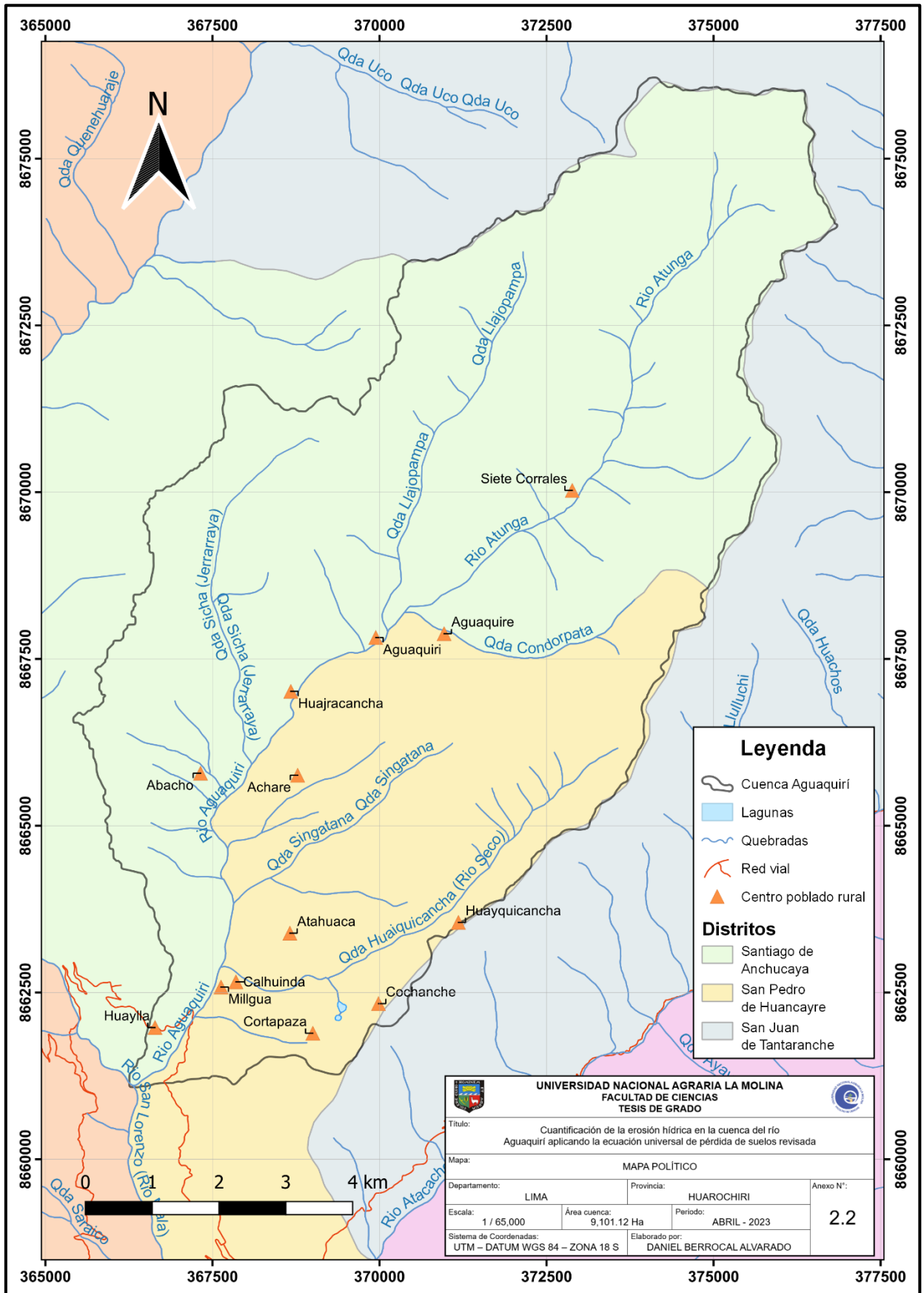
E-28	645.562	130.024	390.201
E-29	924.367	165.208	536.917
E-30	924.367	165.208	536.917
E-31	774.905	145.779	455.899
E-32	774.905	145.779	455.899
E-33	774.905	145.779	455.899
E-34	645.562	130.024	390.201
E-35	645.562	130.024	390.201
E-36	924.367	165.208	536.917
E-37	924.367	165.208	536.917
E-38	774.905	145.779	455.899
E-39	774.905	145.779	455.899
E-40	774.905	145.779	455.899
E-41	645.562	130.024	390.201
E-42	645.562	130.024	390.201
E-43	1047.217	162.600	526.044
E-44	1047.217	162.600	526.044
E-45	1014.382	159.151	511.658
E-46	1014.382	159.151	511.658
E-47	1014.382	159.151	511.658
E-48	933.344	151.659	480.416
E-49	933.344	151.659	480.416

