

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS  
HIDROGRÁFICAS**



**“MITIGACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA PARA LA  
CONSERVACIÓN DEL SUELO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO  
ICHU, HUANCAVELICA”**

**Presentada por:**

**MABÉL YÉSICA ESCOBAR SOLDEVILLA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGÍSTER SCIENTIAE EN  
GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**Lima - Perú  
2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS  
HIDROGRÁFICAS**

**“MITIGACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA PARA LA  
CONSERVACIÓN DEL SUELO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO  
ICHU, HUANCAVELICA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGÍSTER SCIENTIAE**

**Presentada por:**

**MABÉL YÉSICA ESCOBAR SOLDEVILLA**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

Mg. Sc. Sebastián Santayana Vela  
**PRESIDENTE**

Ph. D Absalón Vásquez Villanueva  
**ASESOR**

Mg. Sc. Ricardo Apaella Nalvarte  
**MIEMBRO**

Mg. Sc. Cayo Leónidas Ramos Taipe  
**MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

A mi esposo, Max Henry, por su apoyo incondicional a lo largo del desarrollo de la tesis y a mis hijos: María Isabella y Max Francisco, por ser la fuerza que me impulsa a ser mejor día a día.

A mis padres, Silvia y Francisco, por darme el mejor regalo: su amor, esfuerzo y dedicación para ser una persona de bien.

A mis hermanas, Tania y Ledy, por su apoyo incondicional en todo este largo trayecto del desarrollo del trabajo de investigación.

A mi querida abuela doña Teodora y a la memoria de don Teodosio Soldevilla, mi abuelo que siempre predicó que el mejor regalo a un hijo es la educación.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por brindarme fe, salud y constancia para alcanzar mis metas.

A mi patrocinador de tesis, Ph. D. Absalón Vásquez Villanueva, por su orientación para la culminación de este trabajo de investigación.

A los miembros del Comité Consejero por el tiempo brindado para la revisión y orientación en el presente estudio.

A los docentes de la Maestría Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por compartir sus conocimientos y experiencia para crecer profesionalmente; así como, al personal administrativo por el apoyo brindado cada vez que se requirió.

A mi gran amigo y profesor, Marcelo Portuguez, quien me brindó consejos y orientación en el desarrollo este trabajo de investigación.

A mi familia, que siempre me motivó con una palabra de aliento para terminar con éxito este largo camino.

# ÍNDICE GENERAL

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
2.1	EROSIÓN DEL SUELO.....	4
2.2	EROSIÓN HÍDRICA.....	5
2.2.1	FACTORES EN LA EROSIÓN HÍDRICA.....	6
2.3	MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA.....	6
2.3.1	MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO....	6
2.3.2	ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO REVISADA RUSLE.....	8
2.3.3	DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE RUSLE.....	10
2.4	CONSERVACIÓN DEL SUELO.....	19
2.4.1	TOLERANCIA A LA PÉRDIDA DE SUELO.....	19
2.4.2	PRINCIPIOS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO.....	20
2.4.3	ACCESO A LA CONSERVACIÓN DEL SUELO.....	23
2.5	ETAPAS EN EL DESARROLLO DE UN MODELO.....	23
2.6	MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA.....	26
2.6.1	MODELOS EMPÍRICOS.....	27
2.6.2	MODELO CONCEPTUAL.....	28
2.6.3	MODELOS DE BASE FÍSICA.....	29
2.7	SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA – SIG.....	31
2.8	MODELO RÁSTER.....	31
2.8.1	MODELO DE SUPERFICIE.....	32
2.9	ALGEBRA DE MAPAS.....	33
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	35
3.2	MATERIALES Y EQUIPOS.....	38
3.3	METODOLOGÍA.....	39
3.3.1	DISPONIBILIDAD DE DATA.....	39
3.3.2	DESARROLLO DE LA BASE DE DATOS PARA EL MODELO RUSLE.....	49

3.3.3	MODELO CONCEPTUAL APLICADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DEL SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA .....	63
3.3.4	CLASES DE SEVERIDAD DE LA EROSIÓN DEL SUELO .....	63
3.3.5	PROPUESTA DE MITIGACIÓN PARA DISMINUIR LA PÉRDIDA DEL SUELO.	63
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSION.....</b>	<b>71</b>
4.1	DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES QUE INTEGRAN EL MODELO RUSLE ..	71
4.1.1	EROSIVIDAD DE LAS PRECIPITACIONES (FACTOR R).....	71
4.1.2	LONGITUD E INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE (FACTOR LS).....	75
4.1.3	FACTOR DE COBERTURA VEGETAL (FACTOR C) EN BASE AL ESTUDIO DE LA MESOZONIFICACIÓN ECOLÓGICA Y ECONÓMICA - 2013.....	77
4.1.4	FACTOR DE COBERTURA VEGETAL (FACTOR C) PARA EL AÑO 2018.....	80
4.1.5	FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO (FACTOR K).....	83
4.1.6	FACTOR P SIN PRÁCTICA DE CONSERVACIÓN .....	85
4.1.7	FACTOR P CON PRÁCTICA DE CONSERVACIÓN .....	87
4.2.	ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA UTILIZANDO EL MODELO RUSLE... 91	
4.2.1	ESCENARIO 1 – EN BASE AL ESTUDIO DE LA MESOZONIFICACIÓN ECOLÓGICA Y ECONÓMICA DEL DEPARTAMENTO HUANCVELICA – 2013, SIN PRÁCTICA DE CONSERVACIÓN .....	92
4.2.2	ESCENARIO 2 - EN BASE A IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2B – 2018, SIN PRÁCTICA DE CONSERVACIÓN .....	95
4.2.3	ESCENARIO 3 - EN BASE AL ESTUDIO DE LA MESOZONIFICACIÓN ECOLÓGICA Y DEL 2013, CON PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN .....	99
4.2.4	ESCENARIO 4 - EN BASE A IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2B DEL 2018, CON PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN.....	101
4.3	PROPUESTA PLANTEADA DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN PARA LA SUBCUENCA ICHU.....	104
4.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS BAJO DIFERENTES ESCENARIOS .....	112
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>118</b>
<b>VI.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>120</b>
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>121</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>127</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 : Factores en la erosión del suelo .....	6
Cuadro 2: Valores del factor LS para diferentes pendientes .....	16
Cuadro 3: Valores de cobertura vegetal (C) .....	18
Cuadro 4: Valores de prácticas de conservación (P) .....	19
Cuadro 5: Comparación de la descripción de los procesos en diferentes modelos de erosión .....	30
Cuadro 6: Información cartográfica .....	38
Cuadro 7: Estaciones pluviométricas .....	39
Cuadro 8: Clasificación del Índice de Fournier Modificado (IFM) .....	51
Cuadro 9: Resultados de la aplicación del índice de Fournier modificado para calcular los valores promedio del factor R mensual. ....	52
Cuadro 10: Correlación entre NDVI y Factor C .....	57
Cuadro 11: Prácticas de conservación recomendadas de acuerdo al uso de suelo.....	59
Cuadro 12: Factor de práctica de conservación P .....	60
Cuadro 13: Clases e indicadores de erosión del suelo.....	65
Cuadro 14: Precipitación promedio anual de estaciones y factor R en la subcuenca del río Ichu (Período: 1980 al 2014).....	73
Cuadro 15: Tipos de cobertura y sus valores del factor C para la subcuenca del río Ichu..	77
Cuadro 16: Tipos de cobertura y sus valores del factor C para la subcuenca del río Ichu..	81
Cuadro 17: Valores del factor K para los suelos según clasificación FAO.....	83
Cuadro 18: Valores del factor P estimado según rangos de pendientes .....	85
Cuadro 19: Valores del factor P estimado según rangos de pendientes .....	89
Cuadro 20 : Diferentes escenarios variando los factores C y P.....	91
Cuadro 21: Clases de severidad, en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica, 2013 sin práctica de conservación .....	94
Cuadro 22: Clases de severidad de la erosión del suelo según distritos, condición en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica sin práctica de conservación .....	94
Cuadro 23: Clases de severidad de la erosión del suelo en la subcuenca Ichu, condición actual sin práctica de conservación .....	98
Cuadro 24: Clases de severidad de la erosión del suelo según distritos, según Imágenes satelitales Sentinel 2B del 2018.....	98

Cuadro 25: Clases de severidad de la erosión del suelo, en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica del 2013, con práctica de conservación .....	99
Cuadro 26: Clases de severidad de la erosión del suelo según distritos, en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica del 2013, con práctica de conservación. .....	101
Cuadro 27: Clases de severidad de la erosión del suelo en la subcuenca Ichu, en base a imágenes satelitales Sentinel 2B del 2018, con práctica de conservación .....	102
Cuadro 28: Clases de severidad de la erosión del suelo según distritos, condición actual con práctica de conservación.....	104
Cuadro 29: Pérdida de suelo en hectáreas por grado de erosión del suelo para los diferentes escenarios en la subcuenca Ichu .....	113
Cuadro 30: Grado de erosión para los diferentes escenarios en la subcuenca Ichu .....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Factores y causas de la erosión de suelos y la interacción entre ellas .....	5
Figura 2: Estrategias para la conservación de suelos en tierras cultivadas. ....	22
Figura 3: Modelo de caja negra .....	24
Figura 4: Estructura de la ecuación universal de pérdida de suelo, caja gris. ....	25
Figura 5: Estructura EUROSEM: modelo que aspira a un modelo de caja blanca. ....	26
Figura 6: Modelo USLE .....	28
Figura 7: Aplicación del Algebra de Mapas.....	34
Figura 8: Mapa de ubicación – Subcuenca del río Ichu .....	37
Figura 9: Ubicación espacial de las estaciones meteorológicas .....	40
Figura 10: Modelo Digital de Elevación de la Subcuenca del río Ichu.....	42
Figura 11: Imagen de satélite del sensor Sentinel 2B, composición 843 del 20/06/20018. ....	44
Figura 12: Mapa temático de cobertura y uso del suelo en la subcuenca del río Ichu. ....	46
Figura 13 : Mapa temático de Suelo de la Subcuenca del río Ichu .....	48
Figura 14: Relación entre NDVI y el factor C .....	58
Figura 15: Mapa temático de Prácticas de Conservación de la Subcuenca del río Ichu .....	62
Figura 16: Mapa conceptual de la pérdida de suelo en la Subcuenca del río Ichu.....	63
Figura 17: Factor R mínimo, promedio y máximo por distritos.....	71
Figura 18: Mapa del Factor R en la Subcuenca del río Ichu .....	72
Figura 19: Mapa de Isoyetas media anual en la Subcuenca del río Ichu.....	74
Figura 20: Mapa del factor LS en la Subcuenca del río Ichu .....	76
Figura 21: Mapa del factor C en la Subcuenca del río Ichu .....	79
Figura 22: Mapa del factor C para el año 2018 en la Subcuenca del río Ichu.....	82
Figura 23: Mapa del factor K en la Subcuenca del río Ichu .....	84
Figura 24 : Factor P sin prácticas de conservación en la Subcuenca del río Ichu .....	86
Figura 25: Factor P con prácticas de conservación en la subcuenca del río Ichu .....	90
Figura 26: Clases de severidad de la erosión del suelo para el año 2013, sin práctica de conservación .....	93
Figura 27: Clases de severidad de la erosión del suelo para el año 2018, sin práctica de conservación. ....	97
Figura 28: Clases de severidad de la erosión del suelo para el año 2013, con práctica de conservación .....	100

Figura 29: Clases de severidad de la erosión del suelo para el año 2018, con práctica de conservación .....	103
Figura 30: Mapa de zonas prioritarias para la conservación de suelos de la subcuenca del río Ichu.....	111
Figura 31: Grados de erosión para los diferentes escenarios .....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Precipitación Multianual - Estación Huancalpi.....	127
Tabla 2: Precipitación Multianual - Estación Acostambo.....	128
Tabla 3: Precipitación media multianual – Estación Huancavelica .....	129
Tabla 4: Precipitación media multianual – Estación Lircay.....	130
Tabla 5: Precipitación media multianual – Estación Colcabamba .....	132
Tabla 6: Precipitación media multianual – Estación Choclococha .....	133
Tabla 7: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Huancalpi.....	134
Tabla 8: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Acostambo .....	135
Tabla 9: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Huancavelica.....	136
Tabla 10: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Lircay.....	137
Tabla 11: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Choclococha.....	138
Tabla 12: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Colcabamba .....	139
Tabla 13: Factor Rm en la Estación Huancalpi.....	141
Tabla 14: Factor Rm en la Estación Acostambo .....	142
Tabla 15: Factor Rm en la Estación Huancavelica.....	143
Tabla 16: Factor Rm en la Estación Lircay.....	144
Tabla 17: Factor Rm en la Estación Choclococha.....	145
Tabla 18: Factor Rm en la Estación Colcabamba.....	145

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: PRECIPITACIÓN MEDIA MULTIANUAL .....	127
ANEXO 2: CALCULO DEL FACTOR R (MÉTODO CON LA ECUACIÓN DE WISCHMEIER Y SMITH) .....	134
ANEXO 3: CÁLCULO DEL ÍNDICE DE FOURNIER MODIFICADO (MFIM).....	140
ANEXO 4: FACTOR $R_m$ .....	141
ANEXO 5: ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN DE PRECIPITACIÓN (PCI) .....	147
ANEXO 6: SEVERIDAD DE EROSIÓN A NIVEL DE DISTRITOS – ESCENARIO 1 .....	148
ANEXO 7: SEVERIDAD DE EROSIÓN A NIVEL DE DISTRITOS – ESCENARIO 2 .....	149
ANEXO 8: SEVERIDAD DE EROSIÓN A NIVEL DE DISTRITOS – ESCENARIO 3 .....	150
ANEXO 9: SEVERIDAD DE EROSIÓN A NIVEL DE DISTRITOS – ESCENARIO 4 .....	151

## RESUMEN

El suelo es uno de los recursos más importantes y más amenazados, de allí que la erosión del suelo no solo disminuye la productividad agrícola, sino también reduce la disponibilidad de agua, por lo que la evaluación del riesgo de erosión hídrica es primordial para promover estrategias de conservación. Para estimar la pérdida anual de suelo en la subcuenca del río Ichu se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), teledetección y herramientas SIG. Además, se utilizaron los programas QGIS 3.2 y Python, como herramienta de análisis y geoprocesamiento de los factores R, K, LS, C y P. Asimismo, mediante la información satelital Sentinel 2B se obtuvo el mapa actual de uso del suelo para determinar el nuevo factor C y se plantearon alternativas de prácticas de conservación generándose un nuevo factor P, por consiguiente, se propusieron cuatro escenarios de modelamiento. Los mapas resultantes de la erosión media anual del suelo muestran una pérdida de suelo de 22,7 a 23,7 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>. Al respecto, la primera se modeló con el factor de cobertura en base al estudio de mesozonificación ecológica y económica del Departamento de Huancavelica del 2013 y, la segunda, con el factor de cobertura actual del 2018, cuantificado en los escenarios 1 y 2, respectivamente. De esta manera, se planteó una propuesta de alternativas de prácticas de conservación que permitirán mitigar la pérdida de suelo, cuantificándose en 21,7 y 22,1 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> resultados correspondientes a los escenarios 3 y 4, en comparación a los escenarios 1 y 2, respectivamente, mostrando una disminución de la pérdida de suelo. Los mapas de erosión espacial generados con el método RUSLE para los diferentes escenarios serán insumos efectivos en la formulación de estrategias para la planificación y gestión de la tierra en las zonas de estudio.

**Palabras clave:** Erosión, modelos de erosión, erosión del suelo, RUSLE, subcuenca Ichu, mitigación.

## ABSTRACT

Soil is one of the most important and most threatened resources, soil erosion not only decreases agricultural productivity, but also reduces water availability, so assessing the risk of water erosion is paramount to promote strategies conservation facilities. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), remote sensing, and GIS tools were used to estimate the annual soil loss in the Ichu River Subbasin. QGIS 3.2 and Python programs were used as a tool for analyzing and geoprocessing factors R, K, LS, C, and P. In addition, with Sentinel 2B satellite information the current land-use map was obtained, to determine the new factor C, as well as alternatives of conservation practices generating a new factor P, therefore four scenarios of Modeling. The maps resulting from the annual average soil erosion show a soil loss of 22.7 and 23.7 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, the first is modeled with the coverage factor based on the study of Ecological, Economic Mesozonification, of the Department of Huancavelica del 2013 and the second with the current coverage factor for 2018, quantified in Scenarios 1 and 2, respectively. Therefore, a proposal for alternatives to conservation practices were put forward to mitigate soil loss, quantified at 21.7 and 22.1 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> results for Scenarios 3 and 4, compared to scenario 1 and 2, respectively, showing a decrease in soil loss. Spatial erosion maps generated with the RUSLE method for the different scenarios will be effective inputs in the formulation of strategies for land planning and management in the study areas.

**Key words:** Erosion, erosion models, soil erosion, RUSLE, Ichu subbasin, mitigation.

## I. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural esencial que se está degradando a una escala sin precedentes, tanto en proporción como en extensión geográfica. La degradación varía desde la pérdida de suelo y materia orgánica a través de la erosión, hasta la acumulación de solutos como la salinización del suelo (Boardman y Favis-Mortlock 2012).

Asimismo, la erosión del suelo es un problema fundamental en los países en general, específicamente en Etiopía, con un gran impacto en la calidad del suelo, la productividad de la tierra, la contaminación del agua y la sedimentación (Tamene *et al.* 2017).

La erosión abarca una amplia gama de procesos que implican desprendimiento y transporte del suelo debido a fuerzas que actúan sobre la superficie de la tierra. Para cuantificar estos procesos se recurre a modelos que permitan investigar los procesos físicos y mecanismos que gobiernan las tasas de erosión, así como, identificar áreas de alto riesgo de pérdida de suelo, para ayudar en la planificación de la conservación (Mitasova *et al.* 2013).

Wongchuig *et al.* (2016) indicaron que respecto a la erosión del suelo, países como Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay son responsables de un promedio del 46 por ciento de la extensión total de los suelos degradados por diferentes agentes de erosión. Según la Agencia de Desarrollo de Tierras Agrícolas de Japón, la productividad agrícola en América del Sur ha disminuido debido a la erosión del suelo, que ha estado acelerando la degradación de los recursos naturales en esta región.

En el Perú, principalmente en las partes altas, que corresponden a la región de la sierra, el principal factor de degradación del suelo es la erosión hídrica. El daño generado por este fenómeno en zonas montañosas, de pendientes irregulares y escarpadas se hace cada vez más evidente, debido a que los fenómenos climáticos son más intensos e irregulares.

El suelo agrícola dañado va perdiendo su capacidad productiva, como consecuencia de un aprovechamiento por uso y sobreuso del mismo. Algunas de las razones son la tala indiscriminada, el sobrepastoreo y las malas prácticas de uso de suelo, por consiguiente, se generan problemas económicos, sociales y ecológicos (Portuguez, 2015).

Para hacer frente a los daños causados por la erosión en los lugares de interés, es necesario disponer de información adecuada sobre la cantidad de pérdida de suelo, así como, la distribución espacial de los principales lugares erosionados. Debido a que existe gran diferencia espacial en la tasa de erosión de las diferentes unidades del paisaje y la aplicación de medidas de conservación a todas las áreas afectadas por la erosión, las medidas de conservación que podrían priorizarse deben dirigirse hacia áreas críticas y utilizando estrategias que experimentan una alta pérdida de suelo. Por lo tanto, la identificación de áreas afectadas por la erosión es muy importante desde el punto de vista económico, de gestión y de sostenibilidad (Tamene *et al.* 2017).

Para estimar la pérdida media anual de suelo generada por el impacto de la lluvia y la escorrentía de aguas superficiales, se ha utilizado el modelo empírico de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE); sin embargo, la aplicación de esta ecuación en áreas con pendientes pronunciadas tiene limitaciones. Al respecto, Oliveira *et al.*, citado por Wongchuig *et al.* (2016), señala que la ecuación de RUSLE es un modelo más adecuado para cuencas hidrográficas que la ecuación USLE al proporcionar revisiones fundamentales para caracterizar el factor topográfico LS.

Es importante mencionar que RUSLE está basado en la ecuación USLE y lo descrito por Tanyaş *et al.* (2015), quien manifiesta que los sistemas de información geográfica (SIG) han desarrollado un avance muy destacado al proporcionar herramientas para la aplicación de modelos distribuidos de erosión del suelo, ocasionados por efecto de la precipitación.

Siendo así, el presente trabajo de investigación plantea una propuesta para mitigar la erosión hídrica y conservar el suelo en la subcuenca del río Ichu, ubicado en la región de Huancavelica. Para tal propósito, se utiliza tecnología geoespacial que permita detectar y cartografiar zonas vulnerables a este fenómeno natural.

## OBJETIVO GENERAL

- Plantear una propuesta de mitigación de la erosión hídrica para la conservación del suelo en la subcuenca del río Ichu –Huancavelica.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Estimar la erosión hídrica de la subcuenca del río Ichu, con información cartográfica del estudio de la Mesozonificación Ecológica, Económica del departamento de Huancavelica del 2013, utilizando modelo RUSLE.
- Estimar la erosión hídrica de la subcuenca del río Ichu, en condición actual de uso del suelo, generado a partir de imágenes de satélite del 2018, utilizando modelo RUSLE.
- Plantear una propuesta de mitigación que permita disminuir la pérdida del suelo por erosión hídrica.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 EROSIÓN DEL SUELO

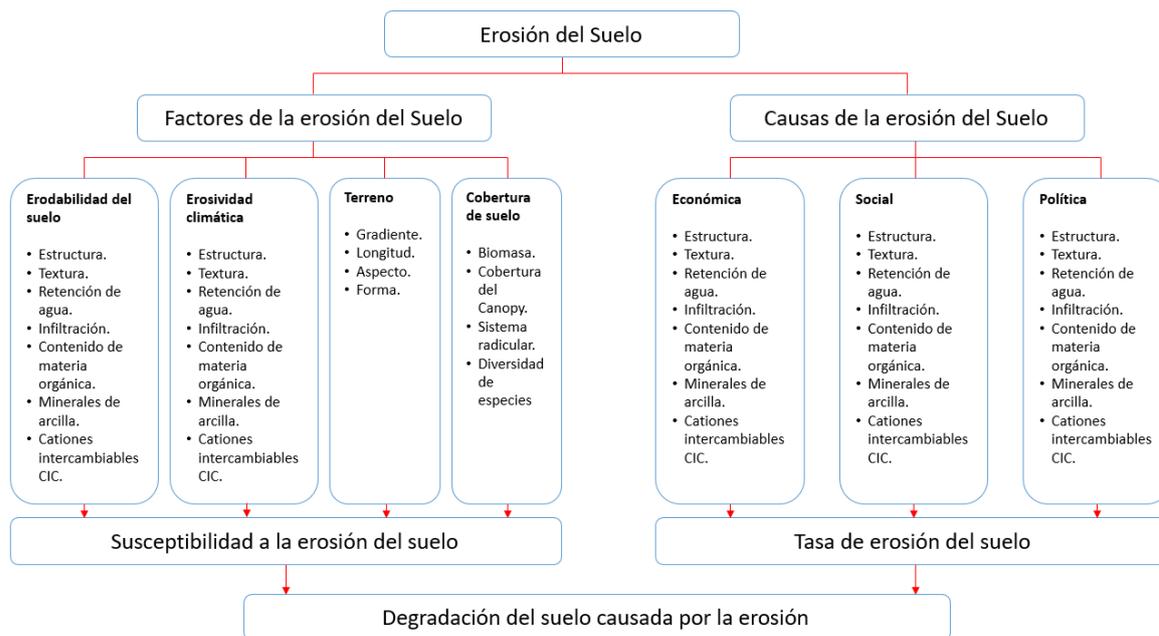
La erosión del suelo es un problema devastador en varios países. En el Perú a pesar de tener muy escasas tierras agrícolas y pecuarias, se produce una continua degradación por la combinación de factores naturales y las malas técnicas empleadas en la agricultura y la ganadería, es así que una de las regiones que presenta las más altas tasas de pérdidas de suelos por erosión hídrica es la sierra, en tal sentido según el estudio realizado en el año 1996 por el INRENA en donde se determinó que en el 41,40 por ciento del territorio nacional se genera una erosión hídrica nula o ligera de las cuales solo el 1,20 por ciento corresponde a la sierra, así también el 27,40 por ciento del territorio nacional generan erosión moderada de los cuales el 11 por ciento corresponde a la sierra, el 24,40 por ciento erosión alta de los cuales el 11,50 por ciento corresponde a la sierra y 6,4 por ciento del territorio nacional con erosión hídrica muy alta de los cuales 4,20 por ciento pertenecientes a la sierra. (Solano 2016)

En la tecnología de la erosión de suelos los términos de la erosión de suelos, la pérdida de suelos y la acumulación de sedimentos tienen significados distintos:

- Erosión de suelos: cantidad bruta de suelo retirado por la acción dispersante de las gotas de lluvia y por la escorrentía. Se mide en forma de caudal de sedimentos, por lo tanto, su unidad de medida es  $m^3$ .
- Pérdida de suelo: suelo desprendido de una pendiente determinada. Se mide en mm de suelo desprendido por  $m^2$  de superficie de estudio ( $mm/m^2$ )
- Acumulación de sedimentos: Volumen de suelo depositado en un punto que está bajo evaluación. Al igual que la erosión, la deposición se mide en  $m^3$ .

El riesgo de erosión del suelo depende de los factores ambientales, humanos y del efecto erosivo en los ecosistemas naturales, de los sistemas agrícolas o forestales (Lal, 1994). En general, el clima y la topografía son las primeras causas de la erosión (Cuadro 1); sin embargo, el manejo inadecuado de la tierra y, en particular, las prácticas agrícolas intensivas son las principales responsables de la erosión y la degradación a nivel mundial.

Por todo lo anterior, la deforestación, el pastoreo excesivo, y la alteración de la labranza conducen a un suelo sin cobertura, inestabilidad en su estructura, menores tasas de infiltración y baja fertilidad. Al respecto, Tebrugge y During (1999) señalaron que las alteraciones mecánicas por prácticas de labranza de inversión afectan las propiedades del suelo, específicamente por la alteración de la agregación del suelo y por el enterramiento de los residuos del cultivo. Esto se puede observar en la Figura 1.



**Figura 1: Factores y causas de la erosión de suelos y la interacción entre ellas**

FUENTE: Lal 2001

## 2.2 EROSIÓN HÍDRICA

La erosión del suelo por acción del agua (erosión hídrica) es la separación, el transporte y la sedimentación de las partículas del suelo por el flujo de agua (escurrimiento) en laderas y taludes. Después de lluvias intensas y eventos de escorrentía, puede tomar la forma de flujo concentrado.

La cantidad de desprendimiento del suelo, dependerá de la energía erosiva del agua (volumen y velocidad), además del grado de inclinación y la longitud de la pendiente que afectan el potencial erosivo. Y, si no hay un adecuado control y manejo, puede conducir a otros problemas en el suelo, como la pérdida de fertilidad, la degradación de la estructura del lecho de siembra y la disminución de la tasa de infiltración.

## 2.2.1 FACTORES EN LA EROSIÓN HÍDRICA

Según Subramanya (2008), la cantidad de sedimentos que se produce por la erosión en una cuenca depende, sobre todo, de factores relacionados con el clima, suelo, topografía, cobertura, uso del suelo y actividades humanas realizadas en la cuenca. Los mayores efectos de estos parámetros son resumidos en el Cuadro 1.

**Cuadro 1 : Factores en la erosión del suelo**

<b>Factor</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Efecto</b>
Clima	Intensidad de precipitación	Erosión por salpicadura
	Duración de precipitación	Erosión en el flujo
	Temperatura	Acción de intemperie
Características del suelo	Característica de suelo (granulación, porosidad, contenido de humedad)	Tasa de infiltración y escorrentía, por lo tanto, tasa de erosión
	Tamaño y forma	Tasa de erosión y modo de transporte
Topografía	Pendiente (orientación, grado y longitudes)	Pendiente pronunciada: mayor energía de flujo, mayor erosión y tasa de transporte.
Cobertura del suelo	Cobertura vegetal/planta	Retraso de tasa de flujo y erosión, protección de la erosión por salpicadura.
Uso del suelo (actividades humanas)	Prácticas agronómicas y/o mineras, construcción de caminos y edificios, etc.	Incremento de tasa de erosión
	reservorios	Sedimentación

Fuente: Subramanya (2008)

## 2.3 MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA

### 2.3.1 MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO

Los modelos son usados para estimar la tasa de erosión del suelo. La modelación de la erosión del suelo puede considerar muchas de las interacciones complejas que influyen en las tasas de erosión al simular los procesos de erosión en la cuenca. Muchos modelos paramétricos, como los empíricos (estadísticos/métricos), conceptuales (semiempíricos) y basados en procesos físicos (determinísticos) están disponibles para calcular la pérdida de suelo.

Los modelos empíricos son los más simples de los tres tipos de modelos porque son de naturaleza estadística, se basan principalmente en el análisis de observaciones y buscan caracterizar la respuesta de estos datos. Los requisitos de datos para tales modelos son generalmente menores en comparación con los modelos conceptuales y físicos. Por su parte, los modelos conceptuales desempeñan un papel intermedio entre los modelos empíricos y los basados en procesos físicos. Los modelos basados en procesos físicos tienen en cuenta la combinación de los componentes individuales que afectan la erosión, incluidas las complejas interacciones entre diversos factores y su variabilidad espacial y temporal. Estos modelos son comparativamente sobre parametrizados (Patil, 2018a).

Para estimar la pérdida de suelos, la mayoría de estos modelos requiere información relacionada con el tipo de suelo, el uso de la tierra, relieve, clima y topografía.

Los modelos están diseñados para un conjunto específico de condiciones relacionadas con el área en particular. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), formulada por Wischmeier y Smith, en 1965, fue un modelo pionero para estimar la pérdida de suelo por erosión laminar y en surcos en condiciones específicas de los campos agrícolas, así como, producir mapas de riesgo de erosión del suelo y apoyar prácticas de conservación del suelo. A pesar de su estructura empírica tiene restricciones en la calibración y validación de la base de datos en comparación con otros modelos (Oliveira *et al.* 2014; Mello *et al.* 2015). La ecuación universal de pérdida de suelo modificada (MUSLE) de Williams y Berndt de 1972 es una versión modificada de USLE, que se aplica a otras condiciones al introducir el factor de escorrentía para la estimación del rendimiento de sedimentos. El Proyecto de predicción de la erosión del agua WEPP es un modelo de simulación continua basado en procesos desarrollados para reemplazar al modelo USLE. La simulación de respuesta al medioambiente de cuencas hidrográficas ANSWERS fue diseñada para calcular la erosión del suelo dentro de una cuenca. El modelo europeo de erosión del suelo EUROSEM se basa en un solo proceso para evaluar y predecir el riesgo de erosión del suelo en campos y pequeñas cuencas. El modelo de Morgan, Morgan y Finney (MMF) es de tipo empírico desarrollado para la estimación anual de la pérdida de suelo promedio de áreas de tamaño de campo en pendientes de colinas que tienen una base física fuerte (Morgan *et al.* 1999).

Por otra parte, USLE, es el modelo matemático más simple que se ha utilizado en todo el mundo desde la década de 1960 y sirve para estimar la pérdida anual de suelo. Para obtener

información rápida y eficiente con respecto a la pérdida de suelo, a menudo se utiliza una integración GIS-USLE. Asimismo, la USLE estima las pérdidas promedio de suelo a largo plazo de las cuencas hidrográficas y es probable que la USLE siga siendo el método más simple disponible para realizar estudios de erosión del suelo en grandes cuencas. Muchos investigadores han opinado sobre el uso extensivo de la USLE a gran escala (Patil, 2018a).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) fue un modelo pionero en un intento de predecir la erosión del suelo, producir mapas de riesgo de erosión del suelo y apoyar prácticas de conservación del suelo. A pesar de su estructura empírica utilizada en este modelo tiene restricciones en la calibración y validación de base de datos en comparación con otros modelos (Oliveira *et al.* 2014; Mello *et al.* 2015).

El modelo RUSLE contiene mejoras significativas en la estimación de los factores pasivos asociados con la erosión del suelo, especialmente el factor topográfico. Asimismo, se ha aplicado para estudiar los impactos del cambio climático con la erosión del suelo (Mello *et al.* 2015).

### **2.3.2 ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO REVISADA RUSLE**

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) fue desarrollada para superar algunas de las limitaciones de la USLE, que usa la misma forma y factores, con coeficientes revisados y está disponible con aplicaciones para un rango más amplio de condiciones y lugares que el USLE original, aunque se basa en relaciones empíricas (Renard *et al.* 1997). De acuerdo con Oliveira *et al.* (2014), RUSLE es un modelo más adecuado para cuencas hidrográficas que USLE, al proporcionar revisiones fundamentales para caracterizar el factor topográfico LS. Por lo tanto, la principal ventaja está relacionada con el ajuste del factor topográfico para varias condiciones de la pendiente, considerando la contribución de las zonas aguas arriba hacia aguas abajo, por medio de un mapa de acumulación de flujo.

Al respecto, este modelo ya ha sido probado y validado en diversas condiciones de gestión del suelo, clima y agronomía (Mitasova *et al.* 2013; Oliveira *et al.* 2014). La mayoría de estos estudios han demostrado un rendimiento razonable en la caracterización cualitativa del riesgo de la erosión del suelo, especialmente cuando está integrado en un Sistema de Información Geográfica (SIG), pues permite mejoras consistentes en su desempeño. Pese a

las limitaciones con RUSLE es posible resaltar una evolución metodológica asociada con las estimaciones de los factores topográficos y el uso de una herramienta de álgebra de mapas para sobreponer las capas de los factores de la ecuación (Segura *et al.* 2014).

En este sentido, numerosas contribuciones se han hecho utilizando el RUSLE asociado a los Sistemas de Información Geográfica, algunas de las cuales hacen referencia a las de Wongchuig *et al.* (2016), quien obtuvo resultados razonables en torno a la erosión del suelo, lo cual valida al modelo a ser utilizado en nuestra área de estudio.

Oliveira *et al.* (2014) considera que la ecuación RUSLE se basa en la multiplicación de seis factores: R (erosividad de la lluvia); K (erodabilidad del suelo); L (longitud de la pendiente); S (inclinación de la pendiente); C (cobertura y manejo de vegetación) y P (prácticas de control de la erosión).

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

Donde:

A: Pérdida anual promedio de suelo por unidad de área  $\left(\frac{\text{toneladas métricas}}{\text{hectárea} \cdot \text{año}}\right)$  o  $\left(\frac{t}{\text{ha} \cdot \text{año}}\right)$

R: Factor de erosividad media anual de precipitación, que es la suma de los valores individuales de erosividad de la tormenta,  $EI_{30}$  ( $E$  es la energía total de una tormenta e  $I_{30}$  la intensidad máxima de la tormenta de 30 minutos), para tormentas clasificadas durante un período de tiempo. La unidad de medida es:

$$\left(\frac{\text{Megajoule} \cdot \text{milímetros}}{\text{hectárea} \cdot \text{hora} \cdot \text{año}}\right) \text{ o } \left(\frac{\text{MJ} \cdot \text{mm}}{\text{ha} \cdot \text{hr} \cdot \text{año}}\right)$$

K: Factor de erodabilidad del suelo, tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosión para un suelo específico, medida en una parcela estándar - que se define como una longitud de 72.6 pies (22.1 m) de pendiente uniforme del 9 por ciento en barbecho de labranza limpia continua. La unidad de medida es:

$$\left(\frac{\text{toneladas métricas} \cdot \text{hectárea} \cdot \text{hora}}{\text{hectárea} \cdot \text{megajoule} \cdot \text{milímetros}}\right) \text{ o } \left(\frac{t \cdot \text{ha} \cdot \text{hr}}{\text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}}\right)$$

L y S: Factores asociados a la longitud e inclinación de la pendiente, respectivamente (adimensional).

*C*: Factor de cobertura vegetal (adimensional); la relación de pérdida de suelo de un área con cobertura de suelo de un área idéntica en barbecho continuo labrado.

*P*: Factor de prácticas de conservación (adimensional); la relación entre la pérdida de suelo y una práctica de conservación, como el contorno, los cultivos en franjas o la creación de terrazas a la pérdida de suelo con el cultivo en hilera recta hacia arriba y hacia abajo de la pendiente.

Teniendo en cuenta lo anterior, RUSLE estima la erosión media anual o estacional del suelo a largo plazo para combinaciones específicas de condiciones físicas y de manejo.

### 2.3.3 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE RUSLE

#### a) Factor R

Wischmeier y Smith, citado por Renard y Freimund (1994), indican que el factor de erosividad de la lluvia es el número de unidades del índice de erosión pluvial (EI) y, a la vez, una indicación de las dos características más importantes de una tormenta que determina su erosividad, es decir, la cantidad de lluvia y la intensidad máxima sostenida durante un período prolongado.

Según lo anterior, la precipitación como agente erosivo del suelo se refleja básicamente mediante el impacto de las gotas de lluvia y la tensión ejercida por el escurrimiento, lo que permite la disgregación del suelo (Angulo y Beguería, 2013).

En el modelo RUSLE, al igual que en el modelo USLE original, se calcula como el producto de la energía pluvial (*E*) y la intensidad máxima de lluvia de 30 min (*I*<sub>30</sub>). Sin embargo, el factor R en una ubicación particular se calcula como el promedio de los valores anuales de EI<sub>30</sub> en intervalos de periodos largos (más de 20 años) para incluir patrones aparentes de lluvia cíclica.

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j$$

Donde:

*R*: Factor de erosividad (MJ mm·ha<sup>-1</sup>·hr<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>).

*E*: Energía cinética total de la tormenta (MJ ha<sup>-1</sup>).

$I_{30}$ : Intensidad máxima de lluvia en 30 min ( $\text{mm hr}^{-1}$ ).

$j$ : Índice del número de años utilizados para producir el promedio.

$k$ : Índice del número de tormentas en cada año.

$m$ : Número de eventos de precipitación individuales en un año dado  $j$ .

$n$ : Número de años utilizados para obtener  $R$ .

En relación con esta información, Renard y Freimund (1994) consideran que es recomendable calcular la energía cinética de la misma con base en la formulación que Brown y Foster propusieron en 1987, que depende de la energía unitaria.

$$E = \sum_{K=1}^m e_m \cdot \Delta V_k$$

Donde:

$e_m$ : Energía cinética unitaria ( $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ).

$\Delta V_k$ : Precipitación unitaria de cada segmento de intensidad constante en el que se ha dividido el evento (mm).

La energía cinética total se obtiene de la sumatoria de la energía de cada segmento de intensidad constante que se puede calcular utilizando la relación.

$$e_m = 0.29 \cdot (1 - 0.72 e^{(-0.05 \cdot I_m)})$$

Donde:

$I_m$ : Intensidad promedio de todos los segmentos en donde se divide el evento ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

Cualquier precipitación que caiga en forma de nieve no tiene ningún significado con respecto a la “ $EI_{30}$ ” y, por lo tanto, no está incluida en los cálculos del factor  $R$ .

Una fórmula alternativa desarrollada por Wischmeier y Smith (1978) y modificada por Arnoldus (1980) implica solo precipitación anual y mensual para determinar la ecuación del factor  $R$  ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ).

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

Donde:

$P_i$ : Precipitación mensual (mm).

$P$ : Precipitación anual (mm).

Esta ecuación obtuvo buenos resultados en las investigaciones de Abdul *et al.* (2015) y Abdo (2017).

Otra manera para la estimación del factor “R”, es por medio de la ecuación de Arnouldus (1980) basado en trabajos de Fournier. Es un método práctico que utiliza una fórmula obtenida por regresión lineal en la cual correlacionó valores conocidos de R con las lluvias medias anuales.

$$R = a. \sum (p^2/P) + b$$

Donde:

*a* y *b*: Constantes que consideran las condiciones climáticas locales.

$\sum (p^2/P)$ : Índice Modificado de Fournier (MFI) o Índice FAO; siendo  $p^2$ , la precipitación media mensual, y P la precipitación media anual.

Este índice fue utilizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO, en la elaboración del mapa universal de degradación de suelos. Las principales ventajas que muestra, son el empleo de datos meteorológicos simples y una buena correlación con valores medidos del factor R. Esta ecuación se probó en diferentes regiones del mundo obteniéndose, en general, un alto grado de correlación (0,89).

Otros autores propusieron diferentes algoritmos dependiendo de la zona de estudio donde se encontraban, en Australia. (Renard y Freimund, 1994).

#### b) **Factor K**

Este factor indica la resistencia de los tipos de suelo con respecto a los procesos de erosión, como el impacto de la lluvia y la escorrentía (Zuazo *et al.* 2011). En ese sentido, el factor K relaciona la velocidad de la erosión debido a las propiedades del suelo y se define por mediciones de pérdida de suelo en una unidad de parcela sin cubierta vegetal. Estos generalmente se determinan en parcelas experimentales especiales de escurrimiento o mediante el uso de ecuaciones de erodabilidad empírica que relacionan varias propiedades del suelo con el factor K.

El MINAG (Ministerio de Agricultura del Perú) y hoy conocido como MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego) desarrolló en 1978 un estudio edafológico en áreas con buen potencial agrícola en la cuenca del río Mantaro, conocido como el "Valle Agrícola del Río Mantaro" (MRAV). Esta zona cuenta con suelos y características

climáticas apropiadas para la actividad agrícola. Asimismo, se encuentra en la parte media de la cuenca con altitudes que varían desde los 3200 a 3800 m.s.n.m., una topografía que varía de plana a ondulada con suaves gradientes en promedio y una precipitación anual que varía entre 670 y 895 mm. Este estudio clasificó los suelos de MRAV en seis grupos y diferentes subgrupos. De esta información se conoce la distribución del tamaño de partícula y los valores de la materia orgánica que contienen dichos suelos, la permeabilidad y los códigos de estructura del suelo, lo que permite una estimación del factor K con base en las siguientes ecuaciones (Wischmeier y Smith, citado por Wongchuig *et al.* 2016).

$$K = \frac{[(2.1 \cdot M^{1.14} \cdot 10^{-4} \cdot (12 - SOM) + 3.25 \cdot (s - 2) + 2.5 \cdot (p - 3))]}{100} \times 0.1318$$

Donde:

K: Factor erodabilidad del suelo  $\left(\frac{t \cdot ha \cdot hr}{ha \cdot MJ \cdot mm}\right)$

SOM: Corresponde al contenido de materia orgánica del suelo (%)

s: Código de estructura del suelo

p: Código de permeabilidad del suelo

M: Factor calculado como el producto de las fracciones del tamaño de partícula del suelo entre 0.002 y 0.1 mm, se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$M = [100 - \% \text{Arcilla}] \cdot [\% \text{Limo} + \% \text{Arena muy fina}]$$

### c) **Factor LS**

El modelo RUSLE y su aplicación en cuencas hidrográficas tiene en cuenta la influencia de las características topográficas sobre la pérdida de suelo y es descrita en la longitud y el grado de la pendiente del factor LS.

Los efectos combinados de la longitud de la pendiente (L) y el grado de inclinación de la pendiente (S) son también conocidos como el factor topográfico (LS) y caracterizan el tipo de relieve en que tendrán lugar los procesos de pérdida de suelo, debido a la inclinación y longitud; además de proporcionar información sobre la forma de la pendiente (Renard *et al.* 1997). Los mismos autores sugieren que la comprensión de las formas del paisaje puede ayudar en la identificación de las rutas preferidas de los flujos de agua y la variabilidad espacial de las propiedades del suelo.

Por otra parte, existen cuatro métodos para calcular el valor de este factor. La primera ecuación desarrollada por Wischmeier y Smith (1978); la segunda por McCool *et al.* (1989) y Moore y Wilson (1992); la tercera, por McCool *et al.* (1987); y la última, por Elwell (1978).

$$L.S = \left(\frac{sl}{22.13}\right)^n (0.065 + 0.045ss + 0.0065ss^2) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

sl: Longitud de la ladera en metros (máximo 100).

ss: Pendiente de la ladera en porcentaje (máximo 20 %).

n: Valor que varía en función de la pendiente. n = 0.5 para pendientes > 5 %, n = 0.4 para pendientes entre 3 a 5 %, n = 0.3 para pendientes entre 1 a 3 %, y n = 0.2 para pendientes menores a 1 %.

$$L.S = \left(\frac{sl}{22.13}\right)^m (10.8 \sin \beta + 0.03) \text{ en pendientes } < 9.0\%; \text{ y}$$

$$L.S = \left(\frac{sl}{22.13}\right)^m (16.8 \sin \beta - 0.5) \text{ en pendientes } \geq 9.0\%, \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

sl: Longitud de la ladera (m).

$\beta$ : Pendiente de la ladera en grados.

m: Varía con la pendiente.  $m = f / (1 + f)$ ;  $f = (\sin \beta / 0.0896) / (3 \sin^{0.8} \beta + 0.56)$ .

$$L.S = (sl/22.13)^{0.5} (0.172ss - 0.55) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

sl: Longitud de la ladera (m)

ss: Pendiente de la ladera (%)

$$L.S = \text{sqrt}(sl) * (0.76 + 0.53ss + 0.076ss^2) / 25.65 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

sl: Longitud de la ladera (m).

ss: Pendiente de la ladera (%).

Según Soe *et al.* (2009), el cálculo del factor “LS” basado en las cuatro ecuaciones anteriores mostró mejores resultados en el segundo método, en comparación con los otros, donde se obtuvieron valores altos para pendientes pronunciadas.

Así también, el cálculo del factor LS se calcula a partir del uso de los Sistemas de Información Geográfica SIG.

La creciente disponibilidad de bases topográficas digitales, junto con el uso de los SIG, ha impulsado el desarrollo de la extracción automática de las variables topográficas. En términos operacionales y desde el punto de vista económico, con el uso de las geotecnologías en la caracterización del factor LS, el trabajo de campo es menos intensivo, ahorrando tiempo y recursos. Se recomienda, por tanto, que se concedan mayores esfuerzos al desarrollo de métodos para la obtención de las variables topográficas y el factor LS en ambiente SIG (Moore *et al.* 1991).

El modelo digital del terreno (MDT o MDE) es la base que permite los análisis necesarios para la realización de los estudios del relieve en general. A partir de éste, es posible determinar las pendientes, las exposiciones del terreno al sol y otros análisis, siempre que sea necesario. El uso de las curvas hipsométricas y puntos de altimetría, con la extensión 3D *Analyst*, y el método de interpolación TIN (*triangular irregular Red*), se genera el MDE.

De igual forma, el uso de los *MDEs* consiste fundamentalmente en la obtención de variables derivadas de la altimetría. Con la creciente disponibilidad de bases topográficas digitales, aliada a la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se convierte en estratégico el desarrollo de métodos automáticos para la extracción y el análisis de las variables topográficas, para su posterior procesamiento e integración en un ambiente computacional. Estas variables pueden ser utilizadas para proporcionar variables no locales (ancho, distancia del drenaje y mediciones de densidad de drenaje), que a su vez pueden proporcionar variables de mayor significado físico, tales como la detección de llanura de inundación y mapeo de los índices topográficos (Moore *et al.* 1993).

Según Ramos, citado por Portuguez (2015), para la elaboración de un mapa de pendientes, en el marco de un SIG, se requiere un modelo digital del terreno MDT o DEM (*Digital Elevation Model*). El Cuadro 2, muestra los valores que se asigna al factor LS de acuerdo al

grado de pendiente, elaborado por la Facultad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (Madrid).

**Cuadro 2: Valores del factor LS para diferentes pendientes**

<b>Grupos de pendientes en %</b>	<b>Factor LS</b>
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
> 100	28.5

FUENTE: Portuguez (2015)

Son diversos los algoritmos desarrollados en el flujo acumulado por celda con la corrección del tamaño de la celda, basados en un modelo de elevación digital - DEM para determinar la longitud del flujo superficial acumulado y, por lo tanto, el factor LS. Estas nuevas relaciones basadas en la teoría del poder de la corriente unitaria “*Unit Stream Power*”, es más correcta para paisajes con topografía compleja que la ecuación empírica original dada por Wischmeier y Smith (1978), ya que cuenta de forma explícita con el flujo de convergencia y divergencia. Adicionalmente, fueron aplicadas por Pelton *et al.* (2012) y Ashiagbor *et al.* (2013), reemplazando la longitud de la pendiente (L) por el área de distribución ascendente por unidad de ancho.

