

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**DOCTORADO EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO**

**AMBIENTE**



**TESIS**

**PÉRDIDA DEL SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN LA COMUNIDAD DE  
SAN FRANCISCO DE CHAÑAJARI MOHO - PUNO**

**PRESENTADA POR:**

**VALERIANO CONDORI APAZA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**PUNO, PERÚ**

**2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO**  
**AMBIENTE**



**TESIS**

**PÉRDIDA DEL SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN LA COMUNIDAD DE  
SAN FRANCISCO DE CHAÑAJARI MOHO - PUNO**

**PRESENTADA POR:**

**VALERIANO CONDORI APAZA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:**

PRESIDENTE

.....  
Dr. FERMÍN FRANCISCO CHAIÑA CHURA

PRIMER MIEMBRO

.....  
Dr. ROLANDO APAZA CAMPOS

SEGUNDO MIEMBRO

.....  
Dr. NÉSTOR QUISPE CONDORI

ASESOR DE TESIS

.....  
Dr. VÍCTOR ANDRÉS GONZALES GONZALES

Puno, 26 de diciembre del 2018

**ÁREA:** Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.

**TEMA:** Pérdida del suelo por erosión hídrica.

**LÍNEA:** Evaluación Tecnológica y del Medio Ambiente.

## DEDICATORIA

A la memoria de mis padres Julián y Cornelia dándome ejemplos dignos de superación y entrega, gracias a ellos, hoy puedo ver alcanzada mi meta.

A la memoria de mi querida esposa Marcela por su amor e incesante aliento, que hizo posible la culminación de mis estudios de doctorado.

Con mucho aprecio a mis hijos: William Fredy, Maby Marybel y William Fernando por su apoyo moral y su comprensión.

## AGRADECIMIENTOS

- A Dios, por darme la vida, salud y guiarme día a día en la ejecución de la investigación para alcanzar mis anhelos.
- A mi alma mater la Universidad Nacional del Altiplano y Escuela de Posgrado, por darme la oportunidad de formarme como Doctoris Scientiae en el programa Doctoral en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.
- Mi gratitud a mis maestros, a los directivos y personal administrativo de la Escuela de Posgrado y del programa Doctoral en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, quienes han contribuido en la culminación de mi Doctorado.
- Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología por proporcionar información meteorológica para la investigación.

**ÍNDICE GENERAL**

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1

**CAPÍTULO I****REVISIÓN DE LITERATURA**

1.1 Marco conceptual	3
1.1.1 Cuenca hidrográfica	3
1.1.2 Concepto de suelo	4
1.1.3 Concepto de erosión	5
1.1.4 Tipos de erosión	9
1.1.5 Erosión hídrica	11
1.1.6 Modelos de evaluación de la erosión hídrica	13
1.1.6.1 Modelos de evaluación directa	13
1.1.6.2 Modelos paramétricos	16
1.1.7 1.1.7. Ecuación universal de pérdida de suelo	22
1.1.8 1.1.8. Factores de la ecuación universal de pérdida de suelos	24
1.1.8.1 Factor de erosividad de la lluvia (R)	25
1.1.8.2 Factor de erodabilidad del suelo (K)	27
1.1.8.3 Factor del grado de pendiente (LS)	27
1.1.8.4 Factor de cobertura vegetal (C)	29
1.1.8.5 Factor de prácticas de conservación (P)	30
1.1.9 Precipitación	31
1.1.10 Formas de control de la erosión	33

1.1.11	Sistemas de información geográfica para estimación de la erosión hídrica	34
1.2	Antecedentes	35
1.2.1	A nivel nacional	35
1.2.2	A nivel internacional	38

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1	Definición del problema	41
2.2	Enunciado del problema	43
2.2.1	Pregunta general	43
2.2.2	Preguntas específicos	43
2.3	Justificación	44
2.4	Hipótesis	45
2.4.1	Hipótesis general	45
2.4.2	Hipótesis específicas	45
2.5	Objetivos	45
2.5.1	Objetivo general	45
2.5.2	Objetivos específicos	45

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y METODOS

3.1	Lugar de estudio	47
3.1.1	Ubicación	47
3.2	Caracterización del ámbito en estudio	49
3.2.1	Extensión	49
3.2.2	Geología	49
3.2.3	Climatología	49
3.3	Población	52
3.4	Muestra	52
3.5	Materiales	52
3.5.1	Información cartográfica	52
3.5.2	Información meteorológica	52
3.5.3	Recolección de datos	52
3.6	Método de investigación	53
3.7	Procedimiento metodológico	53

3.8	Descripción del método por objetivos específicos	56
3.8.1	Objetivo específico 1	56
3.8.1.1	Determinación del parámetro desencadenante o índice de erosividad pluvial (R)	56
3.8.1.2	Prueba estadística t de Student	60
3.8.2	Objetivo específico 2	62
3.8.2.1	Determinación de los parámetros condicionantes	62
3.8.2.2	Perdida de suelo por erosión hídrica	75
3.8.3	Objetivo específico 3	77
3.8.3.1	Propuesta de actividades de conservación de suelos	77
3.8.3.2	Diagnóstico situacional de la microcuenca	77
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		
4.1	Del objetivo específico 1	80
4.1.1	Del índice de erosividad de las precipitaciones (R)	80
4.1.2	De la prueba estadística t de Student	82
4.2	Del objetivo específico 2	83
4.2.1	Del factor de erodabilidad del suelo (K)	83
4.2.2	Del factor topográfico (LS)	85
4.2.3	Del factor de cobertura vegetal (C)	87
4.2.4	Del factor de prácticas de conservación (P)	90
4.2.5	De la pérdida de suelos en la cuenca (E)	92
4.3	Del objetivo específico 3	94
4.3.1	Propuesta de alternativas de manejo y conservación de suelos	95
4.3.2	Prácticas de obras mecánicas estructurales	95
4.3.3	Propuesta de prácticas culturales y agronómicas	98
4.3.4	Propuesta de acciones de capacitación para conservación de suelos y otros	101
4.3.4.1	Objetivo	101
4.3.4.2	Acciones	101
4.3.4.3	Técnicas de aprendizaje	102
4.3.4.4	Acciones de seguimiento	103
CONCLUSIONES		104
RECOMENDACIONES		105



BIBLIOGRAFIA

106

ANEXOS

116

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Censo población y vivienda 2007	43
2. Censo población y vivienda 2017	43
3. Matriz de variables e indicadores	53
4. Datos de estación pluviométrica de Huaraya – Moho	57
5. Datos de estación pluviométrica de Isla Soto	57
6. Determinación de factor R	59
7. Códigos USLE de estructura de suelo	63
8. Códigos USLE de permeabilidad de suelos	63
9. Determinación de factor K	66
10. Valores del exponente m para el cálculo del factor L	67
11. Determinación de factor LS	70
12. Determinación de factor C	73
13. Factor P de prácticas de conservación	73
14. Determinación de factor P	75
15. Niveles de erosión	75
16. Resultados de la pérdida de suelos por erosión hídrica	77
17. Tipo de erosividad de las lluvias	82
18. Resultados de los parámetros estadísticos de la muestra	82
19. Resultados de la prueba estadística t	83
20. Valores numéricos de las categorías de erosionabilidad por unidad de suelo	85
21. Valor textural y coeficiente	85
22. Valores de cobertura vegetal Factor C	87
23. Criterios técnicos para la construcción de terrazas de formación lenta	96
24. Distanciamiento de las zanjas de infiltración	98
25. Precipitación total mensual, Estación Huaraya Moho	117
26. Precipitación total mensual, Estación Isla Soto	117
27. Datos de perfiles y calicatas	118
28. Ensayos de laboratorio de suelos	119
29. Composición florística de pastos y especies nativas	123
30. Índice de erosividad de la lluvia estación de Huaraya - Moho	123



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Inicio de la erosión pluvial	6
2. Definición de longitud pendiente como es usado en USLE	28
3. Efectos de manejo de cobertura	30
4. Ubicación de la microcuenca del río Chañajari	48
5. Vista panorámica de la microcuenca del río Chañajari	48
6. Esquema conceptual del modelo de erosión hídrica	53
7. Modelo conceptual - lógico de erosión hídrica	55
8. Mapa de Precipitación total anual de la microcuenca del rio Chañajari	58
9. Mapa de suelos de la microcuenca del rio Chañajari	65
10. Mapa de pendientes de la microcuenca del rio Chañajari	69
11. Mapa de cobertura vegetal de la microcuenca del rio Chañajari	72
12. Mapa de uso actual de tierras de la microcuenca del rio Chañajari	74
13. Proceso de modelamiento para la obtención de erosión hídrica	76
14. Mapa de Índice de Erosividad Pluvial (R) de la microcuenca del rio Chañajari	81
15. Mapa de Índice de Erodabilidad (K) de la microcuenca del rio Chañajari	84
16. Mapa de Factor Topográfico (LS) de la microcuenca del rio Chañajari	86
17. Mapa de Índice de Cobertura Vegetal (C) de la microcuenca del rio Chañajari	89
18. Mapa de Índice de Practicas de Conservación de Suelos (P) de la microcuenca del rio Chañajari	91
19. Mapa de Erosión Hídrica de la microcuenca del rio Chañajari	93
20. Perfil Mujuni Cucho	120
21. Pajcha Vila Cuyo	120
22. Vila Vila	121
23. Huata Pampa	121
24. Jacha Karka Pampa	122
25. Patilla pata	122
26. Cani Amaya	125
27. Korpa Parque	125
28. Vilina Pata	126
29. Vila Vila	126
30. Vila Cerca	127

31. Qetamani	127
32. Tiptirini	128
33. Huata pampa	128
34. Erosión del suelo hasta afloramiento rocoso	129
35. Suelo en erosión	129
36. Pérdida de suelo en el tiempo	130
37. Erosión crítica	130
38. Suelo erosionado	131
39. Suelo erosionado	131
40. Erosión en cárcava	132
41. Suelo en deslizamiento	132
42. “Sejwinka” o “Sewinka” ( <i>Cortaderia selloana</i> )	133
43. Rivera del río protegida con “Sejwinka” o “Sewinka” ( <i>Cortaderia selloana</i> )	133
44. “Mullaka” ( <i>Muhlebeckia volcánica</i> )	134
45. “Pinco pinco” ( <i>Ephedra americana var. rupestris</i> )	134

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología	117
2. Datos de perfiles y calicatas, ensayos de laboratorio	118
3. Imágenes de perfiles y calicatas	120
4. Tablas de composición florística de pastos y especies nativas	123
5. Imágenes de composición florística de pastos y especies nativas	125
6. Deterioro de suelos - imágenes	129

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

<b>ANA</b>	: Autoridad Nacional del Agua
<b>SENAMHI</b>	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
<b>USLE</b>	: Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo
<b>RUSLE</b>	: Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo Revisada
<b>MUSLE</b>	: Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo Modificada
<b>FAO</b>	: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
<b>SWAT</b>	: Soil and Water Assessment Tool
<b>EUPS</b>	: Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo
<b>INGEMMET</b>	: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
<b>CAZALAC</b>	: Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina El Caribe.
<b>SLEMSA</b>	: Soil Loss Estimator for Southern Africa
<b>NDVI</b>	: Índice diferencial normalizado de vegetación
<b>ICONA</b>	: Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, España.

## RESUMEN

La finalidad del presente trabajo de investigación es estimar la pérdida del suelo por erosión hídrica en la comunidad de San Francisco de Chañajari, comprendida dentro de la microcuenca del río Chañajari, provincia de Moho, región Puno realizado en los años de 2018-2019. La erosión del suelo es un problema creciente, especialmente en áreas de actividad agrícola, donde se conduce a la disminución de la productividad. El objetivo de la investigación es determinar el volumen de pérdida de suelo por acción de la erosión hídrica, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), modelo empleado a nivel mundial por las personas encargadas en la gestión de cuencas para la determinación de la erosión. La metodología utilizada para determinar los parámetros fisiográficos de la cuenca, se estableció una matriz de variables e indicadores, luego un esquema conceptual y el flujo del proceso SIG. Con la información pluviométrica de la oficina del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – Puno, información cartográfica del Instituto Geográfico Nacional y datos del lugar, se obtienen los parámetros como : El factor de erosividad pluvial (R) varía de 121.82 a 151.25  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{año}^{-1}$ ; el factor de erodabilidad del suelo (K) varía de 0.458 a 1.276  $\text{t ha h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$ ; el factor topográfico (LS) varía de 0.17 a 25.71; el factor de cobertura vegetal (C) varía de 0.001 a 1 y el factor de prácticas de conservación de suelos (P) varía de 0.01 a 0.5. La pérdida anual de suelo estimada en la microcuenca utilizando la USLE, el 9.34% de su superficie tiene el riesgo de erosión hídrica crítica de  $49.75 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  y el 10.47% de su superficie tiene el riesgo de erosión hídrica muy alta de  $55.77 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ . De los resultados obtenidos se propone actividades de conservación de suelos, con prácticas de obras mecánico estructurales como: Construcción de terrazas de formación lenta o bargones, zanjas de infiltración y andenes; prácticas culturales y agronómicas como: Surcos en contorno, control de cárcavas y prácticas de acciones de capacitación con el objeto de disminuir la pérdida de suelos en la microcuenca.

**Palabras clave:** Erosión hídrica, erosividad, erodabilidad, pérdida de suelo, USLE y SIG.

## ABSTRACT

The purpose of this research work is to estimate the loss of soil due to water erosion in the community of San Francisco de Chañajari, within the microbasin of the Chañajari river, Moho province, Puno region carried out in the years 2018-2019. Soil erosion is a growing problem, especially in areas of agricultural activity, where it leads to decreased productivity. The objective of the investigation is to determine the volume of soil loss due to water erosion, using the Universal Soil Loss Equation (USLE), a model used worldwide by the people in charge of watershed management to determine the erosion. The methodology used to determine the physiographic parameters of the basin, a matrix of variables and indicators was established, then a conceptual scheme and the flow of the GIS process. With the pluviometric information of the office of the National Meteorology and Hydrology Service - Puno, cartographic information of the National Geographic Institute and site data, the parameters such as: The rain erosion factor (R) varies from 121.82 to 151.25 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>; the soil erodability factor (K) varies from 0.458 to 1,276 t ha h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>ha<sup>-1</sup>; the topographic factor (LS) varies from 0.17 to 25.71; the vegetation cover factor (C) varies from 0.001 to 1 and the soil conservation practices factor (P) varies from 0.01 to 0.5. The estimated annual loss of soil in the microbasin using the USLE, 9.34% of its surface has the risk of critical water erosion of 49.75 t.ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> and 10.47% of its surface has the risk of very high water erosion of 55.77 t.ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. Of the results obtained, soil conservation activities are proposed, with practices of structural mechanical works such as: Construction of slow-formed terraces or barges, infiltration ditches and platforms; cultural and agronomic practices such as: Furrows in contour, control of gullies and practices of training actions in order to reduce the loss of soils in the micro basin.

**Keywords:** Water erosion, erosivity, erodability, soil loss, USLE and SIG.

## INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural valioso que realiza funciones ecosistémicas esenciales y proporciona bienes y servicios ambientales Lai *et al.*, (2016). La erosión hídrica del mismo constituye uno de los fenómenos más importantes de degradación física de los suelos.

En la actualidad, la erosión hídrica de suelos es reconocida como uno de los principales problemas globales, no sólo por factores antrópicos, sino también por la intensificación de la variabilidad climática (FAO, 2015).

El problema de la erosión puede ser causado por agentes naturales como el viento (erosión eólica) y la lluvia (erosión hídrica), sin embargo el mayor agente es el antrópico, muchas actividades humanas afectan la capacidad del suelo de sostenerse ante las fuerzas erosivas, en ese sentido la deforestación, el sobrepastoreo y las malas prácticas de cultivo son actividades comunes en muchas cuencas del mundo (Osman, 2014).

El potencial de un país se valora por sus recursos naturales que posee y la forma como el hombre aprovecha de ellos, el manejo empírico de las tierras sin un criterio técnico de planeamiento adecuado de su uso, puede ocasionar severos daños irreversibles; tanto en la zona donde la escorrentía y erosión se originan, como consecuencia de la ocurrencia de fuertes precipitaciones (Hardaha, 2018), las cuales desplazan tierras agrícolas desde las partes altas hacia las partes bajas de los valles o el mar, esto en el transcurso donde el suelo es llevado en suspensión por el agua de lluvia (Liu, Fu, Liu, Zhao, y Wang, 2019).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE por sus siglas en inglés) y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) siguen siendo las ecuaciones más utilizadas para la estimación de la erosión hídrica del suelo. Esta ecuación se caracteriza por su simplicidad de aplicación y es una herramienta útil para planificar el mejor uso del suelo, para seleccionar sistemas de cultivo, manejo y prácticas de conservación de suelos, estimar pérdidas de suelo en áreas con uso de suelo diferente a la agricultura (Ketema y Dwarakish, 2019 y Kinnell, 2010).