# ANEXO 2: MAPAS

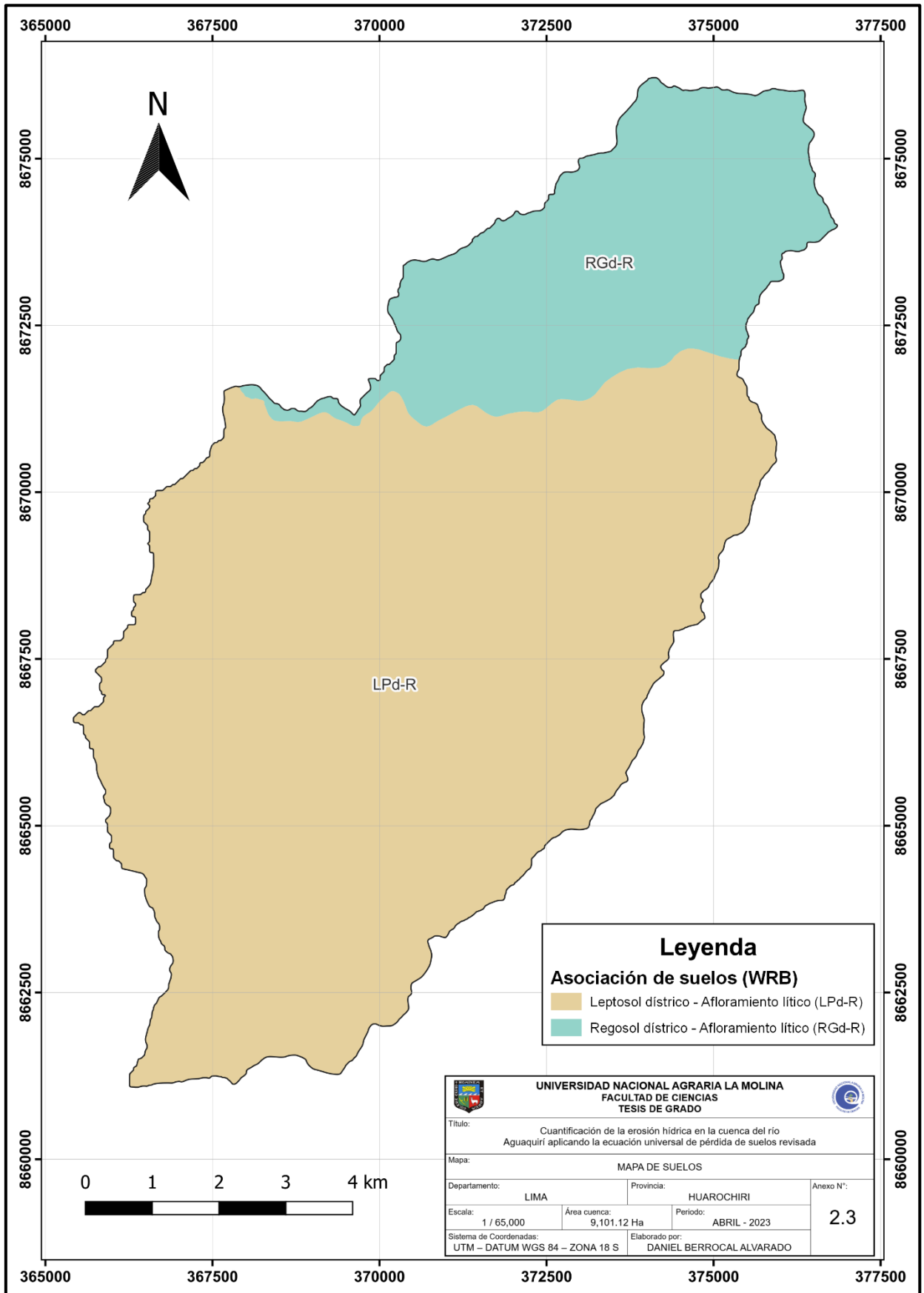
## ANEXO 2.1 Mapa de Ubicación



## ANEXO 2.2 Mapa Político



## ANEXO 2.3 Mapa de Suelos



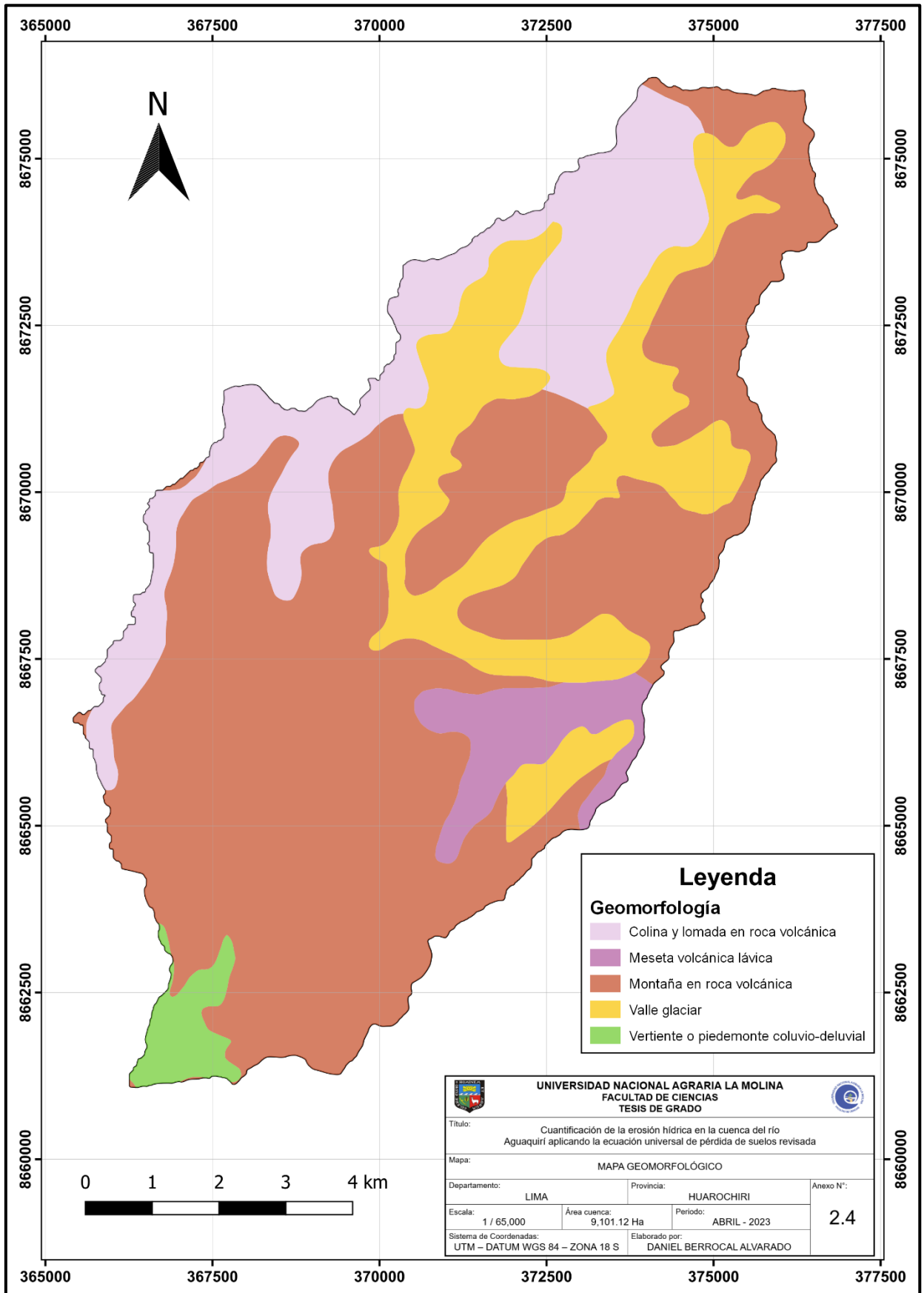