De igual modo, el concepto de distribución de área requiere la generación de un mapa de flujo acumulativo. Para cada píxel, se calculan la pendiente, la dirección del flujo y la cantidad de líneas de flujo acumuladas aguas arriba de ese píxel. Por lo tanto, la aplicación de algoritmos asociados con los sistemas de información geográfica (SIG) es un gran avance para calcular el factor LS en el modelo de RUSLE.

**d) Factor C**

Es definido por Patil y Sharma (2013) como el efecto protector de las plantas sobre la cubierta del suelo. En relación con ello, las plantas pueden reducir la velocidad de la

escorrentía y proteger poros superficiales para disminuir el efecto erosivo de la lluvia e incorpora la influencia de las actividades humanas. Así, el Factor C indica la acción de las prácticas de cultivo y de gestión en el suelo a través de los planes de conservación, rotación de cultivos u otros esquemas de gestión. Para determinar los valores de C en el mapa es necesario obtener información detallada sobre la capa temática de cobertura, la fenología de la vegetación y la distribución de las precipitaciones erosivas durante todo el año. De acuerdo con esto, el Cuadro 3 muestra los valores de cobertura vegetal para los tipos comunes de cultivos y las diferentes coberturas (Wischmeier y Smith 1978, citados por Wongchuig *et al.* 2016).

Como se observa en el cuadro anterior, los valores del factor “C” en el modelo RUSLE oscilan entre cero y uno. Este último valor corresponde a las áreas sin vegetación (suelos desnudos). Asimismo, con el incremento de la densidad de la cobertura vegetal, el valor de “C” tiende a disminuir, lo que reduce el efecto de las precipitaciones en el suelo.

En la actualidad, el uso de los sistemas de información geográfica son útiles para el cálculo de este factor haciendo uso del Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI), ya que según Kabo-bah *et al.* (2013), este implica el uso de datos de teledetección basado en la absorción, la transmisión y la reflectancia de la energía por la vegetación que se correlaciona significativamente con la cantidad de biomasa de hoja verde en el suelo. Por consiguiente, el desarrollo de índices de vegetación a partir de los valores de brillo se basa 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. A partir de este comportamiento diferencial se han desarrollado varios índices para estudiar el comportamiento de la cobertura vegetal.

**Cuadro 3: Valores de cobertura vegetal (C)**

<b>Cultivo y práctica</b>	<b>Media anual del factor C</b>
Suelo desnudo	1.0
Bosque o matorral denso (alto mulch)	0.001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Pradera sobre pastoreada	0.1
Maíz, sorgo, alto rendimiento, laboreo convencional	0.20 – 0.55
Maíz, sorgo, alto rendimiento, sin laboreo convencional	0.50 – 0.90
Maíz, sorgo, bajo rendimiento, laboreo mínimo	0.02 – 0.10
Maíz, sorgo, alto rendimiento, laboreo con chisel	0.12 – 0.20
Maíz, sorgo, bajo rendimiento, laboreo con chisel	0.30 – 0.45
Algodón	0.40 – 0.70
Pradera herbácea	0.01 – 0.025
Soya	0.20 – 0.50
Trigo	0.10 – 0.40
Arroz	0.10 – 0.20
Cacahuete	0.30 – 0.80
Frutales con cobertura vegetal	0.01 – 0.8
Caña de azúcar	0.56
Arbolado denso	0.001-0.003
Arbolado forestal clareado	0.003-0.009
Arbolado muy clareado (25-60 %)	0.041
Matorral con buena cobertura	0.003-0,013
Matorral ralo y eriales	0.20-0.013
Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Pasturas	0.15
Plantas herbáceas y matojos (100 %)	0.003
Plantas herbáceas y matojos (60 %)	0.035
Cubierta escasa (60 %)	0.15-0.09
Cubierta inapreciable	0.45

FUENTE: Wischmeier y Smith (1978) citado por Wongchuig *et al.* (2016)

e) **Factor P**

El factor de prácticas de conservación, representa cómo la superficie influye en el flujo hidráulico y se incorpora al modelo para reflejar las prácticas edáficas y medidas de conservación del suelo a través de planes implementados en la zona para limitar la erosión del suelo. El factor se define como la relación entre el factor de práctica de soporte

implementado y las condiciones idénticas en la labranza ascendente y descendente. Después de implementar prácticas de cero labranzas en las tierras de cultivo, se puede esperar que las pérdidas de suelo disminuyan en un 78 por ciento.

Asimismo, los factores que influyen en las prácticas mecánicas con base en las recomendaciones de Wischmeier y Smith, citadas por Mitchell y Bubenzer (1984), se indican en el Cuadro 4

**Cuadro 4: Valores de prácticas de conservación (P)**

<b>Pendiente del terreno en porcentaje</b>	<b>Cultivo en contorno surcos irrigados</b>	<b>Cultivo en franjas de contorno y en terraceo</b>	
1 - 2	0.60	0.30	0.12
3 - 8	0.50	0.25	0.10
9 - 12	0.60	0.30	0.12
13 - 16	0.70	0.35	0.14
17 - 20	0.80	0.40	0.16
21 - 25	0.90	0.45	0.18

FUENTE: Mitchell y Burbenzer. (1984)

## **2.4 CONSERVACIÓN DEL SUELO**

El objetivo de la conservación del suelo es reducir la erosión a un nivel máximo sostenible de producción agrícola, pastoreo o actividad recreativa que se pueda obtener de un área de tierra sin un daño ambiental inaceptable. Como la erosión es un proceso natural, no se puede prevenir, pero se puede reducir a un nivel máximo aceptable o tolerable a la pérdida de suelo. Esto debe considerarse como un criterio de desempeño que se espera que logren las medidas de control de la erosión (Morgan, 2005).

### **2.4.1 TOLERANCIA A LA PÉRDIDA DE SUELO**

En teoría la erosión del suelo debe mantenerse a un ritmo igual o inferior a la velocidad natural con la que se forma el nuevo suelo. Desafortunadamente, es difícil conocer cuándo existe este equilibrio pues, aunque se pueden medir las tasas de pérdida de suelo (experimento en laboratorio), las tasas de formación de suelo son tan lentas que no se determinan fácilmente. Buol, citado por Morgan (2005) afirma que las tasas de formación de suelo en todo el mundo van desde 0,01 a 7,7 mm/año. Sin embargo, las tasas más rápidas son excepcionales y el promedio es de aproximadamente 0,1 mm/año.

Un enfoque alternativo que evita la necesidad de medir directamente la tasa de formación de nuevos suelos es estimar la tasa requerida para igualar la tasa de eliminación por erosión y solucionar áreas donde se pueda suponer que existe una condición de equilibrio. Utilizando datos de pequeñas cuencas hidrográficas bajo bosques y pastizales, se encontró que las tasas requeridas estaban entre 0,3 y 2,0 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, siendo la mayoría inferior a 1,0 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> que, suponiendo una densidad aparente para el suelo de 1,0 g/cm<sup>3</sup>, es equivalente a 0,1 mm/año. Tal tasa, sin embargo, puede ser un indicador bastante conservador para el desarrollo de un suelo agrícola productivo.

Las recomendaciones sobre tolerancia a la pérdida de suelo se basan únicamente en consideraciones agrícolas, pero se ignoran problemas de contaminación y sedimentación que hay cuando los nutrientes de las plantas y pesticidas dejan un campo en solución en la escorrentía o se unen a las partículas de sedimentos (Morgan, 2005). Para alcanzar el uso sostenible del suelo es importante definir el máximo grado de erosión aceptable, lo que implica la tasa tolerable de erosión y la velocidad anual de formación de un suelo en particular, para lo cual se debe prestar atención a los agentes potenciales de erosión.

#### **2.4.2 PRINCIPIOS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO**

Tomando en cuenta la mecánica del desprendimiento y transporte de partículas de suelo por lluvia, escurrimiento y viento, se mencionan algunas estrategias para la conservación del suelo: protegerlo del impacto de la gota de lluvia, aumentar la capacidad de infiltración para reducir la escorrentía, mejorar la estabilidad agregada y aumentar la rugosidad de la superficie para contrarrestar la velocidad de la escorrentía y el viento.

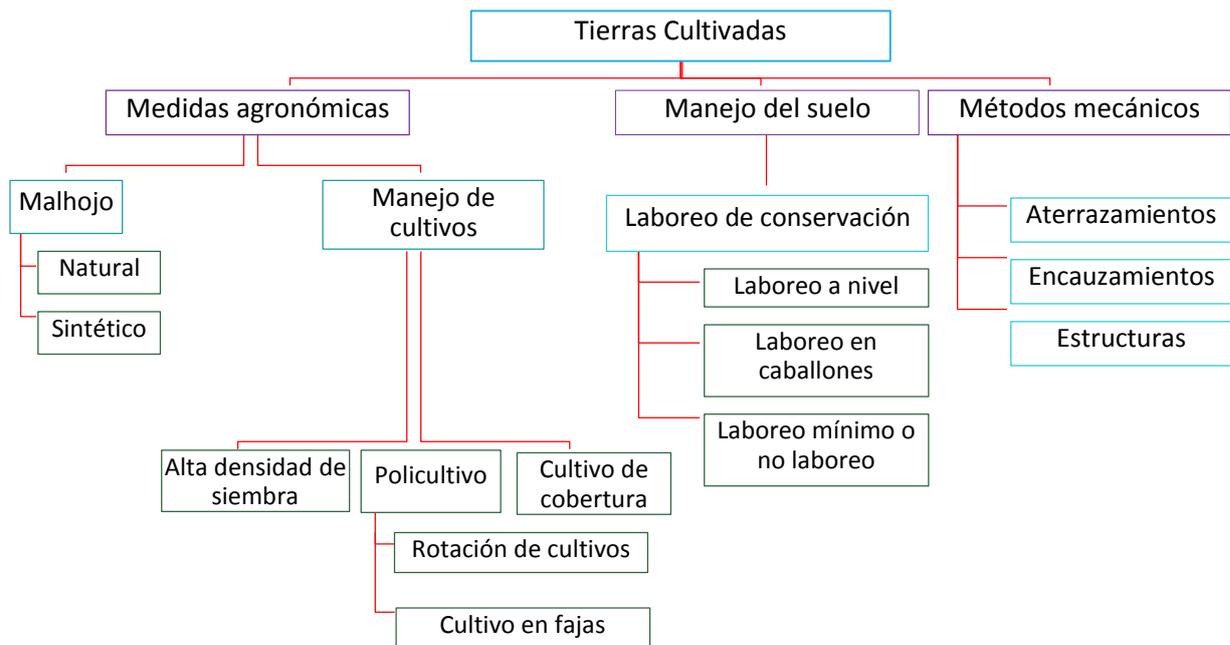
Las diversas técnicas de conservación se pueden describir bajo los títulos de medidas agronómicas, manejo del suelo y métodos mecánicos. En principio, las medidas agronómicas utilizan el papel de la vegetación para proteger el suelo contra la erosión. El manejo del suelo tiene que ver con las formas de prepararlo para promover el crecimiento de la planta y mejorar su estructura para que sea más resistente a la erosión. Así también, los métodos mecánicos o físicos, que a menudo involucran estructuras de ingeniería, dependen de la manipulación de la topografía del terreno, por ejemplo, la construcción de terrazas o rompevientos: para controlar el flujo de agua y aire.

Por otra parte, las medidas agronómicas combinadas con un buen manejo del suelo pueden influir en las fases de desprendimiento y transporte de partículas erosionadas; mientras que los métodos mecánicos son efectivos para controlar la fase de transporte, pero hacen poco para evitar el desprendimiento del suelo.

De todas maneras, la preferencia siempre se da a las medidas agronómicas porque estas son menos caras y se relacionan directamente con la reducción del impacto de la gota de lluvia, el aumento de la infiltración, la reducción del volumen de escorrentía y la disminución de las velocidades del viento y del agua. Además, se adaptan más fácilmente a los sistemas agrícolas existentes y son más relevantes para mantener o restaurar las comunidades de plantas biodiversas.

Por otra parte, las medidas mecánicas son en gran medida ineficaces por sí mismas porque no pueden evitar el desprendimiento de las partículas del suelo. Su papel principal es complementar las medidas agronómicas y se utilizan para controlar el flujo de cualquier exceso de agua y viento que pueda surgir. De igual modo, muchos trabajos mecánicos son costosos de construir y mantener, incluso algunos, como las terrazas, crean dificultades para los agricultores. Por eso, a menos que los suelos sean profundos, la construcción de la terraza expone los subsuelos menos fértiles y, por lo tanto, puede dar lugar a rendimientos más bajos de los cultivos. En las laderas irregulares, las terrazas varían en ancho, lo que hace que el uso de la maquinaria agrícola sea ineficiente, de tal forma que este problema solo se supera cuando las pendientes son planas o existen diseños de terrazas en paralelo. Además, existe el riesgo de falla de la terraza cuando existen tormentas severas, pues la liberación repentina de agua acumulada en la ladera puede causar más daño que si no se hubieran construido las terrazas. Por todas estas razones, el uso de estas no suele ser popular entre los agricultores (Morgan, 2005).

En la Figura 2 se observan las diferentes técnicas de conservación, agrupándolas como medidas agronómicas de manejo del suelo y métodos mecánicos. Es importante considerar un diagnóstico previo para determinar la forma, la naturaleza y el grado de erosión del agua de los suelos agrícolas, así como, para identificar las medidas correctivas más efectivas para un campo dado.



**Figura 2: Estrategias para la conservación de suelos en tierras cultivadas.**

FUENTE: Swaify, Dnagler y Armstrong. (1982)

Se recomiendan las siguientes prácticas de gestión para un buen control de la erosión hídrica:

- Rotación de los cultivos que alternan cultivos en hileras con cultivos de siembra sólida.
- Trabajar cultivos de cobertura y cultivos de abono verde en la rotación.
- Sembrar cultivos en la pendiente hasta donde sea posible o usar un sistema de cultivos en contorno.
- Sistemas de labranza reducida: labranza cero, labranza mínima o labranza de cresta.
- Utilizar la gestión de residuos: dejar al menos un 30 por ciento de residuos de cultivos en la superficie del suelo después de la plantación.
- Mejorar el drenaje subsuperficial en todo el campo o en áreas propensas al encharcamiento.
- Construcción de estructuras de control de la erosión y/o dispositivos de gestión del agua superficial cuando sea necesario una vez que se hayan considerado las medidas agronómicas para ayudar a mejorar la infiltración del suelo y reducir la escorrentía.
- Considerar el retiro de tierras propensas a la erosión en los árboles, arbustos, especies polinizadoras y otras plantas que mejoran el hábitat.

### **2.4.3 ACCESO A LA CONSERVACIÓN DEL SUELO**

La capacidad de los agricultores para adoptar medidas de conservación del suelo dependerá de su acceso a todos los recursos apropiados, no solo a la mano de obra. Estos pueden variar desde el conocimiento de los nuevos sistemas hasta la capacidad de proporcionar los insumos necesarios de capital para asumirlos. Por otra parte, ya sea que los agricultores tengan o no el efectivo para comprar las semillas adicionales, los fertilizantes o la maquinaria necesarios para respaldar un sistema agrícola más orientado a la conservación, esto afectará claramente su aceptación. Así, muchos agricultores pobres que carecen de seguridad suficiente para respaldar los préstamos considerarían que el riesgo de endeudarse es demasiado elevado. La mayoría de las agencias de crédito también verían a los pequeños agricultores como riesgo inaceptable y restringirían el acceso al crédito a los propietarios de tierras más ricos y de mayor escala.

Por todo esto, no tiene sentido diseñar un programa de conservación del suelo que requiera niveles de insumos a los cuales los agricultores no tengan acceso. Sin embargo, se debe reconocer que muchos agricultores usan su propia iniciativa, habilidad técnica y trabajo para desarrollar medidas de conservación del suelo donde se benefician (Morgan, 2005).

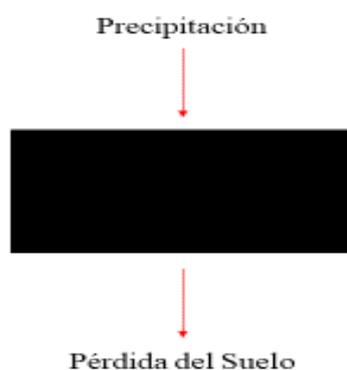
### **2.5 ETAPAS EN EL DESARROLLO DE UN MODELO**

Cualquier modelo es una simplificación de la realidad y, para algunos usuarios, esto crea un problema teórico inmediato. ¿Cómo puede predecirse un problema asociado con la erosión en un lugar particular mediante un modelo que describe la erosión de forma genérica? Seguramente, la única forma de enfrentar eficazmente un problema en una cuenca de captación dada o en un sitio de campo dado es llevar a cabo observaciones de campo detalladas: medir la erosión y sus factores de control en ese sitio y, sobre la base de un análisis de los resultados, seleccionar medidas apropiadas para controlar el problema. Desafortunadamente, tales mediciones a menudo son muy costosas y deben llevarse a cabo durante 10 años o más, a fin de recopilar datos representativos. Por el contrario, muchos problemas deben abordarse inmediatamente y no pueden esperar una solución algunos años más tarde, cuando puede haber ocurrido un daño ambiental considerable. El valor de un modelo de erosión es que se puede aplicar ahora y la pregunta que surge, sin embargo, es cuán simple o compleja debe ser para que sea válida.

En términos generales, la simplificación se puede representar en tres niveles, que generalmente se denomina modelo de caja negra, modelo de caja gris y modelo de caja blanca. En un modelo de caja negra (Figura 3) existe una relación entre una o más entradas o factores de control, como las siguientes: la lluvia, el tipo de suelo, la producción y la pérdida de suelo. Por otra parte, no hay un entendimiento de los procesos del modelo a través de los cuales las entradas dan lugar a la salida.

Tales modelos generalmente se expresan mediante alguna forma de relación estadística, como una ecuación de regresión lineal o una correlación. Así, una curva de sedimentación de un canal fluvial en el que la concentración de sedimentos se expresa como una función de la esorrentía es un buen ejemplo de este tipo de modelo. Por otro lado, un modelo de caja gris (Figura 4) incluye cierta comprensión de la relación entre entrada y salida, reflejando, por ejemplo, que el efecto de la lluvia sobre la erosión varía de acuerdo a la pendiente y la cubierta vegetal. El modelo funciona mediante ecuaciones basadas en relaciones estadísticas, pero estas suelen ser más complejas que las utilizadas en los modelos de caja negra e implican análisis de regresión múltiple o relaciones polinomiales.

Un buen ejemplo es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), la cual relaciona la pérdida de suelo, la lluvia y el tipo de suelo que se ajusten a los coeficientes, como la longitud de la pendiente, el manejo del cultivo y las medidas de protección física (Morgan y Nearing, 2011).



**Figura 3: Modelo de caja negra**

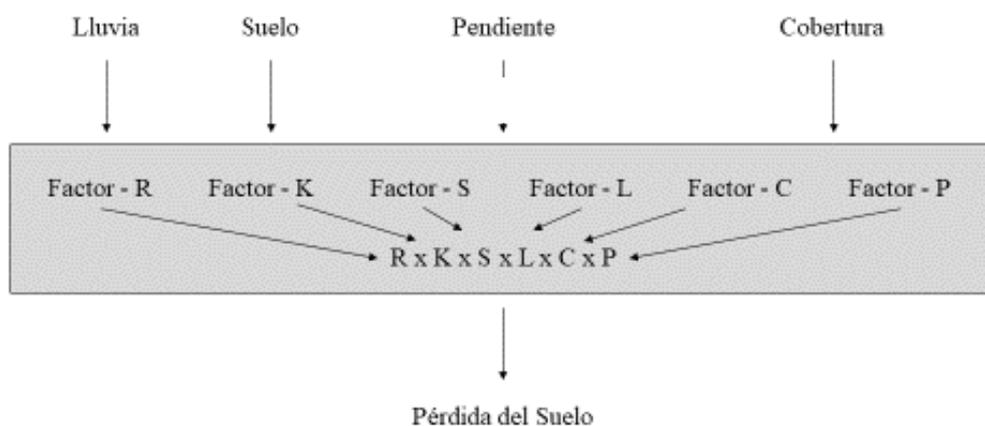
FUENTE: Morgan, Nearing (2011)

En los modelos de caja blanca, se intenta describir la mayor cantidad posible de procesos de erosión, transporte y deposición de sedimentos. Las ecuaciones matemáticas se utilizan para hacer esto, o a veces simples cálculos aritméticos, pero más a menudo, ecuaciones

diferenciales. Dado que estas ecuaciones generalmente se basan en la satisfacción de las leyes de conservación de la masa y la energía, los modelos a menudo se describen como de base física.

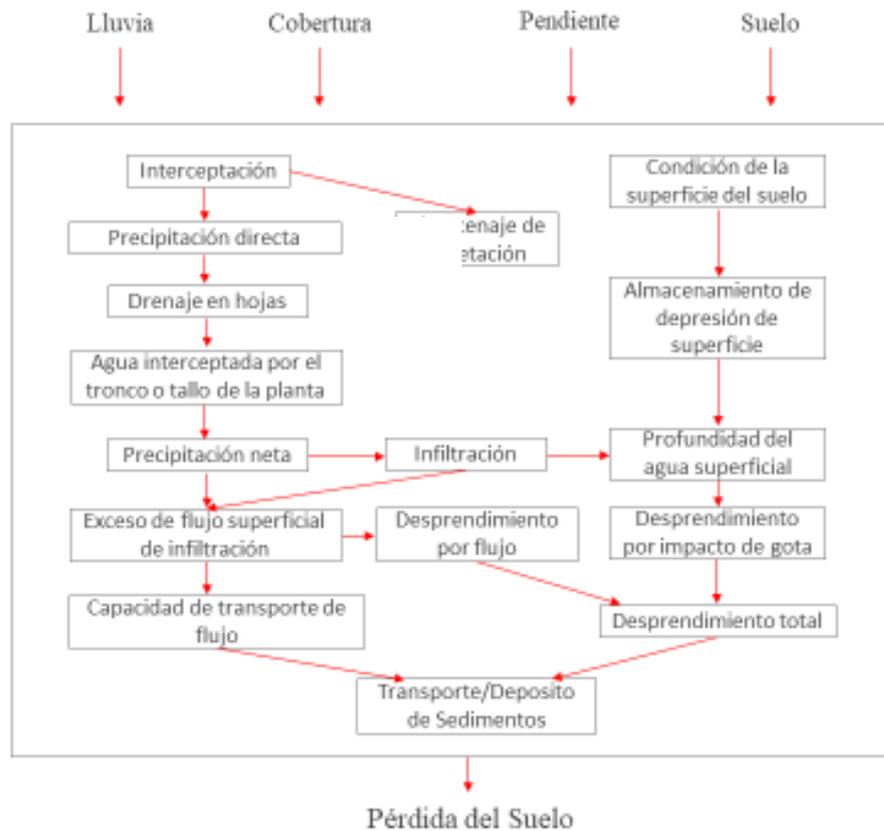
A su vez, el uso de las matemáticas complejas puede ser desalentador para muchos usuarios de modelos que no siempre tienen los mismos conocimientos matemáticos y experiencia que los desarrolladores de modelos. En la práctica, sin embargo, los usuarios de modelos no deben asustarse por esto, sino que deben adoptar un enfoque de preguntas. En ese sentido, deberían estar más preocupados por los procesos descritos en cuanto a si son relevantes para el problema y tienen el mismo nivel de importancia dentro del modelo que en el campo. El usuario debe estar seguro de que las ecuaciones utilizadas se basan en ciencia sólida y pueden ser respaldadas por el conocimiento subyacente y los datos medidos. A menudo, tales preguntas revelan que la comprensión científica de muchos de los procesos descritos en el modelo es limitada, y que muchas de las ecuaciones utilizadas son en realidad empíricas y similares a las utilizadas en los modelos de caja gris.

En realidad, no existe ningún modelo real de erosión de caja blanca, pero hay varios que podrían considerarse de color gris pálido a crema, ya que están basados en procesos, pero solo parcialmente en la base física (Figura 4). Los ejemplos incluyen WEPP, EUROSEM, GUEST, LISEM y SHE (Morgan y Nearing, 2011).



**Figura 4: Estructura de la ecuación universal de pérdida de suelo, caja gris.**

FUENTE: (Morgan y Nearing 2011)



**Figura 5: Estructura EUROSEM: modelo que aspira a un modelo de caja blanca.**

FUENTE: (Morgan y Nearing 2011)

## 2.6 MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA

Al respecto, Morgan (2005) señala que cuando se predice la erosión, se debe decidir si la predicción es para un año, un día, una tormenta o para períodos cortos dentro de una tormenta, si se refiere a una parcela, una ladera o una cuenca. Esto debido a que las perspectivas en el tiempo y en el espacio influyen en los procesos que deben incluirse en el modelo, en la forma que deben describirse y en el tipo de datos necesarios para validar el modelo y su funcionamiento.

Asimismo, el modelado se usa como herramienta predictiva y de simulación para el proceso de pérdida de suelo y estimación de la erosión. El desprendimiento, transporte y la sedimentación del suelo son los principales procesos que se tienen en cuenta para la modelización de la erosión (Lal, 1994). Al respecto, la mayoría de los modelos se basan en el concepto de capacidad de transporte, que se define como la cantidad máxima de sedimento que el flujo transporta sin que se produzca la deposición neta.

Debido a esto, los modelos han sido considerablemente utilizados como los enfoques más factibles para generar data sobre peligros de erosión, que luego es utilizada en la planificación de la conservación del suelo, especialmente para proteger zonas agrícolas.

Asimismo, los modelos para estimar la erosión generalmente se definen con el uso de la ecuación diferencial ordinaria al describir el cambio espacial y usualmente se emplean tres tipos principales de modelos de erosión para la predicción y/o estimación de la pérdida del suelo: (1) modelos empíricos; (2) modelos conceptuales; y (3) modelos en base física (Lal, 1994). Al respecto, los tres modelos mencionados anteriormente tienen una serie de similitudes entre sí y son deterministas en su estructura (Lal, 1998).

Estos modelos se basan en cuatro factores principales que incluyen lo siguiente: clima, topografía, cubierta vegetal y suelo. La diferencia entre ellos radica en cómo los procesos de erosión modifican la superficie durante el evento de erosión y si buscan describir la simulación continua del proceso o predecir solo para un único evento de erosión. Sin embargo, las limitaciones en la estimación precisa de la erosión del suelo se relacionan con la alta incertidumbre inicial del modelo, así como, la variabilidad espacial y temporal. Por ello, se recomienda el uso de modelos previamente calibrados para lograr conseguir una representación lo más exacta posible.

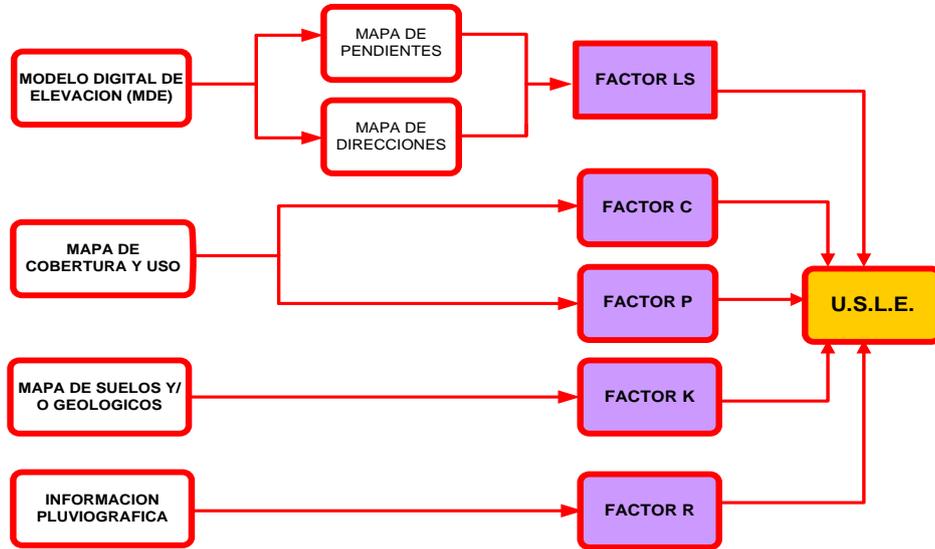
No es seguro que el modelo tenga una buena calidad predictiva si el evento varía fuera del rango de eventos de calibración, pero la resolución espacial probablemente no tiene un rol fundamental. Por otro lado, los datos de entrada del modelo posiblemente sean la razón más importante por la cual los modelos complejos de erosión con base física no predicen mejor que los modelos agrupados (Jetten *et al.* 2003).

### **2.6.1 MODELOS EMPÍRICOS**

Este tipo de modelo para la estimación de la erosión, se basa principalmente en la observación y, por lo general, es de naturaleza estadística (Lal, 1994). Los modelos empíricos se basan en la lógica inductiva y, en general, solo son aplicables con la condición de que los parámetros estén calibrados.

El enfoque clave del proceso del modelo empírico es la estimación de la pérdida promedio de suelo, aunque algunas extensiones se diseñan y desarrollan para la estimación del rendimiento de sedimentos. Se conocen tres tipos de análisis para el modelo empírico: caja

negra, donde solo se estudian las entradas y salidas principales; caja gris, donde se explica con mayor detalle el trabajo del sistema; y caja blanca, donde se detalla cómo funciona el sistema (Morgan, 2005).



**Figura 6: Modelo USLE**

FUENTE: Portuguez (2015)

Los modelos empíricos son los siguientes: USLE, RUSLE, MUSLE, RMMF, SLEMSA, etc. El problema con estos es que la ecuación no puede extrapolarse más allá de su rango de datos con seguridad, ya sea a eventos extremos u otras áreas geográficas.

### 2.6.2 MODELO CONCEPTUAL

Se define como un sistema matemático o físico que obedece a ciertas condiciones específicas y cuyo comportamiento es utilizado para entender un sistema físico, biológico o social. (Portuguez 2015)

Este tipo de modelo se encuentra entre el físico y el empírico, se basa en ecuaciones de continuidad de sedimentos y formas de agua vertidas espacialmente (Lal, 1994). El enfoque principal es estimar el rendimiento de los sedimentos utilizando el concepto del hidrograma unitario, que está basado en la generación de secuencias sintéticas de datos, a partir de las características estadísticas de los datos de muestras existentes. Estas últimas son útiles para generar secuencias de entrada a modelos empíricos y físicos donde los datos solo están disponibles para períodos cortos de observación.

### 2.6.3 MODELOS DE BASE FÍSICA

Con respecto al efecto de la erosión fuera del sitio y la identificación de la contaminación de fuentes no puntuales, los científicos se han esforzado por desarrollar modelos que puedan predecir la distribución espacial de la escorrentía y el sedimento sobre la superficie terrestre. Para lograr tales objetivos, los modelos empíricos tienen limitaciones considerables y no se pueden aplicar universalmente en escalas que varían desde campos individuales hasta grandes cuencas (Kadupitiya, 2002). Por lo tanto, los métodos basados en la física se vuelven importantes.

Igualmente, los modelos basados en procesos físicos o basados en procesos se basan funcionalmente en las ecuaciones matemáticas que describen el proceso de erosión, además de estar destinados a representar los mecanismos esenciales que controlan la erosión. La ventaja de los modelos basados en la física es que pueden representar una síntesis del componente individual que está relacionado con la erosión, incluidas las interacciones complejas entre varios factores y sus variaciones espaciales y temporales (Lal, 1994). A pesar de que actualmente existen varios modelos basados en la física para la predicción de la erosión del suelo, son pocos los modelos desarrollados para evaluar la pérdida del suelo en una escala regional o grande. Según el tipo de simulación se distinguen dos grandes grupos: continua o eventual.

Entre los modelos de simulación continua, se tiene lo siguiente: CREAMS (*Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*) (Knisel, 1980) y WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) (Nearing *et al.* 1989). Estos dos últimos modelos tienen en consideración procesos tales como la evapotranspiración y la fusión de la nieve. Asimismo, CREAMS considera la intervención de la contaminación del suelo agrícola debido a los pesticidas; mientras que, el modelo WEPP tiene en cuenta el crecimiento de la vegetación, la descomposición de los residuos, el efecto hielo-deshielo y la irrigación.

Todos los modelos hacen una simulación de los procesos hidrológicos (infiltración y escorrentía) y erosivos (transporte de sedimentos y deposición), a partir de la precipitación y según el tipo de zona de estudio. Sin embargo, es importante tener en cuenta la alta demanda de datos de los modelos físicos que definirán si el modelo es aplicable en una situación dada (Amore *et al.* 2004).

**Cuadro 5: Comparación de la descripción de los procesos en diferentes modelos de erosión**

MODELO	CREAMS	WEPP	ANSWERS	EUROSEM	TETIS	CASC2D	SHE-SHETRAN	KINEROS 2	Zambrano et al., 2014
Simulación	Continua	Continua	Eventual	Eventual	Eventual	Eventual	Eventual	Eventual	Eventual
Área	Parcela < 5ha	Parcela y Cuenca	Parcela Distribuida	Parcela y Cuenca	Cuenca Distribuida	Cuenca Distribuida	Cuenca Distribuida	Cuenca Distribuida	Cuenca Distribuida
Infiltración	CN-SCS m. infiltración	<u>Green &amp; Ampt</u>	USDAHL	<u>Smith &amp; Parlange</u>	SMA	SMA	<u>Horton//</u>	<u>Smith &amp; Parlange</u>	<u>Green &amp; Ampt</u>
Escorrentía	m. infiltración	<u>Eq. Cinem. Ondas</u>	<u>Eq. Manning</u>	Kinematic Wave	Depósito Lineal	KW	KW/D	Kinematic Wave	Kinematic Wave
Erosión	<u>Eq. Yalin</u>	<u>Eq. Yalin</u>	MUSLE	<u>Bennet/ Govers &amp; Rauws</u>	<u>Kilinc-Richardson/ Engelund y Hansen</u>	<u>Kilinc-Richardson/ Engelund y Hansen</u>	<u>Ackers y White/ Engelund y Hansen</u>	<u>Engelund y Hansen</u>	<u>Hairsine/ Engelund y Hansen</u>
Canales	Deposición	Erosión y Deposición	Deposición	Erosión y Deposición	Erosión y Deposición	Erosión y Deposición	Erosión y Deposición	Erosión y Deposición	Erosión y Deposición
Fusión Hielo	Sí	Sí	No	No	No	No	No	No	No
<u>Evapotransp.</u>	Sí	Sí	No	No	No	No	No	No	No
En base SIG	No	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

FUENTE: Salvany *et al.* (1996)

## **2.7 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA – SIG**

Los Sistemas de Información Geográfica, abreviados como SIG, son sistemas basados en computadora que han sido desarrollados y diseñados específicamente para manejar información geográfica. Además, permiten al usuario capturar información espacial, almacenar, realizar análisis, manipulación y producción de mapas como salida. Dado que la información espacial se puede manejar de manera eficiente por medio de métodos de acceso espacial a una base de datos, estos sistemas son capaces de contener un enorme rango y cantidad de información (Ali *et al.* 2017).

En los modelos de erosión, la implementación SIG admite una gestión eficiente de los datos georeferenciados, el cálculo de los parámetros de entrada para diferentes escenarios, el análisis espacial de los resultados del modelado y la visualización efectiva. Así también, se incorporan herramientas para el análisis estadístico y el modelado del proceso de erosión capturado por datos obtenidos por teledetección.

En ese sentido, RUSLE es un método ideal para analizar el potencial de pérdida de suelo debido a su compatibilidad con SIG. Al modelar la estimación de erosión en SIG, los parámetros específicos de erosión del suelo en el RUSLE pueden investigarse juntos o por separado. Las celdas dentro de un ráster definen con precisión las variables de RUSLE para un área determinada, tales como los factores de terreno (L y S) a partir de los modelos digitales de elevación (DEM) y permitiendo el análisis del potencial de pérdida de suelo en áreas extensas.

## **2.8 MODELO RÁSTER**

Un modelo ráster se define como el espacio de una matriz de celdas de igual tamaño ordenado en filas y columnas formadas por una o varias bandas, que contienen un valor de atributo y coordenadas de ubicación. A diferencia de un modelo vectorial que almacena coordenadas explícitamente, las coordenadas ráster están contenidas en la celda de la matriz; mientras que, los grupos de celdas que comparten el mismo valor representan el mismo tipo de característica geográfica. Los modelos ráster son útiles para almacenar datos que varían continuamente, como en una fotografía aérea, una imagen de satélite, una superficie de concentraciones químicas o una superficie de elevación. A su vez, también se pueden usar para representar un mapa con imágenes, una superficie en tercera dimensión 3D o fotografías de objetos referenciados a entidades (Ali *et al.* 2017).

### 2.8.1 MODELO DE SUPERFICIE

Los modelos de superficie o modelos digitales de elevación (DEM) se utilizan para representar la topografía de la superficie de la tierra. En el caso de los primeros se usan comúnmente para crear mapas de relieve, visualizar en tercera dimensión 3D, modelar el flujo de agua, rectificar la fotografía aérea y realizar análisis de terreno en geomorfología.

Los modelos de superficie se construyen comúnmente a partir de datos de teledetección (por ejemplo, radar de apertura sintética [SAR] y detección de luz y alcance [LIDAR]) o de métodos de estudio tradicionales. Así también, vienen en dos formas primarias según el tipo de fuente de datos que se utilice para su construcción. El modelo basado en ráster son superficies hechas a partir de mediciones de elevación regularmente espaciadas. El segundo tipo se basa en vectores usualmente denominados “Red irregular triangular” o (TIN) y sus superficies se elaboran a partir de puntos de medición distribuidos irregularmente, denominados puntos de masa (Ali *et al.* 2017).

- **Modelos de superficie: basado en ráster**

En los modelos de superficie basados en *ráster* (comúnmente denominados GRID), los datos de elevación forman una cuadrícula de celdas espaciadas regularmente y el tamaño de cada celda se fija dentro del modelo. Los tamaños de celda comunes varían entre 25 y 250 m. De igual modo, en una celda de cuadrícula, la elevación del área geográfica correspondiente es constante. El USGS DEM y el DTED (*Digital Terrain Elevation Data*) son estándares notables del modelo de superficie basado en ráster (Ali *et al.* 2017).

- **Modelos de superficie: basados en vectores**

Los TIN (*Triangulated Irregular Networks*) son una estructura de datos vectoriales que divide el espacio geográfico en triángulos contiguos que no se superponen. Asimismo, los vértices de cada triángulo son puntos de datos de muestra con valores de ubicación (X, Y) y Z (utilizado para representar elevaciones). Estos puntos de muestra están conectados por líneas para formar triángulos de Delaunay. Así, un TIN es un gráfico plano completo que mantiene relaciones topológicas entre sus elementos constitutivos: nodos, aristas y triángulos. Las características de punto, línea y polígono se pueden incorporar a un TIN. Por otra parte, los vértices se usan como nodos que están conectados por aristas formando triángulos. Los bordes conectan nodos que están cerca uno del otro.

Por último, la división del espacio continuo en facetas triangulares facilita el modelado de la superficie porque se puede realizar una aproximación muy cercana de una superficie ajustando triángulos a parches planos o casi planos en la superficie. Los datos vectoriales de entrada se incorporan directamente en el modelo y cualquier consulta o análisis resultante los respetará exactamente. Dado que la triangulación se basa en la proximidad, las interpolaciones siempre están compuestas por los datos/muestras de entrada más cercanos, a la vez que, la conectividad basada en la proximidad es útil para otros análisis. Por ejemplo, los polígonos de Thiessen, también conocidos como diagramas de Voronoi, se construyen a partir de TINs (Ali *et al.* 2017).

## 2.9 ALGEBRA DE MAPAS

Olaya (2016) menciona que la definición actual del álgebra de mapas se debe a Dana Tomlin, quien estableció la división principal de funciones y dio cuerpo a la disciplina, sentando así las bases para lo que es hoy en día la manera habitual de proceder en el análisis de capas geográficas ráster.

Posteriormente, otros autores han desarrollado generalizaciones y extensiones de las ideas de Tomlin, pero son estas las que, desde el punto de vista práctico, cubren la mayor parte de casos posibles y resultan de utilidad directa para el análisis habitual.

Tal es así que, en el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica, entendemos al álgebra de mapas como un conjunto de técnicas de análisis o geoprocesos desarrollados sobre varias capas en formato ráster o vectorial para obtener información derivada.

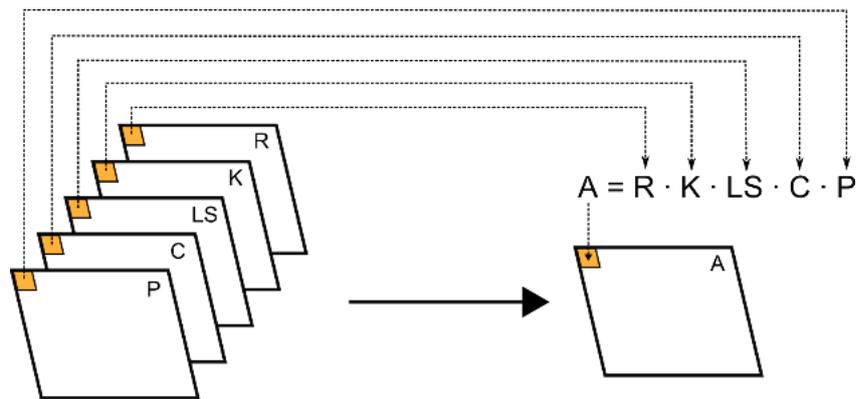
Como tal, el álgebra de mapas lo forman un conjunto de variables (los mapas), expresiones y funciones, los cuales a través de una sintaxis adecuada permiten la obtención de nuevos resultados geográficos. El modelo RUSLE, representa de manera sencilla la aplicación del álgebra de mapas, considerando la siguiente fórmula:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Donde A representa las pérdidas totales en toneladas por hectárea y año; mientras que, los factores R, K, LS, C y P representan la influencia de los diversos factores (agresividad del clima, tipo de suelo, topografía, uso de suelo, y prácticas de conservación) sobre dichas pérdidas. La RUSLE representa, por tanto, un modelo sencillo que combina cinco variables, todas ellas susceptibles de ser recogidas en las correspondientes capas ráster. Si extendemos

el cálculo puntual de la variable A hacia todos los puntos de la zona estudiada obtendremos una nueva capa de dicha variable, evaluando la anterior expresión para cada una de las celdas de esas capas ráster.

A continuación, la Figura 7 muestra la fórmula algebraica de RUSLE y cómo se representa en un conjunto de capas, así basta operar celda a celda con las capas que contienen las variables implicadas para obtener una nueva capa con el conjunto de valores calculados.



**Figura 7: Aplicación del Álgebra de Mapas**

FUENTE: (Olaya 2016)

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1 ÁREA DE ESTUDIO**

Políticamente, la subcuenca del río Ichu se encuentra en la provincia de Huancavelica, departamento del mismo nombre; a su vez, limita por el Norte con la provincia de Tayacaja (departamento de Huancavelica), por el Sur con las provincias de Huaytará y Castrovirreyna (departamento de Huancavelica), por el Este con las provincias de Churcampa, Angaraes y Acobamba (departamento de Huancavelica), y por el Oeste con la provincia de Huancayo (departamento de Junín) y la provincia de Yauyos (departamento de Lima).

Resulta importante mencionar que la subcuenca del río Ichu está dentro de la cuenca del río Mantaro y su extensión es de aproximadamente 1'381,94 km<sup>2</sup>, abarcando zonas que van desde los 2847 m s. n. m. (Mariscal Cáceres) hasta los 5220 m s. n. m. En cuanto a la cabecera de la cuenca, esta se encuentra en el distrito de Santa Ana (Castrovirreyna) y sus límites naturales son los siguientes: por el Norte con la cuenca del río Mantaro, por el Oeste con la subcuenca del río Vilca, por el este con la subcuenca del río Urubamba y por el Sur con la cuenca del río Pisco.

Esta subcuenca se caracteriza por tener un clima propio de puna y vertiente occidental; asimismo, presenta variaciones por la ubicación geográfica, altitud y topografía del lugar. De igual forma, la precipitación total anual varía desde los 700 y 1000 mm, las lluvias con mayor intensidad se producen de diciembre a marzo (aunque pueden presentarse precipitaciones esporádicas en los meses de junio hasta agosto), la temperatura media mensual máxima es de 11 °C, la temperatura media mensual mínima es de -4 °C y la temperatura de media mensual es de 3 °C (con un grado constante de congelación durante las noches). En cuanto a la humedad relativa promedio, esta es de 78 por ciento y disminuye de junio a setiembre, época de menor precipitación llegando hasta 72 por ciento; mientras que, en la época lluviosa de diciembre a marzo, los valores promedios llegan hasta 84 por ciento.

Estos se ven expuestos a una gran variabilidad de fenómenos meteorológicos relacionados con cambios abruptos en el medioambiente: heladas, sequías y deslizamientos, que constituyen una amenaza para las actividades productivas, principalmente la actividad pecuaria, que es la predominante en la zona. La temporada de heladas se presenta con más fuerza de junio a agosto, aunque se pueden producir desde abril, sobre todo en las partes altas donde se originan y su intensidad es mayor (Gerencia Regional de Recursos Naturales y Medio Ambiente, 2013).

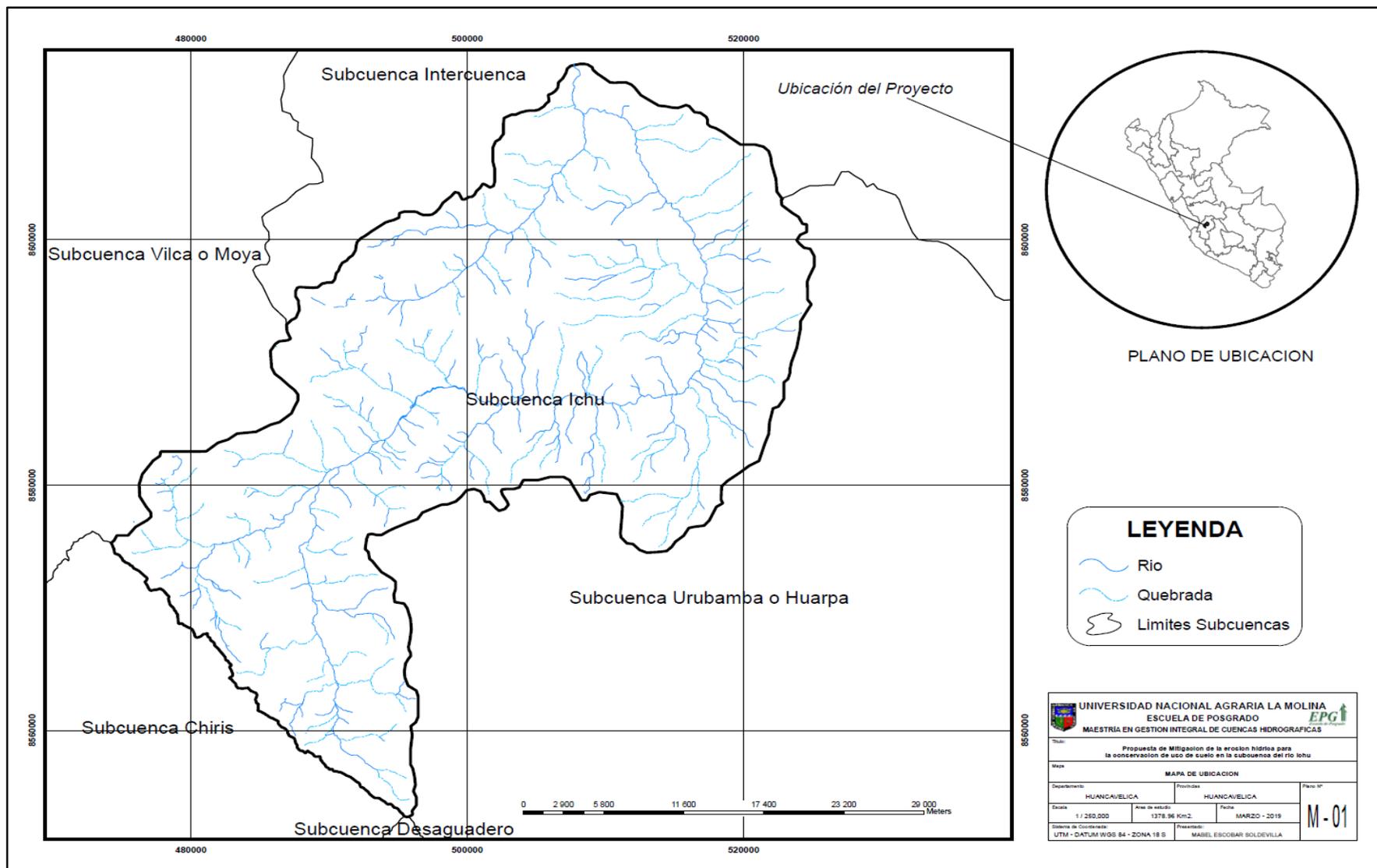


Figura 8: Mapa de ubicación – subcuenca del río Ichu

### 3.2 MATERIALES Y EQUIPOS.

#### Información cartográfica.

En el Cuadro 6 se muestra la descripción general de la información cartográfica utilizada en el trabajo de investigación.