De modo que el problema de mayor importancia en la comunidad de San Francisco de Chañajari es la erosión hídrica y la desertificación generado por la microcuenca del río Chañajari, motivo por el cual hay una disminución de áreas de cultivo. La erosión acelerada depende de los factores naturales como: características físicas, características

ligadas a la morfología del terreno y características ligadas al clima los que favorecen y condicionan la erosión hídrica.

El presente trabajo de investigación viene a establecer una herramienta para la proyección del uso de las tierras agrícolas en las zonas de ser susceptibles a las erosiones de las aguas de lluvia y desarrollar con criterio técnico, un determinado sistema de uso de tierras entre las diferentes alternativas que se presentan; de tal manera que, el sistema elegido sea capaz de extraer el máximo beneficio de estas tierras que son soporte para las plantas.

Para desarrollar la actividad agrícola en tierras de ladera en la microcuenca del río Chañajari es trascendental conocer la capacidad erosiva de las precipitaciones, que causan con mayor intensidad el problema del deterioro de suelos agrícolas en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo con mayor precipitación; característica de la zona en estudio y del altiplano.

El objetivo general de la investigación es determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica mediante el método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) en la microcuenca del río Chañajari y los objetivos específicos es determinar el índice de erosión de cada precipitación considerada erosiva de diez años en estudio, los parámetros de la ecuación universal de pérdida de suelo y proponer alternativas para disminuir la erosión hídrica.

El trabajo está dividido en cuatro capítulos: En el uno se presenta la revisión bibliográfica relacionado a la pérdida de suelo por erosión hídrica, sus métodos para estimar la pérdida de suelo y los antecedentes a nivel nacional e internacional ; el capítulo dos contiene el planteamiento del problema, considerando la identificación del problema, el enunciado del problema, la justificación, la hipótesis, el objetivo general y específicos/; el capítulo tres trata de la metodología de investigación donde se considera el lugar de estudio, población, muestra, materiales, el método de la investigación y la descripción detallada de la metodología por cada objetivo específico y en el capítulo cuatro se exponen los resultados y discusión de la investigación por cada objetivo específico. Finalmente, en la última parte, se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se ha arribado, tomando en cuenta la originalidad del trabajo las recomendaciones sugeridas para complementar al trabajo de investigación; la bibliografía y anexos que considera la información meteorológica procesada, recolección de datos, ensayos de laboratorios, mapas temáticos y fotografías.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1 Marco conceptual

##### 1.1.1 Cuenca hidrográfica

Vásquez *et al.* (2016) definen a la cuenca hidrográfica como el área o unidad de territorio, delimitada por una divisoria topográfica (*divortium aquarum*), que capta la precipitación y drena el agua de escorrentía hasta un colector común, denominado río principal. La cuenca hidrográfica es un ámbito geográfico natural donde ocurre el ciclo hidrológico; es el área drenada hacia un río, identificado por su topografía y delimitada por su divisoria de las aguas; en un sentido amplio incluye el agua, suelo, aire, la luz solar, la flora y la fauna.

Faustino (2006) define a la cuenca hidrográfica como un ecosistema en el cual interactúan y se interrelacionan variables biofísicas y socioeconómicas que funcionan como un todo, con entradas y salidas, límites definidos, estructura interna de subsistemas jerarquizados (por ejemplo en el sistema biofísico: los subsistemas biológicos y físicos). Las cuencas hidrográficas se reconocen como un sistema debido a la existencia de interacciones entre el sistema natural del suelo, el agua y biodiversidad y el sistema socioeconómico, que si bien éste no tiene un límite físico, sí depende de la oferta, calidad y disposición de los recursos.

Mejía (2012) menciona que la cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido.

La delimitación de una cuenca, se hace sobre un plano o mapa a curvas de nivel siguiendo las líneas de divourtium acuarum (parteaguas), la cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación, que en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca.

### **1.1.2 Concepto de suelo**

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2015) ha definido el suelo como la capa superior de la corteza terrestre que está compuesta por una mezcla de partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos; de modo que conforma un medio ambiente muy complejo y variable. Esta mezcla, es localizada en la interfase litósfera-hidrosfera-atmósfera, constituye un ente natural vivo, dinámico y no renovable a corto y mediano plazo.

Weil y Brady (2016) indican que se denomina suelo a todo agregado natural no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta junto con el agua y aire que ocupan los espacios vacíos entre partículas sólidas, también es conjunto de partículas minerales o de materia orgánica en forma de depósito, generalmente minerales, pero a veces de origen orgánico, que pueden separarse por medio de una acción mecánica sencilla y que incluyen cantidades variables de agua y aire.

Vásquez y Tapia (2011) menciona que el suelo es la parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa, que proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de seres vivos que se asientan sobre ella, no siempre son iguales y cambian de un lugar a otro por razones climáticas y ambientales, de igual forma los suelos cambian su estructura, estas variaciones son lentas y graduales.

Para Walker (2008) el suelo es la fina capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra, es una capa delgada situada en el límite entre la atmósfera y la zona continental de la corteza terrestre.

Becerra (1999) menciona que el suelo es la capa delgada de material intemperizado que cubre la superficie terrestre, de un espesor insignificante

comparado con el de otras capas del planeta, sin embargo es de vital importancia para el desarrollo de la vida que se conoce por lo que resulta trascendental para el hombre conocer este recurso y promover su conservación por todos los medios a su alcance.

Quiroga y Bono (2012) indica que la composición del suelo puede ser considerado como un sistema disperso en el que pueden diferenciarse tres partes:

- Fase sólida: agregados minerales y orgánicos.
- Fase líquida: agua de la solución del suelo.
- Fase gaseosa: atmósfera del suelo contenida en el espacio poroso.

En volumen, la fase sólida ocupa aproximadamente el 50% del total, mientras que las fases gaseosa y líquida se reparten el resto del espacio disponible.

El suelo es un componente clave importante de los ecosistemas terrestres. Las plantas obtienen del mismo soporte y nutrimentos, además de que al menos alguna etapa de los ciclos biogeoquímicos que ocurren en los ecosistemas sucede en el mismo. Sin el suelo, la vida como la conocemos sería imposible. Es un recurso natural que se considera en estado crítico, ya que la combinación de la calidad del suelo, de la vegetación y agua determinan la calidad del ecosistema; en este sentido, la información edáfica es el sustento natural para la evaluación y manejo sustentable de las tierras (FAO, 2015).

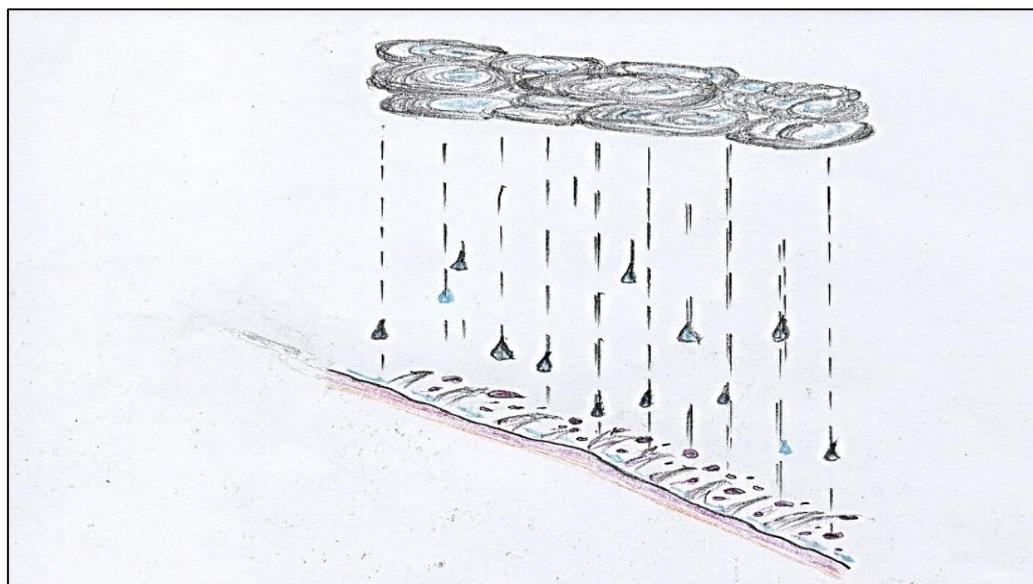
Porta, Lopez-Acevedo y Poch (2014) define al suelo como la capa superficial de la corteza terrestre en la que viven numerosos organismos y crece la vegetación. Es una estructura de vital importancia para el desarrollo de la vida. El suelo sirve de soporte a las plantas y le proporciona los elementos nutritivos necesarios para subdesarrollo.

### **1.1.3 Concepto de erosión**

Sobre la superficie terrestre se han presentado desde tiempos geológicamente lejanos procesos de erosión, que ha dado lugar a la formación de los suelos, por procesos de meteorización física, química y otros. A lo largo de los años se presenta un proceso dinámico en que las diferentes acciones se compensan dando

lugar al equilibrio. Sin embargo, los niveles de fragilidad alcanzados por el medio físico, dan lugar a la aceleración de los procesos de pérdida de suelo, rompiendo el equilibrio, que conlleva a un motivo de preocupación.

En las zonas con cobertura vegetal, la energía cinética de las gotas de lluvia es atenuada por el sistema vegetal y en suelo sin cubierta vegetal da lugar a la superficie del suelo susceptibles a la acción directa de las aguas, ya que un suelo desprotegido recibe el impacto directo de las gotas de lluvia en una proporción equivalente al diámetro de las mismas elevado a la tercera potencia.



*Figura 1.* Inicio de la erosión pluvial

Vásquez y Tapia (2011) nos dicen que la erosión es un fenómeno que comprende el desprendimiento y traslado o arrastre de las partículas del suelo por acción del agua, del viento, o de la actividad biológica. Puede ser natural (normal o geológica) cuando se produce por los cambios naturales en el ambiente y en largos periodos geológicos contribuyendo a la formación de los suelos y del relieve terrestre; o acelerada siendo uno de los problemas más serios que tiene que enfrentar cualquier acción encaminada a lograr el desarrollo agropecuario, ya que además de ser la causa de bajos rendimientos de los cultivos, acorta la vida útil de las obras de regulación por la cantidad de sedimentos que acarrea el agua que se almacena colmatando el lecho de los ríos y favoreciendo, en muchos casos las inundaciones, problemas de drenaje y salinización de las tierras. Existen dos tipos de erosión, eólica e hídrica.

Entre los procesos de degradación del suelo el más severo es la erosión, pues en otros procesos el suelo, aunque degradado, permanece en su sitio, y con frecuencia se dispone de técnicas para su recuperación. En tales casos, y desde el punto de vista de la productividad del terreno, el deterioro del suelo se podría considerar como temporal; no así en el caso de la erosión, donde la pérdida del suelo es permanente, definitiva (Taboada *et al.*, 2011).

García (2015) define el fenómeno de la erosión como un proceso de desgaste, transporte y deposición de las partículas de la masa de suelo. La sedimentación, proceso de deposición del material erosionado y transportado, ocurre a veces lejos del lugar de origen, pudiendo provocar tanto o más daño que la erosión misma. El impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento representan los agentes externos que trabajan para vencer la cohesión de las partículas de la masa de suelo y provocar su transporte. Una vez que la capacidad de infiltración y de almacenamiento superficial está satisfecha, comienza el escurrimiento, arrastrando las partículas sueltas y las que su fuerza misma desagrega.

La erosión es uno de los factores más importantes en la degradación de suelos fértiles de la agricultura alrededor del mundo, está puede llevar al desarrollo de un embrutecimiento del perfil del suelo con el posterior deterioro de la humedad, generando problemas ambientales (Lal, 2015).

Pidwirny (2006) define a la erosión como la degradación de los suelos, los sedimentos, el regolito, los fragmentos de roca y el paisaje, a través de distintos medios externos como el viento, el hielo y el agua.

Según Becerra (1999) la erosión es el proceso físico que consiste en el desprendimiento y arrastre de los materiales del suelo por los agentes del intemperismo.

Según Parikh y James (2012) explica que la erosión es la degradación y el transporte de suelo o roca que producen distintos procesos en la superficie de la Tierra u otros planetas. Entre estos agentes está la circulación de agua o hielo, el viento, o los cambios térmicos. La erosión implica movimiento, transporte del material, en contraste con la disgregación de las rocas, fenómeno conocido como meteorización. La erosión es uno de los principales factores del ciclo geográfico.

La erosión puede ser incrementada por actividades humanas o antropogénicas. La erosión produce el relieve de los valles, gargantas, cañones, cavernas y mesas.

Añó y Peris (2003) definen a la erosión, no como un proceso en sí mismo, sino como la manifestación fenomenológica de una multitud de procesos que dan lugar a la pérdida del recurso suelo. Asimismo, Pidwirny (2006), menciona que dichos procesos llegan a su fin cuando las partículas transportadas caen y se depositan en la superficie, generando procesos de sedimentación.

Según Suárez (2001) la erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento.

La erosión del suelo es un proceso que consiste de dos fases, la separación de las partículas del suelo de la masa del suelo y su transporte por los agentes erosivos como agua y viento. Una tercera fase, se produce cuando ya no está disponible suficiente energía para el transporte de las partículas, la sedimentación o deposición (De Sousa *et al.*, 2019).

García-Chevesich (2015) indica que la erosión es el proceso al que obedece la forma cambiante de la superficie terrestre. Consiste en la separación de las partículas y agregados de la “masa” de suelo y en su transporte y sedimentación en posiciones inferiores al punto original. Los agentes de la erosión pueden ser el agua, el viento, la gravedad, los cambios de temperatura y la actividad biológica.

McCool y Williams (2008) mencionan que la erosión hídrica es el cambio que hace en el paisaje terrestre el accionar de las aguas, lluvias, ríos, inundaciones y la eólica es el cambio del paisaje terrestre a cargo del accionar del viento.

Zachar (1982) puntualiza el término “erosión” que proviene del verbo latino “erodere”, que significa roer. Se refiere al desgaste de la superficie terrestre bajo la acción de los agentes erosivos, siendo los principales el viento y el agua y, en las regiones montañosas, la nieve y el hielo. Las rocas, en efecto, se descomponen bajo la acción de los agentes atmosféricos: la temperatura y la lluvia. Las variaciones de temperatura y humedad provocan en ellas dilataciones y contracciones, debidas a la alternancia del hielo y el deshielo o a las variaciones en el contenido de agua. De esta forma determinan su desagregación mecánica. El

agua de lluvia, más o menos cargada de gas carbónico y de otros elementos, disuelve, al atravesar la atmósfera y la capa superficial del suelo, una parte de sus elementos minerales. Provoca, por tanto, su alteración química. El resultado de estos dos fenómenos, desagregación mecánica y alteración química, es la disgregación de las rocas que se reducen de tamaño hasta las dimensiones de las arenas, limos y arcillas.

Vahrson y Dercksen (1990) mencionan que en el ámbito tropical, la precipitación es el parámetro más importante para la agricultura, y eso no solo en términos de exceso y de déficit de agua y sus probabilidades, sino también en términos de las posibles intensidades y la energía cinética de la lluvias, que normalmente superan en alto grado de valores conocidos para zonas templadas.

#### **1.1.4 Tipos de erosión**

Según FitzPatrick (2011) la erosión es el resultado de la acción de las fuerzas de fricción de gases o fluidos en movimiento. Estos fenómenos generan los diferentes tipos de erosión producidos tanto por el viento como por el agua. En el caso de la erosión producida por el agua, el proceso puede ser analizado iniciando por el desprendimiento de las partículas de suelo, debido al impacto de las gotas de lluvia y al mismo tiempo ocurre el proceso de flujo superficial o escorrentía, la cual hace que las partículas removidas sean incorporadas a la corriente y transportadas talud abajo. Adicionalmente, las corrientes generan procesos de desprendimiento de partículas por acción de la fuerza del agua en movimiento. Los procesos son muy complejos y es común que varios procesos actúen conjuntamente. Los tipos de erosión que se conocen son:

##### **a. Erosión por el viento**

El movimiento del viento ejerce fuerzas de fricción y levantamiento sobre las partículas de suelo, desprendiéndolas transportándolas y depositándolas.

##### **b. Erosión por gotas de lluvia**

Cuando las gotas de agua impactan el suelo desnudo pueden soltar y mover las partículas a distancias realmente sorprendentes.

**c. Erosión laminar**

Las corrientes superficiales de agua pueden producir el desprendimiento de las capas más superficiales de suelo en un sistema de erosión por capas que se profundizan.

**d. Erosión en surcos**

La concentración del flujo en pequeños canales o rugosidades hace que se profundicen estos pequeños canales formando una serie de surcos generalmente semiparalelos.

**e. Erosión por afloramiento de agua**

El agua subterránea al aflorar a la superficie puede desprender las partículas de suelos sub superficial formando cárcavas o cavernas.