### Leyenda

#### Asociación de suelos (WRB)

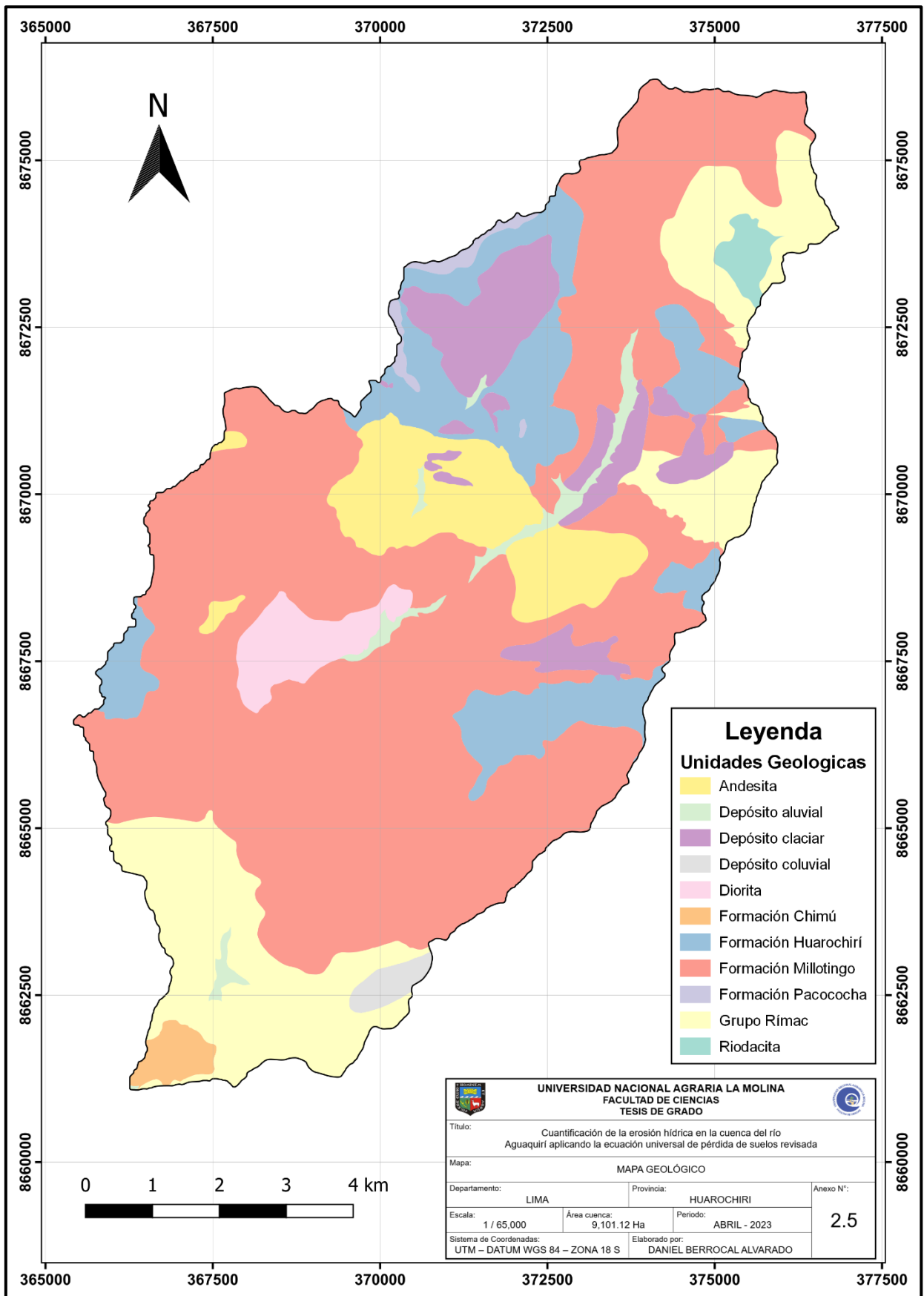
- Leptosol distrito - Afloramiento lítico (LPd-R)
- Regosol distrito - Afloramiento lítico (RGd-R)