**Cuadro 6: Información cartográfica**

<b>Información</b>	<b>Fuente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Formato</b>
<b>Carta Nacional</b>	Instituto Geográfico Nacional - IGN	Cartas Nacionales Escala 1/100000.	Vector
<b>Red hídrica</b>	Autoridad Nacional del Agua - ANA	Rio y quebrada	Vector
<b>Cuencas hidrográficas</b>	Autoridad Nacional del Agua - ANA	Delimitación de la subcuenca Ichu	Vector
<b>Mapa de Temático de Cobertura y uso del suelo</b>	MINAM	Mapa de uso del suelo realizado el año 2013	Vector
<b>Mapa Global de Suelo</b>	FAO	Mapa temático de la clasificación del suelo realizado por la FAO	Vector
<b>Topografía</b>	ALOS PALSAR DEM - Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA)	Modelo Digital de Elevación (DEM) resolución 12.5m x 12.5m	<i>Raster</i>
<b>Sentinel 2A</b>	Agencia Espacial Europea ESA del programa espacial Copernicus	Imagen de Satélite resolución 10m x 10m	<i>Raster</i>
<b>Landsat 8</b>	Satélite de observación de American Earth - USGS -NASA	Imagen de Satélite resolución 30m x 30m	<i>Raster</i>

#### Información hidrológica.

- Precipitaciones mensuales.

#### Hardware y software

- Computadora i7 2.66 Ghz DD 1TB y 8 GB de Memoria y monitor de 15“.
- GPS
- Software SIG QGIS
- Python.

### 3.3 METODOLOGÍA.

#### 3.3.1 DISPONIBILIDAD DE DATA

Este estudio requiere información disponible de datos de precipitación, topografía, suelo y vegetación o cobertura del suelo en la subcuenca.

##### a. Datos de precipitación.

Los datos de precipitación son necesarios para estimar el factor R, el valor de la erosividad de la precipitación en la subcuenca. Además, se localizó una estación principal pluviométrica en Huancavelica, que se ubica en el interior de la subcuenca y cinco estaciones en los alrededores del área: Huancalpi, Acostambo, Colcabamba, Lircay y Choclococha. En el Cuadro 7 se muestran las categorías, los períodos de registro y ubicación geográfica, datos de precipitación que se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI. El registro de la serie de precipitación total mensual se muestra en el Anexo 1.

**Cuadro 7: Estaciones pluviométricas**

Estaciones	Categoría	Período		Coordenadas Geográficas		Cotas msnm.
		Desde	hasta	Latitud S	Longitud W	
Huancalpi	Climat. Ordinaria	1980	2014	75° 14' 14''	12° 32' 32''	4450
Acostambo	Climat. Ordinaria	1989	2014	75° 03' 33''	12° 21' 58''	3675
Huancavelica	Climat. Ordinaria	1988	2014	75° 02' 02''	12° 46' 45''	3770
Lircay	Climat. Ordinaria	1980	2014	74° 43' 43''	12° 58' 57''	3513
Choclococha	Climat. Ordinaria	1980	2014	75° 02' 01''	13° 06' 01''	5069
Colcabamba	Climat. Ordinaria	2004	2014	74° 40' 39''	12° 24' 24''	2920

La Figura 9, muestra la ubicación espacial de las estaciones que se utilizaron para el presente estudio, son estaciones disponibles y en funcionamiento, alrededor de la zona de interés.

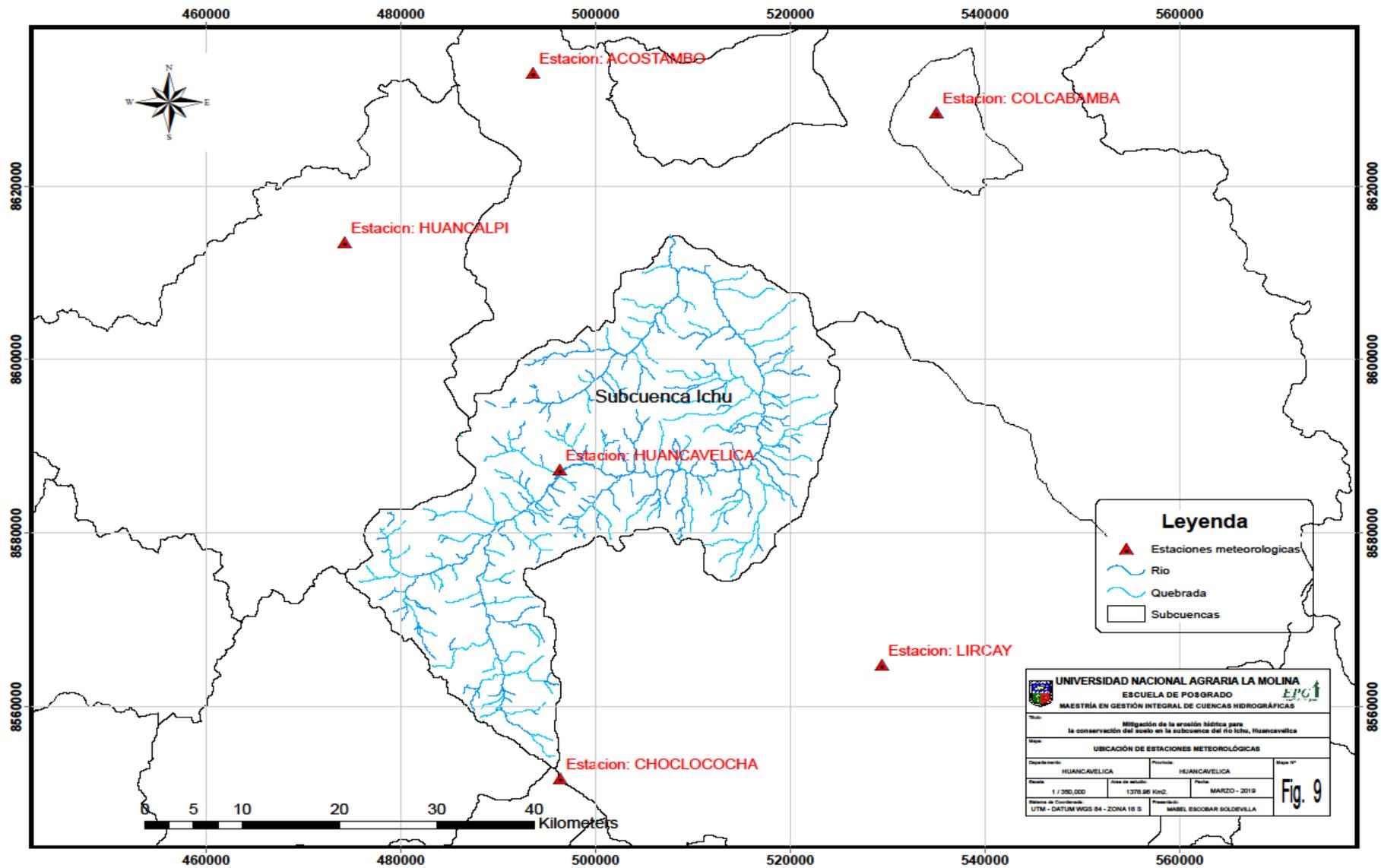


Figura 9: Ubicación espacial de las estaciones meteorológicas

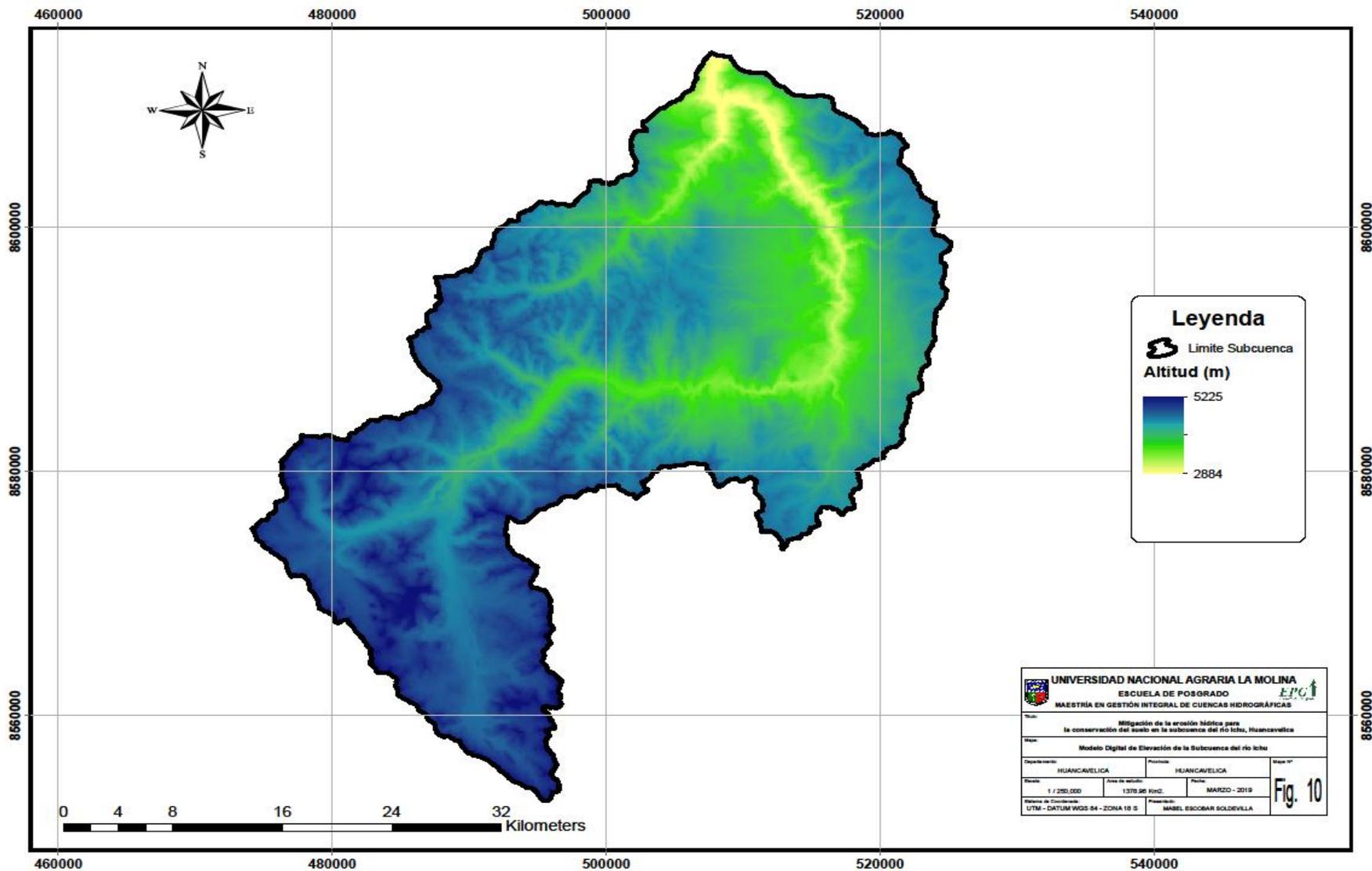
## **b. Modelo Digital de Elevación (MDE).**

Para la delineación de la subcuenca del río Ichu y la preparación del mapa de drenaje, se requiere de información topográfica, debido a lo cual en este estudio se utilizó un modelo de elevación digital codificado geográficamente (DEM, por sus siglas en inglés) y obtenido del sensor ALOS PALSAR de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), el cual se descargó del sitio web de *Alaska Satellite Facility* en formato de archivo de información etiquetado (TIFF) a una resolución espacial de 12,5 m. Las cuatro escenas descargadas que cubren el ámbito la subcuenca fueron las siguientes:

- i. AP\_20714\_FBS\_F6920\_RT1
- ii. AP\_20714\_FBS\_F6930\_RT1
- iii. AP\_21137\_FBS\_F6920\_RT1
- iv. AP\_21137\_FBS\_F6930\_RT1

Con el apoyo del programa QGIS 3.4, conocido *software* SIG de código libre, se unieron las cuatro escenas en un mosaico, para luego extraer solo el área de la subcuenca Ichu.

En la Figura 10 se muestra el modelo digital de elevación correspondiente a la subcuenca del río Ichu y la altitud varía desde los 2884 a los 5224 m.s.n.m.



**Figura 10: Modelo Digital de Elevación de la Subcuenca del río Ichu**

### **c. Data satelital.**

La data satelital utilizada para el estudio corresponde a las imágenes satelitales de la Agencia Espacial Europea ESA del programa Espacial Copernicus (Sentinel 2B), que posee características útiles en monitorizar los cambios en la tierra y vegetación.

Asimismo, se descargaron y procesaron imágenes sentinel 2B, de cuatro bandas con resolución espacial de 10 metros (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) con fecha 20 de junio de 2018. Al respecto, las 4 escenas fueron las siguientes:

- i. S2B\_MSIL1C\_20180620T151659\_N0206\_R125\_T18LVL\_20180620T215124
- ii. S2B\_MSIL1C\_20180620T151659\_N0206\_R125\_T18LVM\_20180620T215124
- iii. S2B\_MSIL1C\_20180620T151659\_N0206\_R125\_T18LWL\_20180620T215124
- iv. S2B\_MSIL1C\_20180620T151659\_N0206\_R125\_T18LWM\_20180620T215124

Con el uso del programa QGIS 3.4, conocido *software* SIG de código libre, y el complemento *Semi-Automatic Classification* versión 6.2.7, se realizó el procesamiento digital de la imagen Sentinel 2B, correcciones geométricas y atmosférica, mosaicos y composición de las cuatro bandas (Banda 2, banda 3, Banda 4 y Banda 8).

El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo a través de software QGIS 3.4 y el complemento clasificación semiautomático - SCP (*Semi-Automatic Classification*) versión 6.2.7, para realizar corrección atmosférica por medio del método DOS1, transformando los Niveles Digitales a valores de reflectancia en la parte superior de la atmosfera (TOA) y posteriormente se aplicaron los índices de vegetación.

La Figura 11, muestra el resultado de la imagen de satélite Sentinel 2B en composición de falso color con las bandas 843.

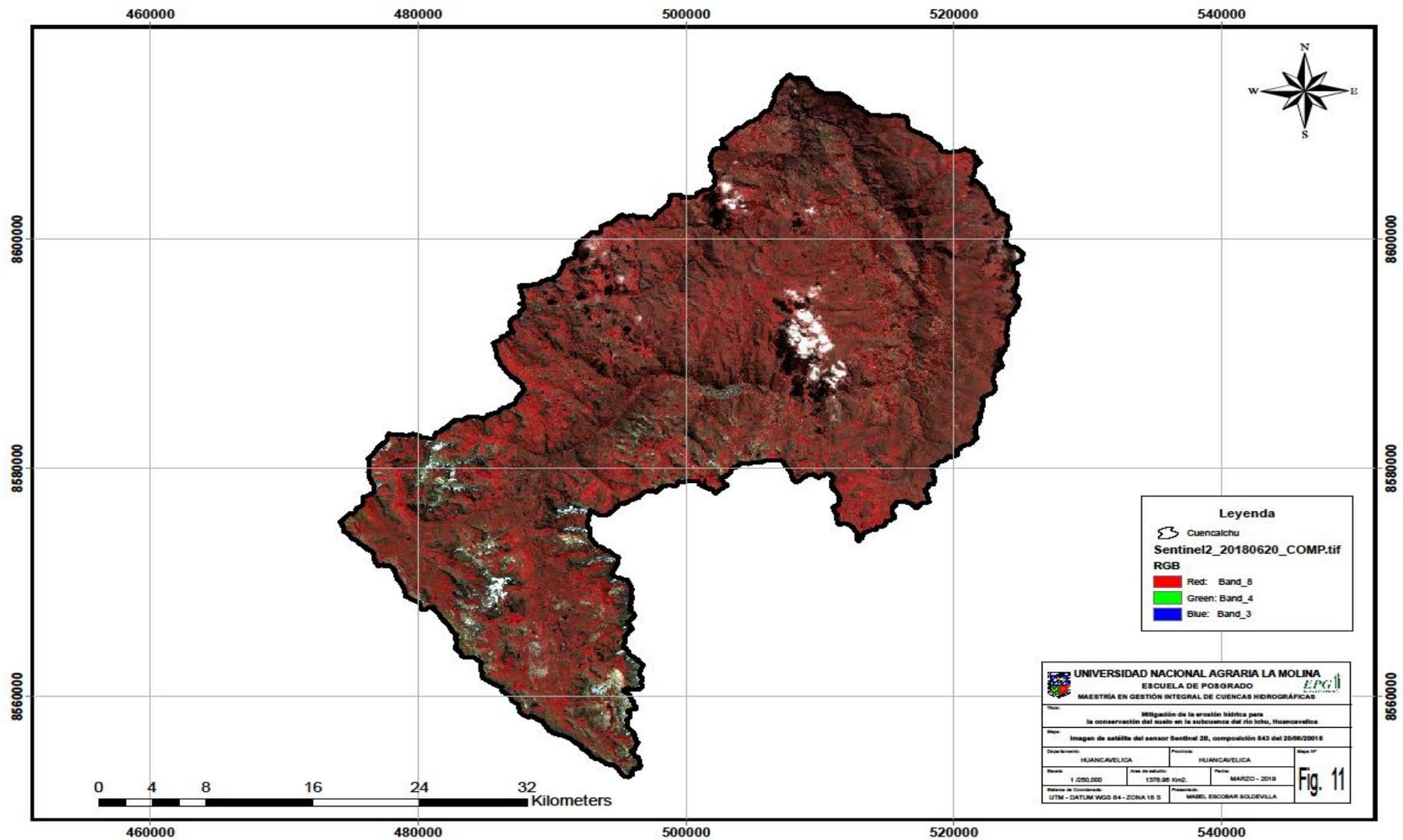


Figura 11: Imagen de satélite del sensor Sentinel 2B, composición 843 del 20/06/2018

#### **d. Cobertura vegetal y uso del suelo en base del estudio de Mesozonificación Ecológica y Económica – 2013.**

La cobertura vegetal juega un papel importante para conservar el suelo y controlar la erosión, pues esta retiene la velocidad con la que llega la precipitación, disminuye la escorrentía y aumenta la infiltración, todo lo cual depende de cómo se viene utilizando el suelo, ya sea para uso agrícola, forestal o de pastos. Cuando perturbamos el uso de las actividades desarrolladas en estas zonas, el suelo se degrada e inicia la erosión. Entonces, la vulnerabilidad del suelo dependerá del uso y sobre uso que se le den.

Por ejemplo, es sabido que en el Perú existen áreas deforestadas que se utilizan para la agricultura o pastoreo. Sin embargo, en las zonas donde se practica el sobrepastoreo, se alteran negativamente las propiedades físicas del suelo, lo que trae como consecuencia, escasa vegetación, compactación del suelo, degradación y erosión (Reynel y León, 1990).

Para el mapa de cobertura y uso del suelo, se consideró la información temática oficial publicada por el Ministerio del Medio Ambiente, del estudio de la Mesozonificación Ecológica, Económica del departamento de Huancavelica a escala 1/100,000. Este fue elaborado por el Gobierno Regional de Huancavelica en el 2013 y contenía información sobre cobertura vegetal, así como, una clasificación por tipos de cobertura.

A continuación, en la Figura 12 se muestra la distribución espacial de la cobertura y uso del suelo en la subcuenca del río Ichu.

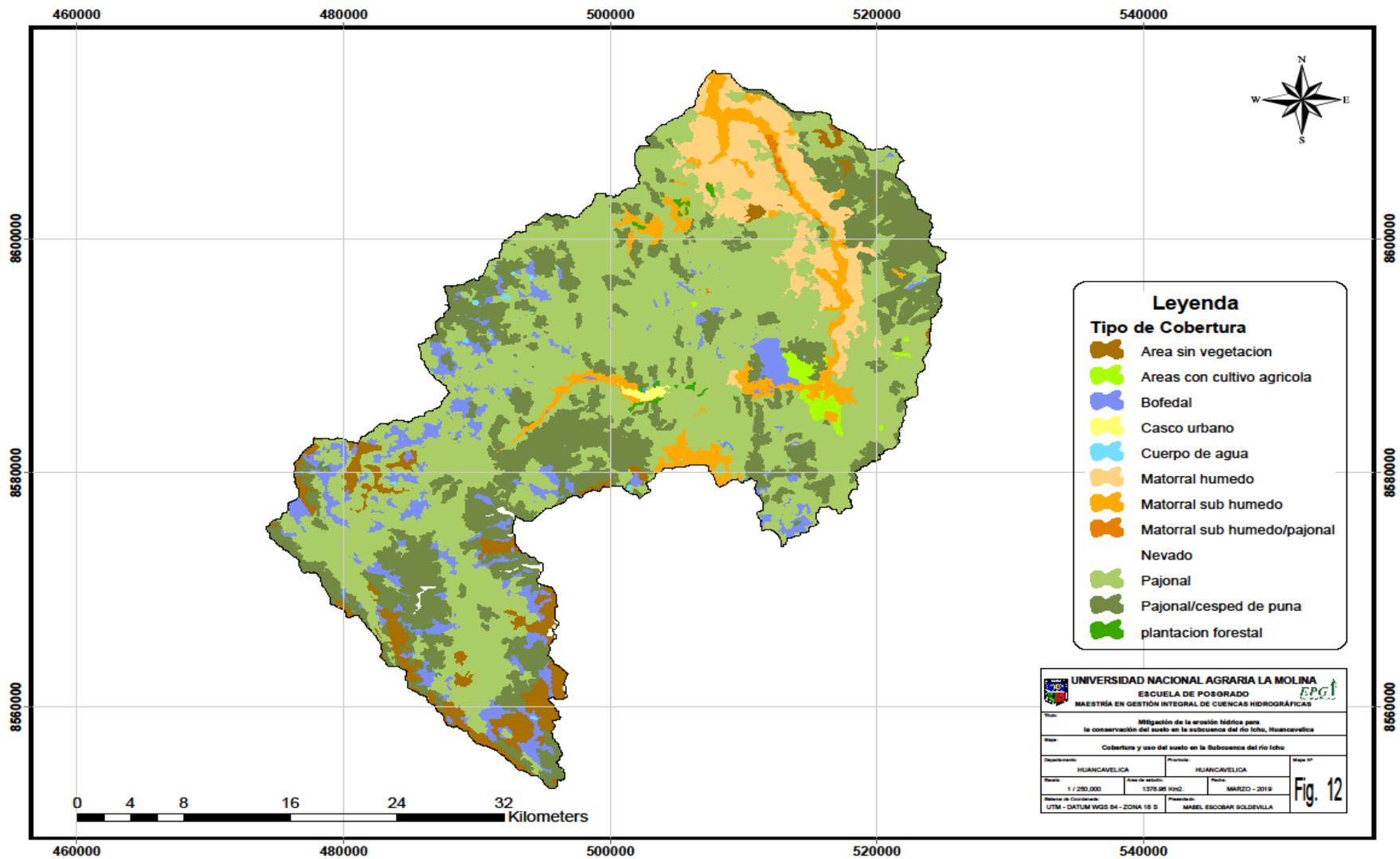


Figura 12: Mapa temático de cobertura y uso del suelo en la subcuenca del río Ichu.

#### **e. Mapa Mundial de Suelos.**

El desarrollo de un mapa global de suelos fue iniciado por la Sociedad Internacional de Ciencia del Suelo en 1960 e implementado por la FAO y la UNESCO entre 1971 y 1980, lo que dio como resultado el mapa mundial de suelos, que se actualizó sistemáticamente a partir de 1995 en el marco del programa de base de datos de suelos y terrenos (SOTER) llevado a cabo por la FAO, el ISRIC y el PNUMA, junto con los servicios nacionales de estudios de suelos.

Posteriormente, esto dio lugar a varias actualizaciones regionales, incluso para América Latina y el Caribe, gran parte de África, así como, Europa oriental y central. Paralelamente, otras organizaciones, en particular el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea (CE) y el USDA realizaron actualizaciones regionales de suelos; mientras que, varios países completaron inventarios y mapas nacionales de suelos (China, Brasil, Botswana y Kenia, etc.).

Esta información actualizada se armonizó con el mapa mundial de suelos digital y fue publicado por un consorcio de FAO, IIASA, JRC, ISRIC y CAS en el 2006, como la base de datos mundial de suelos (armonización de la tierra - HWSD). Aunque no está totalmente armonizado y es consistente, el HWSD contiene la información más actualizada y completa del suelo disponible actualmente. La última versión de esta base de datos, que proporciona estimaciones georreferenciadas de veinte características del suelo, continúa disponible en su sitio web.

Así, una vez descargada la información de mapa de suelos con ayuda del SIG, se extrae el área de la subcuenca para la descripción y análisis de la litología. Al respecto, la intención era integrar los mejores datos disponibles de fuentes locales y nacionales para entregar la información en línea. El formato y la resolución debían ser compatibles con otros conjuntos de datos fundamentales en sistemas terrestres (por ejemplo, la vegetación, la cobertura terrestre, el terreno y los sensores remotos). Se puede afirmar que, la complejidad técnica y logística del proyecto ha sido sustancial, pero se ha logrado un buen progreso durante la fase inicial de investigación del proyecto y se están comenzando a publicar las coberturas continentales. En ese sentido, Arrouays *et al.* (2014) proporcionan un resumen completo.

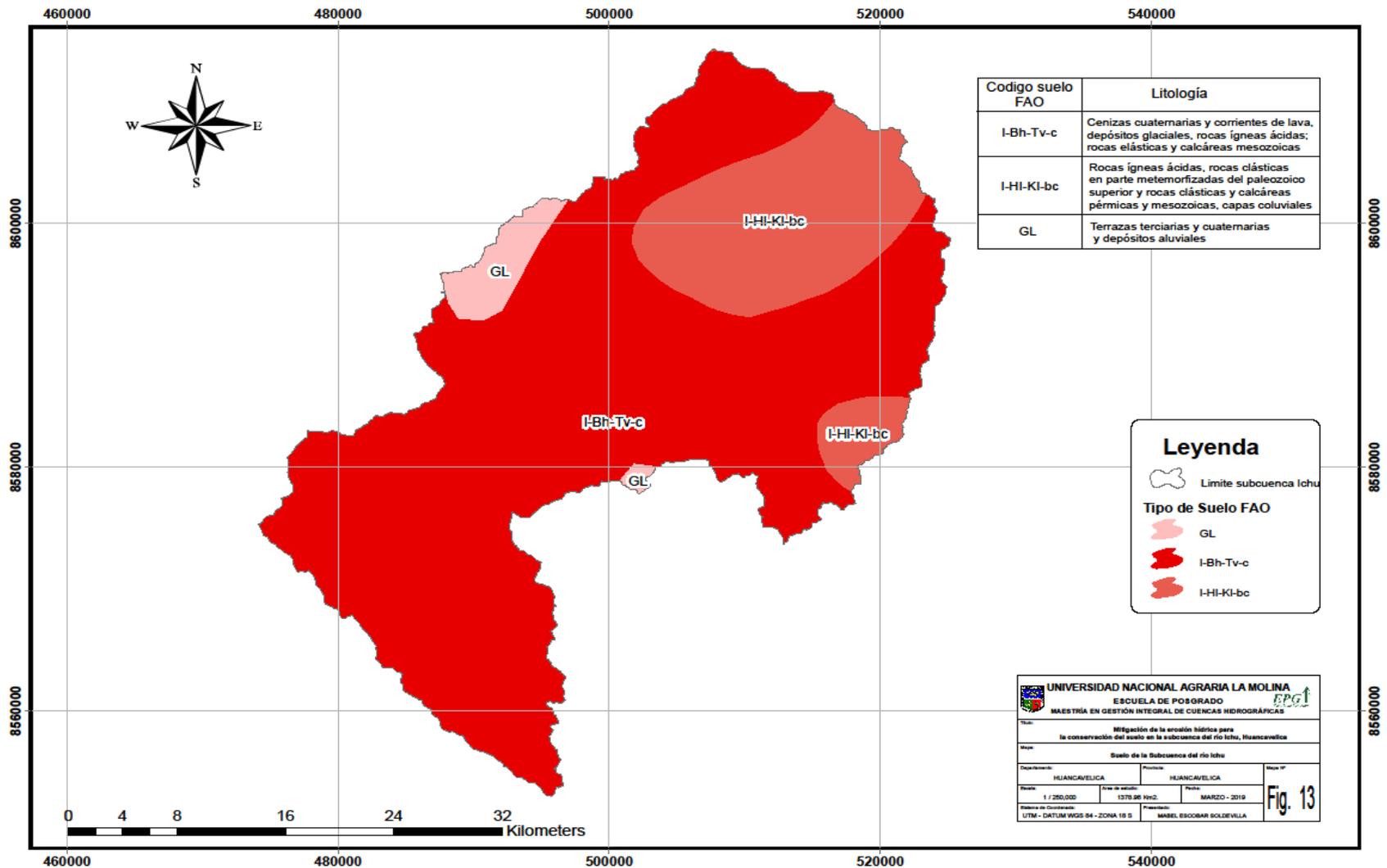


Figura 13 : Mapa temático de Suelo de la subcuenca del río Ichu

### **3.3.2 DESARROLLO DE LA BASE DE DATOS PARA EL MODELO RUSLE.**

Para esta fase se utilizó la ecuación universal de pérdida de suelo revisada RUSLE y las herramientas SIG. Asimismo, con el Sistema de Información Geográfica y lenguaje de programación *Python* se procedió a realizar el proceso de álgebra de mapas, que nos permitió cuantificar la erosión del suelo. A continuación, se muestran los resultados en forma espacial.

#### **a. Estimación del factor de erosividad de precipitación (R)**

Es importante resaltar que para estimar el factor R se deben tener datos de varias estaciones meteorológicas y líneas de igual  $EI_{30}$  conocidas como líneas isoerodentes (Subramanya, 2008); así como, una serie de precipitaciones a largo plazo, de al menos 20 años (Mello *et al.* 2013).

De acuerdo con esto, el valor del factor de erosividad de la lluvia utilizado en RUSLE cuantifica el efecto del impacto de la gota de lluvia y también refleja la cantidad y tasa de escorrentía que probablemente se asocia con la precipitación, pudiendo ser de períodos semanal, mensual, estacional o anual.

Por otra parte, la erosividad de las precipitaciones es muy difícil de cuantificar, ya que se requieren datos pluviográficos de un área determinada. Si bien existe numerosa bibliografía de cómo estimar el valor R, el presente estudio aplica dos metodologías válidas para su cálculo y mejor análisis.

#### **Método descrito por Wischmeier and Smith**

El factor de erosión de precipitación y escorrentía descrito por Wischmeier y Smith consiste en el producto de la energía cinética (E) de la tormenta por la intensidad máxima en treinta minutos ( $I_{30}$ ). Al respecto, la suma de los valores  $EI_{30}$  para un período dado es una medida numérica del potencial erosivo de las lluvias y cuando dicho período corresponde a un año, el valor de la sumatoria será el índice de erosión para ese año. Así, el producto  $EI_{30}$  es un término de interacción estadístico y técnicamente indica cómo la división en partículas se combina con la capacidad de transporte para producir erosión.

En el presente estudio, los datos de precipitación son aproximadamente de 35 años (1980 - 2014), los cuales fueron recopilados de seis estaciones pluviométricas y obtenidos del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú).

Para las condiciones del estudio, el cálculo del factor R se generó a partir de los datos de precipitación media mensual y con ayuda del *software* Excel se estimaron datos de las variables: duración del evento, precipitación acumulada en el evento, promedio de intensidad de lluvia por evento, energía de lluvia por profundidad de lluvia, energía total de la lluvia e intensidad máxima de lluvia a una resolución temporal simulada de 3 horas. Con esta información, se aplicaron las siguientes ecuaciones para el cálculo de EI3h.

$$E_c = 0.1191 + 0.0873 \cdot \log_{10} I_t; \quad I_t < 76 \text{ mmh}^{-1}$$

$$E_c = 0.283; \quad I_t > 76 \text{ mmh}^{-1}$$

Donde:

Ec: Energía de precipitación por hectárea-mm ( $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ );

It: Intensidad de precipitación promedio ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

El factor R, descrito por Renard, K y Freimund (1994), consiste en la suma anual promedio de los valores individuales EI<sub>30</sub> durante largos períodos de tiempo (mínimo 15 años para la aplicación USLE o RUSLE). Para las condiciones de este estudio, el factor R se consideró, en un primer momento, como la suma anual promedio de los valores individuales de EI<sub>30</sub>, según lo aplicado por Vrieling *et al.* (2010). Por lo tanto, tenemos lo siguiente:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j$$

Donde:

R: Factor de erosividad ( $\text{MJ mm} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ).

E: Energía cinética total de la tormenta ( $\text{MJ ha}^{-1}$ ).

I<sub>30</sub>: Intensidad máxima de lluvia en 30 min ( $\text{mm hr}^{-1}$ ).

j: Índice del número de años utilizados para producir el promedio.

k: Índice del número de tormentas para cada año.

m: Número de eventos de precipitación individual en un año dado j.

n: Número de años utilizados para obtener R.

Debido a que la intensidad máxima en 3 horas es inferior a la intensidad de 30 minutos, como originalmente reconocieron Wischmeier y Smith (1978), los valores del factor R se subestimarían, por lo que se requiere aplicar una metodología complementaria.

### ***Método Índice de Fournier Modificado - IFM***

Arnoldus (1980), indica que este índice caracteriza la agresividad de la precipitación al correlacionar el Índice de Fournier (IF) en el que se consideran no sólo la precipitación mensual del mes más húmedo, sino también la del resto de los meses; y se calcula de la siguiente forma:

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P}$$

Donde:

IFM: índice de Fournier modificado (mm)

$p_i$ : precipitación del mes  $i$  (mm)

P: precipitación total anual (mm)

En el Perú se tiene un cierto riesgo de erosión que va de bajo a alto y se incrementa en medida al aumento de altitud; es decir, el relieve determina en gran medida la vulnerabilidad a la erosión y a los procesos erosivos por la intensidad de la lluvia, aspecto que en forma artificial se incrementa por factores, tales como la deforestación y el cambio de uso del suelo. La conformación de este índice corresponde a las franjas paralelas a la costa, con los valores más bajos en las planicies costeras. Al respecto, la clasificación del IFM se presenta en el Cuadro 08.

**Cuadro 8: Clasificación del Índice de Fournier Modificado (IFM)**

<b>IFM</b>	<b>Clasificación</b>
<b>0 - 60</b>	Muy bajo
<b>60 - 90</b>	Bajo
<b>90 - 120</b>	Moderado
<b>120 - 160</b>	Alto
<b>&gt; 160</b>	Muy alto

FUENTE: (PHI 2006)

Tomando en cuenta el cálculo de la erosividad de la lluvia, según su concepto original, se utilizó la siguiente ecuación propuesta para los andes colombianos (Sonder *et al.*, citado por Wongchuig *et al.* 2016).

$$R_m = 161 \cdot (IFMm)^{0.552}$$

Esta ecuación fue propuesta por Sonder *et al.* (2002) para los andes colombianos (Estación La Florida, Cuadro 9) y citado por Wongchuig *et al.* (2016) en su metodología para el estudio del “Riesgo de erosión del suelo asociado con el cambio climático en la cuenca del río Mantaro, en Los Andes peruanos”, debido a la similitud de condiciones geomorfológicas entre las dos regiones estudiadas (ambas cercanas en la Cordillera de Los Andes tropicales), además por el buen desempeño estadístico ( $r^2$ ) de la regresión potencial, también se utilizó para la subcuenca del Río Ichu.

**Cuadro 9: Resultados de la aplicación del índice de Fournier modificado para calcular los valores promedio del factor R mensual.**

Estaciones meteorológicas	Regresion lineal	$r^2$	Regresion con potencia	$r^2$
Quilichao	$y = 40.41(p^2/p_i)$	0.93	$y$	0.95
Mondomo	$y = 49.62(p^2/p_i)$	0.92	$y$	0.88
El Tambo	$y = 23.52(p^2/p_i)$	0.93	$y$	0.95
La Florida	$y = 25.41(p^2/p_i)$	0.96	$y$	0.99
Trujillo	$y = 41.11(p^2/p_i)$	0.94	$y$	0.96
Restrepo	$y = 19.36(p^2/p_i)$	0.76	$y$	0.76

FUENTE: Sonder *et al.* (2002)

En este segundo método, el cálculo del IFM se hace para cada año y luego se realiza el promedio (ver Anexo 2). Así también, se pudo evaluar el índice de concentración de precipitación (PCI) en la subcuenca Ichu, cuyo cálculo se presenta en el Anexo 20, donde se muestra el comportamiento de la concentración de lluvia, especialmente importante para regiones con clima estacional o semiárido. En este caso, los límites teóricos van desde 8,3 (régimen pluvial uniforme) hasta 100 (régimen pluvial irregular), si la precipitación se concentra en un mes.

De acuerdo con Mello *et al.* (2015), el PCI es importante para el análisis del potencial erosivo de la lluvia, ya que puede caracterizar un efecto dinámico más activo del cambio climático sobre el potencial erosivo de la lluvia, por lo que es un índice complementario. Su cálculo viene dado por lo siguiente:

$$PCI(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} p_i)^2} \times 100$$

Donde:

$p_i$ : Precipitación del mes  $i$ , en mm, obtenida sobre la base de las simulaciones del clima.

## **b. Factor topográfico (LS)**

### **b.1 Factor de longitud de la pendiente (L)**

Se define como la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición o bien hasta el punto donde el escurrimiento encuentra un canal de salida bien definido.

La ecuación para obtener este factor es la descrita en la revisión de literatura por McCool, *et al.* (1989):

$$L = \left[ \frac{\lambda}{22.13} \right]^m$$

Donde:

L: Factor longitud de la pendiente.

$\lambda$ : Longitud de la pendiente, (m).

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

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

El exponente m se calcula como:

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

El valor de  $\beta$  se calcula como:

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

Donde:

$\theta$ : Ángulo de la pendiente que debe transformarse de grados a radianes.

La longitud de la pendiente se calcula como:

$$\lambda = \frac{DX}{\cos \theta}$$

Donde:

DX: Distancia entre píxeles.

En este caso, para todas la subcuena se utilizó el DEM con una distancia de pixeles de 12.5 m; el ángulo se obtuvo con la herramienta “*slope*” empleando el software QGIS. Este programa, además, utiliza una herramienta llamada Ráster Calculator (Algebra de Mapa) para ejecutar operaciones con las capas de los modelos con el fin de obtener características que se asocian a una fórmula.

## **b.2 Factor topográfico, inclinación de la pendiente (S)**

El ángulo de la pendiente modifica el tiempo de permanencia de la lámina de agua que circula por la superficie del terreno. En los terrenos llanos o con poca inclinación el agua tiene más posibilidad de infiltrarse que en las zonas inclinadas, en las que el escurrimiento circula más rápidamente hacia las zonas de menor cota.

Se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$S = (10.8 \sin \theta + 0.03) \text{ en pendientes } < 9.0\%; \text{ y}$$
$$S = (16.8 \sin \theta - 0.5) \text{ en pendientes } \geq 9.0\%,$$

Donde:

S: Factor de inclinación de la pendiente.

$\theta$ : Ángulo de la pendiente que debe transformarse de grados a radianes.

Para poder obtener este factor de una manera más sencilla y directa, se utilizó la herramienta *Raster Calculate*, del software Qgis. Una herramienta que permite conocer los grados de inclinación que tiene un terreno para después poder aplicar la fórmula del factor S, según los condicionantes del ángulo de pendiente.

Así calculados el factor L y factos S, con la misma herramienta *Raster Calculate*, del software Qgis, se procede a hallar el producto, en formato *ráster*.

Por lo tanto, es un gran avance la aplicación de algoritmos asociados con los sistemas de información geográfica (SIG), para calcular el factor LS en el modelo de RUSLE.

## **c. Factor de cobertura vegetal (C)**

Uno de los elementos de la RUSLE lo conforma el Factor C de la ecuación universal definida por Patil y Sharma (2013), como el efecto protector de las plantas sobre la cubierta del suelo.

Al respecto, las plantas pueden reducir la velocidad de la escorrentía y proteger poros superficiales para disminuir el efecto erosivo de la lluvia, e incorpora la influencia de las actividades humanas. Así, el Factor C representa el efecto de las plantas, la cobertura del suelo, la biomasa subterránea y las actividades perturbadoras del suelo sobre la erosión del suelo (Patil, 2018b). También, depende del estado de crecimiento y desarrollo de la cobertura vegetal en el momento en que actúa el agente erosivo.

### **c.1 Factor C, para el año 2013 según ZEE – Huancavelica**

Para generar los mapas del factor C en la subcuenca se utilizaron como insumos los mapas de uso de suelo y vegetación, que fueron obtenidos del estudio de la Mesozonificación Ecológica, Económica del Departamento de Huancavelica del 2013. La escala de trabajo de dicho estudio es de 1/100 000.

Para estimar el valor del factor C en el área de estudio se clasificaron 12 tipos de cobertura según los mapas de uso de suelo y vegetación. De esta forma, el valor mencionado se determinó tomando como referencia valores adoptados con base en investigaciones publicadas para la cuenca del río Mantaro (Wongchuig *et al.* 2016), debido a la similitud en características geográficas y de cobertura vegetal. Los valores se muestran en el Cuadro 14, del ítem 4.1.3.

Los valores correspondientes al factor C, oscilan entre cero y uno, este último valor corresponde a áreas sin vegetación (suelos desnudos) y con el incremento de la densidad de la cobertura vegetal, el valor del factor C, tiene una tendencia a valores de cero.

### **c.2 Factor C, para el año 2018, según Imagen satelital Sentinel 2B**

Para determinar el factor C referente a este ítem, se tiene como insumo primario la data espacial de las imágenes satelitales de la Agencia Espacial Europea ESA del programa Espacial Copernicus (Sentinel 2B), de fecha 20 de junio de 2018, a una resolución espacial de 10 metros, a la cual previamente se le procesaron y realizaron las correcciones atmosféricas y geométricas con el apoyo de las herramientas SIG.

Asimismo, estudios realizados por Pacheco *et al.* (2019) señalan que, para el cálculo de este factor, se utilizó el índice normalizado de diferencia de vegetación (NDVI) que implica el

uso de datos de teledetección basado en la absorción, transmisión y reflectancia de la energía por la vegetación que se correlaciona con la cantidad de biomasa de hoja verde en el suelo.

El desarrollo de índices de vegetación a partir de los valores de brillo se basa 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. A partir de este comportamiento diferencial en estas bandas del espectro electromagnético, se han desarrollado varios índices para estudiar el comportamiento de la cobertura vegetal.

Patil y Sharma (2013) calcularon el factor C de RUSLE con métodos matemáticos, usando modelos de regresión para realizar análisis de correlación entre los valores del factor C medidos en campo y obtenidos a partir de tablas guía y los valores de NDVI derivados de imágenes obtenidas por teledetección. En la actualidad, el NDVI es usado para estimar de manera efectiva el factor de manejo de cultivos C (Karaburun, 2010).

Para obtener los índices de vegetación en toda la extensión de la subcuenca, a partir de las imágenes de satélite (Sentinel 2B), se realizó inicialmente la clasificación supervisada por el método de Random Forest, usando la información obtenida en los trabajos de campo, con el apoyo del programa QGIS y el complemento *dzetsaka: Classification tool* en su versión 3.4.2. Posteriormente, se comprobó la precisión del NDVI y se reclasificó en nueve clases de cobertura. Los valores se muestran en el cuadro 16, del ítem 4.1.4.

Al igual que en otros estudios donde se calcula el factor mencionado, se empleó un modelo de regresión lineal, siguiendo la metodología de Karaburun (2010) para hacer análisis de correlación entre los valores del factor C obtenidos por la clasificación supervisada de la imagen y los valores de NDVI derivados con la banda roja e infrarroja de la imagen satelital.

El Índice normalizado de diferencias de vegetación se obtiene con la expresión:

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{VIS}) / (\text{PIR} + \text{VIS}),$$

Siendo:

NDVI = Índice normalizado de diferencias de vegetación.

PIR = Banda infrarrojo cercano.

VIS=Banda roja visible.

Posteriormente se graficó los datos incorporando una línea de tendencia polinomial de 5to orden para obtener la ecuación de regresión con la cual se estima el Factor C en toda la cobertura de la imagen.

La ecuación de regresión es:

$$\text{Factor } C = 11.288 * (\text{NDVI})^5 - 35.785 * (\text{NDVI})^4 + 40.316 * (\text{NDVI})^3 - 17.326 * (\text{NDVI})^2 + 0.5099 * \text{NDV} + 0.99$$

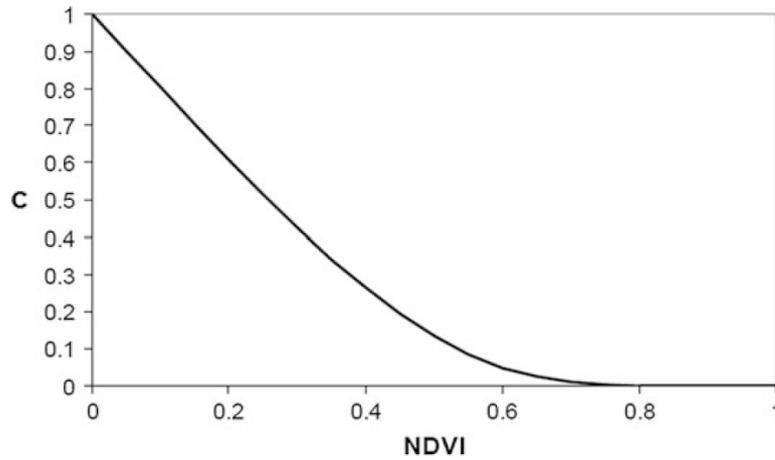
El Cuadro 10 muestra la correlación entre el Índice Normalizado de diferencia de Vegetación y el Factor C de RUSLE.

**Cuadro 10: Correlación entre 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

Correlación entre el NDVI y el factor C

Varios estudios asumen que existe una correlación lineal entre el NDVI y el factor C. Como los valores del factor C varían desde 0 para el suelo bien protegido hasta 1 para el suelo desnudo Vicenta *et al.* (2007), los valores del factor C para el suelo desnudo y la cobertura de la tierra forestal se establecen en 1 y 0, respectivamente, en el análisis de regresión. La Figura 14 muestra la representación gráfica de la función polinomial de quinto orden con un  $R^2 = 0.99$ . La línea de regresión que describe la relación entre los valores C y NDVI evidencia la buena precisión de las imágenes multiespectrales del Sentinel 2B para el cálculo del factor de protección de la vegetación en la RUSLE.