**f. Erosión interna**

El flujo de agua a través del suelo puede transportar partículas formando cavernas internas dentro de la tierra.

**g. Erosión en cárcavas**

Los surcos pueden profundizarse formando canales profundos o la concentración en un sitio determinado de una corriente de agua importante puede generar canales largos y profundos llamados cárcavas. Una vez se inicie la cárcava es muy difícil de suspender el proceso erosivo.

**h. Erosión en cauces de agua (erosión lateral y profundización)**

La fuerza tractiva del agua en las corrientes y ríos produce ampliación lateral de los cauces profundización y dinámica general de la corriente.

**i. Erosión por oleaje**

Las fuerzas de las olas al ascender y descender por una superficie de suelo producen el desprendimiento y el transporte de partículas.

## **j. Erosión en masa (deslizamientos)**

El término erosión o remoción en masa se relaciona a movimientos de masas importantes de suelo conocido con el nombre genérico de deslizamientos. Dentro de los diversos tipos de movimiento del suelo en taludes y laderas algunos están íntimamente relacionados con los procesos típicos de erosión.

Según Honorato (2000) señala que la erosión laminar se define como el movimiento uniforme y difuso de una capa delgada de suelo sobre las laderas, como consecuencia del escurrimiento del agua.

Dagar y Singh (2018) menciona que la erosión por surcos ocurre cuando por pequeñas irregularidades del terreno, la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficiente para hacer cortes y formar canalículos que se manifiestan en la superficie. Este tipo de erosión se puede eliminar con la labranza.

Hardaha (2018) afirma que la erosión en cárcavas se genera por una gran concentración de escorrentía y se manifiesta por profundas incisiones en el terreno. Esto ocurre como consecuencia del flujo de agua que amplía y profundiza el surco o por la concentración del escurrimiento de varios surcos en uno, que posteriormente se agranda por socavamiento y por aceleración del proceso en dirección de la pendiente.

### **1.1.5 Erosión hídrica**

Según Taboada-Castro, Rodríguez-Blanco, Taboada-Castro y Oropeza-Mota (2011) la salpicadura es el agente de desprendimiento más importante, surge como el resultado de las gotas de lluvia golpeando la superficie desnuda del suelo, las partículas de suelo pueden ser lanzadas a través del aire a varios centímetros de distancia.

Al-Taai, Al-Hassani y Mehdi (2016) mencionan que como agente activo, el agua erosiona al suelo de dos maneras, por el impacto de la lluvia y por la fricción del escurrimiento superficial sobre la superficie del terreno, en ambos casos, la erosión constituye un trabajo físico, y la cantidad de energía de la lluvia o de la escorrentía depende de su masa y velocidad de movimiento

El suelo es perturbado por las operaciones de labranza y el pisoteo de personas y ganado, el agua corriente y el viento son los mayores contribuyentes al desprendimiento de partículas del suelo, favoreciendo al aflojamiento del suelo de modo que se elimina fácilmente por los agente de transporte (Álvarez, Taboada, Bustingorri y Gutiérrez Boem, 2006).

La erosión hídrica es función de la erosividad del agente activo, que se define como la habilidad del agua para causar erosión; y la erosionabilidad del suelo, susceptibilidad del suelo para ser erosionado. La erosividad está determinada por la acción dispersante de la lluvia y la cantidad y velocidad de la escorrentía, éstas dependen de las características de la lluvia y el suelo. La erosionabilidad del suelo obedece a las características del suelo, topografía y modalidades del manejo: longitud y grado de pendiente, vegetación y modificación de la superficie (Becerra, 1999).

Los procesos de erosión hídrica son complejos, éstos involucran los cambios en las cantidades e intensidades de las lluvias, número de días de precipitación, tasa de lluvia, producción de biomasa de plantas, proporciones de descomposición de residuos de plantas, actividad microbiana en el suelo, tasas de evapotranspiración y los cambios necesarios en el uso de la tierra para adaptar al nuevo régimen climático (Nearing, Pruski y O'Neal, 2004).

Cazalac (2004) menciona que existen cuatro tipos de erosión del agua. La erosión por salpicadura se produce cuando las gotas de agua caen en el suelo sin vegetación lo suficientemente fuerte para salpicar el suelo y desplazarlo. Cualquier tipo de agua corriente luego lleva el suelo y lo redeposita. Cuando corre la suficiente cantidad de agua de lluvia o de nieve derretida por la superficie, puede tomar partes de suelo uniforme de tierra de laderas llamada erosión de la capa superior del suelo. La erosión lineal sucede cuando llueve lo suficiente como para crear charcos de agua que cavan "canales pequeños pero aun así bien definidos" en la tierra, de acuerdo al Ministerio de Agricultura de Ontario. Cuando los surcos crecen lo suficiente como para interferir con la maquinaria de agricultura, el proceso se llama erosión en cárcavas. Esta erosión puede causar la pérdida de montos significativos de tierra arable y subsuelo, los cuales son frecuentemente redepositados en un lago u océano.

### 1.1.6 Modelos de evaluación de la erosión hídrica

Honorato, Barrales, Peña y Barrera (2001) indica que para la estimación o medición del grado de erosión existente en el suelo se han desarrollado distintos métodos, los cuales se han diferenciado en dos tipos; los modelos cualitativos y los modelos cuantitativos. En los modelos cualitativos destaca la cartografía de unidades homogéneas en función de los parámetros principales que controlan el proceso erosivo (erosividad de la lluvia, suelo, vegetación, topografía), con otros atributos de ajustes más subjetivos. Por otra parte, los modelos cuantitativos permiten la estimación numérica de la erosión y se diferencian en modelos de evaluación directa y en modelos de evaluación indirecta, donde estos últimos son los de mayor aplicación en la actualidad.

Ramos (2001) señala que el límite oscila entre los 10 a 12 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, aunque en zonas húmedas esta cifra puede elevarse hasta las 25 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, por encima de esta cifra no se garantiza la conservación de los suelos, ya que la destrucción es más rápida que la creación del suelo.

Un rango de tolerancia de 2 – 11 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> dependiendo de los tipos de suelo es aceptado en los Estados Unidos. Habiendo lugares y situaciones donde las tasas de erosión son mucho más altas que este límite, incluso tan altas como 100 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> (Osman, 2014).

Según Mintegui *et al.*, (2016) se ha intentado salvar el vacío existente entre los modelos de evaluación indirecta y los procesos físicos, pero se reconoce que falta mucho por hacer, tanto en la teoría del transporte de sedimentos en el flujo superficial, como en el trabajo experimental.

#### 1.1.6.1 Modelos de evaluación directa

##### a. Método de parcelas de escurrimiento

Vega y Febles (2006) señalan que el empleo de parcelas de escurrimiento se ha generalizado. Sin embargo, la utilidad de la información obtenida, y de las investigaciones realizadas en ellas está limitada por la falta de continuidad en el tiempo, para la obtención de dicha información.

Pizarro *et al.* (2004) destacan a las parcelas de escorrentía como una de las metodologías más conocidas para la evaluación directa de la erosión del suelo. Este método de investigación permite controlar muchas de las condiciones en que ocurren los procesos erosivos, como el sellamiento derivado del impacto de las gotas de lluvia.

Cuitiño (1999) el método de las parcelas de escurrimiento, igualmente conocidas como los medidores de erosión, es un sistema de captación de tierra que escurre de una parcela junto con el agua, la cual es almacenada en otros depósitos con el objetivo de medir su cantidad y calidad.

Morgan (2005) mencionan que las parcelas se utilizan para recolectar los sedimentos removidos, involucrando la captación del caudal líquido y sólido.

Para Hudson (1997) son tres las razones donde se justifica el empleo de parcelas de escorrentía:

- Con fines demostrativos, cuando la finalidad es demostrar hechos conocidos.
- Para estudios comparativos, teniendo una indicación aproximada del efecto en la escorrentía o en la erosión de, por ejemplo, la existencia o no de una cubierta del suelo o la cuantía de la escorrentía en la cima y en la base de una ladera.
- En la obtención de datos que se van a emplear para construir o para validar un modelo o ecuación destinado a predecir la escorrentía o la pérdida de suelo.

Según Peralta (1976) indica que este es el único sistema que permite medir los kilos o toneladas de tierra que se pierden en un terreno bajo una pendiente, rotación y cobertura dada. Además, se debe enfatizar en que éste es un método inobjetable en su exactitud de resultados, pero es un trabajo lento que requiere de años de trabajo sistemático.

### **b. Método de parcelas con clavos de erosión**

Cuitiño (1999) menciona que el método de las parcelas con clavos de erosión es un método adecuado para cuantificar la erosión hídrica producida en un sector determinado, ya que no sólo cuantifica la erosión hídrica propiamente tal, sino que también cuantifica la sedimentación producida en el mismo lugar.

Peralta (1976) señala que este método corresponde a una medición cuali-cuantitativa y que para efectuar este tipo de mediciones se debe partir de la base que es posible evaluar la erosión conociendo previamente los suelos y su morfología.

### **c. Simuladores de lluvia**

Sangüesa *et al.* (2010) la simulación y modelación de procesos, se ha aceptado como el recurso científico más viable para enfrentar problemas ambientales donde el agua es el factor principal. Para el caso de erosión de suelos, contaminación e infiltración, los simuladores de lluvia han venido a ofrecer una opción para cuantificar el efecto combinado de diferentes variables que involucran los procesos mencionados.

Nolan *et al.* (1997) los simuladores de lluvia han sido equipos diseñados con la finalidad de aplicar agua en forma similar a la lluvia natural, bajo condiciones controladas, empleándose para investigar sobre diferentes tipos de erosión de suelos y experimentos hidrológicos. Por esta razón, los simuladores de lluvia son una de las herramientas desarrolladas en los últimos años para evaluar la erosión hídrica, las cuales intentan reproducir las lluvias naturales lo mejor posible en términos de sus características físicas y químicas.

El simulador de lluvia, tiene por objetivo analizar la vulnerabilidad a la erosión de suelos desnudos frente a eventos pluviométricos de diferente intensidad, a través de la simulación de precipitaciones a una intensidad dada y la determinación de la infiltración y el transporte de sedimentos (Cazalac, 2004).

En otros estudios puede ser importante que los procesos de erosión no sean distorsionados a causa de que la lluvia simulada sea distinta de la lluvia natural. Los principales factores a considerar en el uso de los simuladores, son las fuentes de energía, los suministros de agua y el acceso a éstos. La mayor parte de los simuladores requieren una fuente de energía para los motores y las bombas. Aunque existen pequeños generadores diésel o de petróleo confiables, ellos no son baratos y necesitan ser transportados (Hudson, 1997).

### 1.1.6.2 Modelos paramétricos

Ketema y Dwarakish (2019) menciona que son modelos basados en la lógica inductiva y por lo general se aplican en aquellas condiciones en las que han sido calibrados los modelos paramétricos destacan por su amplia utilización y su uso; en este aspecto particular, la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE, por su sigla en inglés) de (Wischmeier y Smith 1978), constituye un método de uso generalizado para la estimación de la erosión hídrica. Sin embargo, autores como Hudson, (1997) critican su denominación de “universal”, puesto que solo es aplicable a la mitad oriental de los Estados Unidos. El modelo USLE, a partir de información referida a seis variables de control, estima el valor en toneladas métricas por hectárea y año de la cantidad de suelo removida por la erosión hídrica.

Ketema y Dwarakish (2019) menciona que la Ecuación Universal de Perdida de Suelo Modificada (MUSLE), incrementa la precisión predictiva y posibilitando su aplicación en eventos individuales. La diferencia con el modelo USLE, radica en el reemplazo del factor de erosividad de la lluvia  $R$  por un factor de escorrentía, lo que permite estimar directamente la producción de sedimentos, eliminando la necesidad de usar un factor de entrega y teniendo la ventaja de poder ser aplicada a eventos de lluvia por separado (Williams, 1975).

Por otra parte, en la década de los ochenta, es realizada una revisión del modelo USLE, dando origen a la Ecuación Universal de Perdida de Suelo Revisada (RUSLE), la cual permite predecir las pérdidas de suelo a largo plazo para un sistema específico de manejo (Renard *et al.*, 1997). Además,

posibilita determinar sectores críticos, en los que la pérdida de suelo puede sobrepasar los rangos tolerables, permitiendo además elegir la práctica de control de la erosión hasta un nivel de pérdida de suelo tolerable. En 1991 se publica la versión revisada del modelo RUSLE, que incluye un nuevo procedimiento para estimar el factor C, a partir de cinco variables, de fácil determinación y estimación (Clérici y Préchac, 2001).

- Cobertura del Suelo por residuos de la vegetación previa.
- Cobertura del suelo por la parte aérea de la vegetación.
- Rugosidad de la superficie del suelo.
- Contenido de biomasa en descomposición en los primeros 10 cm. del suelo.
- Contenido de agua del suelo.

Honorato *et al.* (2001) señalan que el modelo USLE, presenta una alta fidelidad y que este posee una relativa aplicabilidad universal, basándose en la gran cantidad de trabajos realizados en todo el mundo con fines científicos. En Chile, el mismo, realizó una evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y la IX Regiones. Sus resultados demostraron un buen comportamiento predictivo del modelo en localidades con prácticas de manejo que favorecieron el proceso erosivo. Por otra parte, en localidades donde existieron prácticas de manejo protectoras del suelo, como una mínima labranza, el modelo no proporcionó buenas estimaciones de erosión, debido principalmente al factor R estimado mediante la aproximación de Arnoldus, cuyos valores no proporcionaron la exactitud suficiente para estimar la erosividad de la lluvia.

Farfan (2002) desarrollo el cálculo del índice de erosividad pluvial R de la USLE para dos estaciones pluviográficas de la Región del Maule en Chile, a partir de la modificación del Índice de Fournier, consiguiendo resultados muy satisfactorios. Para ello correlacionó los valores del factor (R) a nivel mensual, con el valor mensual del índice de Fournier, demostrando con

ello la validez que posee estimar la capacidad erosiva de las lluvias (R), en función del índice de agresividad climática de Fournier.

Según Benítez (2007) y Fournier (1960) estableció un Índice de Agresividad Climática o Índice de Fournier (IF), como alternativa a los índices propuestos por otros autores, cuya obtención y cálculo son de mucha complejidad. Este índice muestra una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía. El cálculo se hace en base a estaciones que posean datos representativos de la zona de estudio, utilizando la siguiente expresión:

$$IF = Pp_{2 \max} - P$$

En el extremo opuesto, en cuanto al tamaño y características de las superficies a evaluar (pequeñas cuencas de carácter torrencial), se encuentra el modelo de Djorovic. Este evalúa la degradación específica en cuencas, considerando como parámetros definatorios, la precipitación, la temperatura, el suelo, el relieve, la vegetación y el grado y tipo de intensidad de los procesos erosivos existentes en la cuenca. Considera además, un parámetro para estimar la influencia del grado de intensidad que han alcanzado los procesos erosivos presentes en la cuenca y el tipo de erosión predominante.

El modelo viene definido por la ecuación:

$$Y = 11,8 * (V + q) * K * C * Pe * LS p 0.56$$

Dónde:

IF = Índice de Fournier.

Pp<sub>2 Max</sub> = Precipitación correspondiente al mes más lluvioso del año (mm).

P = Precipitación media anual (mm).

$$W = \pi * T * h * F * Z^3$$

Dónde:

$W$  = Caudal sólido en  $m^3/año$ , como medida de la degradación específica de la cuenca.

$T$  = Factor de temperatura; donde  $t_0$  es la temperatura media anual de la cuenca en  $°C$ .

$h$  = Precipitación media anual en mm.

$F$  = Superficie de la cuenca en proyección horizontal en  $km^2$ ;

$Z$  = Coeficiente de erosión que refleja la intensidad y extensión del fenómeno erosivo de una cuenca. Además, valora la influencia de los factores de suelo, vegetación y relieve mediante la siguiente expresión:

$$Z = X * Y (\alpha + \pi)$$

Dónde:

$X$  = Coeficiente adimensional que cuantifica el estado de la cubierta vegetal y las prácticas de conservación de suelos, variando de 0.05 para bosques y vegetación arbustiva bien cubierta a 1.0 para suelos desnudos sin labrar.

$Y$  = Coeficiente adimensional de erosionabilidad del suelo que varía de 0.05 para los suelos con estructura menos erosionable a 2.0 para arenas, gravas y suelos sueltos.

$\alpha$  = Coeficiente adimensional que cuantifica el estado erosivo de la cuenca, desde 0.2 para cuencas sin otro tipo de erosión manifiesta, que pequeños deslizamientos de márgenes en la red de drenaje, a 0.1 en cuencas que muestran en su totalidad procesos erosivos profundos.