<b>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA</b> FACULTAD DE CIENCIAS TESIS DE GRADO				
Título: <b>Cuantificación de la erosión hídrica en la cuenca del río Aguquirí aplicando la ecuación universal de pérdida de suelos revisada</b>				
Mapa: <b>MAPA DE SUELOS</b>				
Departamento:	LIMA	Provincia:	HUAROCHIRI	Anexo N°:
Escala:	1 / 65,000	Área cuenca:	9,101.12 Ha	<b>2.3</b>
Sistema de Coordenadas:	UTM – DATUM WGS 84 – ZONA 18 S	Período:	ABRIL - 2023	
			Elaborado por:	DANIEL BERROCAL ALVARADO

## ANEXO 2.4 Mapa Geomorfológico

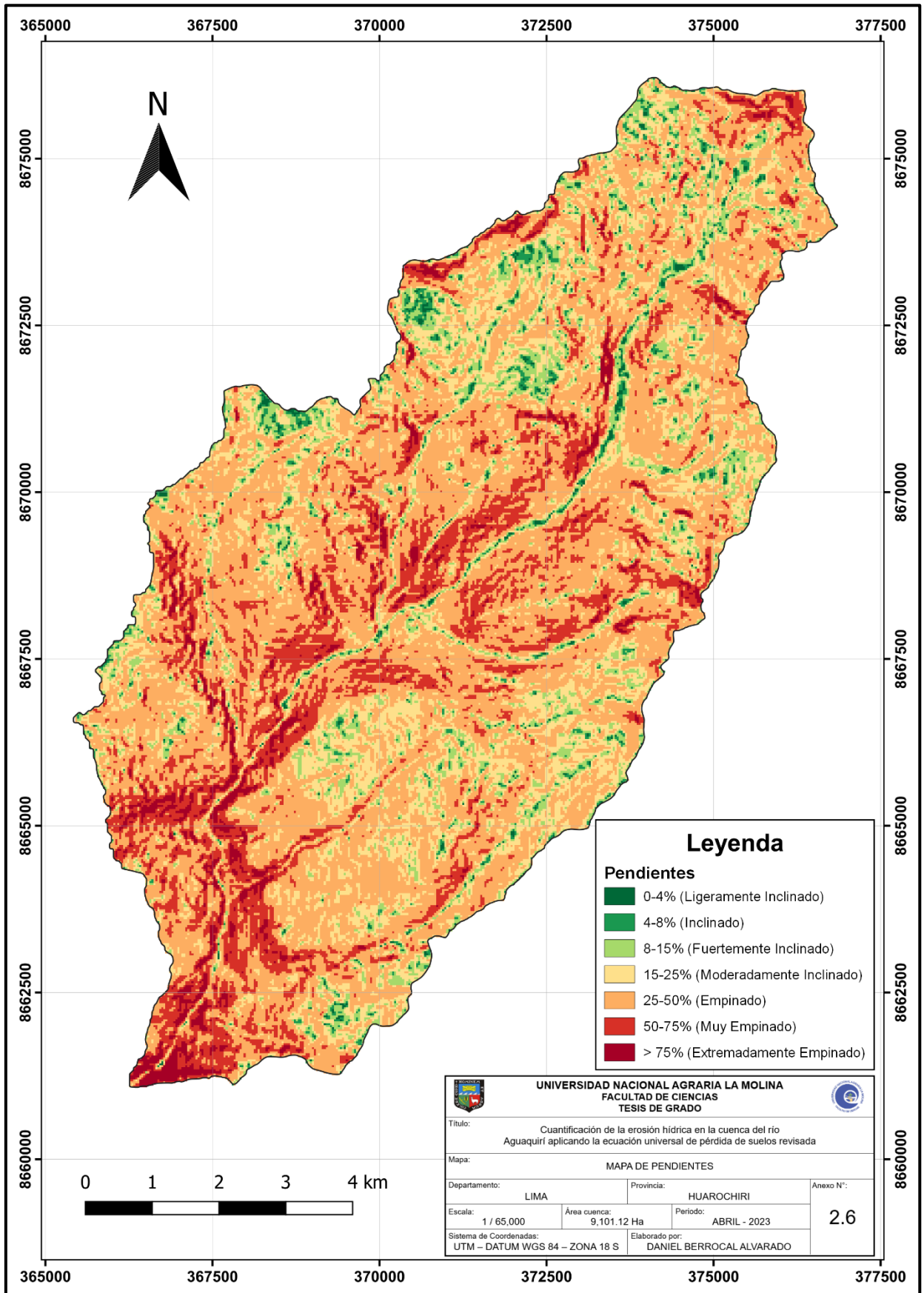


## ANEXO 2.5 Mapa Geológico

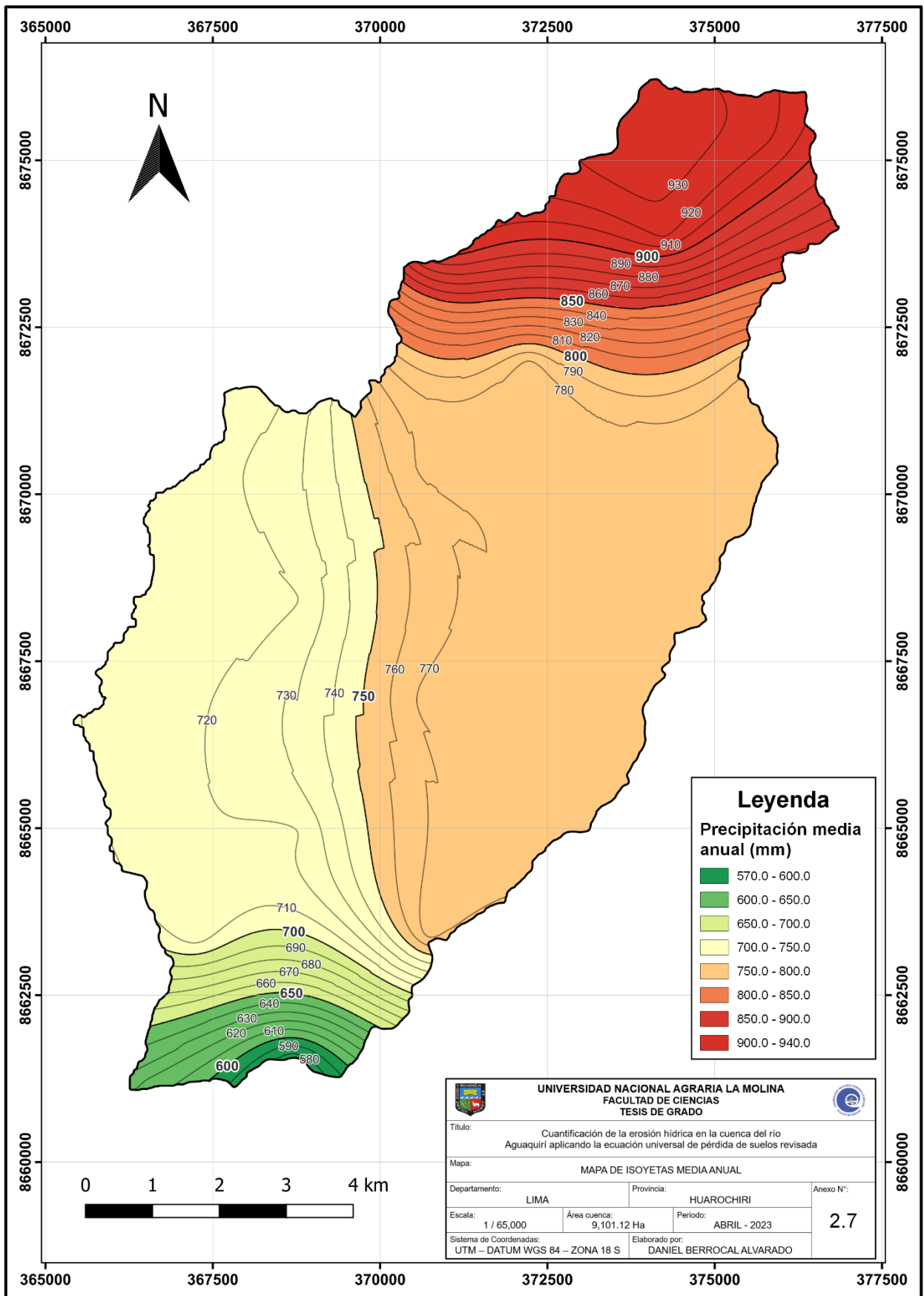