**Figura 14: Relación entre NDVI y el factor C**

**d. Factor de erodabilidad del suelo (K)**

Se utilizó la ecuación de Sharpley y Williams (1990) para estimar los valores de K en la subcuenca del río Ichu:

$$K = A \times B \times C \times D \times 0.1317$$

Donde:

$$A = [0.2 + 0.3 \exp(-0.0256 \text{ SAN} (1 - \text{SIL}/100))];$$

Factor que reduce el indicador K en suelos con alto contenido de arena gruesa y más alto en suelos con poca arena.

$$B = \left[ \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right]^{0.3};$$

Proporciona bajos factores de erosión del suelo para suelos con altas proporciones de arcilla a limo.

$$C = \left[ 1 - \frac{0.25 \cdot C}{C + \exp(3.72 - 2.95 \cdot C)} \right]^{0.3};$$

Reduce los valores de K en suelos con alto contenido de carbono orgánico.

$$D = \left[ 1 - \frac{0.7 \cdot \left(1 - \frac{\text{SAND}}{100}\right)}{\left(1 - \frac{\text{SAND}}{100}\right) + \exp[-5.51 + 2.29 \left(1 - \frac{\text{SAND}}{100}\right)]} \right];$$

Disminuye los valores de K para suelos con contenido de arena extremadamente alto.

Donde:

- SAND - contenido de fracción de arena (0,05-2,00 mm de diámetro) [%];
- SIL - contenido de fracción de limo (0,002-0,05 mm de diámetro) [%];

- CLA - contenido de fracción de arcilla (<0,002 mm de diámetro) [%];
- C: contenido de carbono orgánico (SOC) [%].

De acuerdo con lo anterior, los porcentajes de los contenidos de arena, arcilla, limo y carbono orgánico se obtuvieron de la base de datos de la FAO en la plataforma web del HWSD (*Harmonized World Soil Database*), para luego usar la ecuación de Sharpley y Williams (1990) y así poder estimar los valores de KRUSLE, para representarlos mediante un ráster.

#### e. Factor de prácticas de conservación (P)

Este factor expresa la relación entre la cantidad de suelo perdido, utilizando la práctica de conservación que se aborda, y la que se perdería labrando según la máxima pendiente.

- Estrategias de conservación

El diseño de las estrategias para el control de la erosión tiene que basarse en estudios de la mecánica de desprendimiento y transporte de las partículas del suelo por dispersión pluvial, escurrimiento y viento (Becerra 2005). En el Cuadro 11, y la Figura 2, se presentan medidas de conservación recomendadas de acuerdo al uso de suelo.

**Cuadro 11: Prácticas de conservación recomendadas de acuerdo al uso de suelo.**

Uso de suelo	Prácticas de conservación
<b>Vegetación natural de selva y humedales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reforestación.</li> <li>- Enriquecimiento de vegetación.</li> <li>- Terrazas de muro vivo.</li> </ul>
<b>Área agrícola</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adición de compostas.</li> <li>- Drenaje parcelario.</li> <li>- Rotación de cultivos.</li> <li>- Surcado en contorno.</li> <li>- Terrazas de muro vivo.</li> <li>- Zanjas de infiltración.</li> </ul>
<b>Pastizales y sabanas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcción de jagüeyes.</li> <li>- Barreras vivas.</li> <li>- Drenaje parcelario.</li> <li>- Manejo de praderas.</li> <li>- Presas de malla de alambre en cárcavas.</li> </ul>

FUENTE: (Becerra 2005).

Los objetivos que se pretende alcanzar con las estrategias de conservación son los siguientes:

- Proteger al suelo contra el impacto de la lluvia.
- Aumentar la capacidad de infiltración del suelo para reducir el volumen de escurrimiento.
- Mejorar la estabilidad de los agregados, para aumentar su resistencia a la erosión.
- Aumentar la aspereza de la superficie para reducir la velocidad del escurrimiento superficial.

#### **d.1 Factor P, para el año 2013 según ZEE – Huancavelica**

Para fines de esta investigación, se optó por representar el valor del factor de práctica de conservación según el método de cultivo y la pendiente (Shin, 1999). Las prácticas mecánicas de conservación incluyen los efectos de contorno, en hileras o terrazas. Adicionalmente, en el Cuadro 12 se representa el valor del factor de práctica de conservación según el método de cultivo y la pendiente.

**Cuadro 12: Factor de práctica de conservación P**

<b>Pendiente (%)</b>	<b>Contorno</b>	<b>Cultivo en hileras</b>	<b>Terrazas</b>
<b>0.0 – 7.0</b>	0.55	0.27	0.10
<b>7.0 – 11.3</b>	0.60	0.30	0.12
<b>11.3 – 17.6</b>	0.80	0.40	0.16
<b>17.6 – 26.8</b>	0.90	0.45	0.18
<b>26.8 &gt;</b>	1.00	0.50	0.20

FUENTE: (Shin 1999)

La mayor parte de la subcuenca del río Ichu es pastizal altoandino y menos del 50 por ciento se utiliza para los campos de cultivos (Shin, 1999). Asimismo, en la mayoría de la cuenca prevalece el pastoreo extensivo.

Sin embargo, el valor se determina de acuerdo con las tabulaciones del método de cultivo y la pendiente, las cuales no podrían ajustarse a la realidad de la subcuenca, por lo que se requiere dar solidez a la investigación con trabajos de campo para calcular los valores, toda vez que mientras mayor sea la información, este valor se ajustará a la realidad de la subcuenca.

## **d.2 Factor P ajustado, para el año 2018, según Imagen satelital Sentinel 2B**

El término P ajustado refiere al cálculo del Factor P para el año 2018. En este proceso, para fines de la investigación se optó por representar el valor del factor de práctica de conservación según el método de cultivo y la pendiente (Shin 1999) adicionando la información espacializada de lugares priorizados para proponer las prácticas de conservación.

El cálculo de los valores de P ajustado, se realizó en dos etapas. La primera consistió en realizar visitas de campo a los distritos de forman parte de la subcuenca, con el fin de conocer las prácticas de conservación que se venían realizando y el estado actual de ellas. La segunda etapa se realiza, con la información de campo y ayuda de imágenes satelitales procesadas del año 2018, se realizó el procesamiento para representarlo cartográficamente y proponer nuevas áreas que requieren de prácticas de conservación de suelos. La priorización de áreas se basó en el nivel de detalle de la información recabada en campo, la que faculta a determinar las prácticas de conservación aplicables en la subcuenca. Estas prácticas propuestas consideran también, los usos y costumbres del poblador huancavelicano.

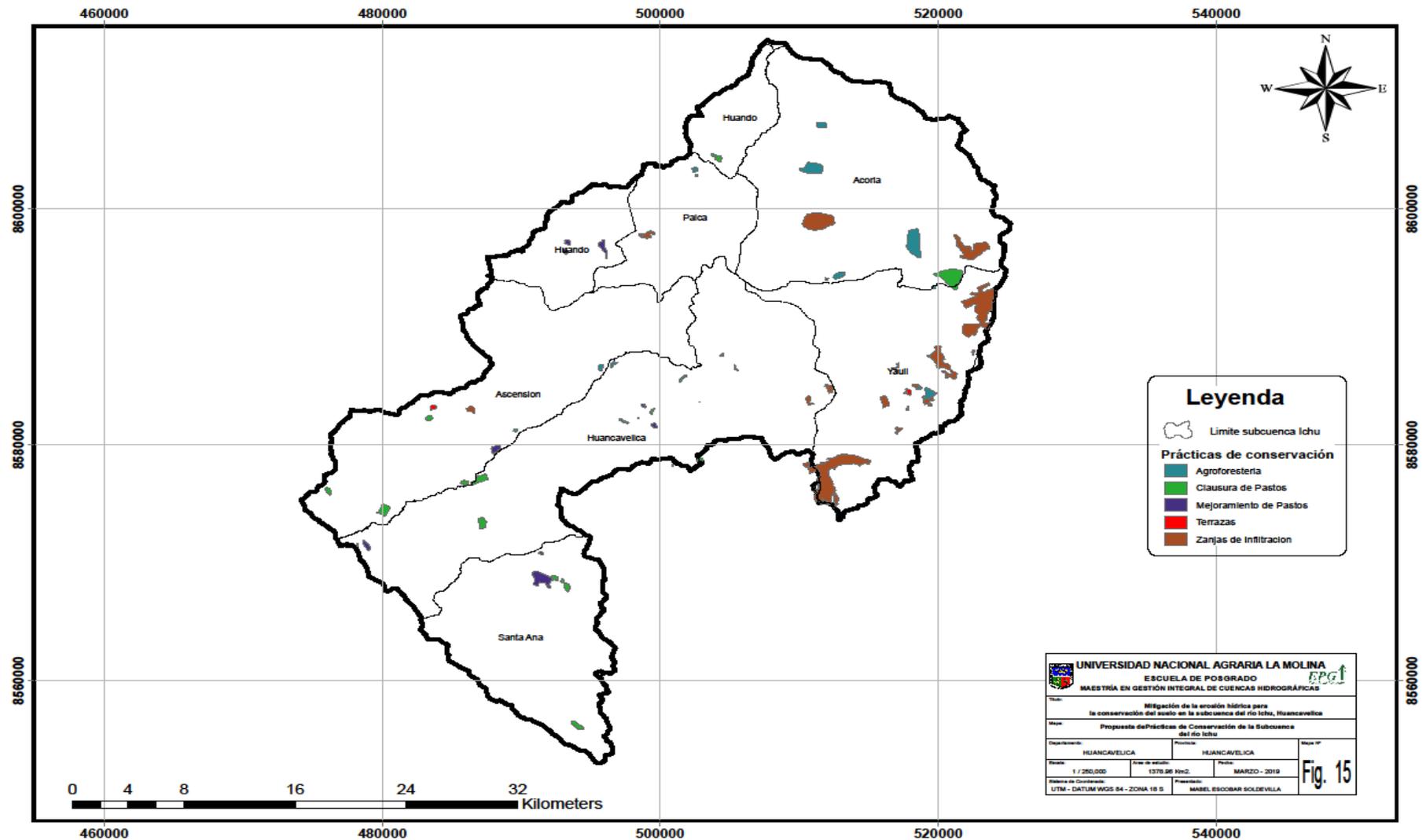


Figura 15: Mapa temático de Prácticas de Conservación de la subcuena del río Ichu

### 3.3.3 MODELO CONCEPTUAL APLICADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DEL SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA

La Figura 16, muestra la metodología e información cartográfica utilizada y generada en el desarrollo del modelo.

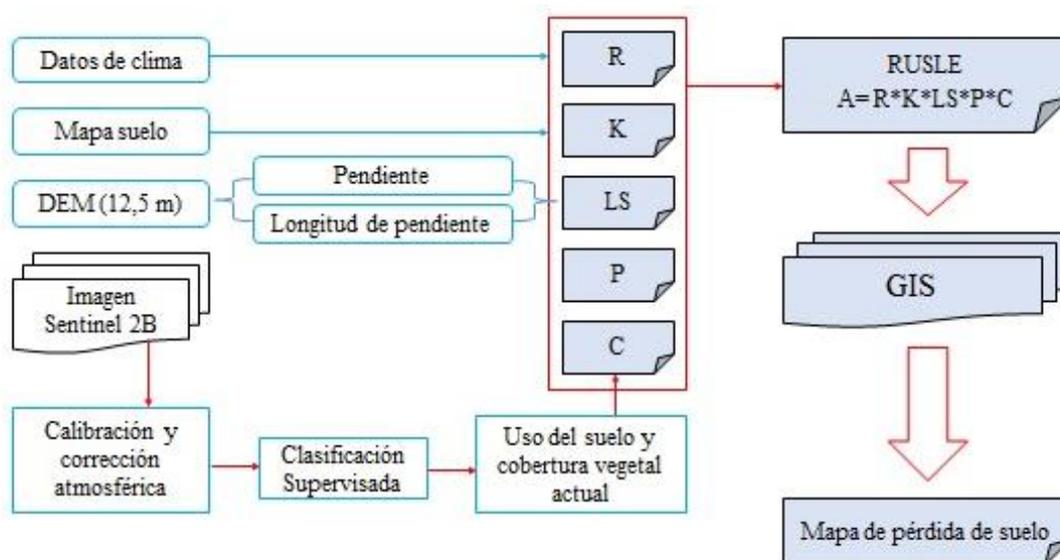


Figura 16: Mapa conceptual de la pérdida de suelo en la Subcuenca del río Ichu

### 3.3.4 CLASES DE SEVERIDAD DE LA EROSIÓN DEL SUELO

El modelo RUSLE se combinó con la técnica GIS para analizar lo siguiente: las tasas de pérdida de suelo causadas por la erosión hídrica y su promedio anual; así también, para evaluar la distribución espacial de las tasas de pérdida a lo largo de la subcuenca.

Debido a la amenaza por la existencia potencial de quebradas inactivas dentro de la gran cobertura de erosión del suelo en la subcuenca Ichu; en el Cuadro 13 se proporciona una descripción de cómo se corre el riesgo de erosión en cada categoría de clase.

### 3.3.5 PROPUESTA DE MITIGACIÓN PARA DISMINUIR LA PÉRDIDA DEL SUELO

La presencia de cobertura vegetal no siempre evita se desarrolle el escurrimiento superficial, por ello el empleo de prácticas de conservación del suelo es necesario para disminuir el efecto del flujo de agua.

Las diferentes prácticas de conservación del suelo tienen el objetivo de reducir la erosión de un área de tierra donde se desarrolle un nivel máximo de producción agrícola, pastoreo o actividad recreativa sin obtener un daño ambiental inaceptable. Puesto que la erosión es un proceso natural, no se puede prevenir, pero se puede reducir a un nivel máximo aceptable o tolerable a la pérdida de suelo. Esto debe considerarse como un criterio de desempeño que se espera que logren las medidas de control de la erosión (Morgan, 2005).

Asimismo, las principales prácticas de conservación de suelos y agua deben iniciarse desde la parte alta de la cuenca y luego hacia la parte baja. Se pueden describir bajo los títulos:

- Prácticas agronómicas
- Prácticas mecánico-estructurales
- Prácticas forestales

Las prácticas agronómicas combinadas con un buen manejo del suelo pueden influir en las fases de desprendimiento y transporte de la erosión, mientras que las prácticas mecánicas son efectivas para controlar la fase de transporte, pero hacen poco para evitar el desprendimiento del suelo.

La preferencia siempre se da a las prácticas agronómicas porque son menos costosas y se relacionan directamente con la reducción del impacto de la gota de lluvia, el aumento de la infiltración, la reducción del volumen de escorrentía y la disminución de las velocidades del viento y del agua. Además, se adaptan más fácilmente a los sistemas agrícolas existentes y son más relevantes para mantener o restaurar las comunidades de plantas biodiversas.

Por otra parte, las prácticas mecánicas son en gran medida ineficaces por sí mismas porque no pueden evitar el desprendimiento de las partículas del suelo, además de ser costosas de construir y mantener (Morgan, 2005). Su papel principal es complementar las medidas agronómicas y controlar el flujo de cualquier exceso de agua, así como, el viento que pueda surgir.

**Cuadro 13: Clases e indicadores de erosión del suelo.**

<b>Código</b>	<b>Clase</b>	<b>Tasa de erosión (t/ha)</b>	<b>Indicadores</b>
1.	Muy leve	0 a 2	No hay evidencia de compactación o costras del suelo; sin marcas de lavado o características de socavación sin pedestales de salpicaduras o exposición de raíces de árboles; Cobertura vegetal superior al 70 % (suelo y dosel).
2.	Leve	2 a 5	Algunas costras de la superficie del suelo; Lavado localizado, profundidad 50 - 100 m; Pequeños pedestales de salpicaduras, de 1 - 5 mm de profundidad, donde las piedras o los árboles expuestos protegen el suelo subyacente, ocupando no más del 10 % del área; el nivel del suelo es ligeramente más alto en la parte ascendente o en los lados de barlovento de las plantas y rocas; 30 - 70 % de cobertura vegetal.
3.	Moderada	5 a 10	Marcas de lavado surcos discontinuos espaciados cada 20 - 50 m; Los pedestales de salpicaduras y las raíces de los árboles expuestos marcan el nivel de la superficie anterior, los montículos de tierra protegidos por vegetación, todos a profundidades de 5 - 10 mm y que no ocupan más del 10 % del área; costras superficiales de leves a moderadas; 30 - 70% de cobertura vegetal; ligero riesgo de problemas de contaminación aguas abajo si las pendientes se descargan directamente en los cursos de agua
4.	Alta	10 a 50	Red conectada y continua de surcos cada 5 - 10 m o barrancos espaciados cada 50 - 100m; exposición de raíces de árboles, pedestales de salpicaduras y montículos de suelo a profundidades de 10 a 50 mm que ocupan no más del 10 % del área; costras de la superficie sobre grandes áreas; menos del 30 % de cobertura vegetal; Peligro de contaminación y problemas de sedimentación aguas abajo.
5.	Severa	50 a 100	Red continua de surcos cada 2-5m o barrancos cada 20m; exposición a raíces de árboles, pedestales de salpicaduras y montículos de suelo a profundidades de 50-100 monjas que cubren más del 10 % del área; vetas de material grueso; suelo desnudo; sedimentación de cuerpos de agua; Daños a carreteras por erosión y sedimentación.
6.	Muy severa	100 a 500	Red continua de canales con canalones cada 5 - 10m; suelo circundante fuertemente costroso; severos problemas de sedimentación, contaminación y eutrofización; suelo desnudo.
7.	Catastrófica	>500	Amplia red de arroyos y barrancos; grandes barrancos (> 100m <sup>2</sup> ) cada 20 m; la mayor parte de la superficie original del suelo removida; Daños severos por erosión y sedimentación en el lugar y aguas abajo.

FUENTE: (Morgan 2005)

## **a) Principales prácticas agronómicas**

### **a.1 Barreras Vivas**

Se trata de hileras de plantas perennes y de crecimiento denso, sembradas perpendicularmente a la pendiente (curvas a nivel). Las plantas se siembran una cerca de la otra para formar una barrera continua (Reynel y León, 1990).

Asimismo, Vásquez (2000) menciona los siguientes aspectos:

- Se recomienda el establecimiento de barreras vivas como práctica adecuada en terrenos con pendiente menor a 10 por ciento.
- En terrenos con pendientes mayores a 10 por ciento, el establecimiento de las barreras vivas debe estar acompañado con otras prácticas conservacionistas, tales como el cultivo en fajas, los surcos en contorno, la acequia o zanjas de infiltración, las terrazas, etc.
- Las plantas que se van a establecer como barrera viva deben sembrarse en doble hilera distanciadas entre sí entre 15-20 cm aproximadamente. En áreas con zanjas o acequias de infiltración, la barrera viva debe sembrarse entre 10 - 20 cm por encima del lado o borde superior (aguas arriba de la zanja).
- El distanciamiento entre barreras vivas dependerá del tipo de cultivo y del grado de pendiente del terreno.
- Se debe practicar un mantenimiento frecuente de las barreras vivas a fin de asegurar su buen desarrollo y funcionamiento.

### **a.2 Surcos en contorno**

Consiste en instalar y manejar los cultivos en curvas a nivel, construyendo los surcos en sentido perpendicular a la máxima pendiente del terreno. Su función es constituir un obstáculo que impida el paso del agua de escorrentía, para disminuir así su velocidad y su capacidad de arrastre del suelo. Esta práctica se recomienda para terrenos con pendientes mayores a 5 por ciento y menores a 18 por ciento; en el caso de terrenos con pendientes mayores al 10 por ciento, debe complementarse con terrazas. Los surcos en contorno se utilizan principalmente en terrenos dedicados a la siembra de cultivos en hilera o en limpio (papa y maíz), aunque pueden surcarse a nivel los terrenos que van a ser dedicados a cultivos densos, especialmente el trigo.

Entre otras prácticas aplicables, se puede mencionar las siguientes:

- Cultivo en fajas.
- Regeneración de la cobertura vegetal.
- Labranza conservacionista o mínima labranza.
- Rotación de cultivos y cultivos asociados.
- Incorporación de materia orgánica al suelo.
- Aplicación de fertilizantes y enmiendas químicas al suelo.
- Manejo de pastos.

## **b. Principales prácticas mecánico estructurales**

### **b.1 Zanjas o acequias de infiltración**

Se trata de pequeños canales de sección rectangular o trapezoidal, generalmente asimétricos y son construidos transversalmente a la pendiente máxima del terreno. Los fondos de estos canales de desviación deben estar a nivel, salvo que se trate de acequias o canales de desviación en los que la pendiente recomendable es de 0,1 a 0,3 por ciento y su desembocadura debe efectuarse en una zona protegida, a fin de evitar la formación de una gran cárcava.

Para el diseño, construcción y mantenimiento se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La cantidad de agua de lluvia que cae en la zona de captación, debe ser menor o igual a la que capta y absorbe la zanja.
- La pendiente del terreno en el área que se construirá la zanja de infiltración determinará el espaciamiento entre zanjas; en terrenos de mayor pendiente se construirán a menor distancia.
- En zonas de pastoreo se deben dejar tabiques con un ancho adecuado para facilitar el paso de los animales y evitar el deterioro de las zanjas.
- Realizar el mantenimiento de la zanja, limpiando el material arrastrado por el agua. De esta manera se aumenta su vida útil.
- En el borde superior de las zanjas se debe sembrar pastos o plantas de buen macollaje a modo de barreras vivas para darle mayor protección.

El efecto de esta práctica es sumamente positivo desde el punto de vista económico, social y ambiental tanto para la propia zona como para la cuenca en su conjunto, pues con esta

medida se logrará disponer de más agua en el estiaje, controlar la erosión y huaycos; además de ayudar con la regeneración de la cubierta vegetal, mejorar el paisaje escénico y la biodiversidad (Vásquez, 2000).

## **b.2 Terrazas de absorción**

Según Vásquez (2000), las terrazas de banco o llamadas también terrazas de absorción son una serie sucesiva de plataformas (bancos o terraplenes), dispuestas a manera de escaleras en las laderas. Los terraplenes pueden construirse a nivel o con una ligera inclinación hacia adentro. La inclinación del banco o terraplén hacia adentro evita el rebalse del agua de lluvia durante los aguaceros fuertes o lluvias prolongadas. La nivelación de los bordes impide que el agua escurra hacia un lado u otro; de este modo el agua de lluvia que cae en las terrazas se infiltra total y uniformemente en éstas, evitando totalmente la erosión. Cuando se construyen estas prácticas en zonas de alta precipitación (>1000 mm/año), se debe contemplar un sistema de drenaje superficial.

Requisitos para su construcción:

- El borde interno de la terraza, pie o borde inferior del talud aguas arriba (debe estar a nivel).
- El borde externo de la terraza o borde superior del talud aguas abajo (debe estar a nivel).
- La profundidad del borde interno o desnivel (debe permitir almacenar el agua de lluvia que recibe).
- El suelo del terraplén o terraza propiamente dicha, debe ser removido o “preparado” para que pueda absorber el agua de lluvia.
- El talud debe ser sembrado con plantas perennes y cuya altura preferentemente no debe ser mayor de 1,50 m.

Las ventajas de esta práctica son:

- Controlar eficazmente la erosión,
- Incrementar el área total del terreno disponible para cultivo. El talud puede ser aprovechado para cultivos de pastos de corte, hierbas o plantas perennes de la zona.
- Atenuar el efecto perjudicial de las sequías que se presentan durante el establecimiento de las plantas, ya que en las terrazas se almacena más agua que en las laderas sin estas obras.

- Aumentar la productividad a diferencia de zonas no tratadas con esta práctica.

### **b.3 Diques para el control de cárcavas**

Reynel y León (1990) mencionan que en zonas con pendiente elevada e inadecuado manejo del suelo, la escorrentía al concentrarse provoca, con el paso del tiempo, cárcavas o grietas en el sentido de la máxima pendiente. Estas pueden alcanzar varios kilómetros de longitud y decenas de metros de profundidad, siendo sus márgenes muy susceptibles al arrastre.

Al sucederse las lluvias hay un lavaje de material por el canal de la cárcava y se deposita en las partes bajas formando grandes conos de deyección que cubren terrenos de cultivo, caminos e incluso viviendas.

Vásquez (2000) señala que el control de cárcavas se desarrolla en dos niveles. En primer lugar, a nivel de laderas, con las prácticas de repoblación de pastos y bosques con especies de la zona, buen manejo de pastos, construcción de zanjas de infiltración, terrazas de absorción, construcción de pequeñas qochas o reservorios. Si todavía hay escurrimiento en la cárcava misma, se efectúan los trabajos a nivel de cárcavas con la construcción o colocación de diques, pequeñas barreras u obstáculos transversales a fin de disminuir la velocidad del agua y favorecer la sedimentación de las partículas que lleva el agua en suspensión.

### **b.4 Andenes**

Vásquez (2000) indica que un sistema de andenería es la expresión de una cultura caracterizada por el trabajo organizado para la conservación de las aguas, los suelos y para la producción agropecuaria eficiente. Al respecto, la andenería incaica fue construida por un pueblo con vocación eminentemente agrícola, guiado por el padre inca bajo una disciplina místico-militar y una organización comunal eficiente para el trabajo. Los objetivos de esta práctica son los siguientes:

- Reducción de la pendiente de la ladera y mejor aprovechamiento de la ladera con fines productivos.
- Mejor aprovechamiento del agua ya sea de lluvia o de riego y protección de los suelos contra la erosión hídrica.
- Mejor aprovechamiento de los abonos y otros insumos.

**c) Principales prácticas forestales:**

Los sistemas forestales son una combinación de árboles y arbustos, que forman bosques y/o macizos forestales con fines maderables, de protección y mixtos. Esta plantación se efectúa en sectores críticos o como complemento a las estructuras o defensa artificial. El sistema forestal consiste en el uso de árboles asociados a cultivos agrícolas (sistemas agroforestales), árboles asociados a las pasturas (sistema silvopastoril) y árboles asociados con fines de restitución de la vegetación (sistemas agroforestales secuenciales).

Por esta razón, la agroforestería y los manejos integrados en la región andina no solo constituyen una idea interesante o un modelo deseable de producción para la zona; sino que son una realidad existente desde hace largo tiempo en muchos lugares, sobre todo aquellos que mantienen sus tradiciones en las estrategias productivas.

En la actualidad se apuesta por actividades asociadas como la agroforestería, debido a sus variados beneficios, entre ellos la conservación del suelo y el agua, que incluye las prácticas de siembra y cosecha de agua (Reynel y León, 1990).

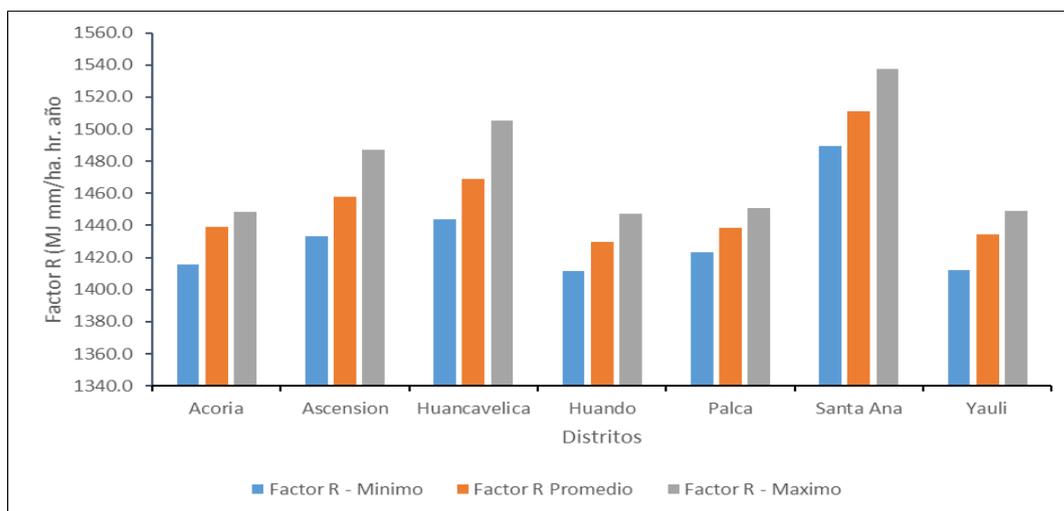
## IV. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES QUE INTEGRAN EL MODELO RUSLE

#### 4.1.1 EROSIVIDAD DE LAS PRECIPITACIONES (FACTOR R)

Para la estimación del factor R, se utilizó el promedio de los valores generados por los dos métodos mencionados y así se obtuvo los valores promedios de R en cada una de las estaciones. Posteriormente, se procedió con la interpolación de dichos valores basados en un método geoestadístico (*kriging* ordinario) para obtener su valor distribuido espacialmente en cada punto en la grilla de la simulación. Finalmente, se muestra el mapa del factor R del área de estudio, el cual varía en un rango de 1410 a 1540 MJ.mm. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> (ver Figura 16).

Asimismo, el distrito de Santa Ana presenta los valores máximos del Factor R, seguido por el distrito de Huancavelica. Del mismo modo, el distrito de Huando presenta los menores valores de R, como se observa en la Figura 17.



**Figura 17: Factor R mínimo, promedio y máximo por distritos**

La Figura 18, muestra el mapa de erosividad de las precipitaciones correspondientes a la subcuenca del río Ichu.

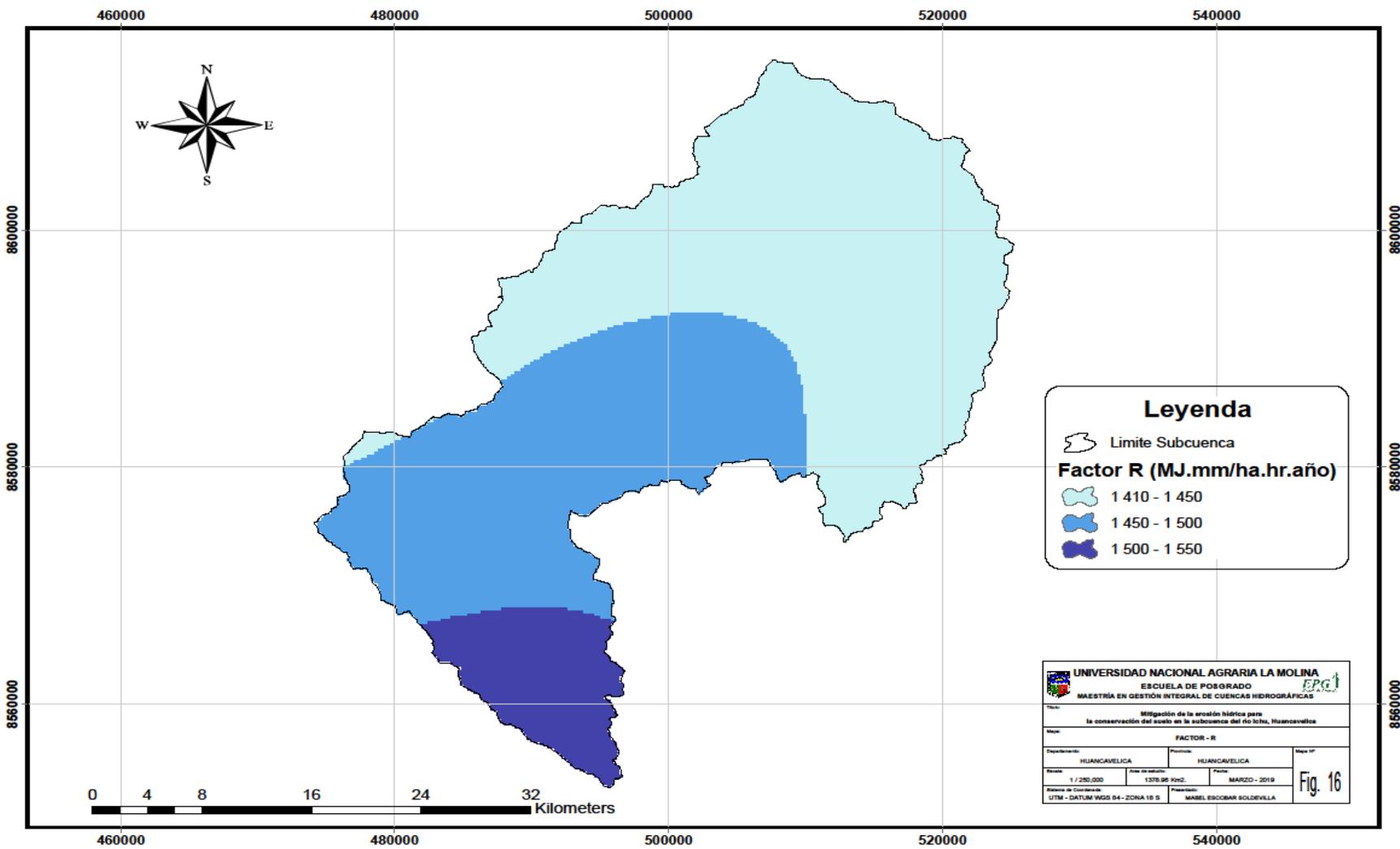


Figura 18: Mapa del Factor R en la subcuenca del río Ichu

En la Figura 19 se muestra la distribución espacial de la precipitación media anual. Así también, se observa que la zona de la subcuenca con precipitaciones media anual menores a 960 mm al año presentaron valores menores de erosividad; mientras que, los mayores valores de erosión se asocian a zonas con precipitación media anual superior a los 1000 mm/anuales.

A su vez, los valores de erosividad anual promedio de cada estación meteorológica y los valores de precipitación media anual correspondiente al período 1980 – 2014 se muestran en el siguiente cuadro.

**Cuadro 14: Precipitación promedio anual de estaciones y factor R en la subcuenca del río Ichu (Período: 1980 al 2014)**

<b>Estación Meteorológica</b>	<b>Factor R Método I</b>	<b>Factor R Método II</b>	<b>Factor R Promedio</b> MJ.mm.ha-1.hr-1.año-1	<b>Precipitación media anual (mm)</b>
Huancalpi	449.3	2247.1	1348.2	908.1
Acostambo	369.5	2061.3	1215.4	763.9
Huancavelica	508.6	2413.2	1460.9	962.8
Lircay	492.9	2170.1	1331.5	801.0
Choclococha	540.0	2540.3	1540.2	1033.3
Colcabamba	530.7	2439.5	1485.1	984.3

De acuerdo con esta información, se alcanzó una correlación consistente entre la precipitación (P) y el factor de lluvia (R promedio), conseguidas por el relacionamiento de la precipitación promedio anual de su serie hidrológica (35 años) de las seis estaciones y el factor R de la ecuación ajustada, con base en los datos descritos en el Cuadro 14.

Al respecto, se reporta una ecuación lineal consistente con un alto coeficiente de correlación  $r^2 = 0.92$

$$R = 1.081P + 414.37$$

La incertidumbre asociada al factor R se da por no existir una base de datos pluviométricos satisfactoria para la subcuenca, lo que no permite establecer una relación más confiable entre la erosión de lluvia y otros indicadores ligados al comportamiento de la precipitación. Los valores usados para su estimación del factor R se muestran en los Anexos 1 hasta el anexo 9.

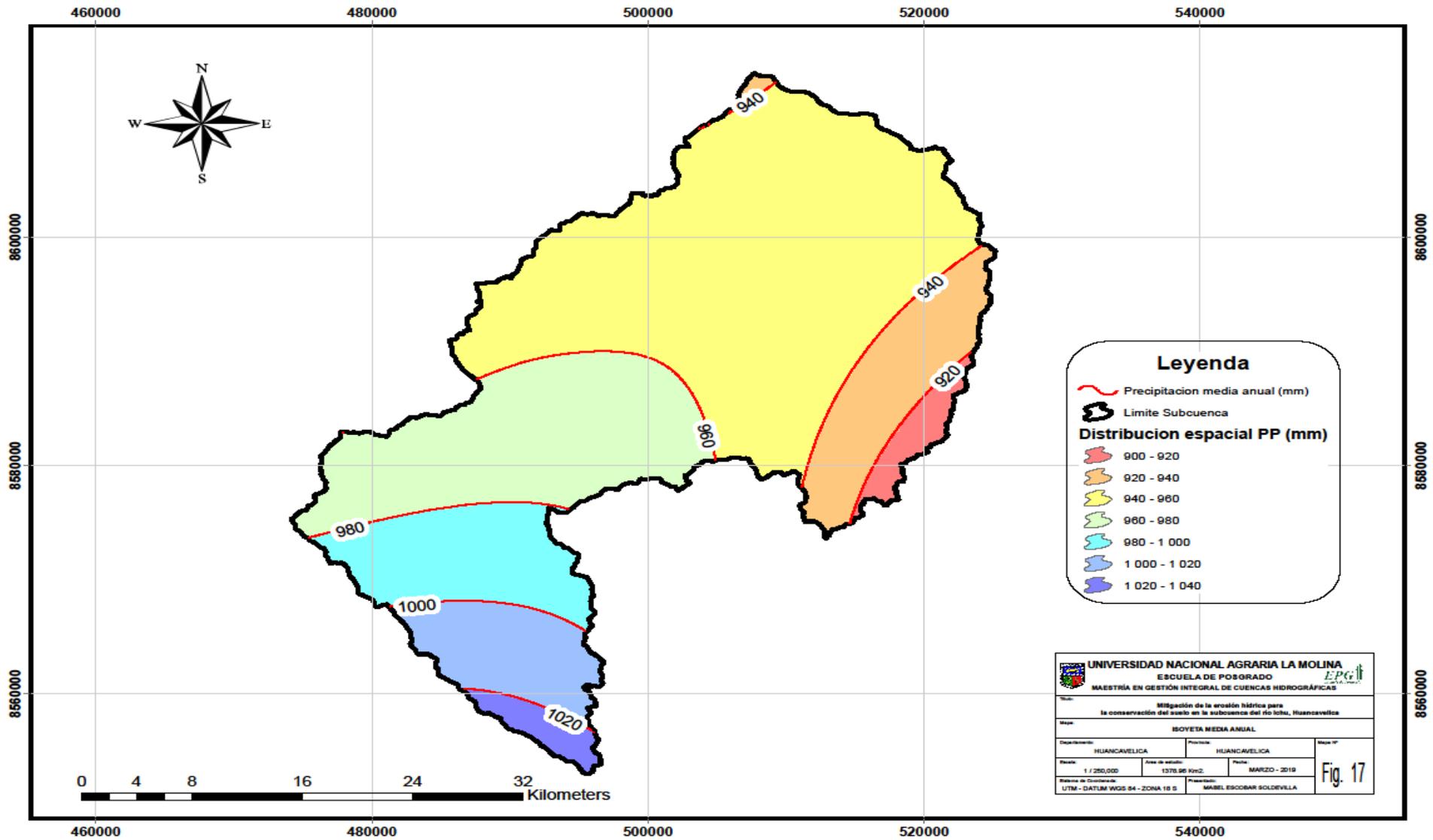


Figura 19: Mapa de Isoyetas media anual en la subcuenca del río Ichu

#### **4.1.2 LONGITUD E INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE (FACTOR LS)**

El factor LS, es un factor adimensional que se calculó para el área de estudio en el entorno GIS, según las formulas Mc Cool y Foster Como primer insumo se halló el modelo de elevación digital (DEM) para la subcuenca del río Ichu, el DEM se obtuvo en formato TIFF, del servidor gratuito de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) ALOS PALSAR, con una resolución espacial de 12,5 m.

La acumulación de flujo es el valor de la capa de grilla expresada como el número de celdas de la grilla; que fluyen en cada celda. El tamaño de cada celda es de 12.5 m por 12.5 m, que fueron insumos para calcular la acumulación de flujo del área de estudio.

Los valores del factor LS de la subcuenca en estudio están en un rango de 0 a 500 y espacialmente los rangos de valor entre 0 y 50 se encuentran en mayor proporción en el área de estudio, como se puede observar en la Figura 20.

El factor topográfico LS tiene mayor valor en zonas con mayores accidentes topográficos, las unidades de suelo que predominan en esta área de estudio son el Cambisol y Regosol, los cuales son susceptibles a erosión. Además, por referencia de Wongchuig *et al.* (2016) en “*Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes*” se puede observar que los valores obtenidos para la subcuenca del río Ichu, se encuentran dentro de un margen muy próximo al de dicho estudio, lo que nos indica un buen resultado.

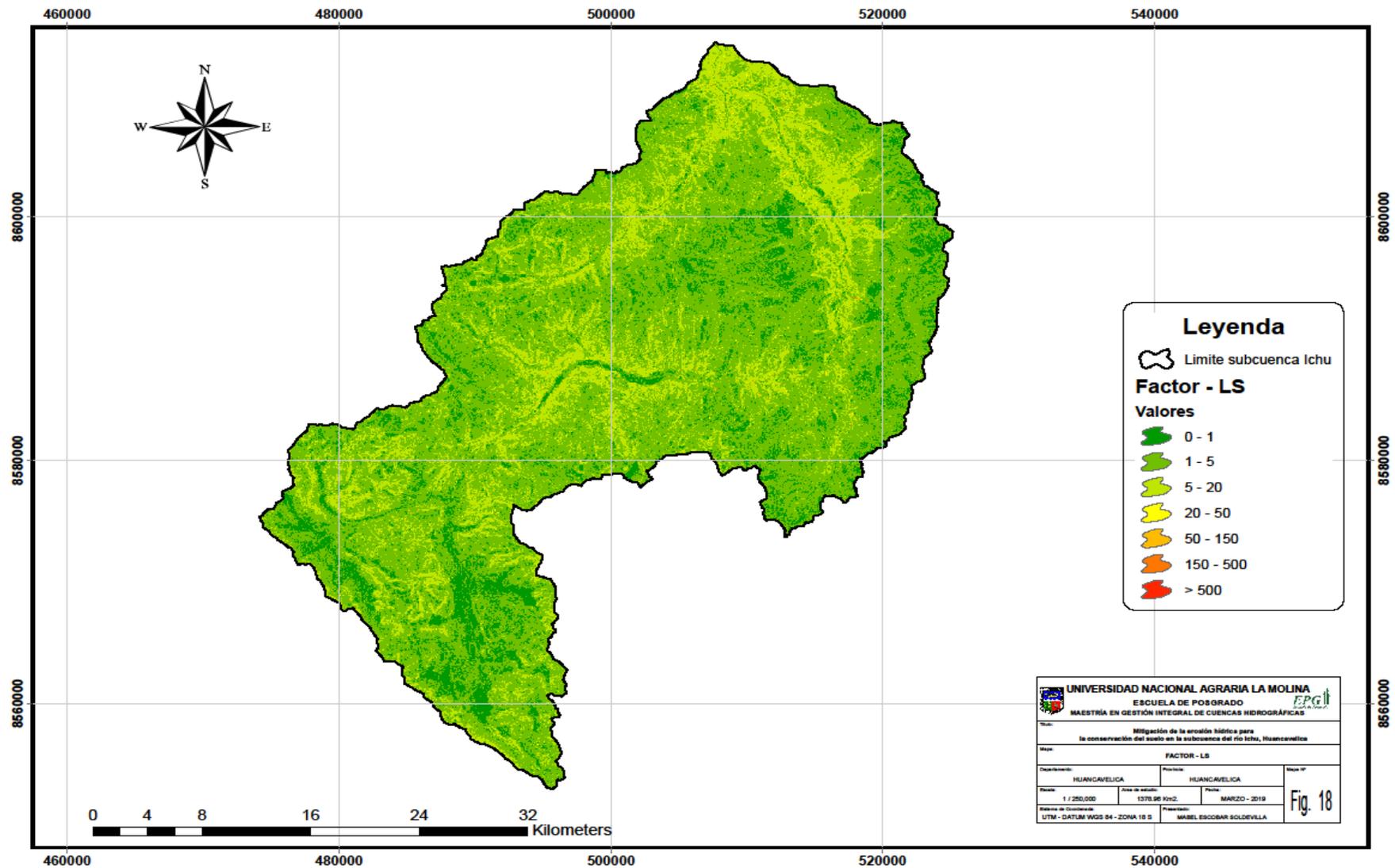


Figura 20: Mapa del factor LS en la subcuena del río Ichu

#### 4.1.3 FACTOR DE COBERTURA VEGETAL (FACTOR C) EN BASE AL ESTUDIO DE LA MESOZONIFICACIÓN ECOLÓGICA Y ECONÓMICA - 2013

Con la información extraída sobre el uso del suelo y la vegetación en el estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica del Departamento de Huancavelica del año 2013, se elaboró el mapa del factor C. En este se muestran los lugares de protección que presenta la cuenca; así, entre más se acerque su valor a cero, la cuenca tiene una mejor cobertura que le permite protegerse de la lluvia y disminuir el efecto de la erosión hídrica. Para este estudio se clasificaron 12 tipos de coberturas con sus respectivos valores del factor C. Estos valores del factor C fueron adaptados al tipo de cobertura de la geografía peruana, realizado anteriormente en investigaciones publicadas para la cuenca del río Mantaro (Wongchuig *et al.* 2016), como se observa en el Cuadro 15.

**Cuadro 15: Tipos de cobertura y sus valores del factor C para la subcuenca del río Ichu**

Tipo de Cobertura	Referencia	Cobertura (%)	Factor C
Áreas sin vegetación	IGP (2005)	5.66	0.900
Áreas con cultivos agrícolas	Delgado and Vásquez (1997)	0.93	0.450
Bofedal	IGP (2005)	8.99	0.120
Zona urbana	G.-S. Lee & K.-H. Lee (2006)	0.22	0.002
Cuerpos de agua	IGP (2005)	0.26	0.000
Matorral húmedo	IGP (2005)	8.08	0.200
Matorral sub húmedo	IGP (2005)	4.86	0.380
Matorral sub húmedo/pajonal	IGP (2005)	0.14	0.380
Nevado	IGP (2005)	0.27	1.000
Pajonal	IGP (2005)	50.34	0.300
Pajonal/césped de puna	IGP (2005)	20.12	0.150
Plantación forestal	IGP (2005)	0.12	0.200

FUENTE: Adaptado de Wongchuig *et al.* (2016)

Asimismo, en la Figura 21 se muestran los valores que van desde cero para cuerpos de agua donde no hay erosión, hasta uno, para suelos desnudos, como se puede observar en algunas áreas de la subcuenca. Además, las áreas ubicadas con mayor altitud tienen valores

relativamente menores (0,13 a 0,2), siendo la cobertura con mayor porcentaje en la subcuenca el de tipo pajonal, con un valor de 0,30, lo cual indica que es poco susceptible a la erosión, por lo que en esta zona se esperaría que los valores de erosión no sean altos.

También se observó que, en las partes con mayor altitud de la subcuenca, el valor del factor C es mayor y se asocia a espacios pequeños de vegetación con una menor acumulación de biomasa, debido a las bajas temperaturas que restringen el desarrollo de la misma y, consecuentemente, reducen la protección del suelo contra el impacto de la gota.