$\pi$  = Pendiente media de la cuenca como parámetro representativo del factor de relieve, expresado en %. El valor  $Z$ , representativo de la cuenca, se calcula como media ponderada de los distintos valores de este coeficiente, obtenidos para cada una de las superficies

parciales que integran los diferentes valores de los coeficientes representativos de los factores:

$$Z = \sum i Z * \alpha Fi$$

$$G = W * R$$

En cuanto a la concepción del fenómeno de estudio por parte de esta metodología, es semejante a la USLE en un alto porcentaje, ya que tiene en cuenta la interacción de los siguientes factores: Precipitación, clima, topografía, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas y geomorfología. Por ello las formulaciones intentan incluir estas variables con un adecuado peso relativo.

Olmos *et al.* (2003) otra formulación difundida, de modo especial en Europa, fundamentalmente por su efectividad cuando se ha aplicado a ambientes de cuencas montañosas, es la de Gavrilovic. Esta metodología estima la cantidad de material producido por la erosión superficial en una cuenca, y que es transportado a la sección del río que la define. Es un método empírico que se compone de dos partes:

El cálculo de la erosión media anual de sedimento por lluvia y escorrentía superficial W.

La determinación del coeficiente de redepósito o de retención de sedimentos R.

De ambos se obtiene el volumen de sedimento producido por erosión y que es transportado a la sección final de la cuenca (m<sup>3</sup>/año).

$$W = T * h * p * Z^3 * F$$

Dónde:

W = Volumen promedio anual erosionado de sedimento (m<sup>3</sup>/año).

T = Coeficiente de temperatura, que se obtiene de:

$$T = (t / 10) + 0,1$$

Dónde:

t = Temperatura promedio anual.

h = Precipitación media anual (mm/año).

F = Superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>).

Z = Coeficiente de erosión, cuya expresión es:

$$Z = X * Y ( \varphi + I )$$

Dónde:

X = Coeficiente de uso del suelo.

Y = Coeficiente de resistencia del suelo a la erosión.

J = Coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados.

I = Gradiente de la pendiente superficial (en %).

Existen otros modelos que tratan de medir la cantidad de sedimentos arrastrados. Uno de ellos es el Soil Loss Estimator for Southern Africa (SLEMSA), el cual fue desarrollado a partir de datos de Zimbabwe para evaluar la erosión resultante en diferentes sistemas agrícolas y para recomendar las medidas adecuadas de conservación. La técnica ha sido adoptada por todos los países del sur de África. La Ecuación es:

$$Z = K * X * C$$

Dónde:

Z = Pérdida media anual de suelo (t/ha).

K = Pérdida media anual de suelo (ton/ha.) en una parcela tipo de 30 m de longitud por 10 m de anchura y 2,5% de pendiente, de un suelo de erosionabilidad conocida (F) con el terreno en barbecho blanco.

X = Factor adimensional que combina la longitud y grado de la pendiente.

C = Factor adimensional que depende del manejo del cultivo.

### 1.1.7 1.1.7. Ecuación universal de pérdida de suelo

La ecuación universal de pérdida de suelos (The Universal Soil Loss Equation-USLE), se dedujo a partir de los datos obtenidos tras la investigación de la erosión en más de 10,000 parcelas a lo largo de 49 localidades de los Estados Unidos de Norteamérica. Para la evaluación de los procesos de erosión hídrica se requiere el empleo de varios tipos de datos cómo: los climáticos, hidrológicos, topográficos, vegetación, tipo de suelo y prácticas de conservación. Mediante el procesamiento de estos datos se obtienen los parámetros de la USLE y se calcula la pérdida anual de suelo producida por la erosión hídrica sin estimar el transporte de sedimentos en los cauces (Wischmeier y Smith, 1978).

Según Prado *et al.* (2017) la cuantificación de la erosión hídrica de los suelos en cuencas hidrográficas sirve para conocer el grado de su deterioro y para implementar medidas de conservación que minimicen la pérdida del suelo. Dada la carencia de la información para cuantificar con precisión aceptable la erosión en México, es necesario estudiar su estimación con la información disponible mediante metodologías validadas con información experimental. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue calibrar los modelos USLE Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo, por sus siglas en inglés.

Según Bagarello, Ferro y Pampalone (2013) la USLE es un modelo ampliamente usado por el cálculo de la erosión del suelo y por las medidas de conservación del suelo. Este modelo de erosión de agua implica a seis factores: erosionabilidad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud de pendiente (L), pendiente escarpada (S), manejo de cultivo (C) y practica de control de la erosión (P). El significado anual de pérdida de suelo (A) es calculado por la multiplicación de estos seis factores. Además, este método es sensible a los cambios en todos los seis factores (Wischmeier & Smith, 1978). La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos – USLE es:

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

Donde:

A = Pérdida Anual de suelos por unidad de superficie, en  $t/ha^{-1}año^{-1}$

R = Índice de erosividad de lluvias, en  $MJmm t/ha^{-1}año^{-1}$

K = Factor de erodabilidad del suelo, en  $t ha h MJ^{-1}mm^{-1}ha^{-1}$

LS= Factor topográfico, producto de los factores, longitud y grado de la pendiente

C = Factor cobertura vegetal, representa su cultivo y manejo (Adimensional)

P = Factor prácticas de conservación de suelos agrícolas (Adimensional)

La ecuación universal de pérdida de suelo, USLE por sus siglas en inglés, se diseñó como una herramienta de trabajo para los conservacionistas y es un modelo empírico o indirecto. Se buscaba con esta ecuación que el cálculo de la pérdida de suelo se estandarizara a la vez que resultara más sencillo; sin embargo existen limitaciones en su uso ya que la ecuación se desarrolló con datos de parcelas experimentales en condiciones de longitud y pendiente controladas, además que considera lluvias, cobertura vegetal y tipo de suelo uniformes y todo en el contexto de Estados Unidos. También es de señalar que la EUPS está basada en la capacidad de las gotas de lluvia para desprender partículas de suelo y no brinda información certera acerca de la producción de sedimentos ni su deposición dentro de la cuenca (Tshikeba, Muamba, Onema, Gumindoga y Tshimpampa, 2018).

Estimación de la producción de sedimento en cuencas mediante la proporción de desplazamiento de sedimentos está definida como el rendimiento de sedimento en cualquier punto a lo largo de un canal, dividido por la erosión total más arriba de ese punto, y su magnitud depende de los diversos factores que determinan tanto la escorrentía como la erosión. Las proporciones de desplazamiento pueden ser estimadas para cuencas específicas midiendo el rendimiento y estimando la erosión total con métodos tales como USLE (Bodoque *et al.*, 2012).

Oñate (2004) menciona que en la década de los ochenta, es realizada una revisión del modelo USLE, dando origen a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), la cual permite predecir las pérdidas de suelo a largo plazo para un sistema específico de manejo. Además, posibilita determinar sectores

críticos, en los que la pérdida de suelo puede sobrepasar los rangos tolerables, permitiendo además elegir la práctica de control de la erosión hasta un nivel de pérdida de suelo tolerable. En 1991 se publica la versión revisada del modelo RUSLE, que incluye un nuevo procedimiento para estimar el factor (C), a partir de cinco variables, de fácil determinación y estimación (Clérico y Préchac, 2001):

- Cobertura del Suelo por residuos de la vegetación previa.
- Cobertura del suelo por la parte aérea de la vegetación.
- Rugosidad de la superficie del suelo.
- Contenido de biomasa en descomposición en los primeros 10 cm. del suelo.
- Contenido de agua del suelo.

#### **1.1.8 1.1.8. Factores de la ecuación universal de pérdida de suelos**

Según Renard y Freimund (1994) para la estimación de la pérdida de suelo, el modelo más utilizado por su simplicidad es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Es una expresión factorial que toma en consideración los factores de erosividad de la lluvia (R), la erosionabilidad del suelo (K), la longitud e inclinación de la pendiente (LS), la cubierta vegetal (C) y las prácticas de conservación (P), de manera que

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Donde:

A = Pérdida de suelo por unidad de superficie.

R = Factor de erosividad de la lluvia con probabilidad de ocurrencia de la energía cinética de la lluvia por lo menos del 50% para intensidad de lluvias con duración de 30 minutos.

K = Erodabilidad del suelo. Cantidad promedio de suelo perdido por unidad del factor (R) cuando el suelo se encuentra en condiciones máximas de erosión posible.

- L = Longitud de la pendiente, es la relación de la erosión con una longitud de pendiente dada y ocurre en el estándar de 22.1 m cuando hay equivalencia con los demás factores.
- S = Factor de inclinación de la pendiente, es la relación entre la erosión y la inclinación de una pendiente dada y la cual ocurre a 9% de inclinación, a igualdad de los demás factores.
- C = Factor del cultivo, es el uso y manejo de los cultivos en relación de la erosión de un suelo.
- P = Factor de las prácticas de conservación de suelos, es el factor de la erosión que ocurre cuando una práctica mecánica de apoyo es aplicada.

#### 1.1.8.1 Factor de erosividad de la lluvia (R)

La erosividad es un proceso ligado a la agresividad de la lluvia por sus características hidrodinámicas; incluye el tamaño o diámetro de la gota, su velocidad de impacto en el suelo, que causa desprendimiento de las partículas menores de 0.05 mm, en el ámbito de limos y arcillas, y el transporte posterior de estas partículas en suspensión, arrastradas por películas superficiales de agua (Somarriba *et al.*, 2005).

La erosividad es la capacidad potencial que tienen las gotas de agua de lluvia para causar erosión. Existen muchas formas de determinarla, una de ellas es a través del índice EI<sub>30</sub> el cual fue propuesto por (Wischmeier y Smith, 1978). Se define como el producto de la energía cinética total de la lluvia (E) por la intensidad máxima en 30 minutos (I<sub>30</sub>). Se enfoca en el desprendimiento de partículas de suelo por erosión laminar (Pérez y Senent, 2017).

Ramos (2001) el factor de lluvia y escurrimiento, número de unidades de índice de erosión pluvial (EI), que para una tormenta determinada es producto de su energía total (E) y su máxima intensidad en 30 minutos (I<sub>30</sub>), se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$R = 1.73 * 0.5 * P$$

Donde:

P = Precipitación media anual

De acuerdo con las investigaciones de diversos autores, ninguna de las características de la lluvia considerada en forma individual, presenta una correlación suficiente para explicar la pérdida de suelo causada por la lluvia. La mejor correlación se encontró con la energía cinética, pero ni aún en este caso tal relación explicaba suficiente proceso erosivo. Finalmente, una correlación aceptable se obtuvo al combinar, como índice de erosividad, a dos características de la lluvia: la energía cinética y la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos (Becerra, 1999).

Cuando la gota de agua se encuentra en el aire, ésta posee una energía potencial ( $E_p = mgh$ ) que al llegar al suelo se convierte en energía cinética ( $E_c = MV^2/2$ ) y ejerce un trabajo sobre éste. Sobre la base de ésta última ecuación es obvio deducir que a mayor diámetro, mayor masa y mayor velocidad de caída, trayendo como consecuencia una mayor acción de trabajo en la disgregación del suelo.

El factor de erosividad de la lluvia en la USLE, es el índice de erosividad presentado por (Wischmeier & Smith, 1978), y se define como el producto de dos características de la lluvia: la energía cinética total de la lluvia ( $E_c$ ) y la intensidad máxima en treinta minutos ( $I_{30}$ ). El producto de ambos se conoce como Índice de Wischmeier, y se expresa de la siguiente manera:

$$EI_{30} = E_c * I_{30}$$

Donde:

$EI_{30}$  = Índice de erosividad para un evento (MJ.mm/ha.hr).

$E_c$  = Energía cinética total de la lluvia (MJ/ha).

$I_{30}$  = Intensidad máxima de la lluvia en 30 min (mm/hr).

Otro modelo o índice de erosividad fue desarrollado para regiones donde se carece de registros pluviográficos, es el índice de Fournier (Becerra, 1999)

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

Donde:

$R$  = Erosividad de la lluvia.

$P_i^2$  = Precipitación mensual en mm

$P$  = Precipitación anual en mm.

Esta ecuación fue adoptada por la (FAO, 1980) dada dificultad para emplear el  $EI_{30}$ , Para fines de este trabajo de investigación se empleó el índice de Fournier para calcular  $R$ .

#### **1.1.8.2 Factor de erodabilidad del suelo (K)**

El término erodabilidad del suelo se usa para indicar la susceptibilidad de un suelo a la erosión (Castro, 2013). La erodabilidad de suelos está influida por algunas de sus propiedades, tales como distribución del tamaño de las partículas primarias, materia orgánica, estructura del suelo, óxidos de hierro y aluminio, uniones electroquímicas, contenido inicial de humedad y procesos de humedecimiento y secado. Se define como la tasa de pérdida de suelo por cada unidad adicional de  $EI_{30}$  cuando la pendiente y su longitud, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación del suelo permaneces contantes y son iguales a uno.

#### **1.1.8.3 Factor del grado de pendiente (LS)**

Según Castro-Mendoza (2013) la topografía del terreno afecta el proceso de erosión y se representa por el factor (LS). La relación entre erosión y factor (LS) es directamente proporcional, es decir, la erosión aumenta conforme la longitud del terreno en el sentido de la pendiente aumenta (factor L) y la inclinación del terreno se hace mayor (factor S).

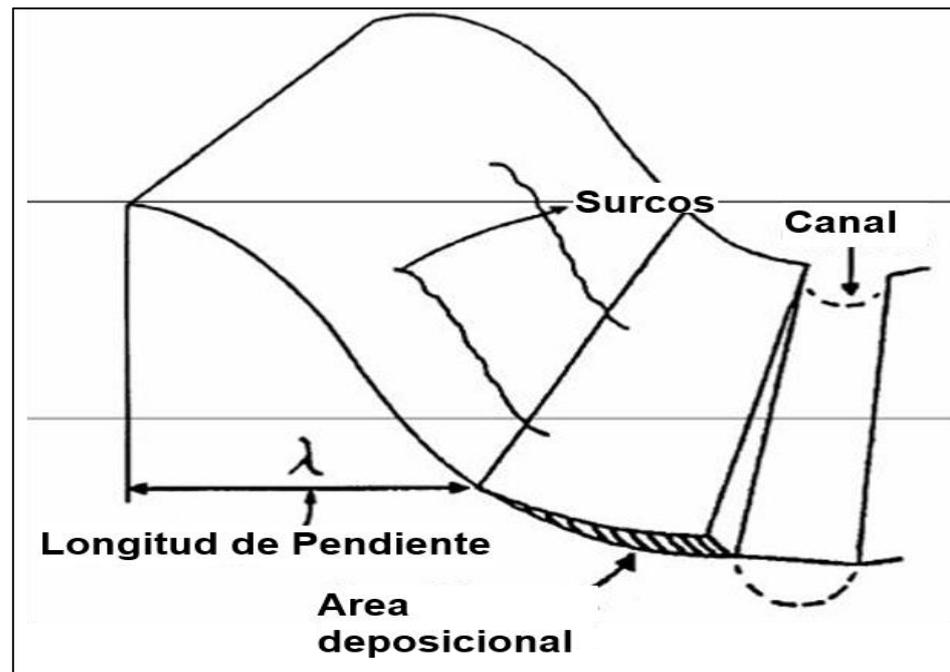


Figura 2. Definición de longitud pendiente como es usado en USLE

La longitud de la pendiente  $L$  ( $\lambda$ ) se define como la proyección horizontal de la hipotenusa de la pendiente del terreno. Este factor se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$L = (\lambda/22.1)$$

Donde:

$\lambda$  = Longitud de la pendiente (m)

$m$  = Exponente adimensional.

Esta es válida cuando se tienen parcelas de 22,13 m de largo con pendientes uniformes de 9 %, sin embargo, existen adecuaciones para las condiciones en campo donde estos factores son altamente variables. Por lo anterior, se utiliza para el cálculo del factor (LS) la siguiente ecuación en función de las características de la microcuencia.

$LS = (\lambda/22.13) m (0.065 + 0.045 S + 0.0065 S^2)$  Para  $S \leq 20\%$  y  $\lambda < 350$  m.

Donde:

$\lambda$  = Longitud del tramo de pendiente en metros, en este caso de 10 m (tamaño de pixel y por lo tanto la unidad de análisis).

$S$  = Pendiente en tanto por ciento.  $m = 0,59$  es un exponente que depende del grado de pendiente y se define en la siguiente ecuación:

$$m = \beta / (1 + \beta)$$

$\beta$  se define en la ecuación:

$$\beta = (\text{sen } \theta / 0.08963) / (\text{sen } \theta)^{0.8} + 0.56$$

Donde:

$\theta$  = Pendiente en grados

#### 1.1.8.4 Factor de cobertura vegetal (C)

Zavaleta, Cruz y Márquez (2012) menciona que los bosques actúan como esponjas, capaces de recoger y almacenar grandes cantidades del agua de lluvia. Los suelos forestales absorben cuatro veces más agua de lluvia que los suelos cubiertos por pastos y 18 veces más que el suelo desnudo.