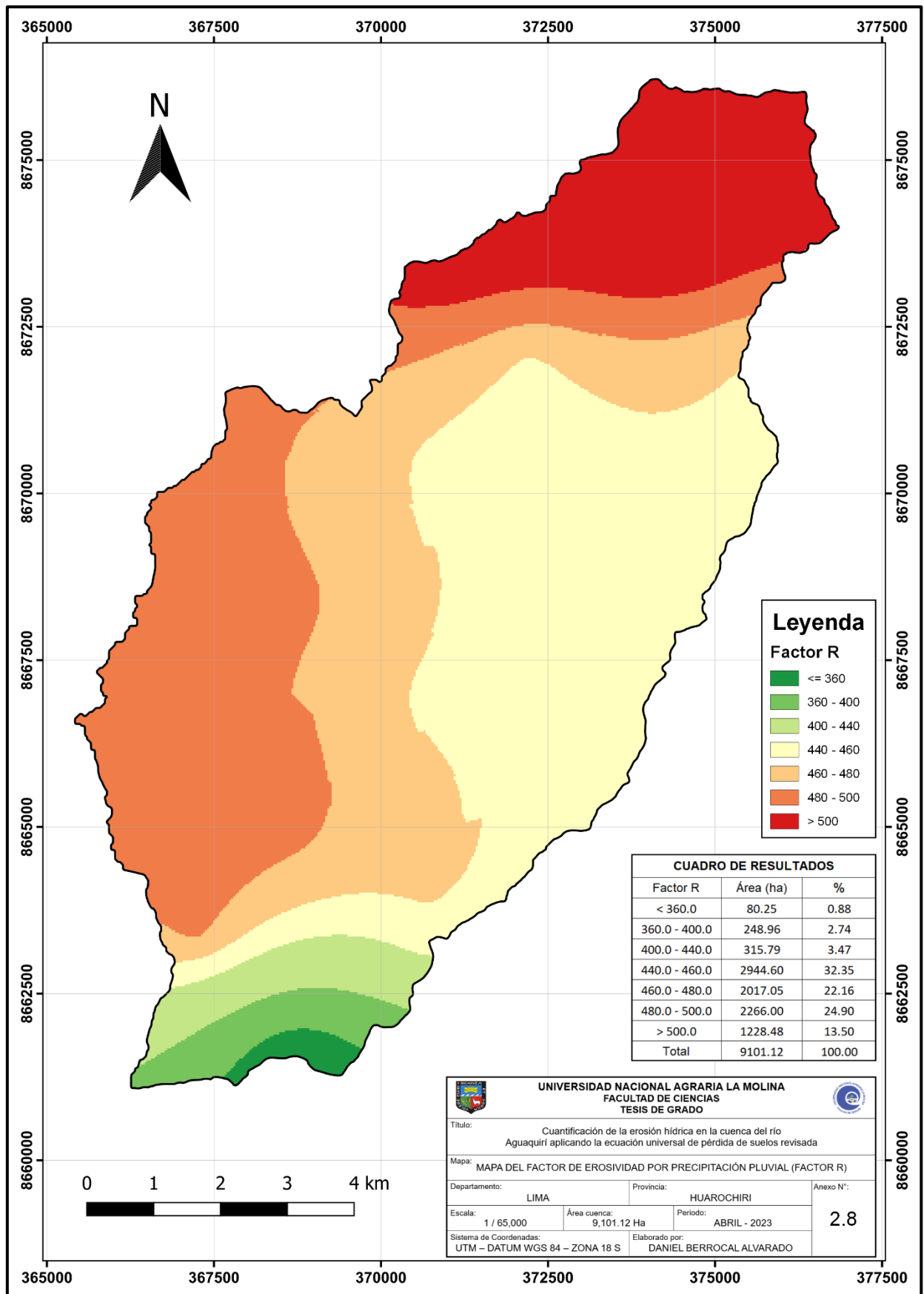
## ANEXO 2.6 Mapa de Pendientes



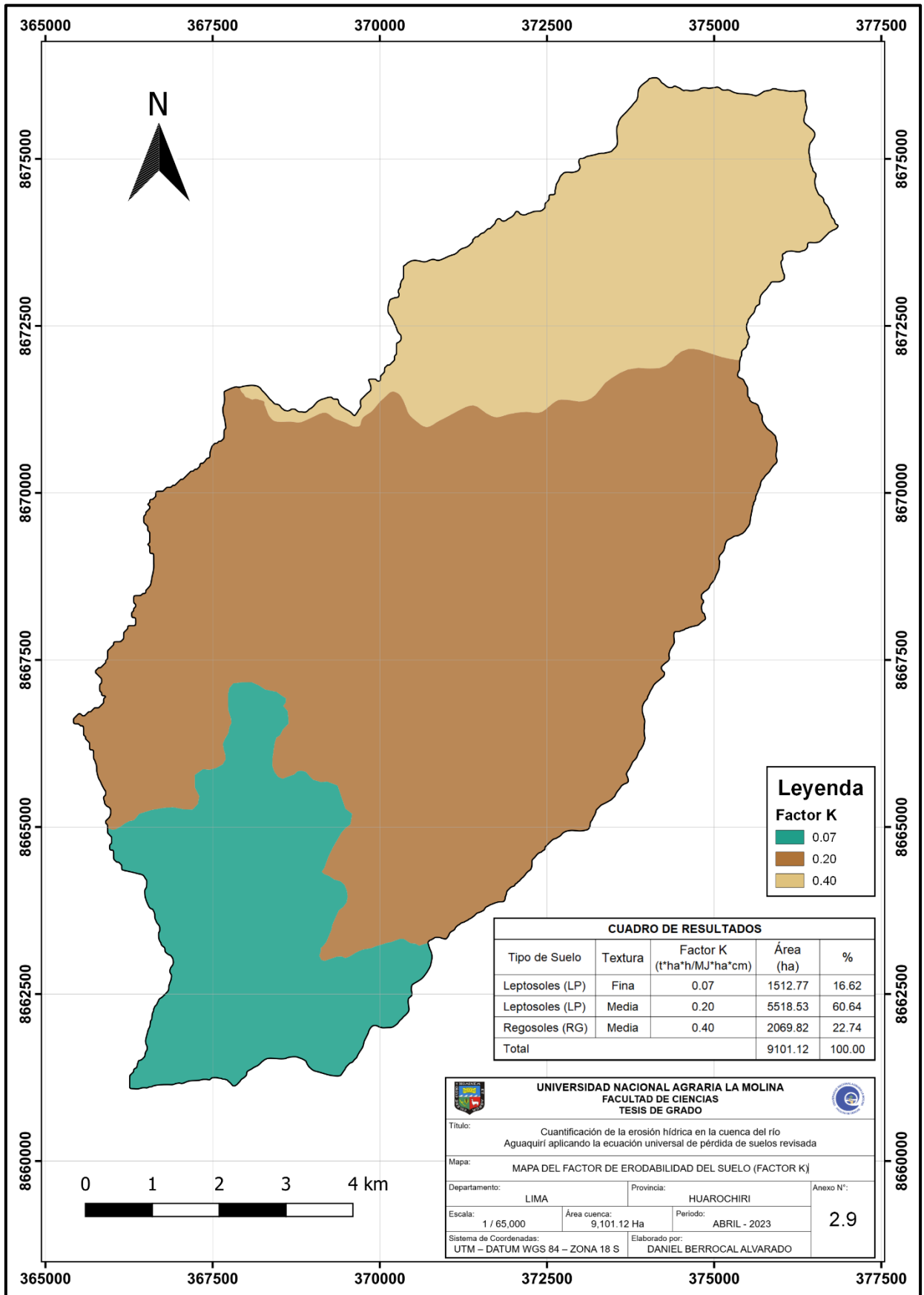
## ANEXO 2.7 Mapa de Isoyetas media anual



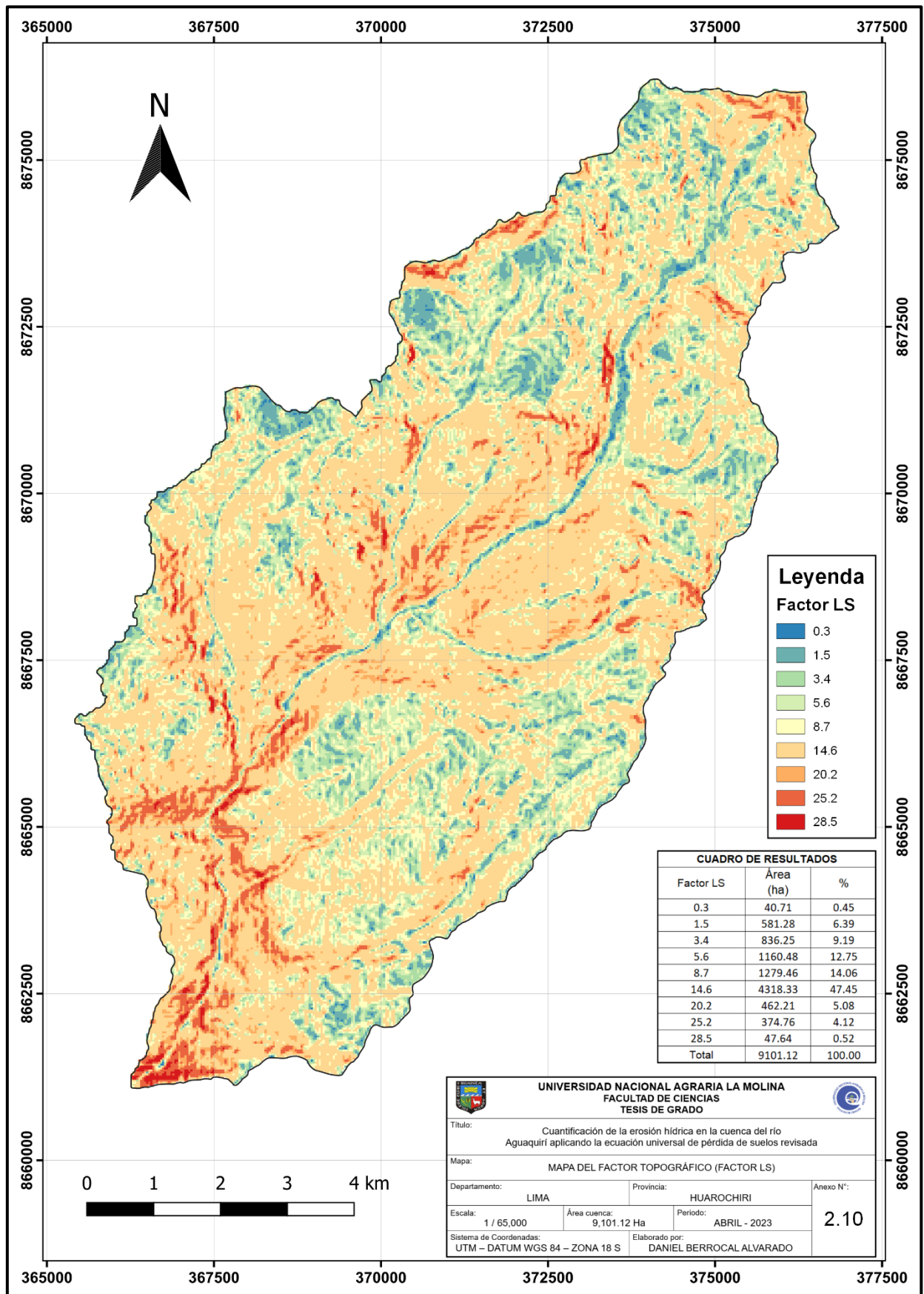
## ANEXO 2.8 Mapa de Factor de Erosividad por precipitación pluvial (Factor R)