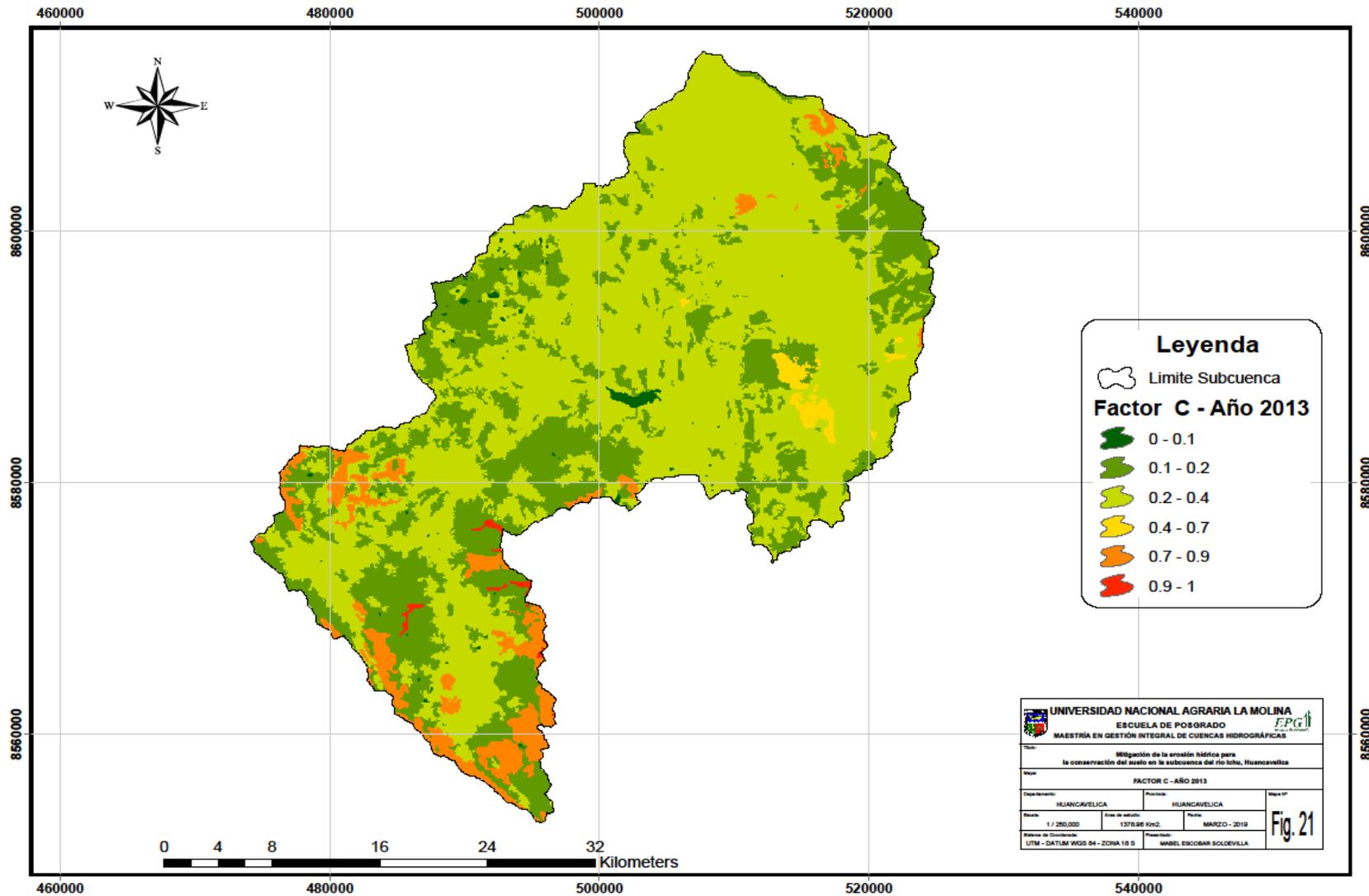


Figura 21: Mapa del factor C en la subcuenca del río Ichu

#### **4.1.4 FACTOR DE COBERTURA VEGETAL (FACTOR C) PARA EL AÑO 2018**

Como es de conocimiento, el factor C relaciona la pérdida de suelo de un área con la cobertura y el manejo específico continuamente en barbecho. Igualmente, mide el efecto del dosel y la cobertura del suelo en la hidrúlica del impacto de la gota de lluvia y la escorrentía, así como, el efecto de la cobertura y la gestión en la cantidad y la tasa de escorrentía. Por tanto, representa el efecto de las plantas, la cobertura del suelo, la biomasa subterránea y las actividades perturbadoras sobre la erosión del suelo (Patil, 2018b).

Al respecto, el 2018 el factor C hizo referencia a la información cartográfica de cobertura y uso actual de suelo. Esto se generó a partir de las imágenes satelitales de la Agencia Espacial Europea ESA del programa Espacial Copernicus (Sentinel 2B), con fecha 20 de junio de 2018.

Asimismo, el NDVI del área de estudio varía entre 0 y 0,63, valores que indican la presencia de zonas descubiertas de vegetación o con escasa cobertura vegetal para los sectores con valores cercanos a cero; mientras que, la presencia de espesa cobertura vegetal se muestra con valores alrededor de 0,63, lo que sugiere la existencia de una cobertura vegetal densa, pero no completamente vigorosa. De tal manera que, los mínimos valores justamente coinciden en las áreas con escasa vegetación, mientras que, la máxima protección se encuentra en áreas con vegetación densa.

En el Cuadro 16 se muestra la superficie cubierta por cada una de las clases de uso y cobertura vegetal, lo cual representa el mayor porcentaje de cobertura con un 54,5 por ciento. En primer lugar, el tipo de cobertura de pajonal /césped de puna muestra valores del Factor C entre 0,15 y 0,29, distribuidos en casi toda la subcuenca, cubiertas de pastizales e Ichu en la mayoría. En segunda posición en cuanto a cobertura, con un 20,8 por ciento se encuentra el tipo de cobertura de pajonales cubierta por matorrales y pastizales, distribuidos indistintamente por toda el área de estudio. Por último, con un 2,5 por ciento de cobertura se encuentra el tipo de cobertura de bofedales.

**Cuadro 16: Tipos de cobertura y sus valores del factor C para la subcuenca del río Ichu**

<b>Tipo de Cobertura</b>	<b>Cobertura (%)</b>	<b>Factor C</b>
Área con cultivo agrícola	6.8	0.45
Área sin vegetación	9.2	0.9
Bofedal	2.5	0.12
Casco urbano	0.5	0.002
Cuerpo de agua	1.3	0
Nevado	3.1	1
Pajonal	20.8	0.30
Pajonal/cesped de puna	54.5	0.15
Plantación forestal	1.3	0.2

De acuerdo con esto, se establece una relación a través de una función polinomial de 5to orden con un  $R^2 = 0,99$  entre el NDVI y el factor C, con lo cual se evidencia la buena precisión de las imágenes multiespectrales de Sentinel 2B, para el cálculo del factor de protección de la vegetación en la RUSLE.

Al respecto, el Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) resulta ser un buen indicador de la distribución espacial de la cobertura vegetal. Estos resultados se muestran en la Figura 22.

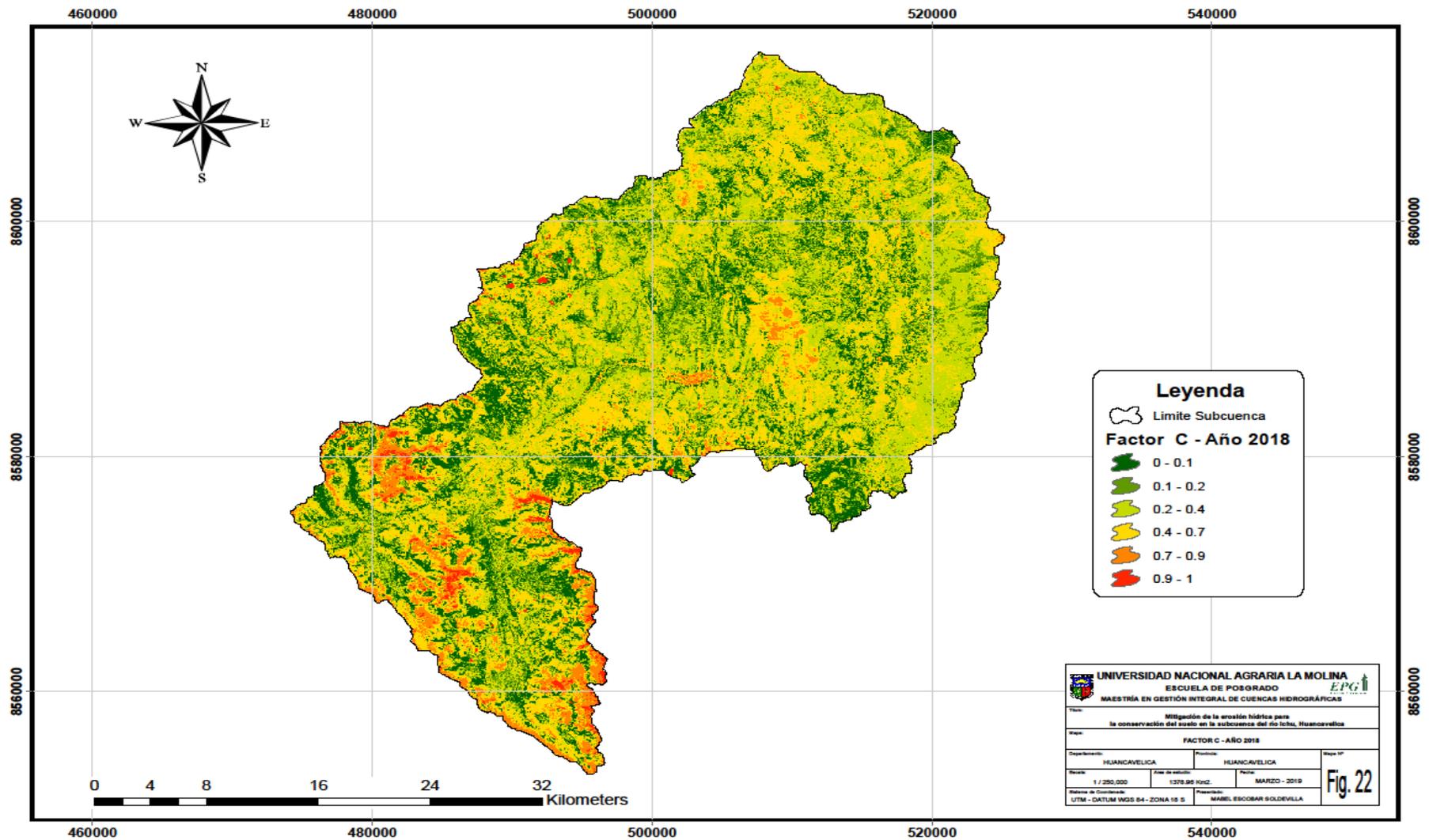


Figura 22: Mapa del factor C para el año 2018 en la Subcuenca del río Ichu

#### 4.1.5 FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO (FACTOR K)

En relación con la ecuación de Sharpley y Williams (1990) que fue explicada en el ítem de metodología, para estimar los valores de K se determinó el factor de erodabilidad del suelo (K) para cada clase de textura del suelo presente en la subcuenca del río Ichu. Así, por ejemplo, en la Figura 23 se representa el mapa de erodabilidad del suelo en la subcuenca del río Ichu, donde los valores varían desde 0,016 en tierra de roca hasta 0,018.

La información anterior sobre la subcuenca incluye suelos con texturas que varían de mediana a arenosa, poco profunda y baja fertilidad natural, lo que indica una alta vulnerabilidad a la erosión, principalmente para los leptosoles y cambisoles.

En el Cuadro 17 se muestran los porcentajes de arena, limo, arcilla y carbono orgánico, que fueron obtenidos desde la base de datos de la FAO para calcular los valores de A, B, C y D, y ser utilizados en la ecuación de Sharpley y Williams (1990). Esto con el objetivo de estimar el valor de K para cada tipo de suelo dentro de la subcuenca del río Ichu.

**Cuadro 17: Valores del factor K para los suelos según clasificación FAO**

<b>Clasificación de suelo FAO</b>	<b>Arena %</b>	<b>Limo %</b>	<b>Arcilla %</b>	<b>Carbono Orgánico %</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>K</b>
GL	48.00	24.00	28.00	2.02	0.20	0.79	0.76	1.00	0.0159
I-HI	37.00	45.00	18.00	2.35	0.20	0.90	0.75	1.00	0.0181
I-Bh	58.90	16.20	24.90	0.97	0.20	0.76	0.93	0.99	0.0184

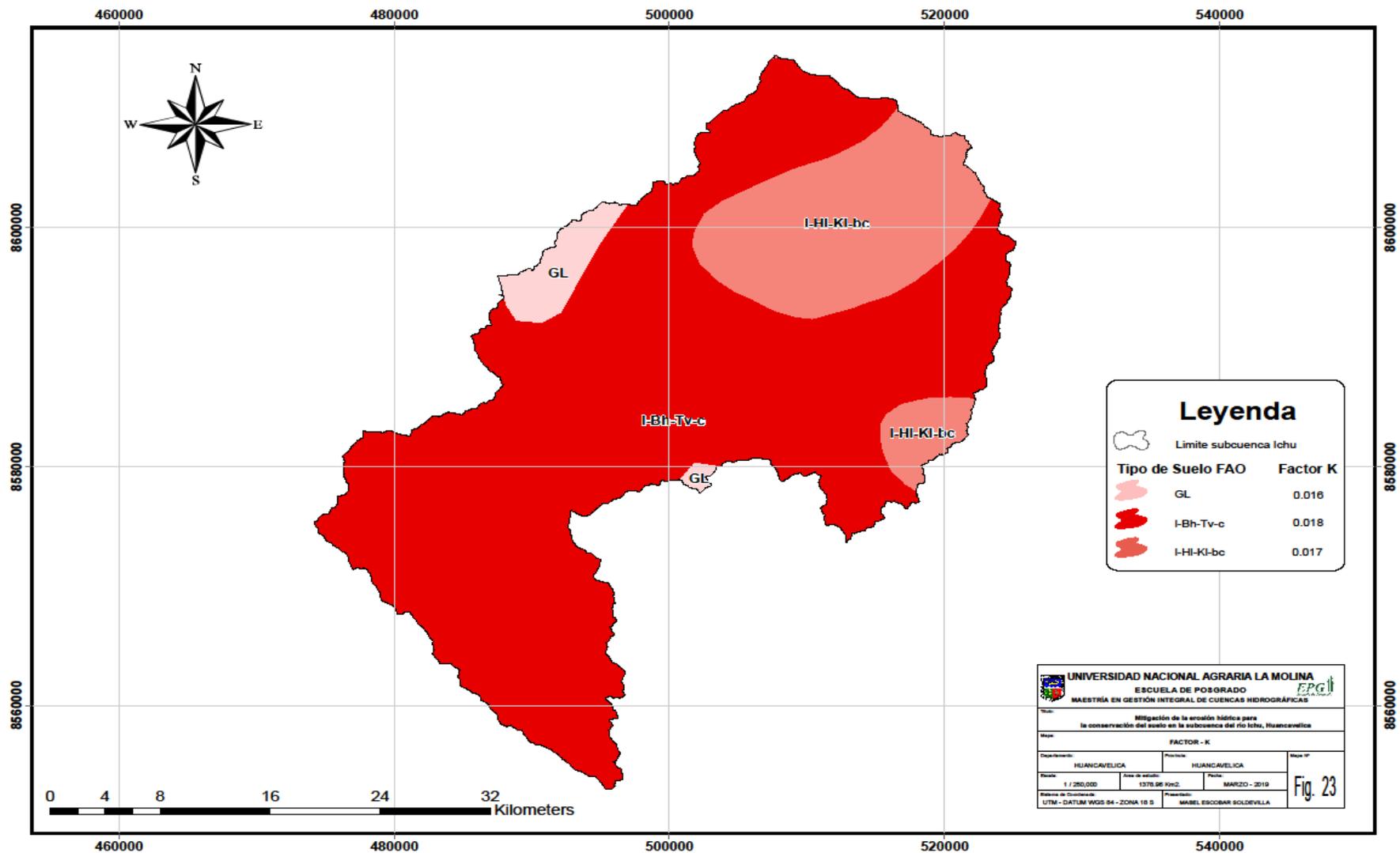


Figura 23: Mapa del factor K en la subcuenca del río Ichu

#### 4.1.6 FACTOR P SIN PRÁCTICA DE CONSERVACIÓN

La mayor parte de la subcuenca del río Ichu tiene aptitud para pastos y es de tipo pastizal alto andino. De acuerdo con esto, menos del 50 por ciento se utiliza para los campos de cultivos y en la mayor parte prevalece el pastoreo extensivo. El factor de práctica de conservación se estimó en función a la relación entre contorno y pendiente en las áreas del campo de cultivo, ya sea en contorno, en hileras o terrazas, de acuerdo al ítem de metodología de la presente investigación. Sin embargo, a fin de tener un mejor criterio de valoración del factor P, se consideraron las visitas de campo a zonas de cultivo y pastizales de la subcuenca, para considerar las prácticas de conservación ya existentes y su estado de conservación.

En el Cuadro 18 se muestran los valores estimados para cada rango de pendiente, de acuerdo con lo recomendado por Shin (1999).

**Cuadro 18: Valores del factor P estimado según rangos de pendientes**

<b>Pendiente (%)</b>	<b>Valor Factor P</b>
0.0 – 7.0	0.55
7.0 – 11.3	0.6
11.3 – 17.6	0.8
17.6 – 26.8	0.9
26.8 >	1

La Figura 24, presenta el factor de práctica de conservación en la subcuenca del río Ichu.

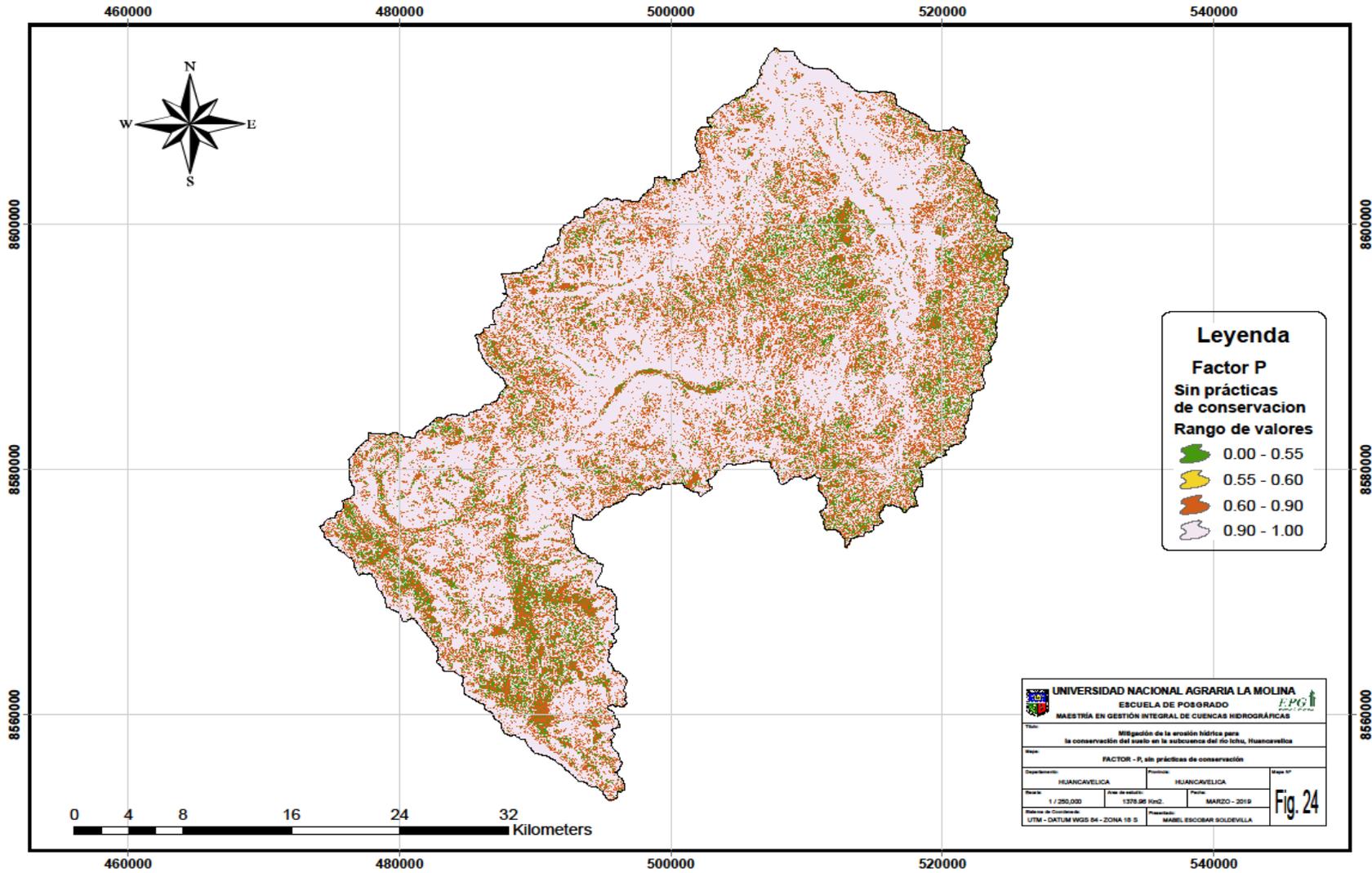


Figura 24 : Factor P sin prácticas de conservación en la subcuenca del río Ichu

#### **4.1.7 FACTOR P CON PRÁCTICA DE CONSERVACIÓN**

Para la estimación del factor P con prácticas de conservación (que se denominará cartográficamente P ajustado) se tuvo como base los valores obtenidos del factor P sin prácticas de conservación. Posteriormente, se continuó con las visitas de campo y se identificaron lugares donde se debía priorizar y llevar a cabo las prácticas de conservación de suelo. Estas prácticas consideran también, los usos y costumbres del poblador huancavelicano.

La estimación de los valores del factor P con propuesta de prácticas de conservación plantea siete alternativas, las cuales se describen a continuación:

##### **a. Agroforestería**

Es una forma de manejo de vegetación que relaciona o integra la vegetación forestal al ciclo agrícola, normalmente con algún beneficio a la producción agrícola por parte de la vegetación.

a.1 Las barreras vivas, con formación de terrazas lentas para proteger y conservar el área agrícola.

a.2 Cercos vivos, cortinas rompevientos para la protección de la cobertura vegetal y ganado.

##### **b. Clausura de pastos**

Esta técnica incluye cercar e impedir el ingreso de animales a la pradera por un determinado tiempo, con el objetivo de recuperar los pastos naturales, incrementar la recarga acuífera y generar semillas de buena calidad.

##### **c. Mejoramiento de pastos**

Esta técnica se realiza en zonas de clausura temporal con pastizales de condición regular y pobre. El mejoramiento de pastos se realiza a través de la regeneración de especies vegetales naturales con el incremento del su vigor general (radicular, basal y aéreo), completar su ciclo vegetativo y llegar a la madurez fisiológica para la obtención de semilla botánica viable. Se permitirá el ingreso de animales para el pastoreo, una vez al año, durante los meses de junio a julio, con una carga ligera y una permanencia corta.

#### **d. Recuperación de pastos**

Esta práctica se realiza en pastizales de condición pobre y muy pobre. Se clausura el área para repoblar de especies por un tiempo mínimo de tres años y debe estar acompañado de un plan de mejoramiento de los pastizales, con el uso de especies nativas o la introducción de especies como el trébol blanco.

En las praderas que vienen siendo invadidas por especies indeseables se deben realizar faenas comunales para eliminarlas y, de optar por esta práctica, se deberá realizar labores de resiembra de pastos naturales en los espacios de suelo desnudos. De manera previa a las tres prácticas antes mencionadas se debe considerar lo siguiente:

- Evaluación de la capacidad de carga.
- Pastoreo rotativo
- Abonamiento de pastos.
- Control de plantas indeseables.

#### **e. Terrazas**

Son franjas secuenciales que dividen la ladera en secciones perpendiculares a la pendiente, cuyos límites superiores e inferiores están orientados por las curvas a nivel y protegidos por muros de piedra (pircas) o bordos de tierra. Las terrazas son formadas progresivamente por efecto del arrastre y acumulación de sedimentos. Se estima que la construcción concluye cuando la pendiente de la plataforma es menor al 12 por ciento.

Para una mayor efectividad, mientras se va formando la terraza, esta práctica debe ser complementada con medidas agronómicas y forestales.

#### **f. Zanjas de infiltración**

Las zanjas de infiltración son estructuras hechas por el hombre que sirven para atrapar escurrimiento superficial en periodos de lluvias intensas en zonas de ladera. En las zanjas, a pendiente de cero por ciento, el agua captada se infiltra en el suelo y así aumenta su humedad y recarga el agua subterránea, evitando procesos erosivos del suelo.

Si bien el uso de las zanjas de infiltración, es una buena técnica que favorece la disminución de la erosión del suelo, esta debe ser sostenible en el tiempo por lo que se debe considerar el diseño y las condiciones de uso (profundidad, tipo de suelo, espaciamiento entre zanjas, entre

otras). Así también, se debe considerar el mantenimiento de esta construcción con faenas comunales de limpieza

El Cuadro 19, muestra los valores de P, según los tipos de practica para diferentes rangos de pendientes.

**Cuadro 19: Valores del factor P estimado según rangos de pendientes**

<b>Tipo</b>	<b>Pendiente (%)</b>	<b>Factor P (Ajuste)</b>
Agrofosteria	0 - 7	0.6
	7 - 11.3	0.5
	11.3 - 17.6	0.6
	17.6 - 26.8	0.6
	> 26.8	0.6
Clausura de pastos	0 - 7	0.7
	7 - 11.3	0.5
	11.3 - 17.6	0.7
	17.6 - 26.8	0.6
	> 26.8	0.7
Mejoramiento y recuperación de Pastos	0 - 7	0.8
	7 - 11.3	0.55
	11.3 - 17.6	0.9
	17.6 - 26.8	0.6
	> 26.8	0.8
Terrazas	0 - 7	0.1
	7 - 11.3	0.12
	11.3 - 17.6	0.16
	17.6 - 26.8	0.18
	> 26.8	0.2
Zanjas de Infiltración	0 - 7	0.27
	7 - 11.3	0.3
	11.3 - 17.6	0.4
	17.6 - 26.8	0.45
	> 26.8	0.5

\*Valores de Factor P referidos a Shin, 1999

De acuerdo con los valores del Cuadro 19 para las diferentes alternativas de conservación, se generó el mapa de factor P, que se muestra en la Figura 25.

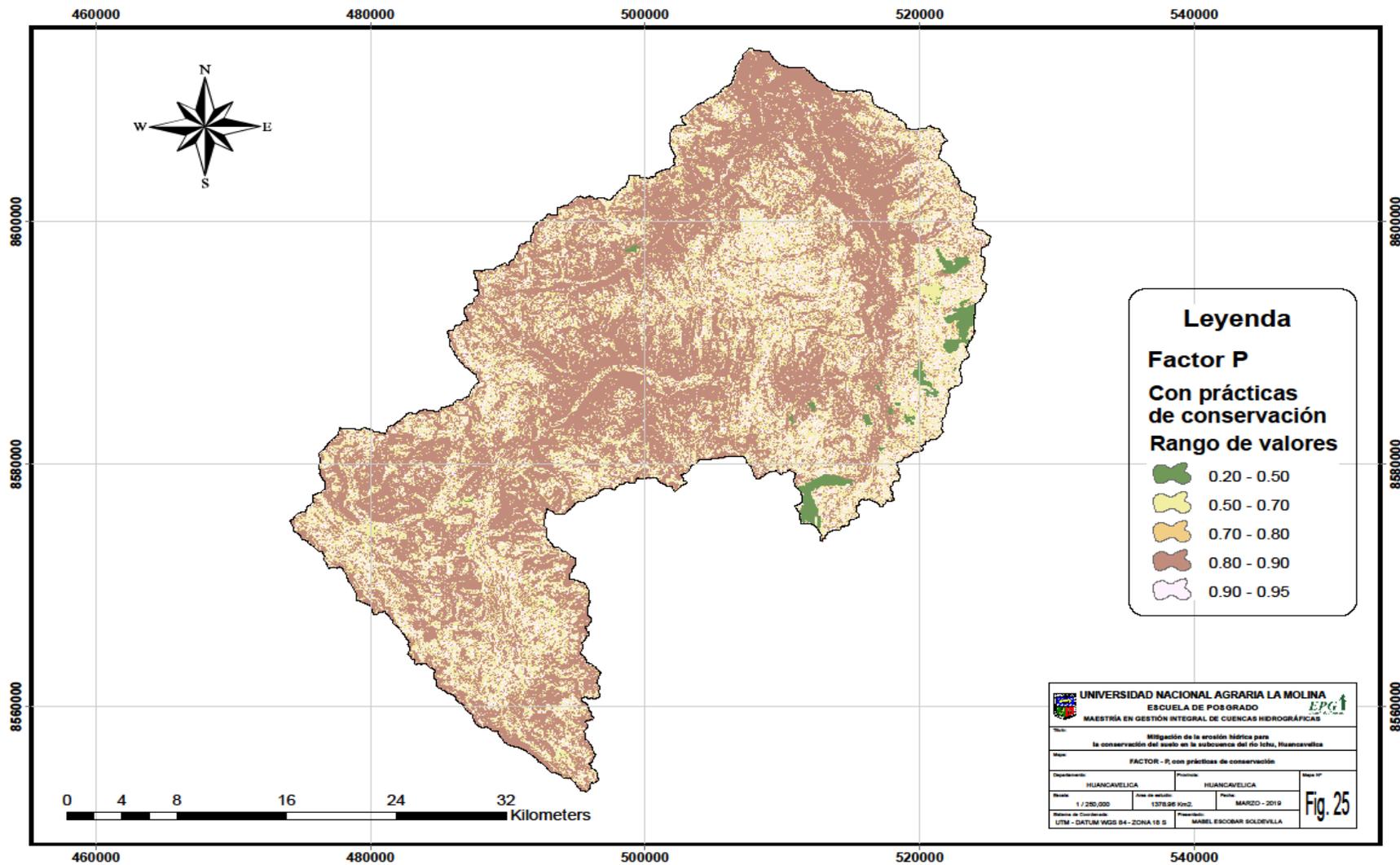


Figura 25: Factor P con prácticas de conservación en la subcuenca del río Ichu

## 4.2. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA UTILIZANDO EL MODELO RUSLE

La estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica se llevó a cabo multiplicando los factores que componen la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE), estos factores se procesaron en formato ráster utilizando la herramienta *Ráster Calculator* del algebra de mapas del programa QGIS.

Los resultados obtenidos de la dinámica de pérdida de suelo por erosión hídrica en este estudio a una escala a nivel de subcuenca, brinda una visión espacial para diferentes condiciones, de acuerdo con el cambio de uso de la tierra y las diferentes alternativas de prácticas de conservación planteadas en la subcuenca del río Ichu. Realizando las múltiples combinaciones de los factores se generaron cuatro escenarios de modelado espacial, las misma que se muestran y describen en el Cuadro 20.

**Cuadro 20 : Diferentes escenarios variando los factores C y P**

Escenario	Factores		Descripción
	Factor C	Factor P	
Escenario 1	En base al estudio Mesozonificación Ecológica y Económica -2013	Sin práctica de conservación	Tasa de pérdida de suelo del 2013, sin práctica de conservación
Escenario 2	En base a imágenes Sentinel 2B, del año -2018	Sin práctica de conservación	Tasa de pérdida de suelo del 2018, sin práctica de conservación
Escenario 3	En base al estudio Mesozonificación Ecológica y Económica -2013	Con práctica de conservación	Tasa de pérdida de suelo del 2013, con práctica de conservación
Escenario 4	En base a imágenes Sentinel 2B, del año -2018	Con práctica de conservación	Tasa de pérdida de suelo del 2018, con práctica de conservación

#### **4.2.1 ESCENARIO 1 – EN BASE AL ESTUDIO DE LA MESOZONIFICACIÓN ECOLÓGICA Y ECONÓMICA DEL DEPARTAMENTO HUANCVELICA – 2013, SIN PRÁCTICA DE CONSERVACIÓN**

Para este escenario, la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica se llevó a cabo utilizando las herramientas SIG, a través del álgebra de mapas de las capas temáticas. Asimismo, se multiplicaron los factores en formato ráster: erosividad (Factor R), erodabilidad (Factor K), topográfico (Factor LS), cobertura vegetal (Factor C en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica - 2013) y prácticas de manejo (Factor P, sin práctica de conservación), a partir de lo cual se obtuvo el mapa de erosión hídrica de la Figura 26.

En la figura mencionada se muestra el escenario 1, donde la distribución espacial de la erosión en la subcuenca del río Ichu se estima con base en el estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica del uso de suelo, observándose que el grado de erosión moderada varía en un rango de 10 a 50 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> y ocupa un 57,3 por ciento de la superficie. Los resultados para esta subcuenca, según el grado de erosión, se muestran en el Cuadro 21.

En cuanto al espacio, los grados de erosión más elevados se localizan en la parte noreste y suroeste de la subcuenca, principalmente en la parte alta de la subcuenca donde la precipitación media anual es mayor a 1000 mm. Así también, encontramos vegetación de tipo pastizal y matorral subtropical con valores de cobertura vegetal cercanos a uno, los cuales indican un suelo desprotegido y poca biomasa (ver Figura 26). Asimismo, presentan zonas con accidentes topográficos que indican valores medio y alto de los factores R y LS, respectivamente.

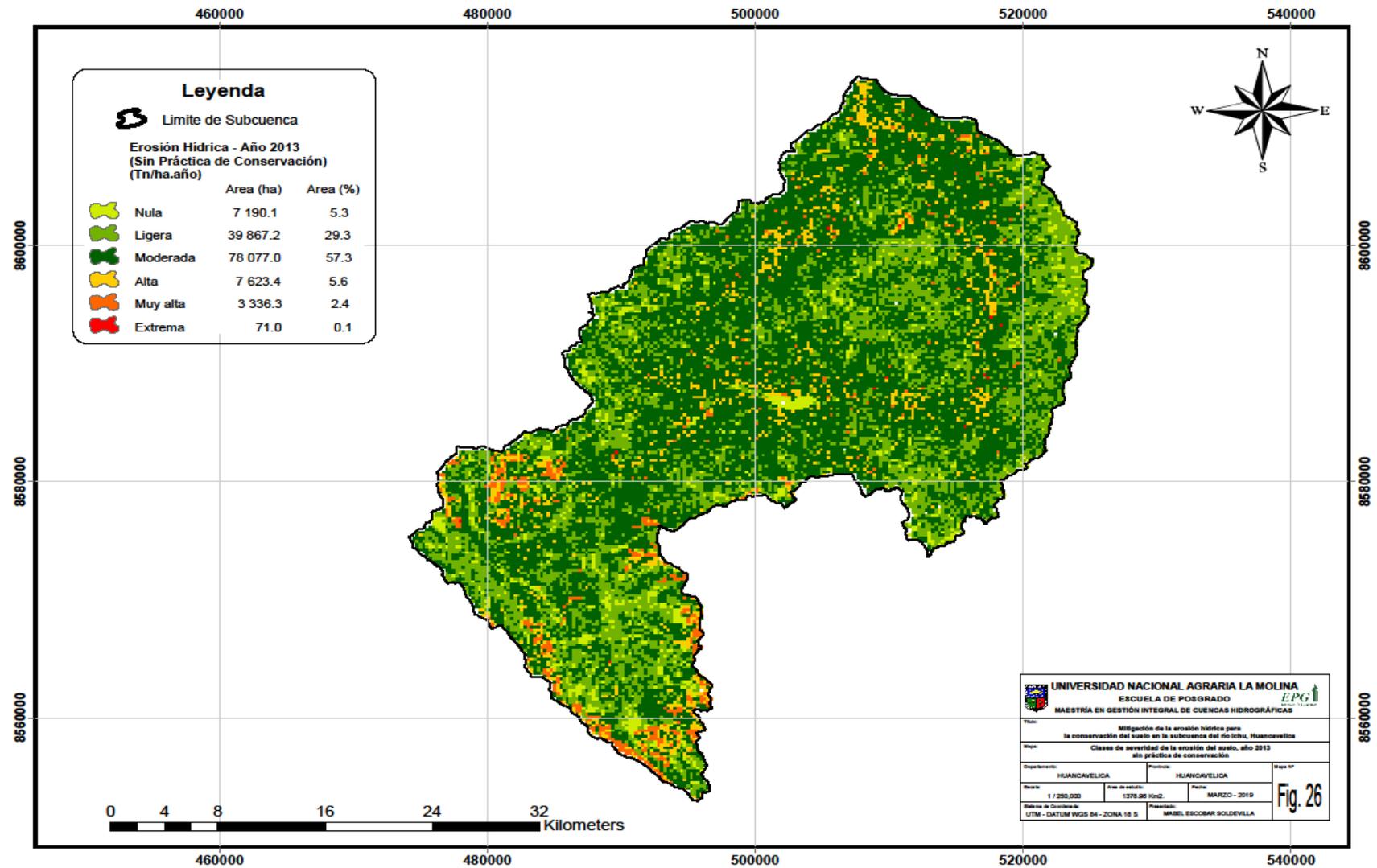


Figura 26: Clases de severidad de la erosión del suelo para el año 2013, sin práctica de conservación

**Cuadro 21: Clases de severidad, en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica, 2013 sin práctica de conservación**

<b>Grados de erosión</b>	<b>Tasa media anual de erosión (t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Nula</b>	0 – 2	7 190.1	5.3
<b>Ligera</b>	2 – 10	39 867.2	29.3
<b>Moderada</b>	10 – 50	78 077.0	57.3
<b>Alta</b>	50 – 100	7 623.4	5.6
<b>Muy alta</b>	100 - 500	3 336.3	2.4
<b>Extrema</b>	> 500	71.0	0.1
<b>Erosión máxima</b>		1 329.4	t. ha <sup>-1</sup> . año <sup>-1</sup>
<b>Erosión media</b>		22.7	t. ha <sup>-1</sup> . año <sup>-1</sup>

En lo que respecta a esta información, los valores estimados de erosión para la subcuenca del río Ichu alcanza una erosión máxima de 1329,4 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> y una erosión promedio de 22,7 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>.

Por otra parte, en el Cuadro 22 se muestra la erosión del suelo a nivel de distritos ubicados dentro de la subcuenca del río Ichu, destacando que los distritos de Santa Ana, Palca y Ascensión tienen la mayor erosión promedio de 28,6; 27,6 y 25,6 (t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>), respectivamente. Estos valores están por encima de la erosión media de toda la subcuenca y se ubican espacialmente en la parte suroeste y noroeste. Del mismo modo, se observa que el distrito de Yauli presenta la máxima erosión, llegando a los 1329,4 (t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>).

**Cuadro 22: Clases de severidad de la erosión del suelo según distritos, condición en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica sin práctica de conservación**

Distritos	Erosión (t/ha año)		
	Min.	Max.	Promedio
Acoria	0.0	871.3	21.3
Ascensión	0.0	564.4	25.6
Huancavelica	0.0	612.7	21.8
Huando	0.0	273.9	19.9
Palca	0.2	545.0	27.6
Santa Ana	0.0	645.2	28.6
Yauli	0.0	1329.4	17.0

#### **4.2.2 ESCENARIO 2 - EN BASE A IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2B – 2018, SIN PRÁCTICA DE CONSERVACIÓN**

Para este escenario, la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica se llevó a cabo multiplicando los factores: erosividad (factor R), erodabilidad (factor K), topográfico (factor LS), cobertura vegetal (Factor C nuevo, en base a imágenes satelitales Sentinel 2B del 2018) y prácticas de manejo (factor P, sin práctica de conservación).

Así, en la Figura 27 se observa la distribución espacial de la erosión en la subcuenca del río Ichu, donde la erosión predominante varía en un rango de 10 a 50 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> con un grado de erosión moderada y abarca un 50,7 por ciento de la superficie total. Los resultados para la subcuenca según el grado de erosión se muestran en el Cuadro 23.

Al respecto, el grado de la erosión en el nivel alto en la subcuenca se puede seguir visualizando en las mismas zonas noreste y suroeste de la subcuenca (Figura 27), haciendo uso del mapa del nuevo factor C y tomando como base las imágenes Sentinel 2B del año 2018. Esto puede darse, aunque la intensidad del grado de erosión moderada y extrema disminuyó y el grado de erosión muy alta se incrementó. Asimismo, esto indica todavía un área de suelo desprotegido, donde se presentan mayores accidentes topográficos y valores altos del factor R (lluvia). La parte central de la subcuenca no tiene accidentes topográficos considerables.

Los valores estimados de erosión para la subcuenca del río Ichu alcanzan un valor máximo de 1 838,2 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> y un promedio de 23,1 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>. De igual forma, a pesar de que la subcuenca tiene una vegetación predominante de pastizal andino, la característica importante en ambos escenarios viene a ser el uso de suelo y vegetación en las zonas con mayor erosión (agricultura temporal); mientras que, en las zonas de menor erosión presenta vegetación hidrófila y perennifolia. Además, la unidad de suelo predominante en esta zona es el Litosol y Cambisol, suelos que van de una moderada hacia una alta susceptibilidad a la erosión, lo cual se comprobó en esta modelación.

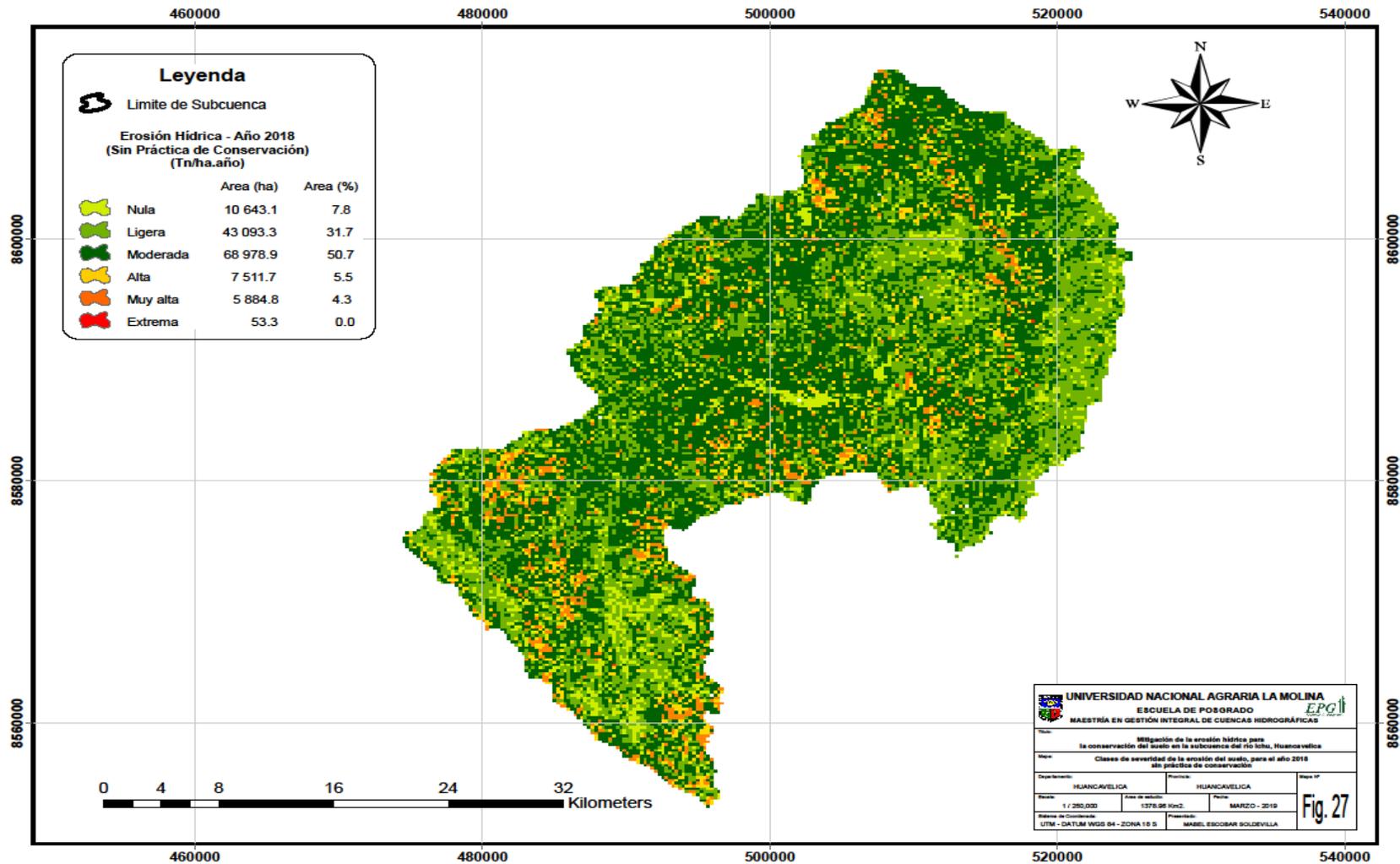


Figura 27: Clases de severidad de la erosión del suelo para el año 2018, sin práctica de conservación.

**Cuadro 23: Clases de severidad de la erosión del suelo en la subcuenca Ichu, condición actual sin práctica de conservación**

<b>Grados de erosión</b>	<b>Tasa media anual de erosión (t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Nula</b>	0 – 2	10 643.1	7.8
<b>Ligera</b>	2 – 10	43 093.3	31.7
<b>Moderada</b>	10 – 50	68 978.9	50.7
<b>Alta</b>	50 – 100	7 511.7	5.5
<b>Muy alta</b>	100 - 500	5 884.8	4.3
<b>Extrema</b>	> 500	53.3	0.0
<b>Erosión máxima</b>		1 838.2	t. ha <sup>-1</sup> . año <sup>-1</sup>
<b>Erosión media</b>		23.1	t. ha <sup>-1</sup> . año <sup>-1</sup>

En el Cuadro 24 se muestra la erosión según los distritos localizados dentro de la subcuenca del río Ichu. Asimismo, se observa que la mayor tasa de erosión media se localiza en el distrito de Huando con 27,2 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>. Por su parte, Santa Ana tiene una tasa de erosión media de 26,9 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>; mientras que, Huancavelica tiene una tasa de erosión media de 26,6 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>. Del mismo modo, se observa que en el distrito de Huancavelica se presenta la máxima erosión, llegando a los 183,2 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>.

**Cuadro 24: Clases de severidad de la erosión del suelo según distritos, según Imágenes satelitales Sentinel 2B del 2018**

<b>Distritos</b>	<b>Erosión (t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>)</b>		
	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Promedio</b>
Acoria	0.0	479.7	20.0
Ascensión	0.0	555.1	23.1
Huancavelica	0.0	1838.2	26.6
Huando	0.0	821.7	27.2
Palca	0.0	683.6	23.3
Santa Ana	0.0	716.9	26.9
Yauli	0.0	1428.2	15.9

### 4.2.3 ESCENARIO 3 - EN BASE AL ESTUDIO DE LA MESOZONIFICACIÓN ECOLÓGICA Y DEL 2013, CON PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN

Para este escenario, la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica se llevó a cabo multiplicando los siguientes factores: erosividad (Factor R), erodabilidad (Factor K), topográfico (factor LS), cobertura vegetal (Factor C, tomando en cuenta el estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica del 2013) y prácticas de manejo (Factor P ajustado, con prácticas de conservación). Los resultados se muestran en la Figura 28.

También se observa la distribución espacial de la erosión en la subcuenca del río Ichu, bajo este escenario donde predomina el grado de erosión moderada que varía en un rango de 10 a 50 t ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>, abarcando el 57 por ciento de la superficie total. Los resultados según el grado de erosión se muestran en el Cuadro 25.

De acuerdo con las condiciones del escenario 3, la Figura 26 muestra espacialmente que en el suroeste de la subcuenca se ubica una erosión alta. Así también, se observa que predomina el grado de erosión moderada, seguido por la ligera, con 57 y 30,4 por ciento, respectivamente.

Los valores estimados de erosión para esta condición alcanzan un máximo de 1255,5 t ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> y un promedio de 21,7 t ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>.