Suárez (2001) indica que la cobertura vegetal consistente de varios estratos y favorece en mayor medida el proceso de infiltración del agua en los terrenos, a diferencia de las mono estratificadas (pastos o suelos desnudos), en las cuales la infiltración del agua es sustancialmente menor.

El parámetro de cobertura vegetal representa la capacidad de la vegetación para impedir el arrastre de sedimentos, es decir, que si el suelo permanece desnudo durante la época de lluvias la capacidad de desprendimiento y arrastre del material es más alta que si tuviese algún tipo de cobertura. Dentro de la EUPS el parámetro (C) representa un factor de reducción de erosión y es adimensional (Castro, 2013).

### 1.1.8.5 Factor de prácticas de conservación (P)

Morgan (2005) menciona que las estrategias para el control de la erosión utilizan técnicas de conservación de suelos con las que se pretende mantener las pérdidas de suelo por debajo del umbral que, teóricamente, debe permitir a la velocidad natural de formación del suelo compensar las pérdidas por erosión. La erosión es un proceso natural, no puede evitarse totalmente pero puede reducirse a un valor máximo aceptable o pérdida tolerable de suelo.

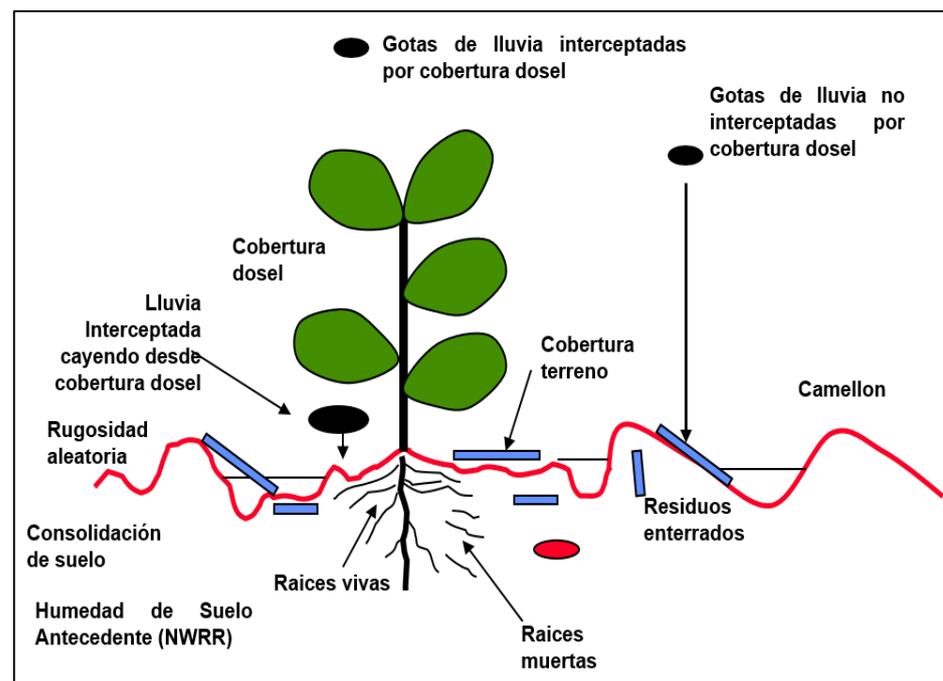


Figura 3. Efectos de manejo de cobertura

El éxito de una estrategia para el control de la erosión pasa necesariamente por tres pasos.

Identificar correctamente los problemas erosivos y por lo tanto los procesos de erosión identificando las áreas con mayor riesgo de erosión y como consecuencia conocer las principales zonas de origen del sedimento.

Diseñar las medidas de conservación de suelos más adecuadas para controlar el problema

Analizar la disposición de los comuneros y restantes agentes para llevar a cabo las medidas de conservación

Según Castro (2013) cuando se introducen cultivos en suelos con pendiente, en ocasiones se utilizan prácticas mecánicas que reducen el agua de escurrimiento y por consecuencia la cantidad de suelo que se puede transportar. El factor (P) se define como la relación que existe entre la pérdida de suelo con una práctica de conservación a la pérdida correspondiente en un terreno bajo cultivo en el sentido de la pendiente, su valor es adimensional y se encuentra entre 0 y 1 (Prasannakumar *et al.*, 2012).

Cuando P toma valores cercanos a cero indica que el suelo no está siendo erosionado debido a las prácticas mecánicas de conservación; y cuando tiende al valor de 1, indica que se tiene la erosión máxima debido a que el tipo de prácticas agrícolas que se emplean en el área estudiada no mitiga los efectos de la agricultura en pendiente (Xiong, Sun y Chen, 2019).

### 1.1.9 Precipitación

Ponce (2014) indica que la precipitación es una variable hidrológica de carácter aleatorio, variando drásticamente en el tiempo (variación temporal) y en el espacio (variación espacial). Es común que, en un determinado período de tiempo, mientras que en una zona ocurre una lluvia, en otra zona próxima no hay precipitación ninguna. La unidad de medición es el milímetro de lluvia, definido como la cantidad de precipitación correspondiente a un volumen de 1 litro por metro cuadrado de superficie, conocido como la lámina de agua o altura de lluvia depositada sobre esa superficie.

Se produce precipitación cuando las gotas minúsculas de agua que forman las nubes se enfrían y se produce la condensación, generándose la unión de las minúsculas gotas de agua para formar gotas de mayor tamaño y de mayor peso y que finalmente debido a ello terminan precipitándose a la superficie terrestre. Los componentes de la precipitación son lluvia, granizo, nieve, neblina (niebla), rocío y granizo con agua. Estas formas de precipitación son las principales fuentes de agua en el mundo (Vásquez *et al.*, 2016).

Dingman (2015) indica que la precipitación es toda forma de humedad, que originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. De acuerdo a esta

definición, las lluvias, las granizadas las garúas, y las nevadas son formas distintas del mismo fenómeno de la precipitación. También se denomina precipitación al agua que proviene de la humedad atmosférica y cae a la superficie terrestre, principalmente en estado líquido como lluvia y llovizna o en estado sólido como escarcha, nieve o granizo.

Mejia (2012) indica que las nubes son arrastradas por los vientos, algunas permanecen sobre los océanos y, otras, son trasladadas hacia los continentes. En estos movimientos pueden enfriarse, por medio de los cuales las gotitas que forman las nubes se pueden agrandar, ya sea porque se juntan entre ellas o porque se aglomeran alrededor de partículas que flotan en la atmósfera. Al agrandarse, las gotas de agua caen por su propio peso hacia la superficie de la Tierra, provocando las precipitaciones. Las precipitaciones que se producen con temperaturas sobre 0°C, caen en forma de lluvia. Las gotas de lluvia se congelan si la temperatura es bajo 0°C y la precipitación es en forma de nieve o de granizo, estado sólido del agua.

La precipitación es una parte importante del ciclo hidrológico y es responsable por depositar agua fresca en el planeta. La precipitación es generada por las nubes, cuando alcanzan un punto de saturación; en este punto las gotas de agua creciente (o pedazos de hielo) se forman, que caen a la tierra por gravedad (Monsalve, 1999).

Almoza (2006) menciona que en meteorología, la precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que cae del cielo y llega a la superficie terrestre. Esto incluye lluvia, llovizna, nieve y granizo; pero no la neblina ni rocío. La cantidad de precipitación sobre un punto de la superficie terrestre es llamada pluviosidad.

Según Chow, Maidment y Mays (1993) la altura de precipitación que cae en un sitio dado, difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos. Los pluviómetros registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en la que está instalada el aparato. Para muchos problemas hidrológicos, se requiere conocer la altura de precipitación media de una zona, la cual puede estar referida a la altura de precipitación diaria, mensual, anual, media mensual, media anual.

Mays (2011) define a la precipitación como cualquier tipo de agua que cae sobre la superficie de la tierra. Las diferentes formas de precipitación incluyen llovizna, lluvia, nieve, granizo, y lluvia congelada. Las precipitaciones son importantes porque ayudan a mantener el balance atmosférico. Las precipitaciones también pueden ser dañinas. Demasiada lluvia puede ocasionar inundaciones severas y muchos accidentes automovilísticos. El granizo puede dañar siembras y autos. La lluvia helada y el agua nieve pueden destruir árboles y torres de poder eléctrico. Lo opuesto a precipitación es evaporación.

#### **1.1.10 Formas de control de la erosión**

León (2014) menciona que control de la erosión es el conjunto de acciones para evitar que el viento o el agua produzcan daño en la tierra de cultivo. El control de la misma consiste en la aplicación de diferentes técnicas que previenen el desgaste excesivo por acción de los elementos. Estos también son parte de los programas municipales y de gobierno de control.

Consiguientemente, las estructuras transversales, además del objetivo de controlar el escurrimiento, tienen la función de propiciar las condiciones necesarias para la colonización y crecimiento de vegetación sobre las superficies de colmatación que favorecen; sin embargo, algunas de estas estructuras en su diseño, incorporan expresamente la implementación de coberturas vegetales. Asimismo, para la corrección de cárcavas, son formulados programas específicos de repoblamiento vegetal, que van desde la siembra y conformación de barreras vivas con plantas de porte herbáceo y arbustivo, hasta la reforestación de partes altas de las cuencas de drenaje y áreas cuya estabilización requiere de sistemas radiculares profundos.

Campos (1998) recomienda que las medidas al alcance de la mano para el control de la erosión (ejemplo prácticas conservación de suelos); siembra de grama, siembras al contorno, colocar sobre el suelo los residuos de cosechas, Construir zanjas al contorno, plantar árboles.

Suárez (2001) explica que la desviación del escurrimiento de la cabecera de la cárcava, es fundamental para el control de su crecimiento; la forma más común de controlar el agua de escorrentía ha sido mediante la construcción de estructuras de captación llamadas zanjas, canalículos o acequias, que cortan el recorrido del flujo

de agua sobre el terreno, disponiéndolo más rápidamente y en forma adecuada, a un canal natural u otra estructura receptora sin que se produzca erosión. La estructura más común es la zanja de coronación o canal de corona, la cual se dispone en la parte superior a una distancia prudencial; debe estar impermeabilizada y verter sus aguas a un canal principal, el cual, en condiciones de alta pendiente, se acompaña de estructuras que disipan la energía alcanzada por las aguas en su recorrido, caso de pantallas deflectoras, canales escalonados o enrocados.

Porta *et al.* (2014) recomiendan que el estudio de diferentes controles de la erosión y de la desertificación, como puede ser el cultivo de leguminosas arbustivas, tiene mucha importancia en la recuperación de los suelos degradados de ambientes áridos y semiáridos; también la tiene la doble simbiosis radicular, tanto con bacterias fijadoras de nitrógeno como con hongos micorrícicos, por su participación en la captación de P y otros nutrientes poco móviles en el suelo.

Leon (2001) menciona que dados diversas circunstancias como la posible lejanía geográfica, el carácter perecedero de las obras, la magnitud de la inversión, y la importancia inherente al papel que desempeñan, debe prodigarse de una adecuada y permanente vigilancia, al conjunto de obras dispuestas para el control de la erosión, de cara a prolongar su vida útil y determinar la funcionalidad de las medidas adoptadas; un programa de seguimiento y monitoreo, a partir de la implementación de las obras, es deseable para corregir a tiempo problemas que se detecten, y para su consideración en diseños futuros.

#### **1.1.11 Sistemas de información geográfica para estimación de la erosión hídrica**

Los estudios para la evaluación de los procesos de erosión hídrica, al igual que diversos campos dentro de las áreas del saber geográfico y ambiental, han progresado al ritmo de los avances tecnológicos (Camargo, Pacheco y López, 2017).

Así se tiene el uso de fotografías con drones Fernández *et al.* (2018). Vinci *et al.* (2017) utilizaron un teléfono inteligente para la reconstrucción de la estructura desde el movimiento (SfM) para monitorear las variaciones en las características

de la superficie del suelo y la pérdida de suelo originada por un evento erosivo de baja intensidad. El escaneo láser terrestre (TLS) se utilizó para validar el modelo SfM.

Farhan y Nawaiseh (2015) generaron mapas de riesgo de erosión e intensidad de la erosión del suelo mediante técnicas RUSLE y GIS en Jordania, indicando que el 54.5% de la cuenca es propensa a pérdidas de suelo de altas a extremas superiores a  $25 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ . Las partes inferiores y medias de la cuenca sufren de erosión del suelo alta, severa y extrema. Mientras que el 45.5% de la cuenca todavía sufre niveles leves y moderados de pérdida de suelo de menos de  $25 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ , sin embargo, el 76.91% de la erosión del suelo se produjo en cuatro unidades de terreno diferentes, y el 72.29% de la erosión del suelo se produjo en zonas con una elevación inferior a 600 m, con un 88% en áreas de  $0^{\circ}-6^{\circ}$ ,  $5^{\circ}-15^{\circ}$  y  $15^{\circ}-25^{\circ}$  categorías de pendientes. El 32.6, 30.3 y el 33.1% de la erosión del suelo se produjo en la agricultura mixta de secano y en las zonas de regadío, zonas áridas y pastizales, respectivamente.

## 1.2 Antecedentes

### 1.2.1 A nivel nacional

Benites (2017) tuvo el objetivo de realizar un análisis comparativo de la erosión hídrica por los métodos de USLE y varillas en la Subcuenca del río Pusmalca - Piura, cuyo resultado de la erosión hídrica es moderado, con tasas de erosión de 53, 72, 76, 86, 96  $\text{t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  para tiempos de retorno de 5, 10, 25, 50, y 100 años respectivamente.

Zúñiga (2017) determinó la pérdida de suelo, en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca aplicando el método USLE y técnicas geoespaciales; estableciendo los diferentes niveles de erosión bajo dos modelos, el primero denominado MC78, debidamente calibrado y basado en el método USLE y NDVI de imagen satelital 2014 y el segundo modelo denominado MC80 basado en USLE e imágenes Landsat del 2001. Los resultados obtenidos fueron con el modelo MC80 que expresó una tasa promedio anual de  $128.96 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ , mientras que el modelo MC78 una tasa promedio de  $145.50 / \text{t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; mostrando una cuenca erosiva con tendencia a la desertificación, que está por

encima del patrón de erosión recomendada por (Icona, 1991) de  $12.5 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  y (Unger, 1984) de  $11.2 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

Cordova (2015) estimó la tasa de erosión mediante la USLE en la microcuenca de la quebrada Chaye Grande que pertenece a la subcuenca del río Yapatera, ubicada en el distrito de Frías, se encontró una tasa promedio de erosión de  $15.74 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ . Esta información puede ser comparada con el estudio “plan regional de reforestación y conservación de suelos en las cuencas hidrográficas de la región Piura” ANA que utilizó el modelo SWAT para estimar la producción de sedimento que producen las cuencas, obteniendo valores para la Subcuenca Yapatera un valor de  $14.106 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  valor que se aproxima al resultado obtenido en nuestro estudio.

Camacho (2012) tuvo como objetivo principal evaluar áreas de erosión hídrica por interacción de precipitaciones máximas con la finalidad de proponer medidas de mitigación frente a este suceso y en su evaluación utiliza la ecuación USLE para evaluar dicho fenómeno. Además, realizó dos análisis de vulnerabilidad erosiva con la variación del factor (C) de cobertura en la ecuación USLE y la aplicó a diferentes tiempos de retorno en la subcuenca hallando valores de 52 a 87  $\text{t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  en el primer análisis y en el segundo análisis se obtuvo valores de 18.8 a  $30.2 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  para los periodos de retorno de 5, 10, 25,50 y 100 años, y concluyó que la interacción del factor de cobertura vegetal sobre la protección de los suelos es muy importante, por lo que determina que la medida más efectiva de mitigación es la agroforestería utilizando la especie *Guadua sp.* (Bambú) en la zona de estudio.

Ccama (2012) realizó una investigación referida a la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica utilizando técnicas de teledetección y SIG, la cuenca del río Ilave, con el objetivo de estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica mediante USLE, Los valores obtenidos muestran que la cuenca del río Ilave posee, el 5.9 % de su superficie con riesgo de degradación por erosión hídrica crítica ( $>200 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ), los riesgos de degradación muy alta ( $100 - 200 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) cubren el 14.19% de la cuenca, los riesgos de degradación alta ( $50 - 100 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) ocupan una superficie de 9.65%, los riesgos de degradación media ( $25 - 50 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) ocupan una superficie de 21.23%, los riesgos de degradación

moderada ( $5 - 25 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) ocupan una superficie de 34.71% y los riegos de degradación baja ( $<5 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) cubren una superficie de 14.32%.