## ANEXO 2.9 Mapa de Factor de Erodabilidad del suelo (Factor K)

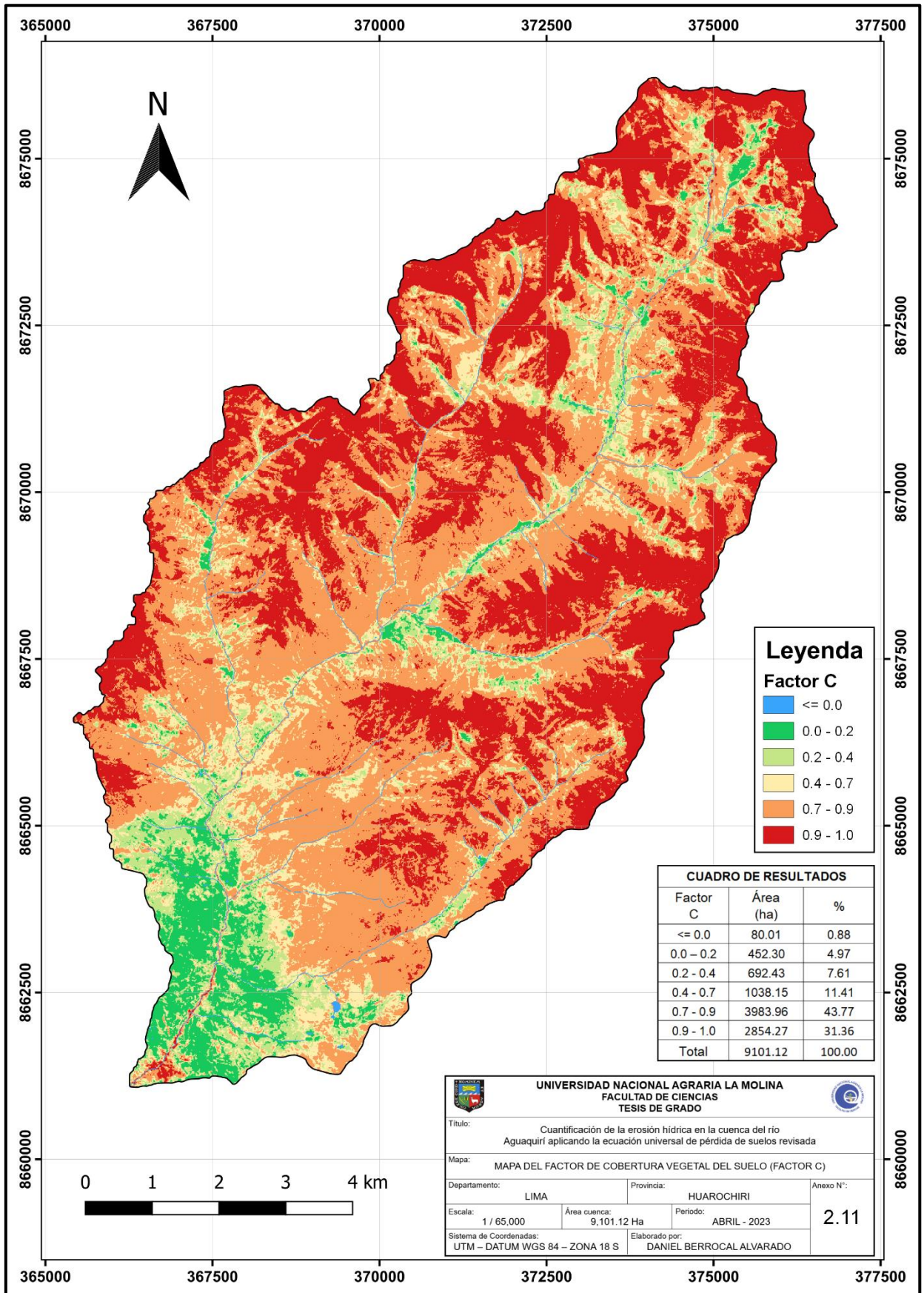


## ANEXO 2.10 Mapa de Factor Topográfico (Factor LS)

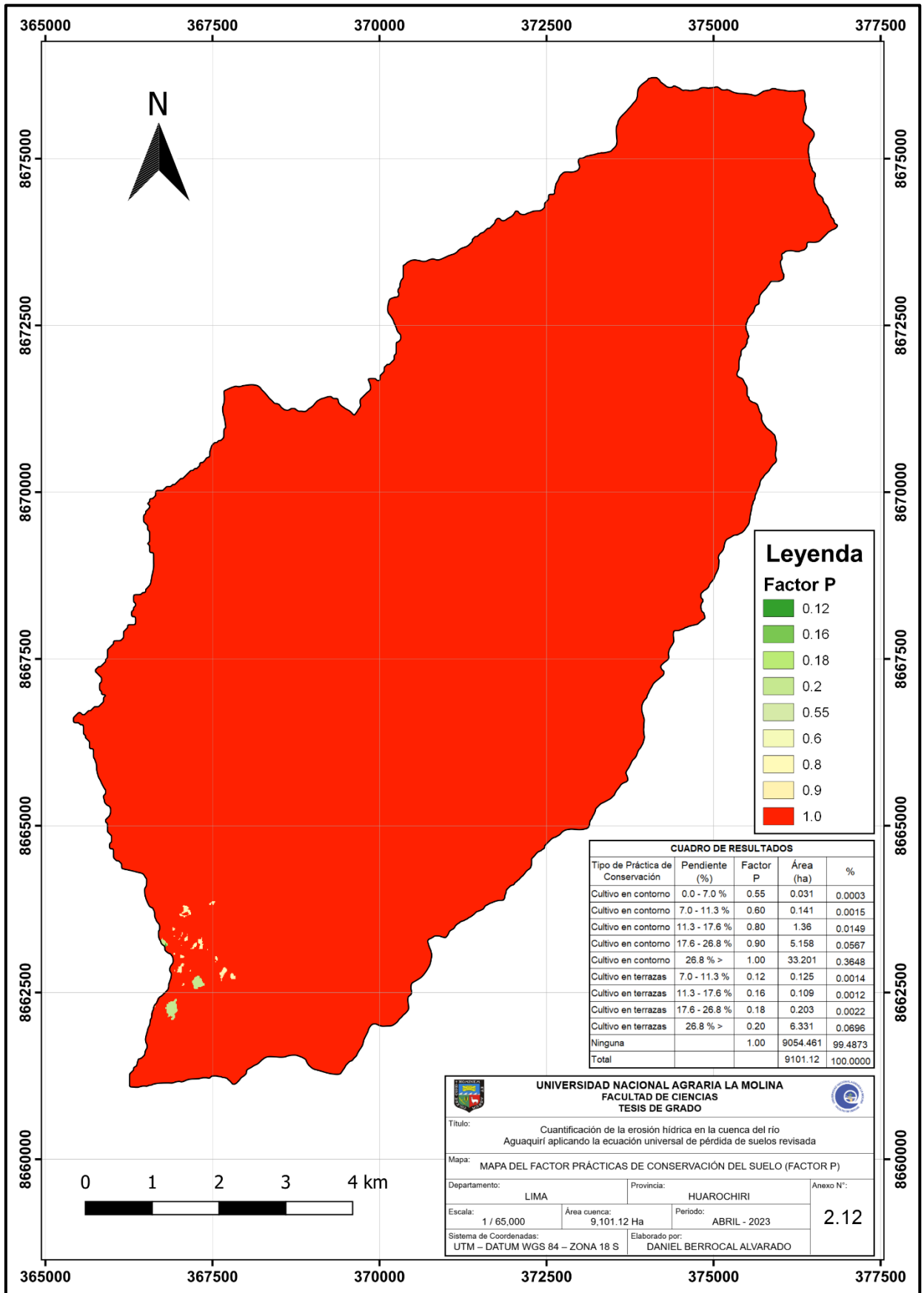




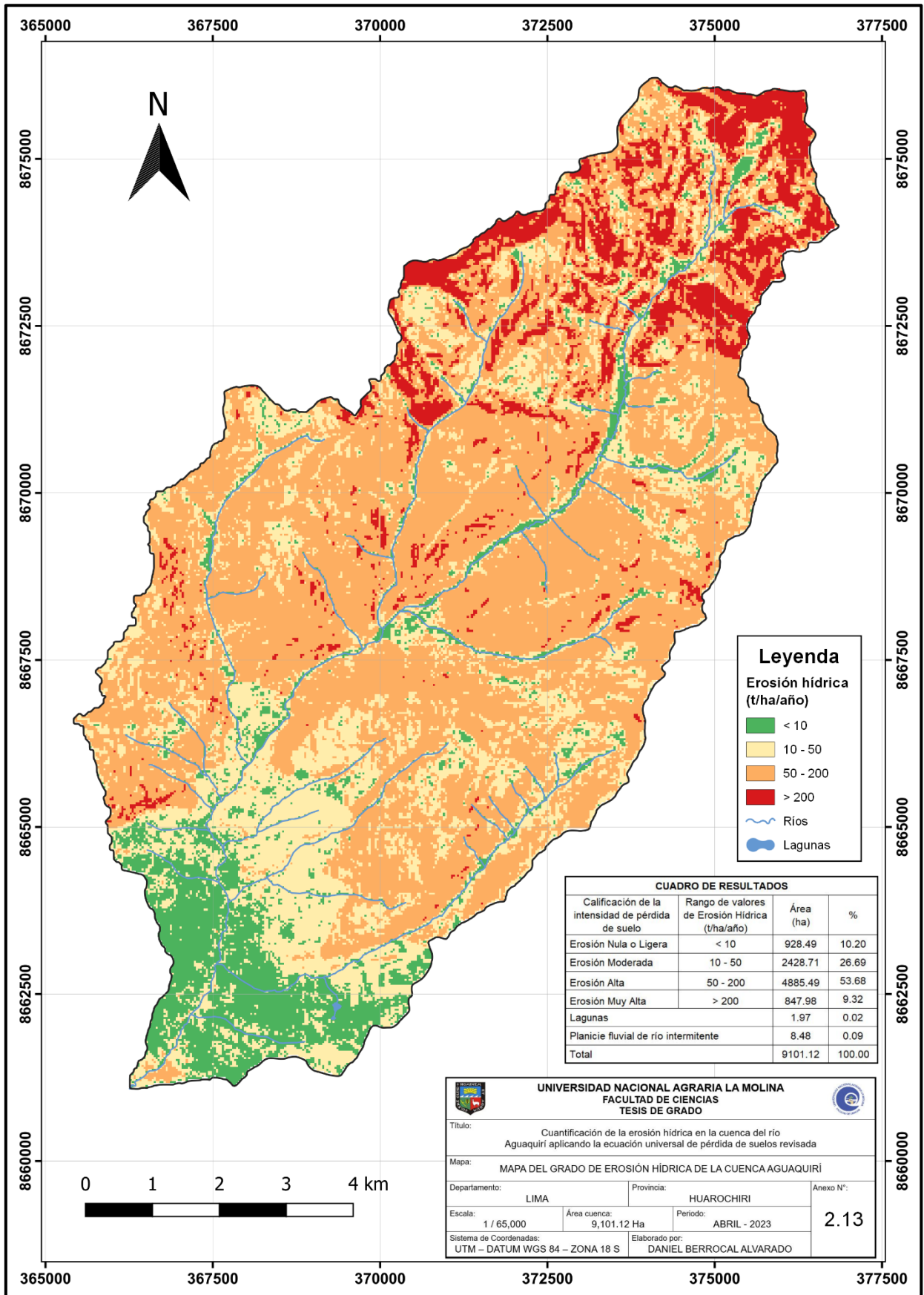
**ANEXO 2.11 Mapa de Factor de Cobertura Vegetal del Suelo (Factor C)**