**Cuadro 25: Clases de severidad de la erosión del suelo, en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica del 2013, con práctica de conservación**

<b>Grados de erosión</b>	<b>Tasa media anual de erosión (t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Nula</b>	0 – 2	7 050.0	5.2%
<b>Ligera</b>	2 – 10	41 501.0	30.4%
<b>Moderada</b>	10 – 50	77 550.2	57.0%
<b>Alta</b>	50 – 100	7 044.1	5.1%
<b>Muy alta</b>	100 - 500	2 953.8	2.2%
<b>Extrema</b>	> 500	66.0	0.1%
<b>Erosión máxima</b>		1 255.5	t ha <sup>-1</sup> . año <sup>-1</sup>
<b>Erosión media</b>		21.7	t ha <sup>-1</sup> . año <sup>-1</sup>

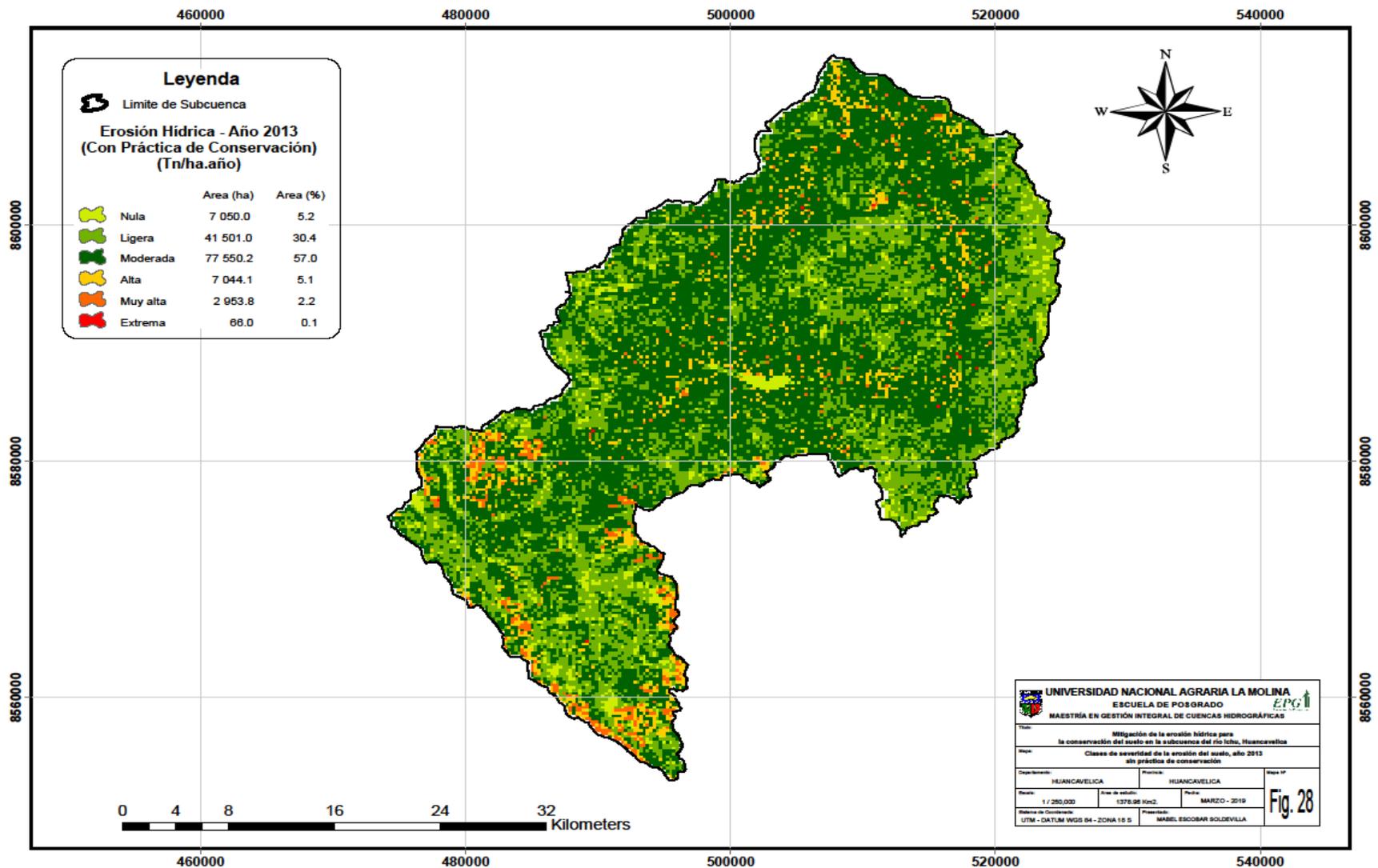


Figura 28: Clases de severidad de la erosión del suelo para el año 2013, con práctica de conservación

En el Cuadro 26 se muestra la erosión según los distritos localizados dentro de la subcuenca del río Ichu. Por ejemplo, los distritos de Santa Ana, Palca y Ascensión presentan la mayor tasa de erosión media de 27,4; 26,4 y 24,5 ( $t\ ha^{-1}\cdot\ año^{-1}$ ), respectivamente. Dichos resultados sobrepasan la erosión media de toda la subcuenca; del mismo modo, se observa que el distrito de Yauli presenta una máxima erosión de  $1255,5\ t\ ha^{-1}\cdot\ año^{-1}$ .

**Cuadro 26: Clases de severidad de la erosión del suelo según distritos, en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica del 2013, con práctica de conservación.**

Distrito	Erosión (t/ha año)		
	Min	Max	Promedio
Acoria	0.0	822.9	20.4
Ascensión	0.0	533.0	24.5
Huancavelica	0.0	492.6	20.9
Huando	0.0	258.7	19.0
Palca	0.2	514.7	26.4
Santa Ana	0.0	613.0	27.4
Yauli	0.0	1255.5	16.2

#### **4.2.4 ESCENARIO 4 - EN BASE A IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2B DEL 2018, CON PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN**

Para este escenario, la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica se llevó a cabo multiplicando los factores: erosividad (Factor R), erodabilidad (Factor K), topográfico (factor LS), cobertura vegetal (Factor C nuevo, tomando en cuenta las imágenes satelitales Sentinel 2B del 2018) y prácticas de manejo (Factor P ajustado, con prácticas de conservación).

De igual forma, en la Figura 29 se muestra la distribución espacial de la erosión en la subcuenca del río Ichu y, bajo las condiciones del escenario 4, se observa que el tipo de erosión predominante es de grado moderado que varía en un rango de 10 a  $50\ t\ ha^{-1}\cdot\ año^{-1}$  .y

ocupa el 49,2 por ciento de la superficie total. Los resultados para esta subcuenca, según el grado de erosión, se muestran en el Cuadro 27.

En este escenario, el mayor grado de erosión los observamos en la zona suroeste de la subcuenca (Figura 28). Así también se observa que espacialmente predomina el grado de erosión moderada, seguido por ligera con valores de 49,2 y 34 por ciento, respectivamente del área total de la subcuenca.

Los valores estimados de erosión para este escenario, alcanzan una erosión máxima de 1348,9 t ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> y una erosión media 22,1 t ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>.

**Cuadro 27: Clases de severidad de la erosión del suelo en la subcuenca Ichu, en base a imágenes satelitales Sentinel 2B del 2018, con práctica de conservación**

<b>Grados de erosión</b>	<b>Tasa media anual de erosión (t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>)</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Nula</b>	0 – 2	9 625.0	7.1
<b>Ligera</b>	2 – 10	46 272.0	34.0
<b>Moderada</b>	10 – 50	66 948.5	49.2
<b>Alta</b>	50 – 100	8 233.9	6.0
<b>Muy alta</b>	100 - 500	5 032.4	3.7
<b>Extrema</b>	> 500	53.3	0.0
<b>Erosión máxima</b>		1 348.9	t.ha <sup>-1</sup> .año <sup>-1</sup>
<b>Erosión media</b>		22.1	t.ha <sup>-1</sup> .año <sup>-1</sup>

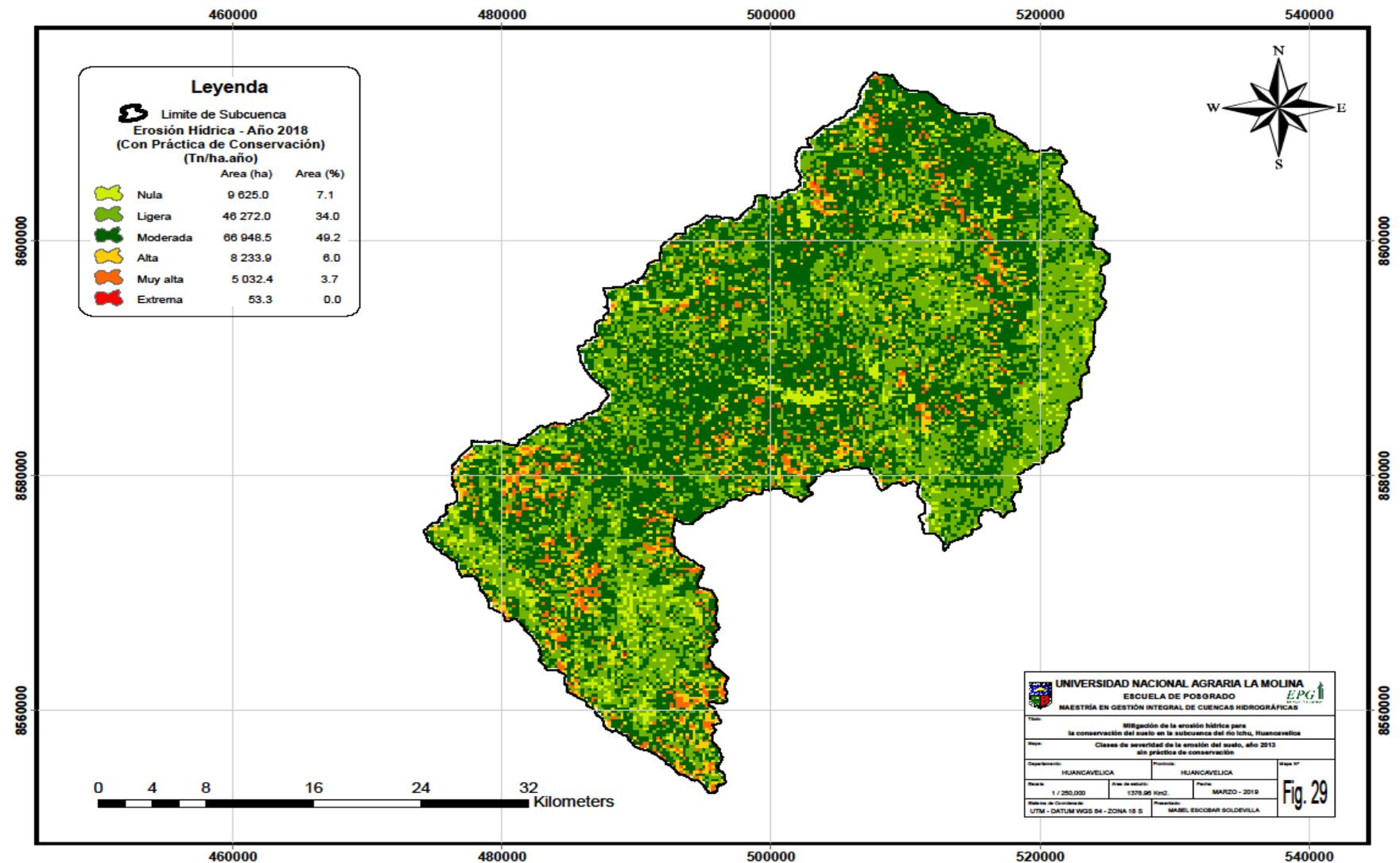


Figura 29: Clases de severidad de la erosión del suelo para el año 2018, con práctica de conservación

En el Cuadro 28 se muestran los resultados de la tasa de erosión distribuidos según distritos localizados dentro de la subcuenca del río Ichu. Al respecto, se observa que los distritos de Huando, Santa Ana y Huancavelica muestran las mayores tasas de erosión media de 26,0; 25,8 y 25,5 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>, respectivamente. Es necesario mencionar que estas se encuentran por encima de la media de toda la subcuenca y que en el distrito de Yauli encontramos una máxima tasa de erosión de 1 348,9 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>.

**Cuadro 28: Clases de severidad de la erosión del suelo según distritos, condición actual con práctica de conservación**

Distrito	Erosión (t. ha <sup>-1</sup> . año <sup>-1</sup> )		
	Min	Max	Promedio
Acoria	0.0	499.2	19.2
Ascensión	0.0	524.2	22.1
Huancavelica	0.0	1327.6	25.5
Huando	0.0	776.0	26.0
Palca	0.0	645.6	22.3
Santa Ana	0.0	681.1	25.8
Yauli	0.0	1348.9	15.2

#### **4.3 PROPUESTA PLANTEADA DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN PARA LA SUBCUENCA ICHU.**

Generalmente, dentro de las prácticas de conservación y mejora de los suelos pueden establecerse dos categorías: las normas generales, que siempre son planteadas en cualquier plan de conservación, y las prácticas especiales o aquellas que únicamente son de aplicación en casos concretos.

Los suelos de la subcuenca de Ichu se caracterizan por su aptitud para pastos naturales y actividad ganadera de tipo extensiva en su territorio. Sin embargo, el poblador de la zona no considera que el recurso suelo requiera de técnicas más adecuadas de conservación, ya que los factores clima y topografía requieren ser incluidos al elegir la técnica más apropiada para el mejoramiento de los suelos y el recurso hídrico. Asimismo, la selección de las prácticas planteadas en la propuesta de mitigación de la erosión hídrica para la conservación del suelo en la subcuenca, se basa en una concepción socializada sobre el respeto de los usos y

costumbres del poblador huancavelicano, así como, del rescate del conocimiento existente y del material para su construcción.

Esta propuesta plantea la integración de diversas técnicas de conservación de suelos, poniendo énfasis en el sistema agroforestal, mecánico estructural y dando prioridad a las zonas más erosionadas.

De igual forma, se estimó que con la implementación de estas técnicas en la propuesta de mitigación de la erosión hídrica para la conservación del suelo en la subcuenca del río Ichu, se conservarían suelos en un total de 95 km<sup>2</sup>, considerando que en las zonas donde se propone implementar zanjas de infiltración se desarrolle también la agroforestería.

Entre las prácticas a proponer son:

- ✓ Clausura de pastos
- ✓ Mejoramiento de pastos,
- ✓ Recuperación de pastos
- ✓ Zanjas de infiltración y recuperación de zanjas de infiltración
- ✓ Terrazas de formación lenta
- ✓ Las barreras vivas, con formación de terrazas lentas para proteger y conservar el área agrícola. (Agroforestería)
- ✓ Cercos vivos, cortinas rompevientos para la protección de la cobertura vegetal y ganado. (Agroforestería)

Las zonas prioritarias:

a) **Distrito de Acoria.**

Comprende los centros poblados de Silva, Pachachaca, Ccatcco, Ccasapata, Tinyacella y Runrucancha, lugares con predominancia de pastos naturales y masa arbórea de Colle negro, queñua, colle blanco y cultivos como la cebada, papa y maíz. En esta área se propone realizar prácticas de asociación agroforestal, como barreras vivas con formación de terrazas lentas para proteger y conservar el área agrícola y cercos vivos, cortinas rompevientos para la protección de la cobertura vegetal y ganado asociados con zanjas de infiltración.

En el sector de Motoy tiene características de ser una zona casi plana, a una altitud de 3900 m. Por otra parte, el sector de Motoy tiene características de ser una zona casi plana a una altitud de 3900 m s. n. m. que pertenece al ccpp Motoy, con características de un suelo poco

profundo y pedregoso cercano a un curso de agua. Al respecto, se propone reforestar un área aproximada de 4 ha con especies nativas de lugar.

Para complementar esta técnica se realizarán cercos vivos perimetrales con arbustos y en el interior zanjas de infiltración. Así también, se puede proponer en otras áreas de este distrito, como el centro poblado de Troya, la clausura de pastos, con la finalidad de repoblar las praderas naturales y mantener la cobertura vegetal.

La clausura de pastos tiene dos finalidades primordiales:

- Clausurar para incrementar la recarga acuífera de la pradera y de los acuíferos.
- Clausuras temporales para la generación de semillas de buena calidad.

**b) Distrito de Yauli.**

- El sector de Cunyac - clausura de pastos

Pertenece al ccpp de Cunyac, ubicada en un rango altitudinal de 4300 msnm hasta los 4500 msnm, con zonas aptas para pastos naturales con presencia de bofedales.

En esta zona se plantea un manejo integrado de aplicación de técnicas para la conservación del suelo, que se inician con la presencia de cobertura vegetal y mejora de ella, para disminuir la erosión hídrica.

A esta altitud en el lugar hay presencia de actividad ganadera por lo que se recomienda realizar clausura de pastos en una parte del lugar con dos finalidades:

Primero, para recuperar praderas e incrementar la recarga acuífera.  
Segundo, para la generación de semillas de buena calidad.

En esos dos casos se considera abonar el suelo con estiércol fermentado de camélidos o con nutrientes como Nitrógeno, fosforo y potasio, para devolver fertilidad al suelo.

Así también continuar con el mantenimiento de las zonas donde existen zanjas de infiltración, ya que esta práctica conserva humedad en el suelo que requiere la vegetación en épocas de estiaje. para continuar con el mejor desarrollo de los pastos que es insumo alimenticio del ganado y no genere empobrecimiento del suelo.

Por otra parte, como en la zona baja del lugar tiene presencia de bofedales que son de importancia mundial por ser colchones de agua, captan carbono y ricos en biodiversidad, requieren un tratamiento de conservación, especial.

- Sector Mosoccancha Chacapampa - construir zanjas de infiltración

Área ubicada en rangos de altitud de 4150 – 4200 msnm, con presencia de pastos naturales, en una geomorfología de altiplanicie, se plantea construir zanjas de infiltración en un área aproximada de 14 ha, por dos motivos:

Primero, ayudara en proporcionar humedad al suelo, y mejora en la cobertura vegetal.

Segundo, A través de la infiltración del agua de esta zona, se generará recarga acuífera en el subsuelo y ayudara en la calidad de suelos de las partes bajas que se dedican a la agricultura extensiva.

- Sector de Chacapampa - Terrazas de formación lenta

La zona se ubica en una zona de ladera con presencia de piedras, las cuales ayudaran ara la construcción de muros o pircas siguiendo las curvas de nivel. La ubicación de los muros para construir las terrazas será en los lugares más críticos del proceso de la erosión. La distancia entre los muros depende de la pendiente, si las distancias son menores existe mayor pendiente.

También complementaremos la construcción de las terrazas con plantación de árboles en hileras, debajo de los muros y a una distancia de la pirca de 20 a 25 cm, convirtiéndolo en un campo agroforestal. Cuando los arboles alcances d 1 a 2 m, realizaremos podas para formar barreras vivas, que sirven para seguir conteniendo el suelo, cada vez que se llenen las pircas. Además, cuando la tierra llega a sobrepasar el muro, cae suavemente a la parte inferior de la pirca, y que se mezclan con la hojarasca y tallo de la planta, formando así un pequeño talud, lo que disminuye el efecto erosivo.

- Sector Occopampa – Practicas asociadas

La zona se ubica entre los rangos altitudinales de 3950 – 4050 msnm en una zona de altiplanicie donde se desarrolla la siembra de algunos cultivos de la zona, y posee un curso de agua que discurre a un lado del área propuesto, por lo que se plantea realizar combinación de técnicas para el mejoramiento del suelo.

-Bosquete de arboles

-Agroforesteria

-Zanjas de infiltración

Los bosquetes de árboles se realizan con el propósito de cubrir con vegetación las zonas altas donde el suelo es pedregoso, y la erosión es visible. Con la técnica se pretende establecer bosquetes para que el agua en temporada de lluvia sea recibida y acumulada, y luego escurra con lentitud y en forma moderada hacia las zonas bajas. Esto propicia también que haya disponibilidad de agua por periodos más largos en las partes bajas, lo cual favorece a la agricultura.

Las especies nativas como: Queñua, Chachacoma y Colle son recomendadas para esta práctica.

Así también se aplica prácticas agroforestales combinando los cultivos de rotación con plantones arbóreos en hilera y complementamos con la construcción de zanjas de infiltración. Cuando los arboles alcancen de 1 a 2 m, realizaremos podas para formar barreras vivas. Además, las hojarascas presentes ayudan a mejorar la actividad agroforestal lo que disminuye el efecto erosivo del lugar.

- Sector Paltamachay - Zanjas de infiltración

La zona de Paltamachay posee similares características que el sector de occopampa, con dificultades de cubierta vegetal, por lo que también se propone prácticas agroforestales con implementación de zanjas de infiltración.

### **Distrito de Huando.**

- Centro poblado de Moca Pata - Clausura de pastos

Existen dos áreas identificadas en el centro poblado de Moca Pata, ubicadas a una altura de 4500 msnm, con aptitud para pastos y evidentes zonas con escasa cobertura vegetal, por lo que se plantea clausura de pastos con dos objetivos.

Área 1: para esta zona identificada el objetivo de realizar la clausura en esta área es para repoblar de vegetación basándose en las características vegetativas, e incrementar la recarga acuífera del área clausurada y de los acuíferos. Así, permanecerá clausurado por espacio de tres años como mínimo, y en concordancia con la población, se debe realizar un plan de

mejoramiento de pastizales con el uso de especies nativas o la introducción de especies mejoradas. Esta actividad debe realizarse al inicio de lluvias, y previo a ello se usa abonos orgánicos, para preparar el terreno.

El cerco de clausura se realiza con mallas ganaderas y estacas de eucalipto.

La práctica se complementa con la construcción de las zanjales de infiltración que permite mayor infiltración y retención del agua, contribuyendo a la recarga del acuífero y al mantenimiento de los caudales de las fuentes de agua en las microcuencas.

Área 2: Para esta segunda área también se plantea clausurar los pastos, pero con el objeto de generar semillas de buena calidad, es decir recuperar áreas en peligro de degradación a través de la clausura temporal.

Esta práctica permite el proceso de regeneración natural del suelo, logrando que las especies vegetales presentes en estas áreas clausuradas puedan incrementar su vigor general a la vez, completar su ciclo vegetativo y llegar a la madurez fisiológica. En esta práctica se permite el ingreso de animales para el pastoreo, una vez al año, durante los meses de junio a julio, con una carga ligera y una permanencia corta.

- Sector de Patacocha – Mejoramiento de pastos

Es necesario recordar que, si bien los pastizales son necesarios para la alimentación de la ganadería, estos juegan un rol importante en la cobertura vegetal ya que disminuyen el proceso erosivo, protegiendo contra el impacto de gotas de lluvia y granizadas, favoreciendo así la infiltración del agua y reduciendo la escorrentía superficial.

Las acciones que se deben considerar antes de realizar el mejoramiento de pastizales son:

- Evaluación de la capacidad de carga.
- Pastoreo rotativo
- Abonamiento de pastos.
- Revegetación de pastos naturales.
- Control de plantas indeseables.

### **Distrito de Palca.**

- Centro poblado Pucarumi - Mantenimiento de zanjas de Infiltración

El área a intervenir se encuentra en un rango de altitud de 3950 a 4150 msnm, zona con aptitud para pastos con baja calidad agroecológica, donde se desarrolla la agricultura. El problema que presenta este sector es mal funcionamiento de las zanjas de infiltración, las cuales requieren realizar acciones de mantenimiento por parte de los pobladores de la zona.

- Centro poblado **Ranrapucro – Agroforesteria**

El área a intervenir se encuentra en un rango de altitud 4150-4250 msnm, son suelos con aptitud forestal, donde se plantea prácticas de Agroforesteria como la formación de bosquetes de árboles para cubrir con vegetación las zonas altas que tienen una visible erosión. Así se pretende establecer bosquetes para que el agua en temporada de lluvia sea recibida y acumulada, y luego escurra con lentitud y en forma moderada hacia las zonas bajas. Esto propicia también que haya disponibilidad de agua por periodos más largos en las partes bajas, lo cual favorece a la agricultura.

Las especies nativas como: Queñua, Chachacoma y Colle son recomendadas para esta práctica.

Así también se aplica prácticas agroforestales combinando los cultivos de rotación con plantones arbóreos en hilera

### **Distrito de Ascensión y Huancavelica.**

En las partes altas de estos distritos (zona de Cachimayo, Alto Andino, Yauricocha, Pastales Huando), se caracterizan por ser zona ganadera y con aptitud para pastos, por lo cual se priorizará técnicas para mejorar la condición del pastizal a través de plantear prácticas asociadas (agronómicas, forestales y mecánico estructural) como: la recuperación y mejoramiento de pastizales, clausura de praderas con la construcción zanjas de infiltración.

### **Distrito de Santa Ana.**

En este distrito se priorizaron 3 áreas con características geomorfológicas de altiplano donde se desarrolla la actividad ganadera y el suelo con aptitud para pastos por lo que también se plantea realizar prácticas de mejoramiento y clausura de pastos al igual que en los distritos de Huancavelica y Ascensión.

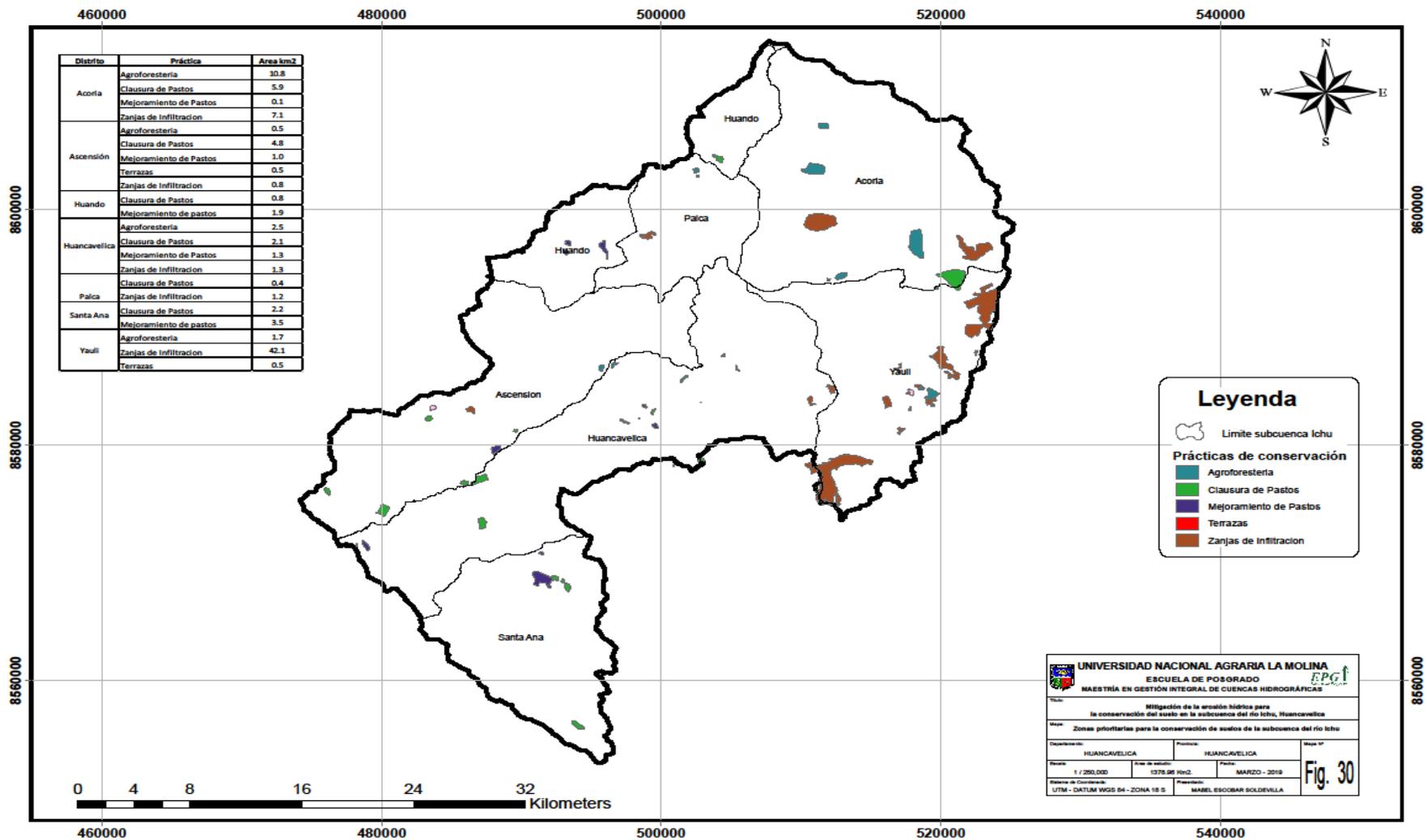


Figura 30: Mapa de zonas prioritarias para la conservación de suelos de la subcuenca del río Ichu

#### 4.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS BAJO DIFERENTES ESCENARIOS

Las capas temáticas generadas de los factores K, LS, R, C y P se integraron utilizando la ecuación RUSLE, dentro de la opción de la calculadora *ráster* del software QGIS, la cual nos permitió cuantificar, evaluar y generar el mapa de erosión del suelo espacializado en toda la cuenca en estudio.

Generalmente, si el valor estimado (A) es alto, significa una tasa de erosión más alta de rendimiento de sedimento, mientras que un valor más bajo denota una tasa más baja de rendimiento de sedimento.

En la subcuenca del río Ichu se clasificó seis categorías: Nula, Ligera, Moderada, Alta, Muy Alta, Extrema para los cuatro escenarios según la tasa de erosión obtenida.

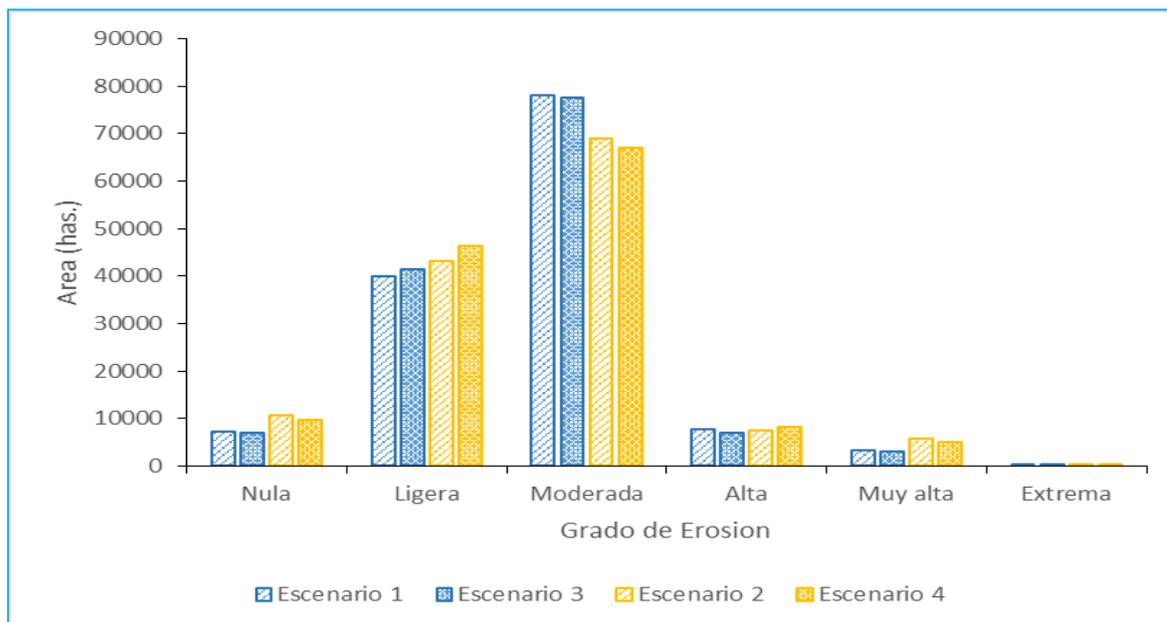
Según el Cuadro 29, presentan los resultados de la modelación, observándose que predomina la tasa de erosión de categoría moderada para los cuatro escenarios, lo que indica que para esta área se estima pérdidas de suelo entre 10 a 50 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>, seguida por la categoría ligera estimada en menos de 10 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>, siendo igualmente significativa en la categoría alta, lo que indica que anualmente podrían perderse más de 100 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>.

En síntesis, la subcuenca tiene un importante número de hectáreas en zonas con tasas de erosión de categoría moderada, por lo que resulta conveniente plantear prácticas de conservación de suelos, para el control de la erosión, especialmente en zonas de pendientes moderadas a fuertes, permitiendo disminuir así la tasa de erosión.

**Cuadro 29: Pérdida de suelo en hectáreas por grado de erosión del suelo para los diferentes escenarios en la subcuenca Ichu**

<b>Grado de Erosión</b>	<b>Escenario 1 (has.)</b>	<b>Escenario 2 (has.)</b>	<b>Escenario 3 (has.)</b>	<b>Escenario 4 (has.)</b>
Nula	7190.1	10643.1	7050.0	9625.0
Ligera	39867.2	43093.3	41501.0	46272.0
Moderada	78077.0	68978.9	77550.2	66948.5
Alta	7623.4	7511.7	7044.1	8233.9
Muy alta	3336.3	5884.8	2953.8	5032.4
Extrema	71.0	53.3	66.0	53.3

La figura 30, muestra la relación de pérdida de suelo en hectáreas y el grado de erosión del suelo para los diferentes escenarios en la subcuenca Ichu, notándose que para el escenario dos (2) y cuatro (4), existe una disminución de pérdida de suelo en hectáreas, debido a la incorporación de prácticas de conservación.



**Figura 31: Grados de erosión para los diferentes escenarios**

El presente trabajo de investigación presenta los resultados finales de la estimación de las tasas de erosión para los cuatro escenarios planteados bajo ciertas condiciones de modificación en el factor P y C para los años 2013 y 2018, como se muestra en el cuadro 30.

Se observa que el escenario uno (1) y tres (3), correspondientes al año 2013, bajo condiciones de modificación del Factor P, y considerando los mismos valores del Factor C, presenta una disminución de la tasa de erosión como consecuencia de las diferentes alternativas de prácticas de conservación planteadas. Así, la tasa de erosión promedio varía de 22,7 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> a 21,7 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> y la tasa de erosión máxima varía de 1 329,4 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> a 1 255,5 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>.

Del mismo modo se analiza los escenarios: dos (2) y cuatro (4), correspondientes al año 2018. Donde el escenario 2, cumple las condiciones de utilizar los valores del Factor P, sin prácticas de conservación y los valores del Factor C, en función al procesamiento de las imágenes satelitales Sentinel 2B y el escenario 4, cumple las condiciones de utilizar los valores del Factor P ajustado considerando prácticas de conservación y los valores del Factor C, en función al procesamiento de las imágenes satelitales Sentinel 2B. los resultados de la estimación de la tasa de erosión promedio es de 23,1 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> hacia 22,1 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> y la tasa de erosión máxima varía de 1 838,2 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> a 1 348,9 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>.

**Cuadro 30: Grado de erosión para los diferentes escenarios en la subcuenca Ichu**

Escenarios	Promedio (t. ha <sup>-1</sup> . año <sup>-1</sup> )	Máximo (t. ha <sup>-1</sup> . año <sup>-1</sup> )
Escenario 1 - (Año 2013)	22.7	1329.4
Escenario 2 - (Año 2018)	23.1	1838.2
Escenario 3 - (Año 2013)	21.7	1255.5
Escenario 4 - (Año 2018)	22.1	1348.9

- Para el cálculo del factor R, se utilizaron dos métodos de estimación, primero el Método descrito por Wischmeier and Smith y el segundo el Método Índice de Fournier Modificado – IFM, el primero tiene la particularidad de subestimar el factor R y el segundo sobreestimar el factor R, con estas consideraciones Wongchuig *et al.* (2016), recomienda usar el promedio de los valores de factor R estimados en cada método. Del mismo modo se evaluó el índice de concentración de precipitación (PCI) en la subcuenca, la cual nos muestra el comportamiento de la concentración de lluvia, registrando valores por debajo del 30 por ciento, categorizándose como régimen pluvial uniforme.

- Se observa en el mapa del factor R y el mapa de isoyetas media mensual siguen la misma tendencia, esto se debe a que la variable principal para la estimación de R es la precipitación, es decir, a mayor precipitación mayor factor R y viceversa, como se muestran en las figuras 18 y 19 del presente capítulo.
- Según el método de McCool, *et al.* (1989), y aplicación del algebra de mapas, se logró calcular los valores del factor LS, considerando que los valores más altos se encuentran en zonas de mayor longitud y pendiente, pues si la longitud es mayor, mayor también será el recorrido de una gota de lluvia hasta llegar al punto de concentración del flujo junto al suelo desprendido; lo mismo sucede con la pendiente ya que, la pérdida de suelo se incrementa más rápidamente con pendientes muy escarpadas en comparación con el incremento en longitud de la pendiente, tal es así que de los resultados obtenidos, se observa que la intensidad de las lluvias y las pendientes pronunciadas del terreno originan escorrentía severa dando como resultado el desprendimiento de suelo ocasionando una alta tasa de erosión del suelo en la subcuenca del río Ichu.
- De los cinco factores (R, LS, K, C y P) calculados para determinar la tasa de erosión en la subcuenca, los factores C y P fueron calculados para dos años diferentes en condiciones distintas. Para determinar los valores del factor C del 2013, para el escenario uno (1) y tres (3), la condición, se basó en el uso de capas temáticas de uso de suelo y vegetación, obtenidos del estudio de la Mesozonificación Ecológica, Económica del Departamento de Huancavelica del año 2013 y el cálculo de los valores del factor C, del 2018 para el escenario dos (2) y cuatro (4), la condición se basó en el cálculo del NDVI, a partir de data espacial de las imágenes satelitales de la Agencia Espacial Europea ESA del programa Espacial Copernicus (Sentinel 2B), de fecha 20 de junio de 2018.

Para el cálculo de los valores del factor P, la condición de cálculo fue utilizando el método de Shin (cultivo y pendiente), sin considerar prácticas de conservación para el escenario uno (1) y dos (2) del año 2013 y 2018 respectivamente. Y el cálculo de los valores del Factor P ajustado, tiene también como condición el método de Shin incluyendo las prácticas de conservación para los escenarios tres (3) y cuatro (4) del año 2013 y 2018 respectivamente. Los tres factores restantes permanecieron constantes para los cuatro escenarios planteados.

- El modelo RUSLE es un modelo empírico que permitió estimar la tasa anual promedio de la erosión del suelo a largo plazo en las laderas utilizando información física de precipitación, tipo de suelo, topografía, sistema de cultivos y las prácticas de conservación. El modelo generó mapas de la tasa de erosión del suelo para cuatro escenarios, clasificándose en seis categorías según el valor de la tasa de erosión con predominancia de las categorías “ligera” y “moderada”.
- De los resultados mostrados en el cuadro 30, la pérdida de suelo por grado de erosión predominante se ubica en la categoría moderada para los cuatro escenarios, afectando a 7 8077,0 ha. para la condición del uso del suelo en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica de la Región Huancavelica, sin prácticas de conservación, y de 7 7550,2 ha con prácticas de conservación. Escenario uno (1) y tres (3) respectivamente. Para la condición de uso de imágenes de satélite del 2018 y sin practica de conservación alcanza una pérdida de 6 8978,9 ha. y con practica de conservación se cuantifica la pérdida en 6 6948,5 ha.; escenario dos (2) y cuatro (4) respectivamente. Del mismo modo se observa que los escenarios 3 y 4, el grado de erosión Moderada disminuye con respecto a los escenarios 1 y 2, pero los grados Ligera y Alta, presentan un ligero aumento respectivamente.
- Para los escenarios 1 y 2, ver Cuadro 30, donde no se plantearon prácticas de conservación, para condiciones del uso del suelo en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica de la Región Huancavelica y condición de uso de imágenes satelitales del 2018, la tasa promedio aumenta de 22,7 a 23,1 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> del mismo modo aumenta la erosión máxima de 1 329,4 a 1 838,2 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>, estos resultados muestran un cambio de uso de suelo y vegetación que trae consigo el aumento de la pérdida del suelo, solo con la actualización del factor C.
- Para los escenarios 1 y 3, con el mismo factor C de uso del suelo en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica de la Región Huancavelica en ambos escenarios, sin practica y con practica de conservación, se cuantifica una disminución de la erosión promedio de 22,7 a 21,7 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> respectivamente; del mismo modo los escenarios 2 y 4, con el mismo factor C de uso del suelo en condiciones de uso de imágenes satelitales del 2018, sin practica y con practica de conservación, se cuantifica una disminución de la erosión promedio de 23,1 a 22,1 t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> respectivamente; de acuerdo al análisis actualizando el uso del suelo (en base al estudio de la

Mesozonificación Ecológica y Económica al uso actual del uso del suelo), la pérdida del suelo por erosión hídrica va en aumento (escenario 1 y 2), y con las propuestas de mitigación nos permitió disminuir la pérdida del suelo por erosión hídrica (escenarios 3 y 4).

- En síntesis, la subcuenca tiene un importante número de hectáreas en zonas con tasas de erosión de categoría moderada, por lo que resulta conveniente plantear prácticas de conservación de suelos, para el control de la erosión, especialmente en zonas de pendientes moderadas a fuertes, permitiendo disminuir así la tasa de erosión.

## V. CONCLUSIONES

- 1 Aplicando el modelo RUSLE, se estimó la erosión hídrica en base a la información de uso de suelo y vegetación del estudio de la Mesozonificación Ecológica, Económica del departamento de Huancavelica del año 2013, con resultados para el escenario uno y tres, el primer escenario sin alternativa de prácticas de conservación, estima que la pérdida promedio anual de suelos es de  $22,7 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  y el segundo escenario con alternativas de prácticas de conservación, redujo a una pérdida promedio anual de  $21,7 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ . Como se puede observar en la comparación de estos dos escenarios, aplicando alternativas de prácticas de conservación se llega a mitigar ligeramente la tasa de erosión del suelo. Del mismo modo, la tasa de erosión máxima también muestra una tendencia similar a los valores promedio. También se observó que la distribución espacial predominante de la tasa de erosión en toda la subcuenca, son las categorías “ligero” y “moderado”.
- 2 Aplicando el modelo RUSLE, se estimó la erosión hídrica en base a la información de uso de suelo y vegetación generada a partir de imágenes de satélite Sentinel 2B del año 2018, que es un input para calcular los valores del nuevo Factor C, estos resultados de la modelación son plasmados en los escenarios dos y cuatro, el primer escenario sin alternativa de prácticas de conservación, estima que la pérdida promedio anual de suelos es de  $23,1 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  y el segundo escenario con alternativas de prácticas de conservación, redujo a una pérdida promedio anual de  $22,1 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , del mismo modo se observa que con las alternativas de prácticas de conservación se llega a mitigar ligeramente la tasa de erosión del suelo; de igual manera, la tasa de erosión máxima también muestra una tendencia similar a los valores promedio debido a que disminuye los valores del cálculo de la erosión máxima de  $1\ 838,2 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  a  $1\ 348,9 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ .

- 3 De los resultados obtenidos, del cálculo de pérdida de suelo por erosión hídrica, el Escenario 1 con uso de la capa temática del uso del suelo y vegetación en base al estudio de la Mesozonificación Ecológica y Económica del año 2013, y el escenario 2 con uso de la capa temática de uso de suelo y vegetación generada a partir de imágenes de satélite Sentinel 2B del año 2018, ambos sin alternativas de prácticas de conservación, se cuantificó un aumento en la tasa de pérdida promedio anual de suelos de  $22,7 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  a  $23,1 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  y la tasa máxima de  $1\,329,4 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  a  $1\,838,2 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , para un periodo de 5 años (del 2013 al 2018), por lo cual fue necesario plantear una propuesta de medidas de conservación de suelo, alternativas acordes a la realidad del lugar, respetando el uso y costumbre del poblador andino, la cual nos permitió mitigar eficientemente la pérdida de suelo; éstos resultados se reflejan en la disminución de los valores de pérdida promedio anual que varían de  $21,7 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  y  $22,1 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  para los escenarios 3 y 4, en base a los escenarios 1 y 2, respectivamente.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Para una mejor aplicación del modelo RUSLE y mayor confiabilidad de los resultados, se recomienda contar con una base de datos espaciales a una escala más detallada y precisa, así mismo realizar estudios de suelos para determinar de manera más precisa el Factor K y los grados de erodabilidad.
- En futuras investigaciones de modelos de estimación y distribución de la erosión del suelo se recomienda, contar con monitoreo de datos pluviográficos y considerar el aumento gradual del número de eventos extremos de precipitación como consecuencia del impacto del cambio climático para disminuir las incertidumbres relacionadas a los resultados del Factor R.
- Debido a la importancia que representa la subcuenca del río Ichu por ser una de las principales áreas significativas del departamento de Huancavelica, se recomienda continuar con estudios similares de la pérdida de suelo por erosión hídrica a escala de microcuencas, con la finalidad de focalizar proyectos de gestión, manejo y conservación de cuencas hidrográficas del departamento.
- Se recomienda utilizar modelos distribuidos de erosión del suelo a diferentes escalas espaciales (tamaños de celdas) para analizar el efecto de las escalas espaciales para la estimación de la erosión del suelo e integrarlo a modelo de estimación de escorrentía en la cuenca hidrográfica, la cual nos permitirá validar los resultados de sedimentos y escorrentía en conjunto utilizando herramientas de Sensores Remotos y Sistema de Información Geográfica.
- Implementar las prácticas de conservación planteadas para el escenario cuatro, basadas principalmente en la integración de técnicas de conservación (agroforestal y mecánico estructural) en las zonas con alto grado de erosión y bajo una concepción socializada respetando los usos y costumbres del poblador huancavelicano.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdo, H. 2017. Geo-Modeling approach to predicting of erosion risks utilizing RS and GIS data: A case study of Al-Hussain Basin, Tartous, Syria. *J Environ Geol* 1(1):1-4.
- Abdul Rahaman, S; Aruchamy, S; Jegankumar, R; Abdul Ajeez, S. 2015. Estimation of annual average soil loss, based on RUSLE model in Kallar watershed, Bhavani basin, TAMIL NADU, INDIA, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-2/W2, 207-214, <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-2-W2-207-2015>.
- Ali, M; Atluri, V; Banerjee, S; Bedard, Y; Chawla, S; Chow, C; Fonseca, F. 2017. *Encyclopedia of GIS*. (S. Shekhar, H. Xiong, & X. Zhou, Eds.) (Second Edi). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23519-6>
- Amore, E; Modica, C; Nearing, M; Santoro, V. 2004. Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V6C-4C4DY72-3/2/ccd88184deadcf57b45dbf5b24fd92ad>, *Journal of Hydrology*, pp. 100-114.
- Angulo, M; Beguería, S. 2013. Análisis de la erosividad de la lluvia: Procesos, índices y fronteras de conocimiento. *Cuaternario y Geomorfología*, 27(1-2): 53-69
- Arnoldus, HMJ. 1980. An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss Equation. In: De Boodt, M. and Gabriels, D., Eds., *Assessment of Erosion*, John Wiley and Sons, New York, 127-132.
- Arrouays, D; Grundy, MG; Hartemink, AE; Hempel, JW; Heuvelink, GBM; Hong, SY; Lagacherie, P; Lelyk, G; McBratney, AB; McKenzie, NJ; Mendonca-Santos, MDL; Minasny, B; Montanarella, L; Odeh, IOA; Sanchez, PA; Thompson, JA; Zhang, GL. 2014. GlobalSoilMap: Toward a Fine-Resolution Global Grid of Soil Properties. *Advances in Agronomy*, 125: 93-134.
- Ashiagbor, G; Forkuo, EK; Laari, P; Aabeyir, R. 2013. Modeling soil erosion using RUSLE and GIS tools. *Int. J. Remote Sens. (IJRSG)* 2 (4), 7-17

- Beasley, DB. 1977. A Mathematical Model for Simulating the Effects of Land Use and Management on Water Quality, Phesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Boardman, J; Favis-Mortlock, D. 2012. Modelling Soil Erosion by Water (Vol. 2). Oxford, UK.: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06431-3>
- Elwell, HA. 1978. Modelling soil losses in Southern Africa. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 23(2), 117-127.
- GRRNyMA (Gerencia Regional de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Huancavelica) 2013. Recuperación de los Servicios Ambientales de los Recursos Naturales para el Desarrollo Sostenible de la Microcuenca del Río Ichu.
- Jetten, V; Govers, G; Hessel, R. 2003. Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrological Processes* 17(5), 887–900.
- Kabo-bah, A; WaterHut, ; Nkrumah, P; Murava, R. 2013. Evaluation of NDVI Using SPOT-5 Satellite Data for Northern Ghana. *Environmental Management and Sustainable Development*. 2013, Vol. 2, No. 1
- Kadupitiya, HK. 2002. Empirical evaluation and comparative study of use of erosion modelling in small catchments in Naivasha, Kenya. ITC.
- Karaburun, A. 2010. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. *Ozean J Appl Sci* 3(1)
- Lal, R. 1984. Effects of slope length on erosion of some Alfisols in Western Nigeria. *Geoderma*. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(84\)90054-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(84)90054-5)
- Lal, R. 1994. Soil erosion research methods. CRC Press.
- Lal, R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical reviews in plant sciences*, 17(4), 319-464.
- Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degrad Develop* 12:519–539
- McCool, DK; Brown, LC; Foster, GR; Mutchler, C; Meyer, LD. 1987. Revised slope

steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Transactions of the ASAE, 30(5), 1387-1396.