Tapia (2011) tuvo como objetivo principal evaluar la pérdida de suelo por erosión hídrica y el efecto de la construcción de zanjas de infiltración en el control de las mismas. Realizó dicho trabajo usando varillas de erosión en laderas semiáridas de la sierra peruana tomando como muestra 22 microcuencas, cuyos promedios de erosión con zanjas de infiltración y sin zanjas fueron de 24.44 y 45.04  $\text{t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  respectivamente, y llegó a la conclusión de que las zanjas de infiltración son una práctica efectiva para el control de la erosión y la captación de agua de lluvia en laderas.

Jiménez *et al.* (2008) desarrollaron una metodología para zonificar áreas en función del riesgo de erosión en forma cualitativa tomando como muestra la subcuenca del río Chalaco, en la región de Piura, debido a que esta región es afectada por la Ocurrencia del Fenómeno del Niño, hallando que más de la mitad del área presenta un riesgo de erosión alto (48%) o muy alto (15%); donde concluyen que el efecto más dañino se da no sólo en la cuenca alta (donde hay deforestación y malas prácticas agrícolas), sino que el mayor daño lo sufre la cuenca baja, por lo que es necesario tomar medidas de control de pérdida de suelo: barreras vivas, zanjas de infiltración y terrazas de banco, esta última la recomienda para pendientes entre 20 y 40%.

Roncal (2006) realizó una investigación con el objetivo de determinar la influencia de las plantaciones forestales en el control de la erosión, y la comparación de la escorrentía superficial y la erosión en dos microcuencas (una con cobertura de pastos y otra con plantaciones forestales en la zona de Porcón – Cajamarca). Para ello, utilizó dos formas diferentes de determinar el índice de erosividad, uno que considera una erosividad mayor a 25 mm/h y el clásico propuesto en el USLE. Además, utilizó el método de parcelas de varillas de erosión establecidas en dicha zona, y llegó a la conclusión de que la cobertura de las plantaciones forestales resulta más eficiente en el control de la erosión que los pastos cultivados.

Yataco (2007) con el objetivo de conocer la interacción de la cobertura vegetal y la pendiente en la erosión hídrica utilizando para esto un método de evaluación de

campo, la cual se basa en el registro de mediciones en varillas en parcelas de erosión. Este método no solo permite cuantificar la erosión así como la sedimentación que se produce, tomando como muestra suelos con pendientes de 20° y 30° con 3 grados de cobertura vegetal: densa, rala y sin cobertura, realizando mediciones cada 15 días, en la que concluye que la erosión hídrica en suelos sin cobertura fue mayor a la de un suelo con cobertura vegetal, debido a que la cobertura vegetal nativa “ichu” actúa como un eficiente protector del suelo disminuyendo considerablemente la erosión, además que la erosión en suelos sin cobertura y con 20° y 30° de pendiente alcanzan valores de 7.7 y 30.9 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> respectivamente.

Canaza (2008) en su trabajo de investigación, evaluación de procesos, factores de erosión y plan de manejo y conservación de suelos en la microcuenca Chinchera -Puno determinó que las tormentas erosivas durante el periodo 1978-1988, que representan el 13.4% de la lluvia total, determinó un índice de erosión anual factor (R) de la Ecuación Universal de Perdida de Suelos de 57.1 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. La degradación específica del suelo determinado por el índice de Fournier fue de 27.46 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, estas cifras confirman la alta agresividad climática de la zona.

Alegre y Rao (1996) realizaron un trabajo de investigación con el objetivo de evaluar el potencial de conservación de suelos y agua mediante el uso de setos de *Inga edulis* “guaba”, en el trópico húmedo en Yurimaguas con más de 6 años de observación (octubre de 1987-diciembre de 1993). El experimento consistió en dos tratamientos: a) los cultivos únicos de arroz y frijol en rotación anual y b) el cultivo anual intercalado de guaba (contorno 4 m de distancia), obteniendo como resultado que el segundo tratamiento conserva en promedio anual 287 mm de agua y 73 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> de suelo, lo que representó el 83% y 93% respectivamente de las cantidades que se perdieron de monocultivo, manteniéndose los nutrientes del suelo a un nivel mucho más alto y mejorando las condiciones físicas del suelo en comparación con el monocultivo de plantas anuales.

### 1.2.2 A nivel internacional

Castro (2017) estimó la erosión potencial hídrica (EP), la cual causa degradación y afectación a la fertilidad del suelo reduciendo el rendimiento del cultivo e incrementando los costos en producción, utilizando la Ecuación Universal de

Pérdida de Suelo (USLE); se encontró en los municipios de Buenavista, Calarcá, Córdoba, Pijao y Génova (Colombia) presentaron más del 27 % del área de estudio con valores de calificación de pérdida de suelo Moderada, Alta y muy Alta que va desde las 26 o más de  $100 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

Olivares, Lobo y Verbist (2014) plantearon el objetivo de evaluar el modelo USLE en la estimación de la erosión hídrica en un Alfisol en la comuna de San Pedro, Chile. La evaluación de pérdida de suelo se evaluó con datos de sedimentos de cada evento de lluvia durante el periodo 1996-2000, realizados en parcelas con tratamiento subsolado, zanjas de infiltración y pradera natural. Además, en la evaluación del factor (R) uso aproximación de Arnoldus (IFM) y la ecuación propuesta por ICONA en España, a las condiciones de Chile. Sus resultados muestran que los datos obtenidos por ambos métodos proporcionan valores que se ajustan bien a los valores registrados en campo. Finalmente, concluye que el modelo USLE fue capaz de establecer aproximaciones con relación a la tendencia de los datos, es decir, los datos fueron consistentes y siguieron el mismo patrón de los datos tomados en campo.

Ovalles (2013) planteó como objetivo principal de su investigación desarrollar un modelo para representar la erosión potencial del suelo a nivel de la cuenca de la presa Sabana Yegua aplicando la ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), y comparar estadísticamente los resultados con mediciones directas en la red de parcelas permanentes para la medición de erosión. Usa el método empírico RUSLE a través de los SIG y el método de directo de parcelas de escorrentía de un proyecto existente en la cuenca de estudio. Los resultados encontrados arrojan que por el primer método la pérdida de suelo fue de  $163 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  y el método directo fue de  $10.4 \text{ t.ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ , llegando a la conclusión que, por su metodología aplicada, precisión de las fuentes espaciales, la temporalidad y distribución de las mediciones, no pueden ser comparables estadísticamente, dado que la ecuación RUSLE no cuenta con el factor P y las parcelas de escorrentía están instaladas bajo sistemas de conservación de suelo.

Quiñonez (2012) planteó como objetivo primordial describir las evidencias de degradación del suelo y sus causas en los sistemas de producción agrícolas predominantes en la microcuenca Torjá, usando una metodología empírica para la

observación de la erosión hídrica del suelo en el cultivo del café, maíz y frejol tomando en cuenta variables física y biofísicas como hojarasca, profundidad de materia orgánica, porcentaje de suelo desnudo, altura del dosel, entre otras. Además, hace uso de parcela de varillas de erosión en el cultivo de maíz. Encontró que la erosión del suelo en cultivos de maíz y sistemas agroforestales de café la superficie del suelo afectada es de 65% y 16% respectivamente, mientras que en el cultivo del maíz la erosión en surcos fue de 21.8 m<sup>3</sup>/ha en un periodo de 28 días en el cultivo del café no se realizó esta evaluación por ser mínima, 0.1% frente al 5% en el maíz. Se concluye que el cultivo del café es más sostenible que el cultivo de maíz.

Oyarzun (1993) planteó el objetivo principal evaluar los efectos de la tala rasa sobre las pérdidas de suelo en plantaciones de *Pinus Radiata* mediante la ecuación USLE en la cuenca del río Bío Bío. Realizó mediciones de sedimentos en parcelas de escorrentía de 110 m<sup>2</sup> equipadas con muestreadores Coshocton, durante los años 1991 y 1992 establecidas bajo los tratamientos de tala rasa con residuos y sin residuos y un control con condiciones no alteradas. Sus resultados indican que hay un incremento significativo en el tratamiento sin residuos frente al control y con residuos. Concluye que la erosión medida con la erosión predicha por el modelo U.S.L.E. sobrestimó las pérdidas de suelo en el 22% a nivel anual y un 41% a nivel mensual.

Mahala (2018) determino la erosión en un medio tropical, mientras que Kisan, Khanindra, Narayan y Kumar (2015) informa sobre el análisis cuantitativo de los cambios en la erosión del suelo durante 7 años debido a las operaciones mineras, Mustefa, Fufa y Takala (2019) utilizó la ecuación de pérdida de suelo universal revisada, generando los mapas donde los factores de la ecuación se generaron e integraron en ArcGIS; mientras que Dutta, Das, Kundu y Taj (2015) predijo el riesgo potencial de erosión del suelo en la cuenca hidrográfica de Sanjal en Jharkhand utilizando datos de TRMM, entrando valores pérdida de suelo estimada por RUSLE que varían entre 0.2 y 61.4 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. (Lee y Lin, 2015) para la zona sur de Taiwan, con una precipitación anual entre 1300 y 4000 mm, calculo el factor de erosividad (R) entre los valores de 15000 a 70000 MJmm ha<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>.

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1 Definición del problema

A medida que la población regional, nacional y mundial crece, se incrementa la presión sobre el medio ambiente debido a la demanda de los recursos naturales, como la demanda de más áreas de cultivo para la producción de alimentos y a falta de ello genera las migraciones por la supervivencia.

El suelo es un recurso natural que corresponde a la capa superficial de la corteza terrestre en la que viven numerosos organismos y crece la vegetación, es una estructura de vital importancia para el desarrollo de la vida, es un recurso básico renovable de las sociedades si es conservado adecuadamente, en caso contrario se genera pérdidas de suelo que conducen al deterioro del medio ambiente y al empobrecimiento de los pueblos.

Si bien es cierto en la naturaleza ocurren fenómenos naturales como el ciclo hidrológico, que genera el recurso hídrico, principal fuente de desarrollo sostenible de la economía de la población, como también acarrea grandes estragos de erosión ó pérdida de suelos con la consiguiente desertificación y pobreza.

La erosión es la pérdida del suelo fértil debido a que el agua y el viento normalmente arrastran la capa superficial de la tierra, el suelo en suspensión es llevado desde las partes altas hacia las partes bajas de los valles o mar. El ser humano en un constante esfuerzo por la sobrevivencia, sacrifica el futuro de su ecosistema, acelerando los procesos de deterioro de los suelos como: la destrucción de la cubierta vegetal por la labranza excesiva, el sobrepastoreo, la deforestación, la minería, del cultivo migratorio que han llevado más allá del límite de tolerancia.

La erosión hídrica se debe a la dispersión y al poder de transporte del agua, como se produce de la erosión por salpicadura ¿donde las partículas del suelo se desprenden de la superficie del suelo por la acción de la gota de lluvia y luego se transportan con la escorrentía superficial (Hardoha, 2018).

La erosión del suelo es un problema importante causando la pérdida de la capa superior del suelo y la fertilidad en tierras agrícolas en terrenos de ladera (lai *et al.*,2016) la erosión mundial del agua es una grave amenaza para la sostenibilidad de la agricultura (Liu, Fu, Liu, Zhao y Wong 2019), la erosión del suelo se está acelerando en todos los continentes y está degradando unos 2 000 millones de hectáreas de tierras de cultivo y de pastoreo (Lal, 1990) lo que representa una serie amenaza para la seguridad alimentaria. Se estima que alrededor de 1000 millones de hectáreas de tierra en el mundo se erosionan por el agua.

Evidentemente un factor a tener en cuenta es el propio suelo que, dependiendo de sus características físicas, la morfología del terreno y el clima, va a presentar distintos grados de erosión, así la erodabilidad de los suelos frente a la erosión está marcada por el poder de adhesión de sus partículas constituyentes y por su capacidad de infiltración, los suelos sensibles a la erosión son aquellos que tienen sus partículas débilmente unidas y con una permeabilidad muy baja.

En la región de Puno específicamente en la comunidad de San Francisco de Chañajari comprendida dentro del ámbito de la microcuenca del río Chañajari no se tiene estudios o investigaciones relacionados a la erosión por lo que se hace necesario su estudio para determinar el volumen de suelo que se pierde cada año y generar una conciencia de manejo y conservación de suelos con propuestas de mejor uso, para aumentar la producción agrícola; la producción de alimentos es de subsistencia dirigida al autoconsumo por factores como: propietarios de pequeñas parcelas, ubicados en diferentes lugares y pisos ecológicos, lo que determina su vocación productiva, pobreza y migración a continuación se presenta cuadros de migración en las tablas 1 y 2.

Tabla 1  
*Censo población y vivienda 2007*

CÓDIGO	CENTROS POBLADOS	REGIÓN NATURAL (según piso altitudinal)	POBLACIÓN NOMINALMENTE CENSADA	VIVIENDAS PARTICULARES	ALTITUD	REGIÓN NATURAL
83	Chuncani	SUNI	54	34	4008	SIERRA
84	Chañajari	SUNI	133 = 187	83= 117	4001	SIERRA

Fuente: INEI

Tabla 2  
*Censo población y vivienda 2017*

CÓDIGO	CENTROS POBLADOS	REGIÓN NATURAL (según piso altitudinal)	POBLACIÓN NOMINALMENTE CENSADA	VIVIENDAS PARTICULARES	ALTITUD	REGIÓN NATURAL
83	Chuncani	SUNI	29	41	3898	SIERRA
84	Chañajari	SUNI	100 = 129	79= 120	3950	SIERRA

Fuente: INEI.

Tasa de despoblación  $187-129=58=31\%$

## 2.2 Enunciado del problema

Las preguntas a resolver en la investigación son:

### 2.2.1 Pregunta general

¿Cuánto es el volumen de pérdida de suelo por la acción de la erosión hídrica en la comunidad de San Francisco de Chañajari mediante el método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)?

### 2.2.2 Preguntas específicos

- ¿Cuánto es el índice de erosión de las precipitaciones pluviales durante el periodo 2008 al 2017 en la comunidad de San Francisco de Chañajari?.
- ¿Es posible determinar los componentes de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) en el ámbito de la comunidad de San Francisco de Chañajari?.
- ¿Qué acciones de conservación de suelos se debe implementar para disminuir la erosión hídrica en el ámbito de la comunidad de San Francisco de Chañajari?

### 2.3 Justificación

El crecimiento de la población mundial a ocasionado un incremento en la demanda global de áreas de cultivo para la producción de alimentos, a falta de ellos incrementa la pobreza y las migraciones hacia las áreas urbanas por la supervivencia. Los estudios y proyectos realizados por el Ministerio de Agricultura, las investigaciones realizadas por las instituciones públicas y privadas han sido solamente de carácter de inventario de erosiones, las cuantificaciones que se han llevado a cabo son en base a unas cuantas variables no se aplicaron metodologías que incluyan tecnologías de punta, por tanto esta investigación no pretende quedarse en una lista más, si no que sirva como base para acrecentar la producción de alimentos, tomar medidas de control para recuperar la productividad de los suelos degradados.

Evidentemente un factor a tomar en cuenta es el propio suelo, que dependiendo de sus características presentan distintos grados de erosión, la erodabilidad está marcada por el poder adhesivo de sus partículas constituyentes. Los suelos de permeabilidad muy baja, así mismo la disminución de la capa arable está sujeto a ser deteriorado la estructura por el impacto directo de las gotas de lluvia.

Una herramienta para estimar la pérdida de suelo es la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), que permite obtener tasas de erosión para varios sistemas de uso y manejo en unidades de tierra específicas, combinando la información proveniente de la investigación relacionada con la erosión hídrica para proporcionar datos de diseño en los planes de conservación (López , Herrera y Tobias, 1990, Wischmeier y Smith, 1978), cuando estas tasas se comparan con la erosión tolerada, permite definir y seleccionar las combinaciones de cultivo y manejo que posibiliten un control adecuado de la erosión. La (USLE) faculta a los productores para llevar a la práctica los resultados obtenidos en la investigación para la conservación del suelo (Becerra, 1999) se plantea alternativas de manejo y conservación.

Para garantizar la seguridad alimentaria y la vida, a los efectos de la pérdida de suelos en la zona en estudio se podrá proponer alternativas de manejo y conservación del recurso suelo, para evitar mayor degradación expuestos a la erosión, se propondrá buenas prácticas agrícolas, construcción de andenes, surcos en contorno, zanjas de infiltración, aplicación de materia orgánica y para la estabilización de suelos con cultivos de especies nativas y tintóreas que tienen la propiedad de enraizamiento fasciculada y profundo.

## 2.4 Hipótesis

### 2.4.1 Hipótesis general

El volumen de pérdida de suelo por acción de la erosión hídrica en la comunidad de San Francisco de Chañajari Moho -Puno, se determina utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.