## ANEXO 2.12 Mapa de Factor de Prácticas de Conservación del Suelo (Factor P)

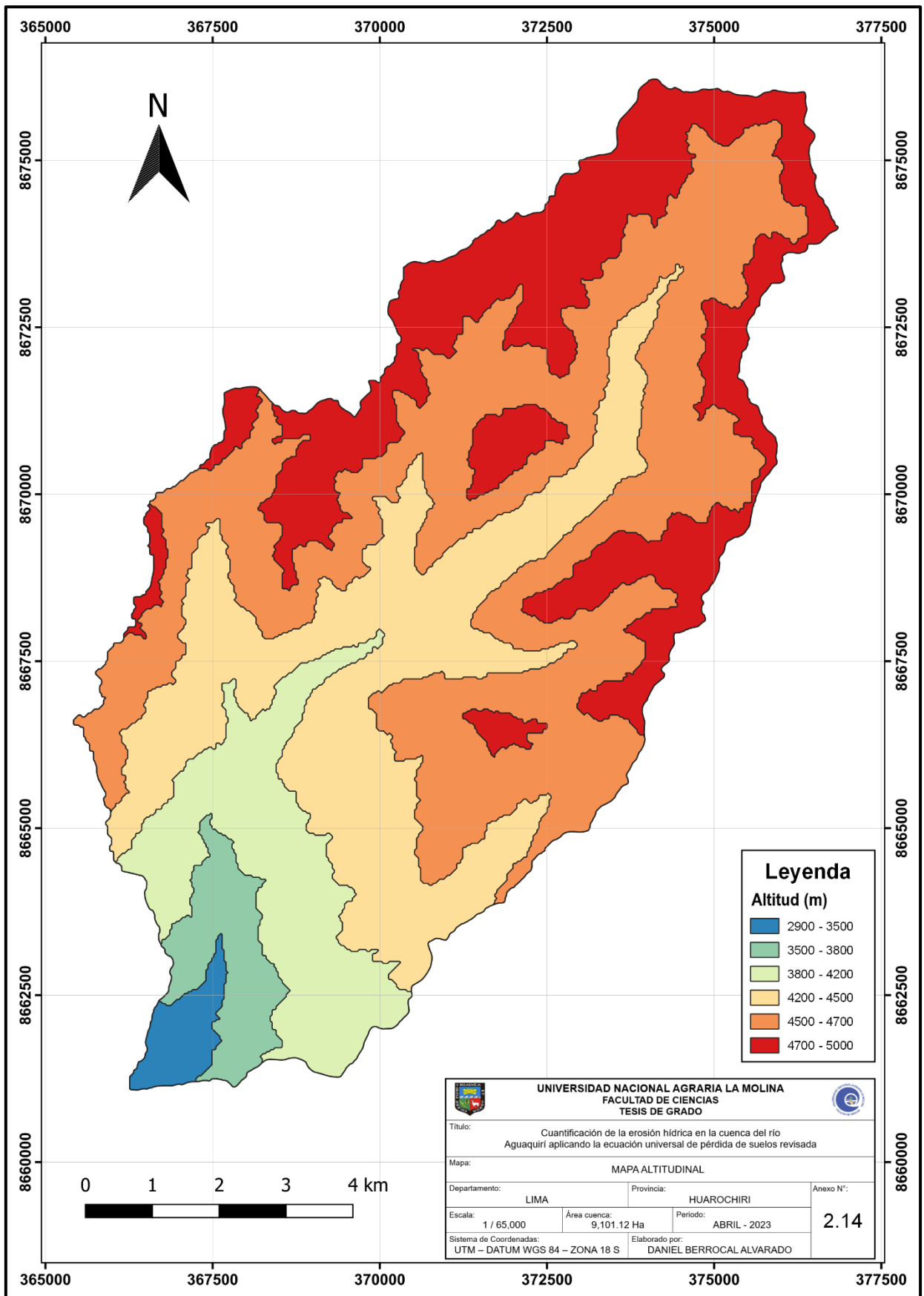


## ANEXO 2.13 Mapa del Grado de Erosión Hídrica de la Cuenca Aguauquirí





## ANEXO 2.14 Mapa Altitudinal



## ANEXO 3: CÁLCULOS

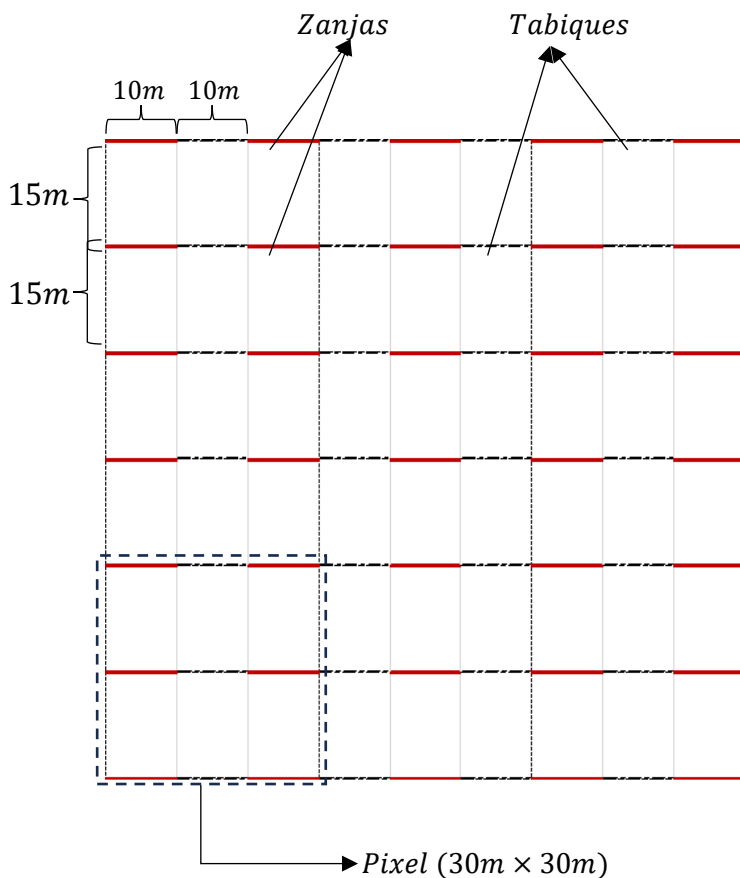
### ANEXO 3.1 Cálculos de número de zanjas de infiltración

Área a conservar:  $56473200 \text{ m}^2$

Dimensiones de la zanja:

- Longitud de zanja: 10 m
- Longitud de tabiques: 10 m
- Distancia entre zanja: 15 m

En el siguiente esquema se observa la cantidad aproximada de zanjas de infiltración que se puede construir en un grupo de 9 píxeles contándose unas 35 zanjas.



$$\text{Número de píxeles} = \frac{56473200\text{m}^2}{30\text{m} \times 30\text{m}}$$

$$\text{Número de píxeles} = 62748$$

A partir de la proporción del esquema anexo:

$$9 \text{ píxeles} \longrightarrow 35 \text{ zanjas}$$

$$62748 \text{ píxeles} \longrightarrow N \text{ zanjas}$$

$$\text{Número de zanjas (N)} = 244020$$

Km lineales de zanja:

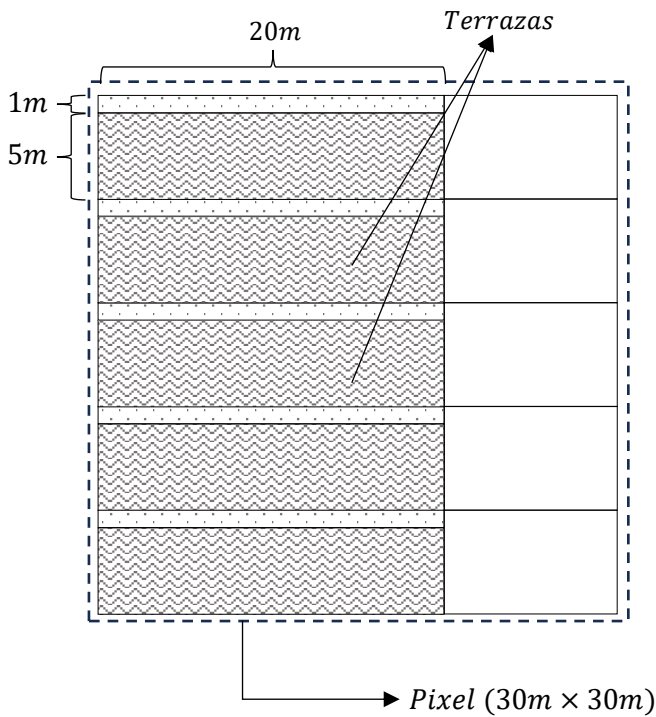
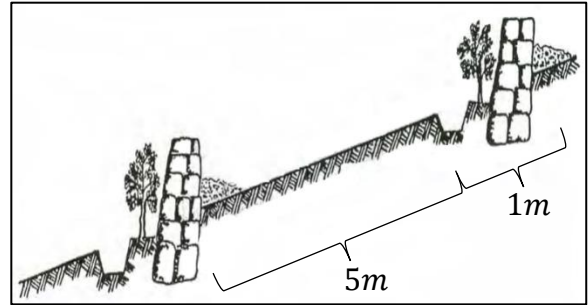
$$244020 \text{ zanjas} \times 10\text{m} \times \frac{1\text{km}}{10^3\text{m}} = 2440.2 \text{ km lineales de zanja}$$

### ANEXO 3.2 Cálculos de número de terrazas de formación lentas

Área a conservar: 124200 m<sup>2</sup>

Dimensiones de la terraza:

- Ancho de la terraza: 5 m
- Longitud del terraplén: 20 m
- Separación entre terrazas: 1 m



En el siguiente esquema se observa la cantidad aproximada de terrazas que se puede construir en un píxel contándose unas 5 terrazas.

$$\text{Número de píxeles} = \frac{124200\text{m}^2}{30\text{m} \times 30\text{m}}$$

$$\text{Número de píxeles} = 138$$

A partir de la proporción del esquema anexo:

$$1 \text{ píxeles} \longrightarrow 5 \text{ terrazas}$$

$$138 \text{ píxeles} \longrightarrow N \text{ terrazas}$$

$$\text{Número de terrazas (N)} = 690$$