- McCool, DK; Foster, GR; Mutchler, CK; Meyer, LD. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. Transactions of the ASAE, 32(5), 1571-1576.
- Mello, CR; Ávila, LF; Viola, MR; Curi, N; Norton, LD. 2015. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, southeastern Brazil. Environ. Earth Sci. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-4033-3>.
- Mitsova, H; Barton, M; Ullah, ; Hofierka, J; Harmon, RS. 2013. 3.9 GIS-Based Soil Erosion Modeling. In Treatise on Geomorphology (Vol. 3, pp. 228–258). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00052-X>
- Mitchell, JK; Bubenzer, GD. 1984. Estimación de la Perdida del Suelo. In Kirby, MJ y RPC Morgan.1984. Erosión de suelos. México,Limusa.
- Moore, ID; Wilson, JP. 1992. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. Journal of soil and water conservation, 47(5), 423-428.
- Morgan RPC; Morgan DDV; Finney HJ. 1984. A predictive model for the assessment of soil erosion risk. J Agril Eng Res 30(1):245–253
- Morgan, RPC; Morgan, DDV; Finney HJ. 1999. A predictive model for the assessment of soil erosion risk. Can J Remote Sens 25(4):367–380
- Morgan, RPC. 2005. *Soil Erosion and Conservation*. (Blackwell Publishing - National Soil Resources Institute y C. University, Eds.) (Third edit). Malden USA.
- Morgan, RPC; Nearing, MA. 2011. *Handbook of Erosion Modelling*. Wiley - Blackwell (First edit). West Sussex, UK. <https://doi.org/10.1002/9781444328455>
- Olaya, V. 2014. Sistemas de Información Geográfica.(en linea). España.Consultado 16 set. 2014.Disponible en <http://volaya.es/writing>
- Oliveira, VA; Mello, CR; Durães, M F; Silva, AM. 2014. Soil erosion vulnerability in the verde river basin, southern minas gerais. Ciência e Agrotecnologia, 38(3), 262–269.

<https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000300006>

- Swaify, SA; Dangler, EW; Armstrong, CL. 1982. Soil erosion by water in the tropics.
- Pacheco, H; Cevallos, R; Vences, C. 2019. Cálculo del factor C de la USLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo - Venezuela usando imágenes del Satélite Miranda VRSS-1. *Espacios*, 40(3), 6
- Patil, R; Sharma, S. 2013. Remote Sensing and GIS based modeling of crop/cover management factor (C) of USLE in Shakker river watershed. International Conference on Chemical, Agricultural and Medical Sciences (CAMS-2013) Dec. 29-30, 2013 Kuala Lumpur (Malaysia).
- Patil, RJ. 2018a. *Spatial Techniques for Soil Erosion Estimation: Remote Sensing and GIS Approach*. Springer.
- Patil, RJ. 2018b. *Spatial Techniques for Soil Erosion Estimation*. In *Spatial Techniques for Soil Erosion Estimation* (pp. 35–49). Springer.
- Pelton, J; Frazier, E; Pickilingis, E. (2012). Calculating slope length factor (LS) in the revised universal soil loss equation (RUSLE). [http://gis4geomorphology.com/wp-content/uploads/2014/05/LS-Factor-in-RUSLE-with ArcGIS10.x\\_Pelton\\_Frazier\\_Pickilingis\\_2014.docx](http://gis4geomorphology.com/wp-content/uploads/2014/05/LS-Factor-in-RUSLE-with-ArcGIS10.x_Pelton_Frazier_Pickilingis_2014.docx) (accessed July 2014).
- PHI. (2006). Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de América Latina y El Caribe. Programa Hidrológico Internacional, UNESCO. Documento Técnico No. 3. La Serena, Chile. 58 pp.
- Portuguez, M. 2015. Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la Cuenca del río Siguas utilizando Geoinformatica. *Anales Científicos*, 76(2), 324. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>
- Ramos, C. 2001. Modelamiento Ambiental para Analisis de Susceptibilidad Erosiva en la Cuenca Media y Alta del río Cañete y Determinacion del Mapa de Erosion.
- Renard, KG; Foster, GR; Weesies, GA; McCool, DK; Yoder, DC. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Handbook, 703, US Department of Agriculture: Washington (DC), 404

- Reynel, C; León, J. 1990. Agroforestería en la Sierra del Perú. Proyecto FAO/Holanda/DGFF. Industrial Papiros. Lima, Perú. Tomo I.
- Sharpley, A; Williams, JR. 1990. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation.
- Segura, C; Sun, G; McNulty, S; Zhang, Y. 2014. Potential impacts of climate change on soil erosion vulnerability across the conterminous United States. *J. SoilWater Conserv.* 69, 171–181. <http://dx.doi.org/10.2489/jswc.69.2.171>.
- Shin, GJ. 1999. The analysis of soil erosion analysis in the watershed using GIS. Doctoral Thesis, Gang-won National University
- Solano, P. 2016. Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la subcuenca del río Shullcas 2000 – 2013, Huancayo. Tesis Lic. Ing. Forestal y Ambiental. Huancayo, Perú, UNCP. 117p.
- Sonder, K; Müller-Sämman, KM; Hilger, T; Leihner, DE. 2002. Erosion control and prediction in cassava based cropping systems in the Southern Andean region of Colombia. 12th ISCO Conference. Beijing, pp. 189–195
- Subramanya, K. 2008. Engineering Hydrology. In Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.) (Vol. 53, pp. 1–30). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tamene, L; Adimassu, Z; Aynekulu, E.; Yaekob, T. 2017. Estimating landscape susceptibility to soil erosion using a GIS-based approach in Northern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(3), 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.05.002>
- Tanyaş, H; Kolat, Ç; Süzen, ML. 2015. A new approach to estimate cover-management factor of RUSLE and validation of RUSLE model in the watershed of Kartalkaya Dam. *Journal of Hydrology*, 528, 584–598. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.048>
- Tebrügge, F; Düring, RA. 1999. Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research* 53: 15–28.
- Vásquez, A. 2000. “Manejo de Cuencas Altoandinas”. Tomo I. Universidad Nacional Agraria La Molina.

- Vásquez, A; Vásquez, I; Vásquez, C. 2014. “Cosecha del agua de lluvia y su impacto en el proceso de desertificación y cambio climático”. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Vicenta, ML; Navas, A; Machin, J. 2007. Identifying erosive periods by using RUSLE factors in mountain fields of the Central Spanish Pyrenees. *Hydrol Earth Syst Sci Discus* 4:2111–2142
- Vrieling, A; Sterk, G; Jong, SM. 2010. Satellite-based estimation of rainfall erosivity for Africa. *J. Hydrol.* 395 (3–4), 235–241.
- Williams, R; Berndt, HD. 1972. Sediment yield computed with universal equation. *J Hydraulic Eng, ASCE* 98(HY12):2087–2098
- Wischmeier, WH; Smith DD. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans American Geophysics Union*, 39(2)
- Wischmeier, WH; Smith, DD. 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of Rocky Mountains: a guide for the selection of practices for soil and water conservation. U.S. Department of Agriculture, *Agricultural Handbook*, p 282
- Wischmeier, WH; Smith DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning. AH-537. U.S. Department of Agriculture, Washington (DC)
- Wongchuig, S; Mello, CR; Chou, SC; Curi, N; Norton, LD. 2016. Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *Catena*, 147, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>
- Zuazo, V; Tejero, I; Martinez, J; Fernandez, J. 2011. Soil erosion: causes, processes and effects. In: Fourier, A. (Ed.), *Soil Erosion Causes, Processes and Effects*. Nova Science Publishers, Inc.

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1: PRECIPITACIÓN MEDIA MULTIANUAL

**Tabla 1: Precipitación Multianual - Estación Huancalpi**

Año	Precipitación media mensual (mm)												Precipitación media
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1968	92.2	125.5	77.1	33.5	0.0	23.9	4.8	14.2	22.2	69.6	20.1	9.3	492.40
1970	87.8	49.3	144.1	85.3	70.9	0.0	2.1	3.2	49.2	50.6	36.3	180	758.80
1971	162	189.3	108	74.7	16.8	49.2	49.6	78.2	4.8	62.5	56.7	102.5	954.30
1973	238.8	226.8	227.4	125	8.7	6.3	0.0	28	83	118	71	195.4	1328.40
1974	130.7	228.4	186.6	56.2	59.2	9.3	7.3	90.4	26.9	21	98.5	73.5	988.00
1975	152.7	114	136.5	34.5	83.6	4.9	1.0	4	35.1	17.6	16.6	81.4	681.90
1976	135.5	186.5	80.6	33.7	32.8	40.6	12	26.8	39.3	11.9	72.2	114	785.90
1977	84.6	71.8	153.5	64.4	80.5	25.3	16.6	42.5	60.3	39.6	273.3	158.4	1070.80
1978	172.5	248.6	157.6	77.9	7.4	11.9	2.1	28.4	58.9	127.6	143.9	103.1	1139.90
1979	119	88.2	61	89.1	2.1	13.3	16.9	39.4	9.2	29	97.8	118.5	683.50
1980	92.9	91.0	59.1	39.8	39.2	17.9	62.0	33.1	68.6	59.9	95.3	62.1	720.9
1981	115.9	176.6	136.1	76.2	3.6	9.0	28.4	104.6	73.8	101.8	107.0	106.4	1039.4
1982	141.7	224.1	142.9	42.7	10.7	17.2	5.7	62.7	31.7	93.5	64.9	38.7	876.5
1983	52.8	21.4	72.8	40.5	34.8	19.0	1.0	6.8	108.4	110.4	44.8	61.9	574.6
1984	165.9	62.3	129.0	47.5	22.7	17.9	19.2	19.5	67.1	23.5	46.9	171.9	793.4
1985	83.0	83.9	95.9	25.4	18.3	23.6	5.4	2.1	29.1	22.4	26.8	76.6	492.5
1986	141.7	264.1	177.8	101.9	48.6	8.0	29.0	25.4	80.6	68.3	62.9	99.3	1107.6
1987	125.2	92.1	61.0	15.1	5.9	11.4	29.4	37.2	15.6	34.1	34.0	39.4	500.4
1988	66.8	39.3	35.1	23.2	21.5	16.0	8.6	26.3	16.1	60.0	66.5	68.5	447.9
1989	110.3	81.2	51.0	19.6	8.2	17.6	24.2	26.0	23.5	82.9	54.3	59.3	558.1
1990	83.9	53.2	32.3	30.4	53.7	93.4	61.2	61.5	128.0	198.4	254.8	125.5	1176.3
1991	77.8	55.1	73.2	40.7	70.3	109.3	9.9	13.9	26.8	138.8	93.5	121.3	830.6
1992	66.9	68.4	38.6	30.9	26.2	178.0	24.7	56.8	26.5	309.9	137.3	189.4	1153.6
1993	317.5	223.5	203.6	217.5	45.8	28.0	73.7	66.9	114.7	237.9	313.9	234.7	2077.7
1994	254.2	306.8	230.2	92.5	39.1	12.0	36.9	39.7	40.5	50.0	53.5	134.9	1290.3
1995	124.0	144.2	153.2	64.8	11.3	0.0	14.5	8.0	75.4	53.7	88.6	200.0	937.7
1996	298.3	257.4	214.1	105.8	23.8	2.3	12.3	29.8	49.4	89.3	128.0	208.1	1418.6
1997	184.3	181.9	88.8	68.2	37.8	3.7	4.0	110.3	53.7	95.6	73.9	128.1	1030.3
1998	224.1	150.0	152.1	111.5	3.6	16.6	0.0	24.5	14.5	60.5	81.1	166.9	1005.4
1999	119.5	196.1	138.7	122.0	17.6	13.0	4.5	2.3	45.4	81.7	54.2	192.0	987.0
2000	282.4	308.8	153.0	50.2	7.0	19.1	69.7	40.6	18.9	137.5	49.5	186.7	1323.4
2001	279.5	131.7	174.1	42.1	20.8	17.4	15.2	19.8	54.8	71.8	61.3	76.5	965.0
2002	108.6	246.1	206.1	66.5	28.5	4.8	112.3	19.9	83.4	106.3	115.2	107.0	1204.7
2003	88.2	105.4	158.4	100.3	8.9	5.8	7.1	37.7	31.1	26.1	69.2	142.9	781.1

<<continuación>>.

2004	65.3	188.1	82.5	5.2	20.3	16.0	19.2	24.6	67.1	100.6	72.1	202.8	863.8
2005	105.4	86.5	88.7	21.8	24.5	2.0	4.5	14.6	43.6	95.9	33.0	115.6	636.1
2006	120.6	120.8	137.3	95.6	11.8	13.4	0.0	44.8	60.3	68.7	94.1	111.2	878.6
2007	78.5	36.5	187.5	37.8	15.3	0.0	2.0	3.2	49.6	49.9	61.6	99.3	621.2
2008	136.7	123.9	64.3	28.0	8.8	16.4	5.5	22.6	14.5	57.3	59.7	55.6	593.3
2009	61.4	97.1	81.5	62.6	36.8	2.9	28.5	6.1	29.8	50.9	119.1	189.2	765.9
2010	197.1	174.7	140.6	41.0	5.8	3.9	0.0	19.1	23.2	88.3	65.3	78.8	837.8
2011	203.7	268.4	134.3	93.3	30.6	0.0	11.3	8.7	80.4	56.1	52.0	144.0	1082.8
2012	79.5	191.6	93.6	114.0	15.9	20.9	8.9	4.4	63.2	25.2	74.4	116.2	807.8
2013	111.4	109.6	77.5	32.0	38.8	39.7	29.4	52.4	27.7	101.4	46.8	89.2	755.9
2014	102.0	103.1	176.4	76.0	25.2	5.5	20.4	30.8	92.6	59.1	21.9	133.0	846.0
<b>media</b>	139.1	144.7	121.2	62.4	24.1	22.34	22.5	31.62	52.27	87.65	82.21	123.8	913.78
<b>Máx.</b>	317.5	308.8	230.2	217.5	70.3	178.0	112.3	110.3	128.0	309.9	313.9	234.7	2077.70
<b>Mín.</b>	52.80	21.40	32.30	5.20	3.60	0.00	0.00	2.10	14.50	22.40	21.90	38.7	447.90

**Tabla 2: Precipitación Multianual - Estación Acostambo**

Año	Precipitación media mensual (mm)												Precipitación media
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1989	125.4	159.3	215.3	97.7	20.3	20.8	0.0	41.7	67.1	90.0	45.0	76.8	720.87
1990	149.2	55.7	60.8	47.2	18.6	56.8	16.1	40.6	40.6	96.7	117.2	121.5	1039.40
1991	46.2	81.1	111.9	31.1	20.2	29.9	12.4	0.0	79.0	27.7	65.5	50.1	876.50
1992	75.9	77.7	100.4	18.2	0.0	14.8	14.6	18.0	28.9	75.7	39.4	54.6	574.60
1993	181.1	136.0	96.1	50.2	15.7	3.2	24.4	32.6	73.1	62.0	162.5	115.3	793.40
1994	170.9	205.6	153.0	76.6	7.2	3.7	1.0	8.6	41.4	75.9	40.0	105.1	492.50
1995	80.0	151.7	158.6	38.8	6.8	12.5	11.8	12.4	41.4	31.5	92.0	90.3	1107.60
1996	104.8	136.6	87.3	52.5	4.3	0.0	0.0	7.5	24.3	52.2	64.5	102.7	500.40
1997	137.9	115.0	81.3	49.7	1.9	2.0	4.4	28.3	76.2	44.3	77.6	96.9	447.90
1998	132.6	145.2	55.2	7.6	6.6	5.0	0.0	14.0	11.6	108.3	88.1	90.9	558.10
1999	107.7	162.4	100.2	69.2	19.0	25.4	10.0	2.2	62.0	48.6	61.5	73.7	1176.30
2000	139.8	146.3	107.9	39.6	53.3	8.7	21.5	20.1	22.9	102.7	13.9	88.9	830.60
2001	189.5	143.2	109.6	23.6	18.7	16.9	49.0	16.3	34.0	80.4	91.1	81.2	1153.60
2002	52.7	202.5	133.0	32.7	20.3	2.5	50.0	29.8	41.8	73.5	95.1	117.5	2077.70
2003	69.5	119.2	134.4	63.5	10.9	0.0	0.0	45.5	51.1	17.8	90.1	87.3	1290.30
2004	60.2	145.5	96.4	33.3	17.7	48.0	11.8	17.0	40.7	70.6	119.3	116.6	937.70
2005	68.5	100.8	85.7	41.2	19.4	0.0	6.0	4.5	24.5	93.2	56.0	87.7	1418.60

<<continuación>>.

2006	47.0	119.5	104.5	49.7	6.5	12.3	0.0	27.9	27.4	56.7	111.7	96.0	1030.30
2007	85.5	68.7	132.8	38.2	25.5	0.0	20.0	7.5	34.3	67.5	85.9	87.4	1005.40
2008	31.8	120.5	62.3	35.9	16.6	18.1	4.0	5.0	53.0	101.2	32.3	85.3	987.00
2009	05.3	144.6	96.3	40.3	42.5	0.0	19.8	28.9	26.9	66.2	119.5	161.6	1323.40
2010	09.2	101.0	116.8	16.6	11.5	11.3	0.0	29.8	9.6	76.2	43.3	125.9	965.00
2011	59.5	215.3	163.7	62.1	38.6	2.0	17.5	6.3	57.3	75.2	69.6	126.9	1204.68
2012	77.2	252.9	55.8	122.4	37.1	9.5	10.3	6.8	32.7	48.1	77.9	198.0	781.10
2013	143.2	150.1	120.6	52.6	50.2	6.8	8.3	29.5	30.5	42.8	69.9	131.4	863.80
2014	141.2	106.6	118.6	65.0	15.0	14.6	14.5	7.5	45.6	37.9	52.7	96.6	636.10
<b>media</b>	118.9	137.0	109.9	48.3	19.4	12.5	12.6	18.8	41.5	66.3	76.21	102.6	763.93
<b>Máx.</b>	209.2	252.9	215.3	122.4	53.3	56.8	50.0	45.5	79.0	108.3	162.5	198.0	994.00
<b>Min.</b>	46.20	55.70	55.20	7.60	0.00	0.00	0.00	0.00	9.60	17.80	13.90	50.10	518.20

**Tabla 3: Precipitación media multianual – Estación Huancavelica**

Año	Precipitación media mensual (mm)												Precipitación
													media
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1988	131.4	109.6	130.0	95.3	13.7	2.0	0.0	0.0	32.7	40.1	43.4	143.1	741.30
1989	201.6	79.4	220.4	112.2	8.1	33.3	2.2	13.1	14.3	47.2	41.8	26.1	799.70
1990	132.3	41.1	113.1	26.9	21.1	70.9	9.5	18.7	43.3	113.2	89.3	148.2	827.60
1991	74.1	78.1	90.3	104.3	30.4	4.0	0.0	0.0	33.5	90.2	71.9	110.4	687.17
1992	9.0	63.8	122.9	30.4	6.1	36.5	25.2	17.5	23.0	94.3	10.8	138.1	577.64
1993	180.9	188.1	82.3	66.9	67.2	59.4	30.8	81.4	142.1	222.6	269.8	269.0	1660.43
1994	229.3	187.9	200.5	92.1	22.1	9.2	8.6	14.6	69.8	61.2	51.0	108.4	1054.70
1995	225.8	153.6	238.7	76.4	18.3	2.4	10.1	0.0	77.8	51.1	81.4	39.9	975.50
1996	129.7	186.1	77.8	26.1	9.2	5.2	13.8	49.7	43.2	33.1	30.0	130.0	733.90
1997	74.2	108.2	74.3	46.3	17.2	10.1	0.0	55.3	58.0	69.8	110.0	129.1	752.50
1998	166.5	124.4	121.2	61.3	1.9	9.6	0.0	26.0	23.0	74.0	46.6	125.4	779.92
1999	161.0	223.8	109.4	107.6	39.5	5.0	12.3	8.1	63.3	58.5	46.5	105.2	940.20
2000	161.5	157.1	120.5	54.6	17.7	6.9	35.1	27.1	25.8	97.1	49.2	86.9	839.50
2001	164.5	128.0	249.7	42.3	35.9	0.0	36.8	35.9	72.9	59.9	127.8	84.0	1037.70
2002	115.8	238.4	314.9	79.2	18.2	5.8	91.1	90.3	119.1	109.0	197.1	135.6	1514.50
2003	193.9	456.8	332.4	117.5	8.9	0.0	7.4	75.0	35.3	43.3	24.8	194.0	1489.30

<<continuación>>.

2004	40.7	164.4	167.4	30.2	4.2	35.3	49.5	40.2	55.0	38.8	45.6	211.4	882.70
2005	124.7	121.2	138.1	74.5	11.7	3.8	2.1	2.3	47.5	59.2	41.5	90.5	717.14
2006	143.6	111.3	138.6	132.9	0.0	23.6	0.0	33.8	24.1	74.2	75.0	86.9	844.05
2007	95.5	66.6	222.4	43.8	21.0	0.0	4.2	3.6	46.1	74.2	55.2	78.5	711.10
2008	154.5	166.0	101.3	7.4	3.9	7.0	11.2	18.3	23.6	73.0	29.6	96.6	692.40
2009	283.2	288.2	157.0	83.7	21.5	2.1	28.2	8.8	60.8	77.6	154.1	202.2	1367.40
2010	289.7	119.4	162.0	56.1	7.6	3.9	0.0	10.1	14.4	73.9	66.0	167.5	970.60
2011	241.8	218.6	196.5	78.6	12.3	1.1	10.3	8.2	47.8	40.1	100.9	159.9	1116.10
2012	105.1	242.4	127.1	192.9	7.4	9.5	14.5	5.4	76.8	63.9	74.9	263.4	1183.30
2013	163.0	216.1	237.7	61.0	23.0	18.8	9.9	32.5	38.1	78.5	33.0	189.0	1100.60
2014	187.1	137.4	135.9	71.5	59.5	6.8	23.2	11.3	73.7	88.6	55.4	102.3	952.70
<b>media</b>	154.9	162.0	161.2	73.42	19.54	13.9	16.1	25.8	50.82	74.71	74.56	135.7	962.78
<b>Máx.</b>	289.7	456.8	332.4	192.9	67.2	70.9	91.1	90.3	142.1	222.6	269.8	269.0	1660.43
<b>Min.</b>	9.00	41.10	74.30	7.40	0.00	0.00	0.00	0.00	14.30	33.10	10.8	26.10	577.64

**Tabla 4: Precipitación media multianual – Estación Lircay**

Año	Precipitación media mensual (mm)												Precipitación media
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1968	104.1	79.2	160.3	16.3	23.7	30.8	18.8	38.8	27.3	101.5	76.9	69.2	746.90
1969	63.6	99	103.5	68.1	0	3.9	11.6	12.7	64.5	43.8	94.7	144.1	709.50
1970	184.6	117.9	83.7	94.4	37.3	2.2	7.8	7.9	89.9	37.9	26.9	207.5	898.00
1971	141.8	197.7	127.1	57.4	20.7	34.9	3.1	24.3	1.9	44	24.8	122	799.70
1972	106.2	124	189.8	93.6	14.1	0	26.6	6.6	61	52.7	52.2	91.1	817.90
1973	189.8	191.6	158.7	86.2	9.2	13.4	10.3	25.2	95.7	68.8	66.9	166.1	1081.90
1974	201.5	239.6	138.7	51.5	11.9	18.8	8.6	83.7	20.7	41.5	60.7	52.5	929.70
1975	136.9	109.6	134.7	63.5	76.8	1.4	6.1	20.5	50	44.4	80.2	106.1	830.20
1976	173.4	171.3	128.7	33.6	53.8	15.5	18	12	169.8	5.4	32.4	83.4	897.30
1977	77.7	176.7	85.7	24.8	38.5	0.3	10.7	0.9	50.8	34.9	129.9	72.6	703.50
1978	146.7	93.4	106.2	69.6	2.4	14.0	0.6	4.3	52.4	89.0	94.5	67.0	740.10
1979	77.5	122.2	213.6	65.0	38.0	19.1	28.6	17.5	45.3	56.7	80.9	67.5	831.90
1980	104.1	79.2	160.3	16.3	23.7	30.8	18.8	38.8	27.3	101.5	76.9	69.2	746.90
1981	63.6	99	103.5	68.1	0	3.9	11.6	12.7	64.5	43.8	94.7	144.1	709.50
1982	184.6	117.9	83.7	94.4	37.3	2.2	7.8	7.9	89.9	37.9	26.9	207.5	898.00
1983	141.8	197.7	127.1	57.4	20.7	34.9	3.1	24.3	1.9	44	24.8	122	799.70

<<continuación>>.

1984	106.2	124	189.8	93.6	14.1	0	26.6	6.6	61	52.7	52.2	91.1	817.90
1985	189.8	191.6	158.7	86.2	9.2	13.4	10.3	25.2	95.7	68.8	66.9	166.1	1081.90
1986	201.5	239.6	138.7	51.5	11.9	18.8	8.6	83.7	20.7	41.5	60.7	52.5	929.70
1987	136.9	109.6	134.7	63.5	76.8	1.4	6.1	20.5	50	44.4	80.2	106.1	830.20
1988	173.4	171.3	128.7	33.6	53.8	15.5	18	12	169.8	5.4	32.4	83.4	897.30
1989	77.7	176.7	85.7	24.8	38.5	0.3	10.7	0.9	50.8	34.9	129.9	72.6	703.50
1990	146.7	93.4	106.2	69.6	2.4	14.0	0.6	4.3	52.4	89.0	94.5	67.0	740.10
1991	77.5	122.2	213.6	65.0	38.0	19.1	28.6	17.5	45.3	56.7	80.9	67.5	831.90
1992	150.2	79.9	52.5	57.3	20.5	5.2	43.8	19.2	99.5	116.6	39.2	47.2	731.11
1993	185.7	261.7	122.0	50.1	7.4	14.2	0.0	75.7	52.4	57.5	93.5	168.4	1088.55
1994	138.1	165.5	33.2	18.7	14.4	26.3	0.0	26.0	12.1	58.0	67.6	66.6	626.50
1995	90.8	118.3	134.2	126.5	22.0	25.8	26.7	0.0	55.0	12.0	17.3	107.9	736.51
1996	165.4	174.1	150.8	155.5	44.1	0.0	49.8	41.5	147.9	36.4	31.4	107.4	1104.30
1997	100.1	54.5	60.4	86.1	77.9	16.6	9.7	12.2	0.4	56.7	92.2	59.3	626.10
1998	138.5	147.8	169.2	64.1	3.7	2.3	0.0	0.0	0.0	97.3	30.4	104.8	758.10
1999	182.7	115.7	220.5	83.1	19.6	18.6	3.0	23.8	34.5	55.3	42.1	33.5	832.40
2000	158.6	20.4	63.3	53.4	24.1	88.8	10.5	36.4	50.2	66.0	133.8	147.3	852.80
2001	105.3	73.3	105.0	29.5	30.9	44.0	7.7	2.7	24.2	3.6	56.8	44.1	527.10
2002	70.1	73.0	53.8	47.2	0.0	24.4	24.6	42.3	20.4	72.4	25.2	40.8	494.20
2003	239.0	107.6	103.4	96.7	36.9	13.2	28.0	19.7	25.8	67.5	135.9	137.5	1011.20
2004	154.6	218.6	145.4	76.9	29.9	7.8	0.5	0.0	24.8	30.3	52.4	72.2	813.40
2005	140.8	154.5	110.2	26.0	15.3	0.0	5.0	7.0	22.1	37.7	77.8	41.2	637.60
2006	131.5	161.6	120.4	52.1	8.4	0.0	0.0	33.6	27.8	55.4	37.2	88.0	716.00
2007	203.9	139.6	66.1	72.2	8.0	1.9	0.0	33.1	72.8	35.6	100.2	154.9	888.30
2008	193.0	115.8	100.0	71.0	0.0	12.1	0.0	4.6	15.1	69.2	69.4	95.0	745.20
2009	94.4	149.6	103.8	71.9	20.2	9.4	29.7	0.0	13.7	49.1	30.6	68.0	640.40
2010	157.3	204.2	84.6	14.3	34.5	22.1	61.9	39.6	6.7	127.0	20.5	133.7	906.40
2011	220.1	119.7	132.3	43.7	36.0	6.4	25.9	20.1	54.4	44.8	72.6	116.9	892.90
2012	116.4	230.8	165.8	68.0	44.6	6.5	41.7	16.4	51.5	120.5	88.1	169.2	1119.50
2013	139.4	193.9	180.8	61.5	53.0	0.4	4.2	37.4	21.1	27.2	60.8	116.7	896.40
2014	92.4	158.9	100.9	34.7	16.9	37.3	10.9	16.4	32.5	29.9	46.7	112.8	690.30
<b>media</b>	141.9	137.9	116.2	61.06	24.6	14.2	15.4	18.7	36.89	56.16	59.95	106.3	789.39
<b>Máx.</b>	239.0	261.7	220.5	155.5	77.9	88.8	61.9	75.7	147.9	127.0	135.9	199.7	1119.50
<b>Min.</b>	70.10	20.40	33.2	14.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.60	17.30	33.5	494.20

**Tabla 5: Precipitación media multianual – Estación Colcabamba**

<b>Año</b>	<b>Precipitación media mensual (mm)</b>												<b>Precipitación media</b>
	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	
2004	120.1	213.5	176.4	33.4	21.4	22.2	19.0	26.3	53.4	84.3	77.2	181.3	1028.51
2005	73.5	103.7	123.0	55.1	8.7	0.0	13.9	7.1	26.4	115.1	31.0	115.7	673.20
2006	210.3	111.0	159.5	68.2	8.3	17.9	3.7	19.0	39.2	72.3	103.4	166.0	978.77
2007	138.5	105.8	186.9	53.2	16.0	0.0	14.8	4.1	15.7	76.2	48.6	126.7	786.50
2008	230.7	150.9	87.7	32.2	26.0	10.8	0.4	14.0	27.7	110.4	83.4	93.0	867.20
2009	182.7	157.2	127.8	77.6	38.3	40.2	17.9	30.4	29.5	66.3	145.4	139.6	1052.90
2010	222.9	135.9	188.6	36.5	6.1	7.6	0.3	26.8	32.9	95.4	42.4	185.0	980.40
2011	283.5	307.4	201.4	88.0	33.4	6.7	13.9	3.5	88.5	84.7	100.5	92.5	1304.00
2012	134.5	275.8	119.7	119.6	20.8	56.8	3.6	4.2	23.3	60.9	80.2	210.1	1109.50
2013	176.2	218.7	146.0	27.7	37.3	19.2	18.5	45.7	22.2	105.2	58.6	160.2	1035.50
2014	179.6	141.2	175.6	60.1	28.5	2.4	41.3	11.7	79.7	67.7	82.6	140.6	1011.00
<b>media</b>	177.5	174.7	153.9	59.24	22.3	16.7	13.4	17.5	39.9	85.3	77.57	146.4	984.32
<b>Máx.</b>	283.5	307.4	201.4	119.6	38.3	56.8	41.3	45.7	88.5	115.1	145.4	210.1	1304.00
<b>Min.</b>	73.50	103.7	87.7	27.7	6.1	0.0	0.3	3.50	15.7	60.9	31.0	92.5	673.20

**Tabla 6: Precipitación media multianual – Estación Choclococha**

Año	Precipitación media mensual (mm)												Precipitación media
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1980	93.0	51.8	54.3	35.1	29.5	15.54	44.4	44.1	33.0	73.8	86.6	25.9	587.04
1981	47.2	67.3	41.8	91.1	7.92	0.1	0.0	20.3	59.4	29.0	38.6	83.7	486.44
1982	167.2	248.8	120.6	74.5	8.97	8.21	3.59	47.23	60.5	77.3	102.9	35.4	955.00
1983	46.4	83.1	105.4	72.6	32.2	17.4	2.37	12.5	95.7	81.7	40.1	72.6	662.44
1984	182.5	144.9	98.06	53.7	22.2	22.85	11.9	28.1	53.8	51.0	67.2	148.6	884.90
1985	121.9	135.4	126.2	93.5	23.6	25.39	15.34	10.6	69.8	18.1	34.7	102.9	777.46
1986	219.9	92.9	89.6	24.2	1.2	18.2	1.1	1.9	0.9	1.1	3	130.4	584.44
1987	255.1	78.5	109.0	38.1	4.0	0.4	19.7	15.1	5.8	21.2	24.5	72.6	644.02
1988	242.3	166.6	165.6	115.6	71.3	1.5	0.0	0.3	6.8	42.0	19.8	88.6	920.40
1989	114.8	75.2	96.5	51.2	15.4	9.2	0.5	28.9	34.3	75.2	66.0	28.7	595.86
1990	21.3	4.9	28.9	31.1	128.7	101.4	10.8	23.2	66.0	81.8	179.1	82.6	759.80
1991	110.8	90.7	91.2	79.1	130.3	22.0	1.7	0.0	4.5	29.5	22.6	32.5	614.90
1992	91.8	84.1	104.4	45.1	3.2	15.8	13.8	26.7	9.9	192.5	75.4	171.8	834.54
1993	131.6	128.4	153.5	184.0	23.0	29.6	8.5	36.6	72.8	104.0	109.3	65.8	1047.10
1994	133.5	331.0	239.0	50.2	39.8	11.3	32.7	18.8	60.3	28.8	43.5	22.4	1011.30
1995	33.3	133.2	179.6	97.1	16.7	0.0	0.0	2.1	26.4	65.8	69.3	63.2	686.70
1996	223.4	159.6	187.3	117.7	25.2	2.4	2.9	46.3	44.6	66.0	58.5	165.6	1099.50
1997	254.0	256.3	90.2	125.0	30.5	0.0	0.0	220.2	57.1	104.5	101.0	155.4	1394.20
1998	373.6	466.8	389.0	153.4	0.0	59.8	0.0	28.4	52.8	122.8	154.4	103.7	1904.70
1999	242.3	390.0	236.4	202.5	55.2	12.4	17.1	11.9	84.0	196.3	71.3	209.0	1728.40
2000	201.0	250.3	282.1	121.7	18.2	2.5	35.1	37.3	43.7	162.2	77.8	164.6	1396.50
2001	276.1	110.5	158.7	149.7	29.7	17.3	17.1	4.2	63.9	101.4	128.7	102.5	1159.80
2002	105.8	275.6	305.0	83.6	18.3	38.6	22.9	5.6	47.9	83.1	78.7	141.8	1206.90
2003	282.1	387.0	362.4	126.0	51.5	0.0	14.9	8.0	13.7	40.9	28.4	169.7	1484.60
2004	63.8	213.5	178.9	83.8	6.1	37.1	15.7	28.6	87.0	79.9	97.0	197.1	1088.50
2005	135.4	140.1	222.4	65.5	9.1	0.0	0.0	9.6	19.8	46.8	49.7	223.1	921.50
2006	250.8	204.6	213.5	110.7	0.0	8.6	0.0	25.0	63.8	94.1	111.5	139.0	1221.62
2007	111.3	137.7	172.7	81.5	7.7	3.8	1.6	2.8	21.8	83.6	93.5	155.9	873.90
2008	311.1	190.6	129.5	77.5	4.4	20.3	5.1	21.3	47.4	104.8	38.5	111.8	1062.30
2009	165.9	197.4	58.0	87.4	46.2	9.7	25.8	12.4	38.4	48.2	205.5	220.2	1115.13
2010	247.0	188.3	193.5	116.8	14.7	17.5	0.0	4.0	9.9	57.6	67.9	166.8	1084.01
2011	230.1	239.6	215.7	130.3	18.7	0.0	9.9	8.6	47.8	79.1	106.2	188.1	1274.06
2012	111.2	271.2	155.7	202.6	37.6	15.8	2.5	5.9	69.4	86.2	142.6	330.6	1431.30
2013	210.1	190.9	213.4	64.2	106.5	11.3	29.2	26.4	64.7	91.6	82.0	251.1	1341.40
2014	347.0	207.3	227.8	79.3	28.9	0.0	18.5	40.8	45.4	79.3	68.2	183.1	1325.60
<b>media</b>	188.5	198.9	184.3	102.5	33.6	16.01	10.9	24.96	43.2	84.61	84.67	143.1	1033.32
<b>Máx.</b>	373.6	466.8	389.0	202.6	130.3	101.4	35.1	220.2	87.0	196.3	205.5	330.6	1904.70
<b>Min.</b>	21.30	4.90	28.90	31.10	0.00	0.00	0.00	0.00	4.50	21.2	19.8	22.40	595.86

**ANEXO 2: CÁLCULO DEL FACTOR R (MÉTODO CON LA ECUACIÓN DE WISCHMEIER Y SMITH)**

**Tabla 7: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Huancalpi**

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j$$

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R <sub>anual</sub>
1980	4.27	4.17	2.51	4.63	4.55	1.81	7.73	3.73	8.68	7.43	5.70	2.67	336.01
1981	5.52	8.98	6.65	9.80	0.25	0.79	3.12	14.08	9.44	13.65	6.52	5.00	518.22
1982	6.97	11.80	7.04	5.02	0.98	1.73	0.45	7.83	3.55	12.38	3.65	1.52	430.19
1983	2.20	0.75	3.21	4.72	3.96	1.94	0.05	0.56	14.66	14.97	2.36	2.66	270.46
1984	8.36	2.68	6.25	5.68	2.40	1.81	1.97	2.00	8.46	2.50	2.49	8.71	379.11
1985	3.75	3.79	4.43	2.74	1.86	2.51	0.42	0.13	3.21	2.36	1.28	3.41	216.94
1986	6.97	14.24	9.05	13.66	5.83	0.69	3.20	2.74	10.45	8.64	3.52	4.62	557.62
1987	6.04	4.23	2.61	1.48	0.47	1.06	3.25	4.28	1.54	3.86	1.70	1.56	221.68
1988	2.90	1.55	1.35	2.46	2.25	1.58	0.75	2.85	1.60	7.44	3.75	2.99	193.74
1989	5.21	3.65	2.11	2.02	0.71	1.77	2.58	2.81	2.50	10.79	2.96	2.52	251.43
1990	3.79	2.22	1.23	3.38	6.55	12.37	7.61	7.66	17.71	28.07	17.62	6.06	607.32
1991	3.47	2.32	3.23	4.75	8.93	14.80	0.89	1.34	2.91	19.42	5.58	5.82	405.22
1992	2.91	2.99	1.52	3.44	2.84	25.19	2.65	6.99	2.88	43.85	8.69	9.73	592.28
1993	17.56	11.76	10.57	30.78	5.45	3.07	9.43	8.44	15.63	33.66	22.21	12.44	1126.80
1994	13.63	16.89	12.17	12.23	4.53	1.12	4.24	4.61	4.72	6.03	2.91	6.58	665.85
1995	5.97	7.11	7.62	8.13	1.04	0.00	1.41	0.69	9.68	6.55	5.24	10.36	462.57
1996	16.35	13.82	11.20	14.26	2.53	0.14	1.16	3.30	5.94	11.75	8.02	10.84	742.65
1997	9.43	9.29	4.05	8.62	4.36	0.26	0.29	14.95	6.55	12.70	4.24	6.20	514.65
1998	11.80	7.44	7.56	15.14	0.25	1.65	0.00	2.62	1.41	7.51	4.73	8.42	504.37
1999	5.72	10.13	6.80	16.77	1.77	1.24	0.34	0.14	5.39	10.61	2.95	9.88	494.01
2000	15.36	17.01	7.61	6.06	0.58	1.95	8.84	4.73	1.93	19.22	2.65	9.57	690.11
2001	15.19	6.40	8.83	4.94	2.16	1.75	1.49	2.04	6.70	9.15	3.41	3.40	478.49
2002	5.12	13.13	10.72	8.38	3.13	0.37	15.26	2.05	10.86	14.34	7.10	5.03	614.45
2003	4.02	4.95	7.92	13.42	0.78	0.46	0.59	4.34	3.47	2.83	3.93	7.04	374.29
2004	2.83	9.65	3.72	0.40	2.10	1.58	1.97	2.64	8.46	13.46	4.12	10.52	422.71
2005	4.95	3.93	4.05	2.29	2.62	0.12	0.34	1.42	5.14	12.75	1.64	5.51	296.15
2006	5.78	5.79	6.72	12.70	1.10	1.28	0.00	5.31	7.48	8.69	5.62	5.26	426.84
2007	3.51	1.42	9.62	4.36	1.50	0.00	0.12	0.22	5.97	6.01	3.43	4.62	291.82
2008	6.69	5.97	2.78	3.07	0.77	1.63	0.43	2.38	1.41	7.06	3.31	2.34	271.16
2009	2.63	4.50	3.67	7.81	4.22	0.19	3.13	0.49	3.30	6.15	7.38	9.72	365.39
2010	10.19	8.87	6.91	4.79	0.46	0.28	0.00	1.95	2.46	11.60	3.67	3.52	410.43
2011	10.58	14.50	6.55	12.35	3.40	0.00	1.04	0.76	10.42	6.89	2.81	7.10	549.24
2012	3.56	9.86	4.31	15.53	1.57	2.18	0.78	0.33	7.90	2.71	4.28	5.54	390.91
2013	5.28	5.18	3.46	3.59	4.49	4.61	3.25	6.36	3.03	13.58	2.48	4.07	355.38
2014	4.76	4.82	8.97	9.77	2.71	0.43	2.11	3.43	12.25	7.31	1.00	6.48	410.38

**Tabla 8: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Acostambo**

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j$$

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R <sub>anual</sub>
1989	7.83	10.31	14.54	18.07	2.95	3.03	0.00	6.82	11.77	16.46	4.12	3.42	486.69
1990	9.56	3.05	3.38	7.86	2.66	9.73	2.24	6.61	6.61	17.86	12.42	5.83	397.40
1991	2.45	4.73	6.87	4.85	2.93	4.64	1.65	0.00	14.19	4.24	6.36	2.07	258.18
1992	4.38	4.50	6.06	2.59	0.00	2.03	2.00	2.56	4.46	13.51	3.52	2.29	236.86
1993	11.94	8.60	5.76	8.44	2.18	0.32	3.66	5.13	12.98	10.76	18.03	5.49	474.75
1994	11.17	13.80	9.84	13.70	0.86	0.38	0.07	1.06	6.76	13.55	3.58	4.93	444.97
1995	4.65	9.74	10.25	6.27	0.80	1.66	1.55	1.65	6.76	4.93	9.41	4.13	348.19
1996	6.36	8.64	5.15	8.89	0.46	0.00	0.00	0.90	3.64	8.83	6.25	4.80	299.02
1997	8.73	7.09	4.74	8.34	0.16	0.17	0.47	4.35	13.62	7.31	7.74	4.49	342.33
1998	8.35	9.27	3.02	0.92	0.77	0.55	0.00	1.90	1.52	20.31	8.96	4.16	321.07
1999	6.57	10.54	6.04	12.20	2.73	3.83	1.27	0.20	10.76	8.13	5.92	3.26	358.18
2000	8.87	9.35	6.58	6.42	9.04	1.08	3.15	2.91	3.40	19.13	1.02	4.06	371.38
2001	12.57	9.12	6.70	3.52	2.68	2.38	8.21	2.28	5.38	14.48	9.31	3.65	419.64
2002	2.86	13.56	8.38	5.14	2.95	0.23	8.40	4.62	6.83	13.07	9.77	5.61	415.86
2003	3.95	7.38	8.48	11.05	1.41	0.00	0.00	7.54	8.61	2.53	9.19	3.97	329.67
2004	3.34	9.29	5.78	5.25	2.51	8.02	1.55	2.39	6.63	12.48	12.68	5.56	371.64
2005	3.88	6.08	5.04	6.72	2.80	0.00	0.69	0.48	3.68	17.13	5.31	3.99	273.03
2006	9.40	7.41	6.34	8.34	0.76	1.63	0.00	4.28	4.19	9.70	11.76	4.44	366.17
2007	5.03	3.90	8.36	6.16	3.85	0.00	2.90	0.90	5.44	11.85	8.70	3.98	306.92
2008	8.29	7.48	3.48	5.73	2.33	2.58	0.42	0.55	8.98	18.81	2.79	3.87	317.03
2009	6.40	9.22	5.77	6.55	6.97	0.00	2.86	4.46	4.10	11.59	12.70	8.11	409.11
2010	14.08	6.10	7.21	2.33	1.51	1.47	0.00	4.62	1.21	13.62	3.94	6.08	361.66
2011	10.32	14.54	10.63	10.77	6.23	0.17	2.48	0.73	9.83	13.41	6.83	6.13	498.08
2012	4.46	17.47	3.06	23.09	5.95	1.20	1.32	0.80	5.14	8.04	7.77	10.24	457.34
2013	9.12	9.63	7.48	8.91	8.44	0.80	1.02	4.56	4.74	7.02	6.86	6.39	401.73
2014	8.97	6.49	7.34	11.35	2.06	2.00	1.98	0.90	7.56	6.10	4.95	4.47	338.82

**Tabla 9: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Huancavelica**

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j$$

<b>Año</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>R<sub>anual</sub></b>
1988	6.39	5.18	6.31	17.57	1.85	0.17	0.00	0.00	5.14	6.51	3.95	9.11	383.33
1989	10.45	3.56	11.58	21.15	0.99	5.25	0.20	1.76	1.95	7.86	3.78	1.24	404.62
1990	6.44	1.64	5.37	4.10	3.09	12.54	1.20	2.68	7.12	21.36	9.10	9.49	431.00
1991	3.28	3.49	4.13	19.46	4.73	0.42	0.00	0.00	5.29	16.49	7.09	6.76	351.21
1992	0.25	2.75	5.91	4.73	0.70	5.84	3.80	2.48	3.41	17.36	0.75	8.75	295.40
1993	9.23	9.65	3.71	11.73	11.79	10.24	4.80	14.68	26.81	42.00	30.54	18.74	932.16
1994	12.11	9.64	10.39	16.90	3.26	1.15	1.06	2.00	12.32	10.60	4.76	6.62	553.28
1995	11.90	7.65	12.68	13.66	2.61	0.22	1.29	0.00	13.94	8.61	8.18	2.06	504.79
1996	6.29	9.54	3.47	3.96	1.15	0.58	1.87	8.34	7.10	5.22	2.56	8.16	372.05
1997	3.29	5.10	3.29	7.69	2.43	1.29	0.00	9.43	9.96	12.32	11.55	8.10	384.83
1998	8.39	6.00	5.82	10.62	0.16	1.21	0.00	3.94	3.41	13.17	4.29	7.83	399.31
1999	8.07	11.78	5.17	20.16	6.40	0.55	1.63	0.99	11.01	10.06	4.28	6.39	487.95
2000	8.10	7.85	5.78	9.30	2.51	0.81	5.58	4.13	3.90	17.94	4.57	5.12	423.92
2001	8.28	6.20	13.35	6.93	5.73	0.00	5.90	5.73	12.94	10.34	13.71	4.93	538.79
2002	5.52	12.66	17.39	14.23	2.59	0.66	16.69	16.52	22.47	20.46	22.31	8.57	833.85
2003	10.00	25.85	18.50	22.17	1.11	0.00	0.89	13.37	5.62	7.12	2.04	12.91	833.66
2004	1.62	8.27	8.44	4.69	0.44	5.62	8.30	6.53	9.37	6.27	4.18	14.24	470.36
2005	6.01	5.82	6.77	13.27	1.54	0.39	0.18	0.21	7.92	10.20	3.75	5.37	359.51
2006	7.08	5.27	6.79	25.07	0.00	3.52	0.00	5.34	3.60	13.22	7.44	5.12	432.11
2007	4.41	2.89	11.70	7.21	3.07	0.00	0.44	0.37	7.65	13.21	5.22	4.55	357.50
2008	7.70	8.36	4.72	0.89	0.40	0.83	1.46	2.61	3.52	12.96	2.52	5.79	346.39
2009	15.41	15.72	7.84	15.15	3.15	0.18	4.33	1.09	10.52	13.90	16.97	13.54	755.08
2010	15.82	5.72	8.13	9.59	0.92	0.40	0.00	1.29	1.97	13.15	6.42	10.92	519.87
2011	12.87	11.47	10.15	14.11	1.63	0.08	1.32	1.00	7.98	6.51	10.47	10.35	598.64
2012	4.93	12.91	6.15	36.39	0.89	1.20	1.98	0.60	13.74	11.13	7.43	18.30	657.77
2013	8.19	11.32	12.62	10.56	3.41	2.69	1.26	5.11	6.14	14.09	2.86	12.53	590.73
2014	9.60	6.73	6.64	12.66	10.26	0.80	3.45	1.47	13.11	16.17	5.24	6.19	491.47