### 2.4.2 Hipótesis específicas

- El índice de erosión de las precipitaciones durante el periodo 2008 al 2017 en la comunidad de San Francisco de Chañajari, se determina mediante métodos indirectos.
- Los componentes de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, para el ámbito de la comunidad de San Francisco de Chañajari, se determinan para conocer el volumen de pérdida de suelo.
- Las acciones de manejo y conservación de los recursos suelo y agua se determinan para aumentar la producción agrícola en la comunidad de San Francisco de Chañajari.

## 2.5 Objetivos

### 2.5.1 Objetivo general

Estimar el volumen de pérdida de suelo por la acción de la erosión hídrica, utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo, en la comunidad de San Francisco de Chañajari Moho -Puno.

### 2.5.2 Objetivos específicos

- Determinar el índice de erosión de las precipitaciones mediante métodos indirectos durante el periodo 2008 al 2017 en la comunidad de San Francisco de Chañajari,
- Obtener los parámetros de la ecuación universal de pérdida de suelo para el ámbito de la comunidad de San Francisco de Chañajari,

- Proponer acciones de conservación de suelos para disminuir la pérdida de suelos por erosión hídrica en la comunidad de San Francisco de Chañajari.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Lugar de estudio

La investigación se realizó en el ámbito de la microcuenca del río de Chañajari.

##### 3.1.1 Ubicación

###### a. Geográfica

Coordenadas geográficas : Latitud Sur 15°23'49.887" a 15°25'12.677".

Longitud Oeste 69°28'37.472" a 69°25'49.651".

Coordenadas UTM (WGS84) : Norte 8297710 a 8295138 m.

Este 448807 a 453824 m.

Variación altitudinal : 3905 a 4396 m.s.n.m.

###### b. Política

Región : Puno.

Provincia : San Pedro de Moho.

Distrito : San Pedro de Moho.

Comunidad : San Francisco de Chañajari

###### c. Hidrográfica

Vertiente : Lago Titicaca

Cuenca : Río Pachararía

Microcuenca : Río Chañajari

Codificación Ppasteter : 01712

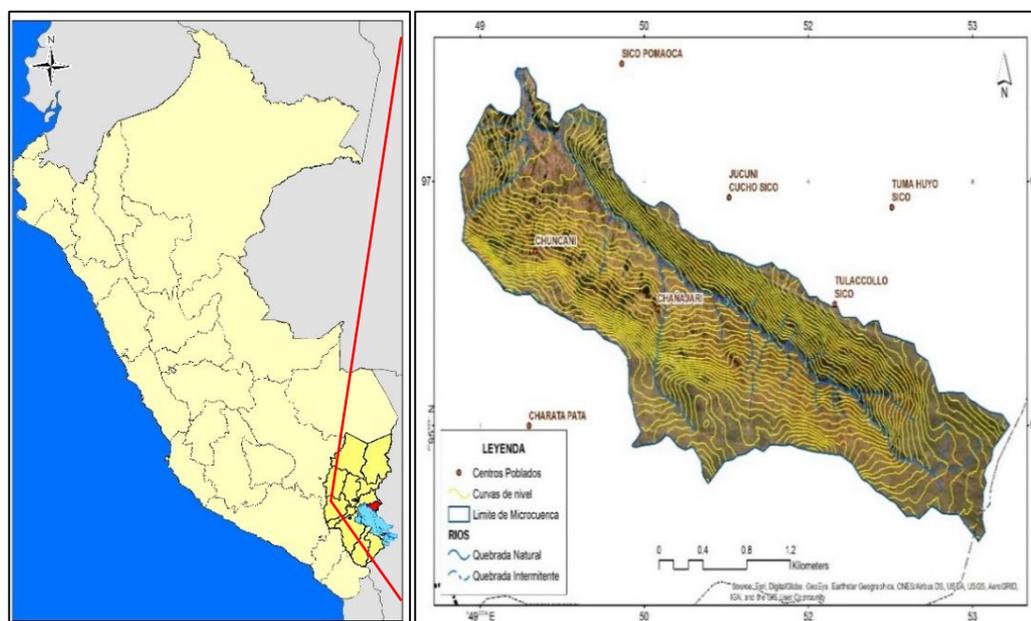


Figura 4. Ubicación de la microcuenca del río Chañajari



Figura 5. Vista panorámica de la microcuenca del río Chañajari

## 3.2 Caracterización del ámbito en estudio

### 3.2.1 Extensión

La comunidad de San Francisco de Chañajari cuenta con una superficie de 361.5 has, inscrita en registros públicos con partida electrónica N° 05047339, comprendida dentro del ámbito de la microcuenca del río Chañajari con una superficie de 532.7 hás. Y debido a sus características físico, ambientales y sociales es representativa por las condiciones de alta montaña.

### 3.2.2 Geología

Esta unidad fue designada como Grupo Moho, por Ingemmet (1993) esta formación descansa sobre la Arenisca Huancané con un cambio marcado en la litología en unos 4 ó 5 m pasando de predominantemente areniscosa a una secuencia limolítica y fangolítica de color rojo.

Esta microcuenca está constituida por montañas y colinas de rocas sedimentarias formación Vilquechico, disectadas como lutitas de color marrón rojo de grano fino, con la gran acumulación de material detrítico en el río

La parte basal de la secuencia está dominada por sedimentos de color marrón rojizo de grano fino y en la parte media es mayormente de limonita y fangolita color caqui gris y marrón. Fangolitas calcáreas delgadas con lignito alóctono, y capas con fósiles esparcidos se encuentran en esta parte media, aunque en muchas localidades los sedimentos de grano fino, parecen ser cortados por una gruesa secuencia de areniscas con estratificación cruzada. Al tope de la secuencia se retorna a una litología compuesta de fangolitas y limolitas rojas.

Fotogeológicamente no hay rasgos diagnósticos. Las características de las unidades areniscosas y fangolíticas de estratificación delgada están marcadas por colinas de una coloración ligeramente más clara que son muy persistentes, algunas de ellas se pueden trazar por varios kilómetros a lo largo del rumbo.

### 3.2.3 Climatología

Según la clasificación de Thornthwaite, el clima es templado subhúmedo seco. La temperatura media anual es de 8.7 °C, la precipitación media anual histórica de

885.1 mm. Con una marcada distribución temporal. La humedad relativa media anual es del 63% y la evaporación total anual de 1510.2 mm.

#### **a. Temperatura**

El aire se calienta o enfría a partir del suelo por distintos métodos de transmisión y por los cambios de estado físico del agua atmosférica de modo que, la temperatura constituye un factor limitativo para el desarrollo de las plantas, como para la agricultura; en consecuencia, el estudio de esta variable merece una atención especial.

En la microcuenca del río Chañajari, la variación de la temperatura media es de 6.3 a 10.1 °C, que corresponden a los meses de julio y noviembre, respectivamente; y la temperatura media anual es de 8.7 °C. La temperatura máxima mensual varía de 13.5 a 15.9 °C, que corresponden a los meses de junio y noviembre, respectivamente; y la temperatura máxima promedio anual es de 14.6 °C. La temperatura mínima mensual varía de -1.0 a 5.3 °C, que corresponden a los meses de julio y enero, respectivamente; y la temperatura mínima promedio anual es de 2.7 °C.

#### **b. Precipitación**

La precipitación es una de las variables climáticas más importantes que influyen en la producción agrícola, puesto que la precipitación pluvial es normalmente la única fuente de humedad proporcionada al suelo.

El período de lluvias de mayor magnitud comienza a partir del mes de diciembre y se prolonga hasta marzo y el período seco (invierno), comprende los meses de mayo a setiembre, las precipitaciones son mínimos.

En la microcuenca del río Chañajari, la precipitación total mensual varía de 7.0 a 200.2 mm, que corresponden a los meses de junio y enero, respectivamente y la precipitación total anual es de 885.1 mm.

#### **c. Humedad relativa**

La humedad relativa se define como el porcentaje de saturación del aire con vapor de agua. El factor determinante de la humedad relativa es la temperatura, el cual

permite saber cuánto de vapor de agua hay en la atmósfera. Se expresa en porcentaje.

En la microcuenca del río Chañajari, la mayor humedad relativa se presenta en el mes de febrero con 71% y la menor en el mes de junio con 55%; mientras que la humedad relativa promedio anual es de 63%.

#### **d. Evaporación**

La evaporación es el proceso físico mediante el cual el agua se convierte a su forma gaseosa. La evaporación del agua a la atmósfera ocurre en la superficie de ríos, lagos, suelos y vegetación. Dentro de los métodos directos más empleados en el mundo está el tanque de evaporación clase A, que consiste en la medida de la evaporación partiendo de una superficie de agua, ésta se hace estableciendo la medida de la disminución de una superficie de agua a partir de una superficie evaporante en milímetros (mm).

En la microcuenca del río Chañajari, la evaporación total mensual varía de 102.5 a 135.7 mm, que corresponden a los meses de junio y diciembre, respectivamente; y la evaporación total anual es de 1510.2 mm.

#### **e. Horas de sol**

Las horas de sol es el número de horas por día de luz solar brillante. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI, mide la duración de insolación diaria con el aparato meteorológico llamado heliógrafo.

En la microcuenca del río Chañajari, la mayor horas de sol se presenta en el mes de junio con 9.70 horas y la menor en el mes de enero con 5.80 horas y las horas de sol promedio anual es de 7.87 horas.

#### **f. Viento**

El viento es el movimiento de aire en la superficie terrestre, esto es generado por la acción de gradientes de presión atmosférica producida por el calentamiento diferencial de las superficies y masas de aire.

En la microcuenca Chañajari, la mayor velocidad del viento se presenta en el mes de octubre con 2.1 m/s (viento moderado) y la menor en el mes de junio de 1.4

m/s (viento suave a moderado) y la velocidad del viento promedio anual es de 1.8 m/s.

### 3.3 Población

Como la variable en estudio es la pérdida del suelo por erosión hídrica la misma que está en función a las precipitaciones, la población a considerar es la información de 02 estaciones meteorológicas: Huaraya - Moho e isla Soto, ubicada en la zona aledaña al ámbito de la microcuenca.

### 3.4 Muestra

La muestra a considerar es de 02 estaciones meteorológicas en referencia, con registro histórico de 10 años de precipitaciones, para determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica.

### 3.5 Materiales

#### 3.5.1 Información cartográfica

Las cartas nacionales utilizadas son del Instituto Geográfico Nacional IGN, a escala 1/100000 proyección: Universal Transversa de Mercator (*UTM*), Elipsoide o Datum Horizontal: World Geodesic System 1984 (*WGS-84*), zona 19L sur donde se ubica la zona en estudio, la escala de trabajo es 1/20000, y el área mínima cartografiable de 01 cm<sup>2</sup> en el mapa corresponde a 04 hectáreas de terreno.

#### 3.5.2 Información meteorológica

Los datos meteorológicos fueron proporcionados por la oficina del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI-PUNO), con fines de investigación correspondientes a las estaciones pluviométricas de Huaraya - Moho e Isla Soto - Conima los mismos que se presentan en el anexo 1.

#### 3.5.3 Recolección de datos

Se realizaron salidas al campo para los cuales se agruparon en rubros los trabajos y los materiales necesarios como: Vehículo para la logística, cámara fotográfica, GPS navegador, la tabla de colores MUNSSELL, formatos e insumos para excavar y describir los perfiles.

### 3.6 Método de investigación

La investigación es un estudio de tipo cuantitativo ya que es secuencial y probatorio; por otro lado, es aplicada por lo que los objetivos de la investigación son parte de la realidad concreta que se da en el tiempo (2008-2017) y en el espacio (Microcuenca del río Chañajari)

### 3.7 Procedimiento metodológico

Para determinar las unidades fisiográficas de la cuenca se estableció un matriz de variables e indicadores, luego un esquema conceptual y el flujo de proceso SIG.

Tabla 3  
*Matriz de variables e indicadores*

MODELO	PARÁMETROS	VARIABLES	CRITERIO DE EVALUACIÓN
MODELO DE EROSION HIDRICA	Desencadenantes	Índice de erosividad pluvial (R)	Precipitación total anual
		Índice de erodabilidad del suelo (K)	Suelos
	Condicionantes	Factor topográfico (LS)	Pendientes
		Índice de cobertura vegetal del suelo (C)	Cobertura Vegetal
		Índice de prácticas de conservación de suelos (P)	Uso Actual de Tierras

Así mismo la siguiente figura muestra el procedimiento de forma conceptual.

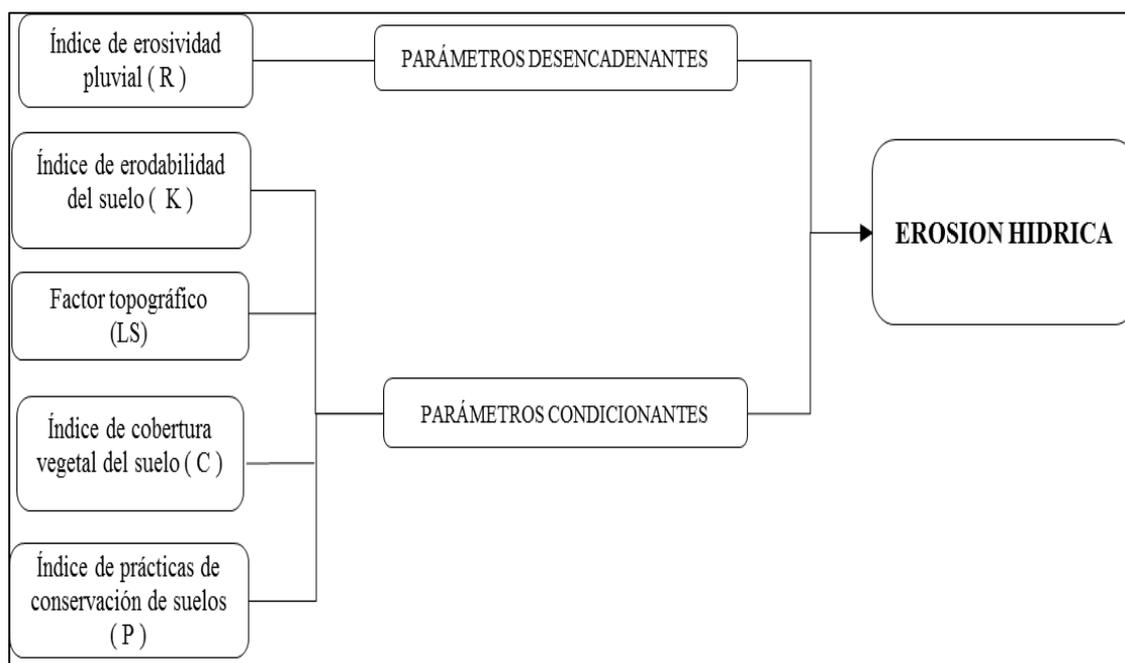


Figura 6. Esquema conceptual del modelo de erosión hídrica

Para la obtención cartográfica de erosión hídrica se elaboró un esquema de modelo conceptual lógico, en la cual se identificó el procedimiento de proceso SIG que se siguió, así como por ejemplo la obtención de las variables tales como precipitación, suelos, cobertura vegetal, uso actual de tierras y pendientes.