**Tabla 10: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Lircay**

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j$$

<b>Año</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>R<sub>anual</sub></b>
1980	9.38	5.57	6.46	6.83	0.11	1.03	0.02	0.24	4.91	9.06	4.36	2.91	349.19
1981	4.48	7.60	14.41	6.31	3.38	1.50	2.42	1.35	4.15	5.39	3.63	2.94	394.29
1982	9.63	4.65	2.84	5.45	1.63	0.31	3.99	1.51	10.30	12.35	1.55	1.93	345.55
1983	12.28	18.16	7.58	4.66	0.47	1.05	0.00	7.52	4.91	5.47	4.30	8.50	535.78
1984	8.75	10.77	1.65	1.46	1.07	2.19	0.00	2.16	0.87	5.53	2.95	2.89	288.35
1985	5.39	7.32	8.46	13.55	1.77	2.14	2.23	0.00	5.20	0.86	0.57	5.08	344.61
1986	10.76	11.41	9.68	17.15	4.02	0.00	4.63	3.75	16.20	3.21	1.19	5.06	551.88
1987	5.25	7.16	8.25	13.62	19.74	3.12	1.63	1.58	0.09	5.64	8.07	11.43	564.54
1988	6.82	16.96	9.47	6.59	0.86	0.81	0.00	0.00	0.00	12.76	7.84	10.36	532.40
1989	8.48	9.47	11.49	9.65	4.28	1.87	0.94	3.27	3.59	7.10	4.38	4.65	470.13
1990	8.83	2.31	12.22	4.22	4.17	10.48	2.41	7.38	2.76	6.76	6.52	11.97	538.78
1991	9.30	13.80	16.71	3.85	5.75	12.34	3.43	0.99	2.56	8.07	5.86	6.59	614.73
1992	8.42	8.25	5.47	12.10	0.00	3.17	2.97	3.64	5.53	8.13	2.91	6.03	432.17
1993	22.07	13.01	6.31	9.41	5.20	1.82	3.75	3.48	4.82	10.30	28.13	12.16	903.53
1994	17.53	21.51	20.44	8.02	6.20	1.87	0.12	0.00	8.48	8.54	6.48	6.03	754.88
1995	10.66	20.95	7.21	3.59	5.09	0.00	1.30	3.07	3.69	6.08	6.70	6.03	539.96
1996	14.91	13.07	11.07	10.24	3.80	0.00	0.00	4.06	3.17	4.55	5.75	5.20	540.55
1997	18.03	14.29	4.93	10.24	2.51	0.64	0.00	4.12	10.77	3.54	8.07	18.53	686.07
1998	20.38	10.18	9.88	8.89	0.00	2.61	0.00	0.90	4.06	8.83	10.72	8.02	621.26
1999	6.53	7.44	6.76	10.36	8.19	2.76	9.24	0.00	2.36	6.03	4.76	7.38	467.24
2000	9.24	14.35	7.96	2.06	6.08	6.59	8.13	4.01	2.91	11.19	3.38	10.36	573.97
2001	15.96	9.77	8.19	8.83	7.44	0.90	2.16	2.86	8.71	4.71	5.97	16.40	640.32
2002	14.29	23.32	15.65	9.77	9.41	2.11	7.50	2.41	5.25	11.61	10.12	15.22	889.36
2003	10.48	14.85	9.35	9.35	7.16	0.09	1.21	1.21	4.01	4.22	9.94	11.37	604.13
2004	9.94	13.98	6.59	6.59	4.28	4.98	3.59	3.59	3.96	2.66	4.60	8.65	507.54
2005	6.36	11.61	11.13	11.13	7.21	0.44	6.65	6.65	6.42	10.12	2.76	9.00	575.65
2006	10.48	11.13	9.53	9.53	0.37	0.86	0.64	0.64	2.61	4.44	6.53	10.36	492.79
2007	9.94	5.31	16.27	16.27	4.87	0.00	9.12	9.12	2.36	3.78	2.21	5.38	544.95
2008	27.17	12.40	4.44	4.44	2.81	2.56	1.35	0.56	2.02	3.75	1.40	6.87	508.39
2009	8.42	11.88	4.06	5.21	1.99	0.87	2.22	0.60	2.90	4.15	6.40	8.61	417.48
2010	10.99	7.13	7.33	3.65	1.50	0.67	0.00	0.04	0.87	2.65	1.10	7.53	321.79
2011	12.47	16.05	10.49	5.06	1.56	0.11	1.33	1.04	4.27	2.21	2.65	5.29	458.86
2012	3.99	14.26	6.83	14.77	1.44	1.30	0.32	0.07	4.20	4.22	1.95	10.34	434.50
2013	9.28	8.32	7.76	1.95	2.88	0.89	0.74	2.06	1.17	4.12	1.07	8.93	354.10
2014	9.90	6.52	5.77	6.00	4.65	0.61	1.35	1.45	5.98	9.35	0.68	5.17	372.67

**Tabla 11: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Choclococha**

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j$$

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R <sub>anual</sub>
1980	2.66	1.33	1.41	1.35	1.10	0.50	1.79	1.78	1.26	3.26	1.74	0.30	292.84
1981	1.19	1.82	1.03	4.18	0.22	0.00	0.00	0.70	2.53	1.08	0.66	1.28	244.17
1982	5.28	8.35	3.61	3.30	0.25	0.23	0.08	1.93	2.58	3.44	2.14	0.45	501.74
1983	1.16	2.34	3.08	3.21	1.22	0.58	0.04	0.38	4.42	3.68	0.69	1.08	347.76
1984	5.84	4.47	2.83	2.25	0.78	0.81	0.36	1.04	2.25	2.11	1.29	2.53	416.08
1985	3.65	4.13	3.80	4.31	0.84	0.92	0.50	0.31	3.06	0.61	0.58	1.64	389.52
1986	7.25	2.66	2.55	0.87	0.02	0.61	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	2.17	247.52
1987	8.60	2.18	3.21	1.49	0.09	0.00	0.67	0.49	0.14	0.74	0.38	1.08	295.31
1988	8.10	5.26	5.22	5.51	3.14	0.02	0.00	0.00	0.18	1.68	0.29	1.37	490.37
1989	3.41	2.07	2.78	2.12	0.50	0.26	0.00	1.07	1.32	3.34	1.26	0.35	293.99
1990	0.45	0.07	0.66	1.17	6.24	4.73	0.32	0.82	2.86	3.68	4.09	1.26	421.59
1991	3.27	2.58	2.60	3.54	6.33	0.77	0.03	0.00	0.10	1.10	0.34	0.40	335.30
1992	2.62	2.36	3.05	1.83	0.07	0.51	0.43	0.98	0.29	9.92	1.47	3.00	414.43
1993	4.00	3.88	4.78	9.41	0.81	1.10	0.24	1.42	3.21	4.87	2.29	0.96	613.31
1994	4.06	11.59	7.98	2.07	1.57	0.34	1.24	0.64	2.57	1.07	0.76	0.25	526.55
1995	0.78	4.05	5.74	4.50	0.55	0.00	0.00	0.04	0.96	2.85	1.33	0.91	354.85
1996	7.38	5.00	6.02	5.62	0.91	0.04	0.06	1.88	1.80	2.86	1.09	2.88	566.81
1997	8.56	8.65	2.57	6.03	1.14	0.00	0.00	11.57	2.41	4.90	2.09	2.67	799.23
1998	13.31	17.16	13.94	7.64	0.00	2.55	0.00	1.05	2.20	5.91	3.44	1.65	1088.22
1999	8.10	13.98	7.88	10.51	2.32	0.38	0.57	0.36	3.80	10.14	1.38	3.78	1007.37
2000	6.53	8.41	9.65	5.84	0.61	0.05	1.35	1.46	1.76	8.14	1.53	2.86	759.92
2001	9.42	3.26	4.97	7.42	1.11	0.57	0.57	0.09	2.76	4.73	2.78	1.63	640.66
2002	3.10	9.40	10.56	3.78	0.62	1.52	0.81	0.14	1.96	3.75	1.55	2.40	620.18
2003	9.65	13.86	12.86	6.08	2.14	0.00	0.48	0.22	0.43	1.63	0.45	2.96	794.05
2004	1.70	7.00	5.71	3.79	0.15	1.45	0.51	1.06	3.96	3.58	1.99	3.53	545.39
2005	4.13	4.30	7.34	2.84	0.26	0.00	0.00	0.28	0.68	1.91	0.89	4.08	419.16
2006	8.43	6.67	7.00	5.24	0.00	0.24	0.00	0.90	2.75	4.34	2.35	2.34	641.81
2007	3.29	4.21	5.48	3.67	0.21	0.08	0.02	0.05	0.76	3.78	1.91	2.68	419.95
2008	10.80	6.14	3.92	3.46	0.10	0.70	0.12	0.74	1.94	4.91	0.66	1.81	550.05
2009	5.23	6.40	1.52	3.98	1.88	0.28	0.94	0.38	1.51	1.98	4.80	4.01	537.50
2010	8.29	6.06	6.25	5.57	0.47	0.58	0.00	0.09	0.29	2.44	1.30	2.90	547.97
2011	7.64	8.00	7.09	6.33	0.63	0.00	0.29	0.24	1.96	3.54	2.22	3.34	661.61
2012	3.28	9.23	4.86	10.51	1.47	0.51	0.05	0.15	3.04	3.91	3.14	6.43	766.94
2013	6.88	6.16	7.00	2.77	5.01	0.34	1.09	0.96	2.80	4.20	1.63	4.68	674.59
2014	12.24	6.77	7.55	3.55	1.07	0.00	0.62	1.62	1.84	3.55	1.31	3.24	674.70

**Tabla 12: Cálculo del Factor R (Método con la Ecuación de Wischmeier y Smith) – Estación Colcabamba**

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^m (E)_k (I_{30})_k \right]_j$$

<b>Año</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>R<sub>anual</sub></b>
2004	2.56	5.02	4.02	1.28	2.24	2.33	1.94	2.85	6.51	11.00	3.44	9.25	571.82
2005	1.43	2.15	2.64	2.32	0.76	0.00	1.34	0.59	2.86	15.70	1.17	5.51	354.50
2006	4.93	2.33	3.57	2.98	0.72	1.81	0.26	1.94	4.54	9.22	4.84	8.36	536.24
2007	3.03	2.21	4.30	2.22	1.58	0.00	1.44	0.30	1.55	9.80	2.00	6.12	414.06
2008	5.49	3.35	1.77	1.22	2.81	0.99	0.01	1.35	3.03	14.97	3.77	4.28	440.24
2009	4.19	3.51	2.76	3.46	4.42	4.68	1.81	3.38	3.26	8.35	7.18	6.85	556.20
2010	5.28	2.96	4.35	1.42	0.49	0.64	0.01	2.91	3.71	12.67	1.70	9.47	554.10
2011	6.97	7.65	4.69	4.01	3.77	0.55	1.34	0.25	11.63	11.06	4.68	4.25	672.61
2012	2.93	6.75	2.55	5.73	2.16	6.99	0.25	0.31	2.47	7.57	3.60	10.96	636.13
2013	4.02	5.16	3.22	1.02	4.29	1.97	1.88	5.43	2.33	14.17	2.49	8.03	563.95
2014	4.11	3.10	4.00	2.56	3.13	0.15	4.83	1.09	10.31	8.55	3.72	6.91	537.36

### ANEXO 3: CÁLCULO DEL ÍNDICE DE FOURNIER MODIFICADO (MFIM)

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

**Año Huancalpi Acostambo Huancavelica Lircay Choclococha Colcabamba**

1980	69.4	-	-	88.2	60.0	-
1981	114.8	-	-	108.3	62.0	-
1982	128.2	-	-	88.9	140.1	-
1983	72.4	-	-	155.7	75.1	-
1984	111.8	-	-	99.0	114.0	-
1985	66.3	-	-	99.4	98.3	-
1986	145.1	-	-	132.6	142.0	-
1987	69.2	-	-	73.3	142.2	-
1988	49.6	-	108.6	125.5	154.7	-
1989	66.8	125.2	143.0	133.0	73.7	-
1990	142.3	92.9	100.6	104.1	104.9	-
1991	92.4	67.5	84.7	70.4	89.4	-
1992	172.7	65.7	88.5	53.2	122.2	-
1993	228.9	119.6	186.6	132.6	120.7	-
1994	193.8	136.1	152.1	134.2	194.8	-
1995	128.7	104.3	158.6	104.3	108.7	-
1996	200.2	91.3	111.4	104.5	149.4	-
1997	123.4	91.3	86.8	126.5	180.7	-
1998	146.7	105.1	110.7	113.7	309.3	-
1999	137.7	93.5	129.8	88.7	234.7	-
2000	199.9	100.7	108.0	127.3	187.4	-
2001	152.0	111.1	138.6	121.5	154.3	-
2002	146.2	113.2	182.1	139.8	186.5	-
2003	105.6	89.9	280.5	129.7	276.8	-
2004	126.3	93.6	129.4	92.8	140.9	139.1
2005	83.8	75.6	98.6	88.3	159.2	93.5
2006	101.3	100.0	107.6	96.6	170.2	135.3
2007	101.3	81.1	115.7	101.5	124.1	118.4
2008	84.3	88.7	113.2	110.5	173.2	131.8
2009	103.7	107.3	197.9	122.7	157.0	124.1
2010	131.3	123.3	170.9	118.8	169.7	155.1
2011	161.1	135.0	171.1	148.8	180.2	198.0
2012	110.5	148.9	176.2	140.2	206.0	163.4
2013	78.5	106.2	163.5	117.4	168.2	140.8
2014	106.6	92.1	113.9	95.4	204.4	125.4

\* $P_i$  = Precipitación del mes, en mm;  $P$  = Precipitación total anual, en mm

## ANEXO 4: FACTOR R<sub>m</sub>

**Tabla 13: Factor R<sub>m</sub> en la Estación Huancalpi.**

$R_m = 161 \cdot (MFI_m)^{0.552}$													
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R <sub>anual</sub>
1980	775.8	1090.4	636.8	253.7	0	174.8	29.7	98.4	161.1	568.7	144.3	61.6	1771.5
1981	578.9	306.1	1000.4	560.7	457.2	0	9.4	15	305.4	315	218.3	1278.8	2134.0
1982	1003.1	1191.3	641.1	426.8	82.2	269.1	271.6	448.9	20.6	350.5	314.8	605.2	2193.0
1983	1282.6	1211.7	1215.2	627.7	33.1	23.2	0	120.3	399.4	589	336.2	1027.8	2840.3
1984	776.4	1437.9	1150.3	305.8	323.9	42	32.1	516.8	135.6	103.1	568.2	411.2	2433.4
1985	1131.3	819.3	999.5	219	581.7	25.4	4.4	20.3	223.2	104.1	97.6	564.9	2101.6
1986	916.7	1304.4	516.6	197.3	191.5	242.3	63.1	153.2	233.8	62.5	457.5	757.5	2125.8
1987	459.5	383.3	886.9	340	434.9	121.2	76.1	214.9	316.2	198.7	1676.8	918.2	2501.9
1988	974.7	1459	882.1	405.2	30.1	50.9	7.5	133	297.6	698.7	797.9	552.2	2588.1
1989	857.9	616.4	410.3	623.3	9.9	76.3	99.5	253.2	50.8	180.5	690.9	854	1906.3
1990	633.8	619.2	384.7	248.6	244.5	102.9	405.6	202.9	453.5	390.5	651.9	406.3	1671.8
1991	661.2	1052.5	789.5	416.1	14.3	39.4	140	590.4	401.7	572.9	605.3	601.6	2208.1
1992	906.9	1504.2	915.3	241.2	52.3	88.4	26.1	368.6	173.6	573.1	383	216.4	2346.4
1993	385	142	548.8	287.3	243	124.6	4.8	40.1	851.8	869.1	321.1	458.9	1711.2
1994	1140.3	386.7	863.8	286.7	126.9	97.6	105.5	107.3	419.8	131.8	282.7	1185.9	2175.4
1995	690.7	699	810.1	186.9	130.1	172.3	33.8	11.9	217.1	162.7	198.3	632.1	1629.8
1996	797	1584.7	1023.9	553.8	244.6	33.4	138.3	119.5	427.5	356.1	325.1	538.2	2512.3
1997	1077.8	768	487.3	104.3	37	76.5	217.7	282.3	108.1	256.4	255.6	300.8	1669.6
1998	572.7	318.8	281.4	178.2	163.8	118.2	59.6	204.6	119	508.7	569.9	588.8	1389.7
1999	882.4	629.2	376.5	131	50.1	116.3	165.3	179	160.1	643.8	403.5	444.7	1637.0
2000	432.2	261.4	150.7	140.9	264.1	486.6	305.1	306.8	689.1	1117.9	1473.5	674.2	2485.4
2001	481.9	329.3	450.5	235.7	430.9	701.4	49.5	72	148.6	913.1	590.3	786.9	1957.9
2002	340.3	348.7	185.4	145	120.9	1002.4	113.3	284	122.4	1848.8	752.6	1073.5	2766.1
2003	1372.3	931.4	840.3	903.8	161.9	94	273.7	245.9	445.9	997.8	1355.1	983	3231.4
2004	1396.5	1718.8	1251.7	457.5	176.8	48	165.9	179.8	183.8	231.9	249.9	693.8	2947.7
2005	754	890.7	952.3	368.3	53.6	0	70.5	36.6	435.4	299.3	520.3	1278.2	2351.1
2006	1581.3	1343.7	1096.5	503.5	97	7.4	46.8	124.3	217.2	417.6	621.4	1062.6	3000.7
2007	1108.7	1092.8	495.1	370	192.9	14.8	16.2	629	284.2	537.1	404.3	742	2297.1
2008	1394.5	895.2	909.1	645.2	14.6	78.8	0	121.1	67.9	328.5	454	1007.2	2527.4
2009	703.7	1215.8	829.5	720	84.9	60.8	18.8	9	241.7	462.4	294	1187.8	2440.6
2010	1546.7	1707.1	786.2	229.7	26.1	79.1	330.1	181.7	78.1	698.8	226.2	979.5	2998.2
2011	1820.4	793.2	1079.5	225.2	103.4	84.9	73.1	98.1	301.1	406	341	435.4	2577.5
2012	567.2	1399.5	1150.6	330.1	129.5	18.1	588.6	87.1	423.8	554	605.3	558	2522.4
2013	572.6	697.1	1092.9	659.9	45.5	28.4	35.5	224	181.2	149.3	438.1	975.5	2108.0
2014	388.7	1249.8	503.1	23.8	107	82.3	100.6	132.3	400.5	626.3	433.6	1358.1	2326.7

\*Se usó el promedio de la precipitación mensual en cada año como significativo anual para calcular el R<sub>anual</sub>.

**Tabla 14: Factor Rm en la Estación Acostambo**

$$R_m = 161 \cdot (MFI_m)^{0.552}$$

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R <sub>anual</sub>
1989	753.8	981.8	1369.1	572.3	101	103.7	0	223.6	378	522.7	243.2	438.7	2315.7
1990	995.3	335.4	369.4	279.3	99.9	342.7	85.2	236.5	236.5	616.6	762.4	793.4	1964.0
1991	338.6	630.2	899.2	218.7	135.8	209.4	79.3	0	612.2	192.5	497.8	370.3	1646.5
1992	608.4	624.4	828.6	125.8	0	100.1	98.6	124.2	209.5	606.7	295	422.9	1622.8
1993	1135.8	827.9	564.3	275.5	76.4	13.2	124.2	171.1	417.2	347.8	1007.7	690	2257.7
1994	1106.6	1357.1	979.4	456.3	33.5	16.1	3.8	40.8	231.3	451.7	222.4	647	2425.3
1995	534.6	1083.4	1138	240.5	35.2	68.9	64.6	68.3	258.3	191	623.8	611	2093.5
1996	775.4	1038.9	633.8	361.5	22.8	0	0	42.2	154.4	359.2	453.7	758.3	1945.1
1997	984.4	805.5	549.3	319.1	8.7	9.2	22	171.3	511.4	281	521.8	666.8	1945.5
1998	981.5	1084.9	373	41.8	35.8	26.3	0	82	66.6	784.9	625	646.9	2102.9
1999	734.4	1155.8	678.2	450.7	108.2	149	53.3	10	399.2	305.1	395.7	483.1	1970.6
2000	962.7	1012.2	723.3	239.2	332	44.9	121.9	113.1	130.7	684.9	75.3	584	2053.7
2001	1268.5	931	693	127.2	98.4	88	285	84.5	190.4	492.3	565.1	497.7	2167.7
2002	309.2	1366.8	859.3	182.6	107.9	10.7	291.8	164.8	239.4	446.5	593	749.4	2190.1
2003	471.6	855.5	976.7	426.9	61	0	0	295.4	335.8	104.8	628.1	606.6	1929.3
2004	376.7	998.2	633.4	195.9	97.5	293.3	62.3	93.3	244.5	449.1	801.5	781.5	1972
2005	506.9	776.5	649.1	289.2	125.9	0	34.5	25.1	162.9	712.1	405.8	665.9	1753.5
2006	1022.3	813.4	701.4	308.8	32.7	66.1	0	163.2	160	357	755	638.7	2045.5
2007	610.6	479.6	992.9	250.9	160.6	0	122.8	41.6	222.8	470.4	613.8	625.6	1822.2
2008	974.2	882.4	426	231.8	98.9	108.8	20.6	26.3	356.3	727.8	206.3	602.6	1914.6
2009	663.8	942.1	601.4	229.9	243.8	0	104.9	159.3	147.1	397.6	763.2	1065.1	2127.0
2010	1518.1	679.5	797.7	92.6	61.7	60.5	0	176.6	50.6	497.8	266.7	866.6	2296.8
2011	964.1	1342.6	992.2	340.3	201.3	7.7	84.1	27.2	311.4	420.4	385.9	749	2414.0
2012	449.3	1665	313.9	747.3	200.1	44.5	48.6	30.7	174	266.5	453.7	1270.8	2548.4
2013	941.8	992	779.1	311.7	296.1	32.6	40.6	164.6	170.8	248.3	426.7	856.5	2114.6
2014	1010.2	740.7	833.2	429	85	82.5	81.9	39.5	290.1	236.5	340.3	664.3	1954.7

*\*Se usó el promedio de la precipitación mensual en cada año como significativo anual para calcular el R<sub>anual</sub>.*

**Tabla 15: Factor Rm en la Estación Huancavelica.**

$R_m = 161 \cdot (MFI_m)^{0.552}$													
<b>Año</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>R<sub>anual</sub></b>
1988	915.2	749.1	904.4	642	75.4	9	0	0	197.1	246.9	269.4	1005.6	2140.7
1989	1407.9	503.3	1553.5	737.2	40.5	192.8	9.6	68.8	75.8	283.4	247.8	147.4	2491.7
1990	867.7	238.7	729.8	149.5	114.3	435.8	47.4	100.1	252.9	730.5	562.2	983.6	2052.3
1991	507	537.3	630.7	739.5	189.6	20.2	0	0	211.2	629.7	490.4	787.4	1865.9
1992	54.4	473.1	975.6	208.7	35.4	255.4	169.6	113.4	153.4	728.2	66.6	1109.9	1912.0
1993	834.4	871.2	349.9	278.2	279.7	244.1	118.2	345.6	639.3	1049.4	1297.6	1293.3	2886.5
1994	1393	1118.1	1201.1	508.9	105.3	40	37.1	66.6	374.7	324.1	265	609.2	2578.3
1995	1429.8	934.4	1520.3	432.2	89.2	9.5	46.3	0	441	277.2	463.6	211	2638.8
1996	907.2	1351.4	516	154.5	48.9	26	76.5	314.6	269.5	200.9	180.2	909.5	2170.7
1997	483	732.5	483.7	286.9	96.2	53.4	0	349.1	368	451.5	745.9	890.1	1892.2
1998	1155.7	837.7	814	383.5	8.3	49.5	0	148.8	129.9	472.1	283.3	845.3	2163.5
1999	1004.5	1445	655.7	643.8	212.9	21.7	58.7	37	358.4	328.5	255	627.9	2362.1
2000	1073	1040.7	776.6	324.1	93.4	33	199	149.5	141.6	611.9	288.9	541.3	2134.3
2001	974.1	738.4	1544.2	217.5	181.5	0	186.5	181.5	396.6	319.3	737.2	463.8	2449.3
2002	536.6	1190.9	1619.2	352.8	69.6	19.7	411.7	407.8	553.5	501.9	965.3	638.8	2847.9
2003	956.8	2464.2	1734.8	550.4	31.9	0	26	335.3	145.9	182.8	98.8	957.4	3614.5
2004	227.9	1064.4	1085.8	163.9	18.6	194.8	282.9	224.8	317.8	216.2	258.4	1404.9	2358.7
2005	879.8	852.5	985.1	498.2	64.5	18.6	9.7	10.7	303.1	386.5	261.1	617.5	2029.7
2006	939.7	709.3	903.6	862.7	0	128	0	190.3	131	453.6	458.7	539.7	2130.4
2007	658.4	442.3	1674.2	278.5	123.7	0	20.9	17.6	294.6	498.3	359.5	530.3	2216.7
2008	1136.4	1230.1	713.1	39.7	19.6	37.3	62.7	107.8	142.8	496.7	183.3	676.6	2190.2
2009	1523.8	1553.5	794.5	396.7	88.5	6.8	119.4	33	278.8	364.9	778.3	1050.5	2981.7
2010	1887.9	709.6	993.8	308.2	33.9	16.2	0	46.4	68.7	417.8	368.8	1031.1	2749.4
2011	1431.6	1280.8	1138.6	414	53.4	3.7	43.9	34.1	239.1	197	545.5	906.9	2751.9
2012	552.5	1390	681.5	1080.2	29.5	38.9	62	20.8	390.8	319	380.1	1523.5	2796.7
2013	933.5	1274.4	1415.7	315.4	107.4	86	42.4	157.4	187.6	416.7	160.1	1099.2	2683.4
2014	1177.1	837.1	827	407	332.3	30.3	117.5	53.1	420.8	515.7	307.1	604.4	2198.2

*\*Se usó el promedio de la precipitación mensual en cada año como significativo anual para calcular el R<sub>anual</sub>.*

**Tabla 16: Factor Rm en la Estación Lircay.**

$R_m = 161 \cdot (MFI_m)^{0.552}$													
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	R <sub>anual</sub>
1980	1034.5	589.1	678.9	425.8	10.3	72.5	2.2	19.7	311.2	558.6	596.8	408.3	1908.2
1981	479.4	792.6	1468.3	394.8	218.3	102.1	159.5	92.7	265	339.5	502.7	411.6	2137.6
1982	1068.9	532.8	334.7	368.9	118.6	26.1	274.2	110.3	678.4	808.2	242.6	297.8	1916.8
1983	1084.6	1583.9	682.1	255.3	30.9	63.5	0	402.7	268.2	297.1	508.5	973.6	2612.1
1984	1061	1295.6	219.9	116.7	87.4	170	0	167.9	72.2	407.1	482.2	474.3	2034.0
1985	610.9	817.9	940.1	880.7	127.7	152.3	158.1	0	351.2	65.4	97.9	738.9	2039.1
1986	946.9	1002	855.1	884.5	220	0	251.6	205.8	836.9	178	151.2	587.9	2390.6
1987	744	380.2	425.9	630	564.1	102.3	56.6	72.8	1.7	397.2	679.4	417.4	1722.8
1988	958	1029.3	1195	409.2	17.6	10.4	0	0	0	648.8	179.6	704.2	2319.1
1989	1235.3	746	1520.3	517.7	105.1	99.2	13.2	130.2	196.1	330.2	244.3	189.9	2394.7
1990	1042.6	108.4	378.2	313.5	130.2	549.6	52	205.3	292.8	396.1	864.2	960.9	2091.9
1991	865.2	580	862.4	212.3	223.5	330.2	48.2	15.2	170.6	20.8	437.7	331	1684.7
1992	572.1	598.3	427.1	369.7	0	178.4	180	327.5	146.4	592.8	184.9	314.7	1444.5
1993	1492.5	618.4	591.8	549.6	189.7	61	139.9	94.9	127.8	369.6	800.3	810.7	2390.0
1994	1040.5	1525.1	972.3	481.3	169.6	38.5	1.9	0	138	172.1	315.1	448.9	2406.6
1995	1073.4	1189.3	819	166.3	92.6	0	26.9	39.1	139	250.6	557.6	276.4	2093.4
1996	933.7	1172.3	847.1	336	44.8	0	0	207	167.9	359.5	231.6	599.3	2095.4
1997	1345.3	885.5	387.9	427.6	37.7	7.7	0	180.8	431.5	195.9	614	993.2	2329.5
1998	1395	793.7	675	462.5	0	65.6	0	22.5	83.7	449.6	451	637.9	2195.8
1999	688.7	1145	764.8	509.9	125.5	54	192.1	0	81.8	334.7	198.6	479.5	1914.0
2000	999	1332.6	503.7	70.8	187.1	114.4	356.8	217.9	30.6	788.8	105.3	834.9	2336.8
2001	1459.6	745.1	832.1	244.9	197.8	29.4	137.5	103.9	311.9	251.8	429	725.9	2277.9
2002	637.6	1357.6	942.3	352.3	221.1	26.4	205.3	73.3	259.2	662.5	468.8	963.6	2461.4
2003	879.7	1266.3	1172.2	356.4	302.4	1.4	18.4	205.8	109.4	144.8	351.9	722.9	2361
2004	645.3	1174.1	711.2	218.9	98.9	237.1	61	95.7	203.6	185.7	303.8	804.3	1963.5
2005	511.1	664.8	1100.3	236.3	159.5	6.6	94.7	27.6	226.1	507.2	176.5	846.5	1910.3
2006	870.9	757.5	848.4	275.9	5.2	44.7	8.7	284.2	95.4	316.6	518.5	860	2007.0
2007	858.5	467.8	1239.7	409	223	0	158.7	8	224.4	258.2	335.6	776.4	2062.1
2008	1589.9	927.2	334.1	180.6	151.2	57.2	22.1	12.2	164.8	319.5	155.4	629.5	2161.8
2009	841.3	1172	419.9	316.4	127.6	59.4	141.6	42.3	182.1	254.9	827.4	1099.8	2289.8
2010	1245.6	822.5	843.7	258.8	112.6	53.9	0	5.3	68	191.5	182.6	1107.6	2249.5
2011	1194	1525.2	1011.1	299.2	99.4	9.7	85.7	68.4	254.6	137.2	349.4	671.6	2547.3
2012	408.1	1381.9	680.6	851	93.8	85.4	24.1	6.7	255.1	256.3	266.2	1296.4	2464.8
2013	1000.6	900.8	843.1	135.7	195.9	66.1	55.6	143.3	84.5	274.1	168.1	1233.2	2234.9
2014	1045.9	700.7	623.8	385	302.5	46.1	94.9	101.5	384.3	589.5	109.4	718.1	1993.2

\*Se usó el promedio de la precipitación mensual en cada año como significativo anual para calcular el R<sub>anual</sub>.

**Tabla 17: Factor Rm en la Estación Choclococha.**

$R_m = 161 \cdot (MFI_m)^{0.552}$													
<b>Año</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>R<sub>anual</sub></b>
1980	710.8	372.5	392.4	242.4	200.1	98.6	314.2	311.9	226.4	550.6	657	173.3	1543.6
1981	372.9	551.7	326.1	771.2	52	0.4	0	146.9	480.4	217.8	298.7	701.9	1570.9
1982	1037.9	1609.8	723.6	425.6	41.1	37.3	15	257.2	337.7	442.8	607.6	186.9	2463.7
1983	308.6	589.6	763.6	506.5	205.8	104.7	11.6	72.3	686.2	576.1	262.8	506	1745.9
1984	1193	924.8	600.8	309	116.7	120.4	58.6	151.5	309.6	292	395.9	950.6	2198.8
1985	820.8	921.7	852.4	612.5	133.7	145.2	83.2	55.1	443.3	100.1	204.9	681	2026.3
1986	1842.6	711.7	683.8	161.2	5.8	117.7	5.3	9.7	4.3	5.3	16.1	1035	2482.1
1987	2057.4	560.1	804.7	252.1	20.9	1.6	121.7	90.8	31.6	132	154.9	514	2484.1
1988	1596	1055.5	1048.5	705	413.5	5.8	0	1	30.9	230.6	100.5	525.6	2602.7
1989	889.4	557.6	734.3	364.7	96.8	54.8	2.2	194	234.4	557.6	482.5	192.5	1728.8
1990	121.1	23.9	169.6	183.9	882.4	678.2	57.2	133.1	422.1	535	1270.9	540.8	2100.7
1991	840.6	673.9	678	579.4	1005.3	141.1	8.4	0	24.5	195	145.3	217	1923.5
1992	577	523.8	665	263.3	14.2	82.7	71.2	147.6	49.4	1306.9	464.1	1152.9	2284.9
1993	757.6	737.3	898	1096.9	110.4	145.9	36.8	184.4	394.1	584.2	617.2	352.5	2270.0
1994	784.6	2138.1	1492.4	266.5	206.3	51.4	166	90.1	326.3	144.3	227.5	109.3	2956.0
1995	209.8	969.1	1348	683.6	97.9	0	0	9.9	162.3	444.9	471.1	425.5	2142.0
1996	1322.7	912.5	1088.8	652	118.9	8.9	10.9	232.7	223.3	344.2	301.3	950.4	2553.4
1997	1336.9	1350.3	426.3	611.1	128.8	0	0	1141.9	257.3	501.5	483	777.2	2835.6
1998	1723.1	2203.3	1801.6	644.9	0	228	0	100.2	198.7	504.5	649.6	418.6	3815.4
1999	1127.1	1906.3	1096.9	924.6	220.2	42.3	60.4	40.5	350	893.4	292	957.4	3276.2
2000	1031.6	1314.2	1499.7	592.8	72.8	8.1	150.2	160.7	191.4	814.1	361.7	827.4	2893.7
2001	1622.6	590.4	880.5	825.5	138.4	76.2	75.3	16	322.5	537	698.7	543.4	2599.0
2002	550.5	1584.2	1771.8	424.5	79.3	180.9	101.6	21.5	229.5	421.7	397.1	760.7	2885.3
2003	1449.9	2055.6	1911.8	595.5	221.8	0	56.4	28.4	51.4	172	115	827.3	3588.5
2004	333.4	1265.2	1040.8	450.6	25	183.3	70.9	137.5	469.6	427.5	529.5	1158.3	2471.9
2005	838.9	871.1	1451	376.3	42.6	0	0	45.2	100.4	259.6	277.5	1456	2644.3
2006	1418.1	1132.6	1187.1	575	0	34.2	0	111.2	312.9	480.5	579.5	739.1	2744.0
2007	695.8	880.1	1130.1	493.2	36.5	16.7	6.4	11.9	115	507.4	573.9	1009.3	2304.1
2008	1943.1	1131.3	738.4	418.9	17.6	95.5	20.8	100.7	243.4	584.5	193.5	627.8	2770.3
2009	945	1144.9	296.2	465.7	230.6	41.1	121.1	53.9	187.8	241.4	1196.9	1291.7	2623.9
2010	1489.4	1103.9	1137.6	651.5	66	80.1	0	15.7	42.7	298.5	358.2	965.6	2739.0
2011	1259.8	1317.4	1173.1	672.5	78.9	0	39.1	33.5	222.3	387.3	536.5	1008.5	2831.3
2012	529.4	1416.5	767.6	1026.6	159.9	61.4	8	20.7	314.6	399.6	696.6	1762.7	3048.1
2013	1107.6	996.4	1126.8	299.2	523.1	44	125.4	112.2	301.8	442.9	392	1348.5	2725.7
2014	1939.9	1098.4	1219	380.2	124.8	0	76.2	182.6	205.4	380.2	321.9	957.8	3035.2

*\*Se usó el promedio de la precipitación mensual en cada año como significativo anual para calcular el R<sub>anual</sub>.*

**Tabla 18: Factor Rm en la Estación Colcabamba.**

$$R_m = 161 \cdot (MFI_m)^{0.552}$$

<b>Año</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>R<sub>anual</sub></b>
2004	691.7	1305.4	1057.4	168.4	103	107.3	90.3	129.4	282.7	468	424.6	1089.8	2454.0
2005	508.2	743.2	897.3	369.8	48.2	0	80.8	38.5	164.1	833.9	196	838.7	1970.9
2006	1319.4	651.6	972.3	380.6	37.2	86.9	15.2	92.8	206.3	405.9	602.6	1016.2	2417.0
2007	938.8	697.3	1306.9	326.4	86.6	0	79.5	19.3	84.9	485.4	295.4	850.9	2245.2
2008	1562.4	977.8	537.1	177.7	140.3	53.2	1.4	70.8	150.5	692.5	508.1	573	2382.1
2009	1085	919.1	731.3	421.6	193.3	204	83.5	149.8	144.9	354.3	843.2	806.2	2304.6
2010	1405.7	814	1168.9	190.7	26.5	33.7	1	135.6	170	550.8	225	1144.3	2606.6
2011	1566.1	1712.4	1073.7	430.4	147.7	25.1	56.1	12.2	433.1	412.6	498.4	454.8	2982.6
2012	751.7	1660.9	660.9	660.3	95.7	290.2	13.8	16.4	108.5	313.4	424.7	1229.9	2682.6
2013	1052.1	1335.5	854.9	136.4	189.5	91	87.4	237.1	106.9	595.3	312	947.1	2471.0
2014	1088.8	834.9	1062.1	325.1	142.7	9.3	214.9	53.4	444	370.8	461.9	831	2318.3

*\*Se usó el promedio de la precipitación mensual en cada año como significativo anual para calcular el  $R_{anual}$ .*

**ANEXO 5: ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN DE PRECIPITACIÓN (PCI)**

$$PCI(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} p_i)^2} \times 100$$

<b>Año</b>	<b>Huancalpi</b>	<b>Acostambo</b>	<b>Huancavelica</b>	<b>Lircay</b>	<b>Choclococha</b>	<b>Colcabamba</b>
1980	9.6	-	-	12.9	10.2	-
1981	11.0	-	-	13.0	12.7	-
1982	14.6	-	-	12.2	14.7	-
1983	12.6	-	-	14.3	11.3	-
1984	14.1	-	-	15.8	12.9	-
1985	13.5	-	-	13.5	12.6	-
1986	13.1	-	-	12.0	24.3	-
1987	13.8	-	-	11.7	22.1	-
1988	11.1	-	14.6	16.6	16.8	-
1989	12.0	13.0	17.9	16.0	12.4	-
1990	12.1	11.3	12.2	12.2	13.8	-
1991	11.1	12.2	12.3	13.3	14.5	-
1992	15.0	12.7	15.3	10.8	14.6	-
1993	11.0	12.6	11.2	13.1	11.5	-
1994	15.0	15.3	14.4	16.5	19.3	-
1995	13.7	14.3	16.3	16.4	15.8	-
1996	14.1	14.3	15.2	14.6	13.6	-
1997	12.0	12.8	11.5	14.2	13.0	-
1998	14.6	15.8	14.2	15.3	16.2	-
1999	14.0	12.6	13.8	13.8	13.6	-
2000	15.1	13.2	12.9	14.0	13.4	-
2001	15.8	13.0	13.4	13.6	13.3	-
2002	12.1	13.3	12.0	12.5	15.4	-
2003	13.5	13.0	18.8	14.5	18.6	-
2004	14.6	12.0	14.7	13.5	12.9	13.5
2005	13.2	12.9	13.7	13.9	17.3	13.9
2006	11.5	13.2	12.8	13.4	13.9	13.8
2007	16.3	12.4	16.3	13.7	14.2	15.1
2008	14.2	13.3	16.3	18.0	16.3	15.2
2009	13.5	12.6	14.5	13.7	14.1	11.8
2010	15.7	16.4	17.6	17.0	15.7	15.8
2011	14.9	13.6	15.3	15.9	14.1	15.2
2012	13.7	16.0	14.9	15.4	14.4	14.7
2013	10.4	12.7	14.9	15.2	12.5	13.6
2014	12.6	12.9	12.0	12.0	15.4	12.4

**ANEXO 6: SEVERIDAD DE EROSIÓN A NIVEL DE DISTRITOS – ESCENARIO  
1**

Distrito	Tipo de Erosión	Área (ha)	Área (%)
Acoria	Nula	1040.3	3.82
	Ligera	8794.1	32.30
	Moderada	15631.6	57.41
	Alta	1419.8	5.21
	Muy Alta	331.3	1.22
	Extrema	9.7	0.04
	<b>TOTAL</b>		<b>27226.7</b>
Ascensión	Nula	1300.7	5.50
	Ligera	6105.9	25.80
	Moderada	14069.2	59.44
	Alta	1379.9	5.83
	Muy Alta	804.8	3.40
	Extrema	7.6	0.03
	<b>TOTAL</b>		<b>23668.1</b>
Huancavelica	Nula	1380.1	4.30
	Ligera	7533.0	23.45
	Moderada	21396.2	66.60
	Alta	1331.6	4.14
	Muy Alta	472.8	1.47
	Extrema	11.8	0.04
	<b>TOTAL</b>		<b>32125.5</b>
Huando	Nula	469.7	5.02
	Ligera	2186.7	23.36
	Moderada	6297.3	67.26
	Alta	375.6	4.01
	Muy Alta	33.4	0.36
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>9362.8</b>
Palca	Nula	84.6	1.00
	Ligera	1092.8	12.86
	Moderada	6695.4	78.77
	Alta	538.5	6.34
	Muy Alta	85.2	1.00
	Extrema	3.8	0.04
	<b>TOTAL</b>		<b>8500.4</b>
Santa Ana	Nula	1561.6	9.95
	Ligera	5419.6	34.53
	Moderada	6052.8	38.56
	Alta	1298.1	8.27
	Muy Alta	1357.6	8.65
	Extrema	5.9	0.04
	<b>TOTAL</b>		<b>15695.6</b>
Yauli	Nula	843.9	4.42
	Ligera	7202.0	37.72
	Moderada	10488.0	54.93
	Alta	468.2	2.45
	Muy Alta	70.6	0.37
	Extrema	19.7	0.10
	<b>TOTAL</b>		<b>19092.4</b>

**ANEXO 7: SEVERIDAD DE EROSIÓN A NIVEL DE DISTRITOS – ESCENARIO  
2**

Distrito	Tipo de Erosión	Área (ha)	Área (%)
Acoria	Nula	100.6	0.37
	Ligera	8824.4	32.41
	Moderada	16650.1	61.15
	Alta	1320.0	4.85
	Muy Alta	331.5	1.22
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>27226.7</b>
Ascensión	Nula	82.9	0.35
	Ligera	4792.6	20.25
	Moderada	16750.5	70.77
	Alta	1627.8	6.88
	Muy Alta	414.4	1.75
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>23668.1</b>
Huancavelica	Nula	177.6	0.55
	Ligera	5872.1	18.28
	Moderada	22222.4	69.17
	Alta	3303.0	10.28
	Muy Alta	544.6	1.70
	Extrema	5.9	0.02
	<b>TOTAL</b>		<b>32125.5</b>
Huando	Nula	5.9	0.06
	Ligera	1414.9	15.11
	Moderada	6799.5	72.62
	Alta	935.3	9.99
	Muy Alta	207.2	2.21
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>9362.8</b>
Palca	Nula	5.9	0.07
	Ligera	621.5	7.31
	Moderada	7334.3	86.28
	Alta	473.6	5.57
	Muy Alta	65.1	0.77
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>8500.4</b>
Santa Ana	Nula	390.7	2.49
	Ligera	4871.2	31.04
	Moderada	7971.3	50.79
	Alta	1846.9	11.77
	Muy Alta	615.6	3.92
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>15695.6</b>
Yauli	Nula	29.6	0.16
	Ligera	8545.8	44.76
	Moderada	9865.8	51.67
	Alta	509.2	2.67
	Muy Alta	130.2	0.68
	Extrema	11.8	0.06
	<b>TOTAL</b>		<b>19092.4</b>

**ANEXO 8: SEVERIDAD DE EROSIÓN A NIVEL DE DISTRITOS – ESCENARIO  
3**

Distrito	Tipo de Erosión	Área (ha)	Área (%)
Acoria	Nula	100.6	0.37
	Ligera	8202.2	30.13
	Moderada	17527.0	64.37
	Alta	1266.8	4.65
	Muy Alta	130.2	0.48
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>27226.7</b>
Ascensión	Nula	142.1	0.60
	Ligera	5234.2	22.11
	Moderada	16350.3	69.08
	Alta	1503.5	6.35
	Muy Alta	438.0	1.85
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>23668.1</b>
Huancavelica	Nula	118.4	0.37
	Ligera	6290.3	19.58
	Moderada	24319.8	75.70
	Alta	1172.0	3.65
	Muy Alta	224.9	0.70
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>32125.5</b>
Huando	Nula	5.9	0.06
	Ligera	2019.6	21.57
	Moderada	7070.9	75.52
	Alta	248.6	2.66
	Muy Alta	17.8	0.19
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>9362.8</b>
Palca	Nula	5.9	0.07
	Ligera	621.9	7.32
	Moderada	7333.8	86.28
	Alta	473.6	5.57
	Muy Alta	65.1	0.77
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>8500.3</b>
Santa Ana	Nula	254.5	1.62
	Ligera	5842.5	37.22
	Moderada	6615.3	42.15
	Alta	2273.1	14.48
	Muy Alta	710.3	4.53
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>15695.6</b>
Yauli	Nula	82.9	0.43
	Ligera	7652.4	40.08
	Moderada	10936.8	57.28
	Alta	307.8	1.61
	Muy Alta	106.5	0.56
	Extrema	5.9	0.03
	<b>TOTAL</b>		<b>19092.4</b>

**ANEXO 9: SEVERIDAD DE EROSIÓN A NIVEL DE DISTRITOS – ESCENARIO  
4**

Distrito	Tipo de Erosión	Área (ha)	Área (%)
Acoria	Nula	100.6	0.37
	Ligera	9038.9	33.20
	Moderada	16548.1	60.78
	Alta	1249.0	4.59
	Muy Alta	290.1	1.07
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>27226.7</b>
Ascensión	Nula	100.6	0.43
	Ligera	5024.6	21.23
	Moderada	16660.5	70.39
	Alta	1562.7	6.60
	Muy Alta	319.6	1.35
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>23668.1</b>
Huancavelica	Nula	159.8	0.50
	Ligera	6020.8	18.74
	Moderada	22381.4	69.67
	Alta	3048.5	9.49
	Muy Alta	509.1	1.58
	Extrema	5.9	0.02
	<b>TOTAL</b>		<b>32125.5</b>
Huando	Nula	5.9	0.06
	Ligera	1478.0	15.79
	Moderada	6860.7	73.28
	Alta	852.4	9.10
	Muy Alta	165.7	1.77
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>9362.8</b>
Palca	Nula	47.4	0.56
	Ligera	1313.1	15.45
	Moderada	6601.2	77.66
	Alta	461.7	5.43
	Muy Alta	77.0	0.91
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>8500.3</b>
Santa Ana	Nula	248.6	1.58
	Ligera	5216.4	33.23
	Moderada	7880.6	50.21
	Alta	1823.2	11.62
	Muy Alta	526.8	3.36
	Extrema	0.0	0.00
	<b>TOTAL</b>		<b>15695.6</b>
Yauli	Nula	130.2	0.68
	Ligera	8897.0	46.60
	Moderada	9491.0	49.71
	Alta	461.7	2.42
	Muy Alta	106.5	0.56
	Extrema	5.9	0.03
	<b>TOTAL</b>		<b>19092.4</b>