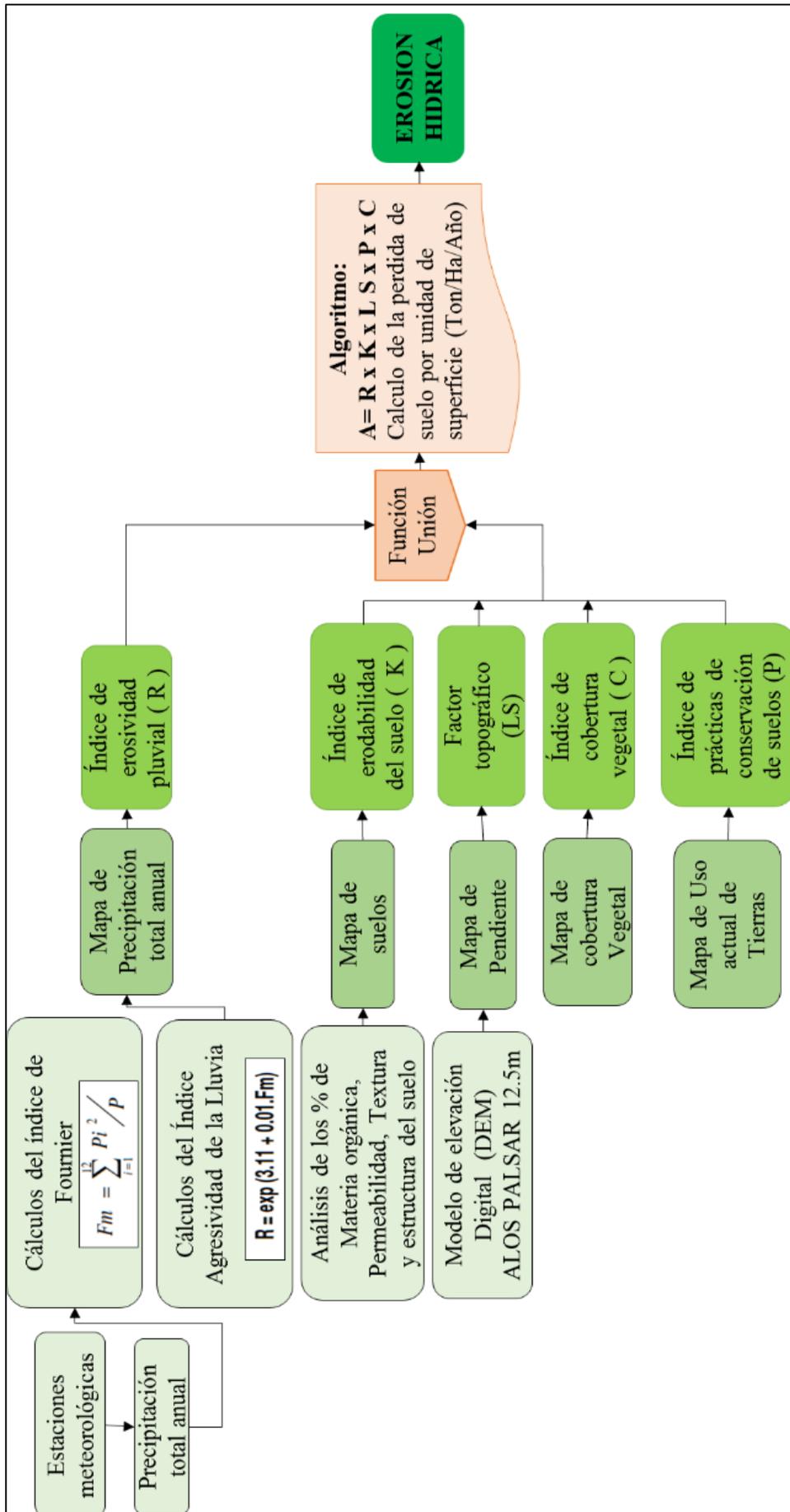


Figura 7. Modelo conceptual - lógico de erosión hídrica

### 3.8 Descripción del método por objetivos específicos

#### 3.8.1 Objetivo específico 1

Determinar el índice de erosión de las precipitaciones mediante métodos indirectos durante el periodo 2008 al 2017 en la microcuenca del río Chañajari

##### 3.8.1.1 Determinación del parámetro desencadenante o índice de erosividad pluvial (R)

Desde el punto de vista de precipitación el índice de erosividad de la lluvia (R) es un parámetro estimado a partir de datos de sus características que se correlacionan significativamente con las pérdidas de suelo, de acuerdo a Becerra (1999), la capacidad potencial es debida a la energía de la lluvia y la intensidad de la lluvia. Para el cálculo del factor (R), se utilizó con la modificación del índice de Fournier, propuesto por (FAO, 1980).

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

Donde:

$R$  = Factor de erosividad de la lluvia.

$P_i^2$  = precipitación total mensual en mm.

$P$  = precipitación total anual en mm.

$n$  = número de años.

Para determinar este parámetro, se emplea datos de precipitaciones pluviales de las estaciones pluviométricas de Huaraya - Moho e isla Soto, de los años de 2008 al 2017, datos proporcionados por la Oficina del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) -Puno.

Tabla 4  
 Datos de estación pluviométrica de Huaraya – Moho

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA - SENAMHI - PUNO												
DEPARTAMENTO : PUNO		PROVINCIA : MOHO		DISTRITO: MOHO		INFORMACIÓN :PRECIPITACIÓN TOTAL						
ESTACIÓN : CO. 1107787		LAT: 15°23'17.8"		LONG: 69°29'13.4"		ALT: 3890						
HUARAYA MOHO												
AÑOS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2008	219.3	135.6	118	7	20.2	0	0	0	5.3	85	10.5	209.5
2009	85.2	87.8	47.8	15.5	2.2	0	5.8	0	12.5	48	124.4	158.6
2010	218.6	182.7	78.4	31.8	35.2	0.9	0	4.7	1.9	42.5	0.5	240.4
2011	56.7	140.5	107.8	8.6	9.9	0	5.6	2.3	48.6	45.9	55.6	186.6
2012	186.8	282.5	145	134.9	0.3	2.2	0	3.3	13.2	64.2	43.6	253
2013	190.4	184	67.2	11	25.3	16.3	8.3	11.8	0	115.2	36.6	186.3
2014	120.4	95.3	50.6	38.1	24	1	21.7	39.7	94.7	40.1	17.9	83
2015	212.5	158.3	50.4	157	11.1	1.5	9.5	10.4	38.7	65.9	108.9	117.5
2016	137.9	323.9	4.5	97.2	12.9	0	11.3	6.8	6.7	65.5	38.1	95
2017	183	67.6	218	86.9	40.3	0	2.5	0	62.3	74.5	41.3	96.4
PROMEDIO	161.08	165.82	89.77	58.8	18.14	2.19	6.47	7.9	29.39	64.66	47.74	162.63

Tabla 5  
 Datos de estación pluviométrica de Isla Soto

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA - SENAMHI - PUNO												
DEPARTAMENTO : PUNO		PROVINCIA : MOHO		DISTRITO: CONIMA		INFORMACIÓN :PRECIPITACIÓN TOTAL						
ESTACIÓN : CO. 110817		LAT: 15°33'44.2"		LONG: 69°29'19.8"		ALT: 3815						
ISLA SOTO												
AÑOS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2008	250.1	150.1	116	21.9	13.4	0	0.2	1.1	1.2	30.8	18.2	148.8
2009	119.6	172.7	105.8	36.3	0.3	0	10.2	0	15.1	5.2	130.3	249.7
2010	265.8	226.9	103.2	100.1	46.1	8.2	0	1.5	0	32.2	4	240.7
2011	70	257.8	208.7	10.4	14.9	3.1	16.2	0.8	25.7	84.1	36.1	222.2
2012	242.7	290.4	169.7	114.7	6.2	2.5	2.8	3.7	5.5	46.1	68.9	229
2013	256.1	258.4	83.1	15	45	9.7	25.7	13.6	0	92.4	41.7	329.9
2014	208.8	188.4	91.8	62	13.5	0	11.5	67.9	81	66.9	38.7	95.1
2015	247.1	141.6	88.7	190.2	12	0	1.2	18.04	33.5	47.1	60.9	110.3
2016	96	291.6	37.8	121.4	0	0	12.5	0.6	6.2	33.8	25.1	133
2017	192.1	165.9	234.4	98.2	55.9	3.6	6.6	0.4	83.5	39.5	7.9	63.7
PROMEDIO	194.83	214.34	124.82	77.02	20.73	2.71	8.69	10.76	25.17	47.81	43.18	182.24

A continuación, se muestra cartográficamente la precipitación total anual.

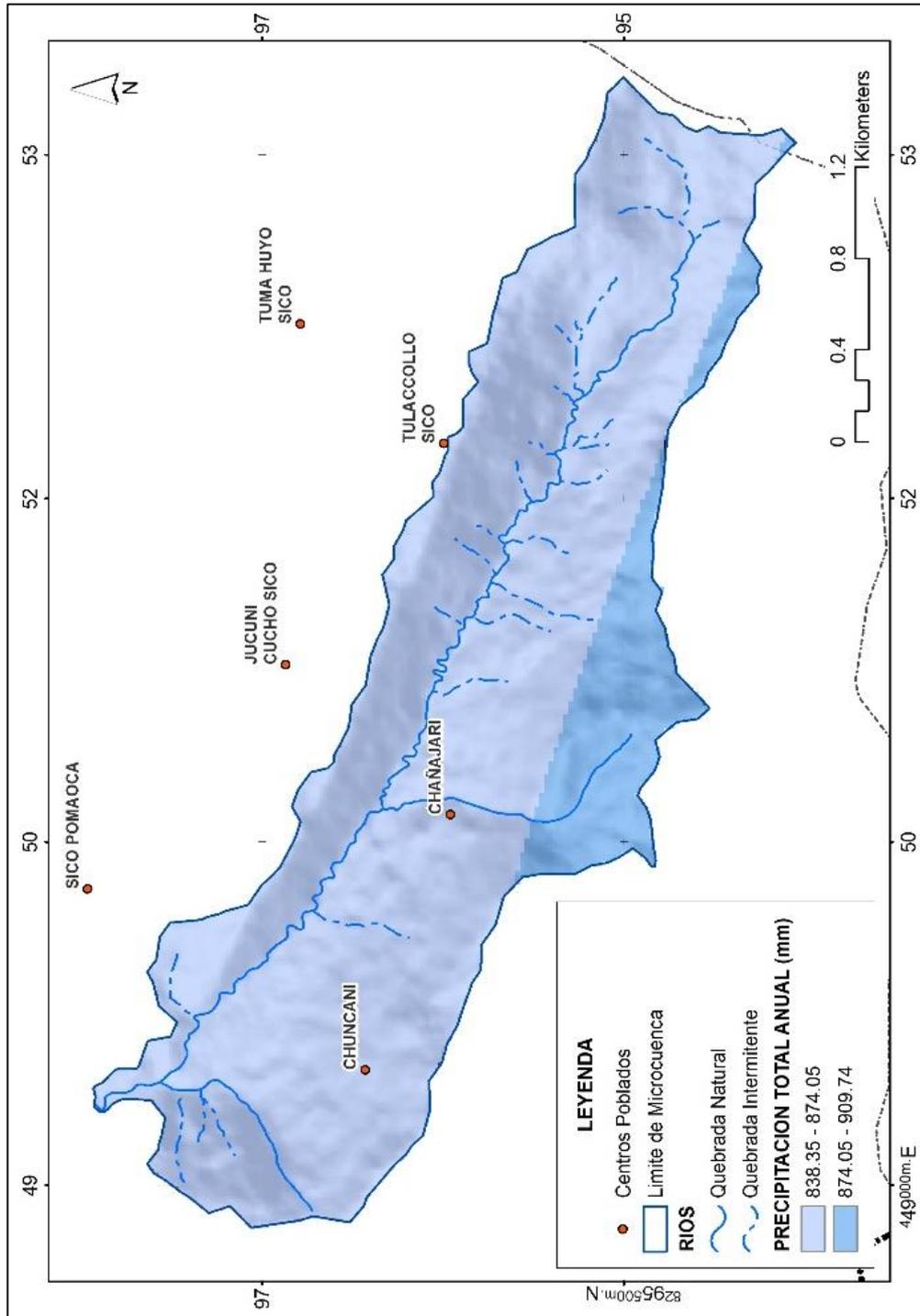


Figura 8. Mapa de Precipitación total anual de la microcuenca del río Chañajari

La variable de precipitación, se utilizó para obtener el factor de erosividad pluviual (R), que constó en la aplicación de la fórmula que se menciona en el párrafo anterior obteniendo así dicho factor.

Tabla 6  
*Determinación de factor R*

Estación	Total Anual	Índice de Fournier MENSUAL												R
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
ISLA SOTO	952.30	39.86	48.24	16.36	6.23	0.45	0.01	0.08	0.12	0.67	2.40	1.96	34.87	151.25
HUARAYA														
MOHO	813.59	31.89	33.80	9.91	4.25	0.40	0.01	0.05	0.08	0.99	5.14	2.80	32.51	121.82

Con la finalidad de ver la variabilidad del factor de lluvia durante el periodo del 2008 al 2017, en las estaciones meteorológicas de Huaraya - Moho e Isla Soto, se realiza el análisis estadístico, mediante la prueba estadística de t de student.

El cálculo de (R) de la lluvia se anexa en las tablas 30 y 31.

### 3.8.1.2 Prueba estadística t de Student

Mediante la prueba estadística “t” de Student se analiza si los valores promedios de erosividad obtenidos en la estación Huaraya y en la estación Isla Soto, para el periodo del 2008 al 2017, son estadísticamente iguales o diferentes, con un 95% de nivel de significancia, cuyo procedimiento es el siguiente:

Planteamiento de las hipótesis:

$H_p : \mu_1 = \mu_2$  (media poblacional)

$H_a : \mu_1 \neq \mu_2$

$\alpha : 0.05$

Cálculo de la desviación estándar de las diferencias de los promedios:

$$S_d = S_p \times \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}$$

$$S_p = \sqrt{\frac{((n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2)}{(n_1 + n_2 - 2)}}$$

Donde:

$S_d$  = Desviación estándar de las diferencias de los promedios.

$S_p$  = Desviación estándar ponderada.

$n_1$  = Número de datos del primer periodo

$n_2$  = Número de datos del segundo periodo

$S_1^2$  = Varianza del primer periodo.

$S_2^2$  = Varianza del segundo periodo

Cálculo del valor de  $T_c$ , según:

$$T_c = \frac{[(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)]}{S_d}$$

Donde:

$\mu_1 - \mu_2 = 0$  por hipótesis.

$T_c$  = Valor de T calculado.

$X_1$  = Promedio de la primera serie (Huaraya).

$X_2$  = Promedio de la segunda serie (Isla Soto).

Hallar el valor de “ $T_t$ ” de las tablas de t de Student con:

$\alpha = 0.05$

$$G.L = n_1 + n_2 - 2$$

Donde:

G.L = grados de libertad.

$T_t$  = T tabulado.

$\alpha$  = Nivel de significancia.

Conclusión:

Si  $T_c \leq T_t$  (95%)  $\rightarrow \bar{x}_1 = \bar{x}_2$  estadísticamente.

Si  $T_c > T_t$  (95%)  $\rightarrow \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$  son desiguales estadísticamente.

Para medir el grado de correlación entre los resultados de erosividad de las lluvias estimados en la estación Huaraya - Moho y los resultados estimados

en la estación Isla Soto, se realiza una regresión lineal simple, aplicando la siguiente ecuación:

$$Y = a + b X$$

Donde:

Y = Variable dependiente.

X = Variable independiente,

a y b coeficientes de la regresión.

### 3.8.2 Objetivo específico 2

Obtener los parámetros de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) para el ámbito de la microcuenca del río Chañajari

#### 3.8.2.1 Determinación de los parámetros condicionantes

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) ha sido empleada en todo el mundo para numerosos propósitos y en muy diferentes condiciones socioeconómicas y ambientales, siendo la más aceptada entre las personas encargadas de la gestión de cuencas con fines de producción o de conservación de suelos y de recursos hídricos.

Para determinar o procesar estos parámetros se emplea datos tomados en el campo como: Descripción de calicatas y perfiles, análisis de laboratorio, cobertura vegetal y prácticas de conservación de suelo.

##### a. Factor de erodabilidad (K)

El valor del factor de erodabilidad del suelo se puede determinar de dos maneras, de manera directa a través de la ecuación de erodabilidad o bien de manera gráfica; para lo cual es necesario obtener para ambos casos ciertas propiedades del suelo.

**Textura.** El análisis textural del suelo es para obtener los porcentajes de arena, limo, arcilla y arenas finas. De acuerdo a los manuales originales de

USLE, para efectos de la erosión del suelo la arena muy fina se comporta similar al limo.

**Materia Orgánica.** Se estima su proporción porcentual dentro del suelo, para lo cual se efectúa un análisis de las muestras obtenidas en campo. Según USLE, el porcentaje de materia orgánica oscila entre 0 y 4 %, con valores de números enteros, si el contenido fijado es más que el rango especificado, se asume un 4 %.

**Estructura del suelo.** Su determinación se efectúa mediante la observación visual y tacto, para lo cual es recomendable emplear algún manual de comparación, de acuerdo a la USLE las categorías y códigos empleados son solo cuatro, los mismos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7  
*Códigos USLE de estructura de suelo*

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

Fuente: Mancilla (2008).

El factor (K) en el Sistema Internacional de Unidades está expresado en  $\text{MJmm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{año}^{-1}$  que expresa la resistencia del suelo en superficie y tiempo, respecto a la energía de la lluvia.

**Permeabilidad del suelo.-** Para la permeabilidad se asignan valores o códigos de acuerdo a la velocidad de infiltración de cada suelo determinado, estos códigos son asignados por la USLE según Tabla 8.

Tabla 8  
*Códigos USLE de permeabilidad de suelos*

Código USLE	Categoría de permeabilidad
1	Rápida (más de 12.7 cm/hr)
2	Moderada a rápida (6.3 a 12.7 cm/hr)
3	Moderada (entre 2.0 y 6.3 cm/hr)
4	Lenta a moderada (entre 0.5 y 2.0 cm/hr)
5	Lenta (entre 0.13 y 0.5 cm/hr)
6	Muy lenta (menor a 0.13 cm/hr)

Fuente: Mancilla (2008).

Para determinar este factor, primero se identificó los tipos de suelo que se encontraron en dicha microcuenca, luego se representó espacialmente mediante la ayuda del trabajo de campo e imagen satelital que en este caso se utilizó la imagen satelital basemap del ArcGIS. Obteniendo así 8 unidades de suelos.

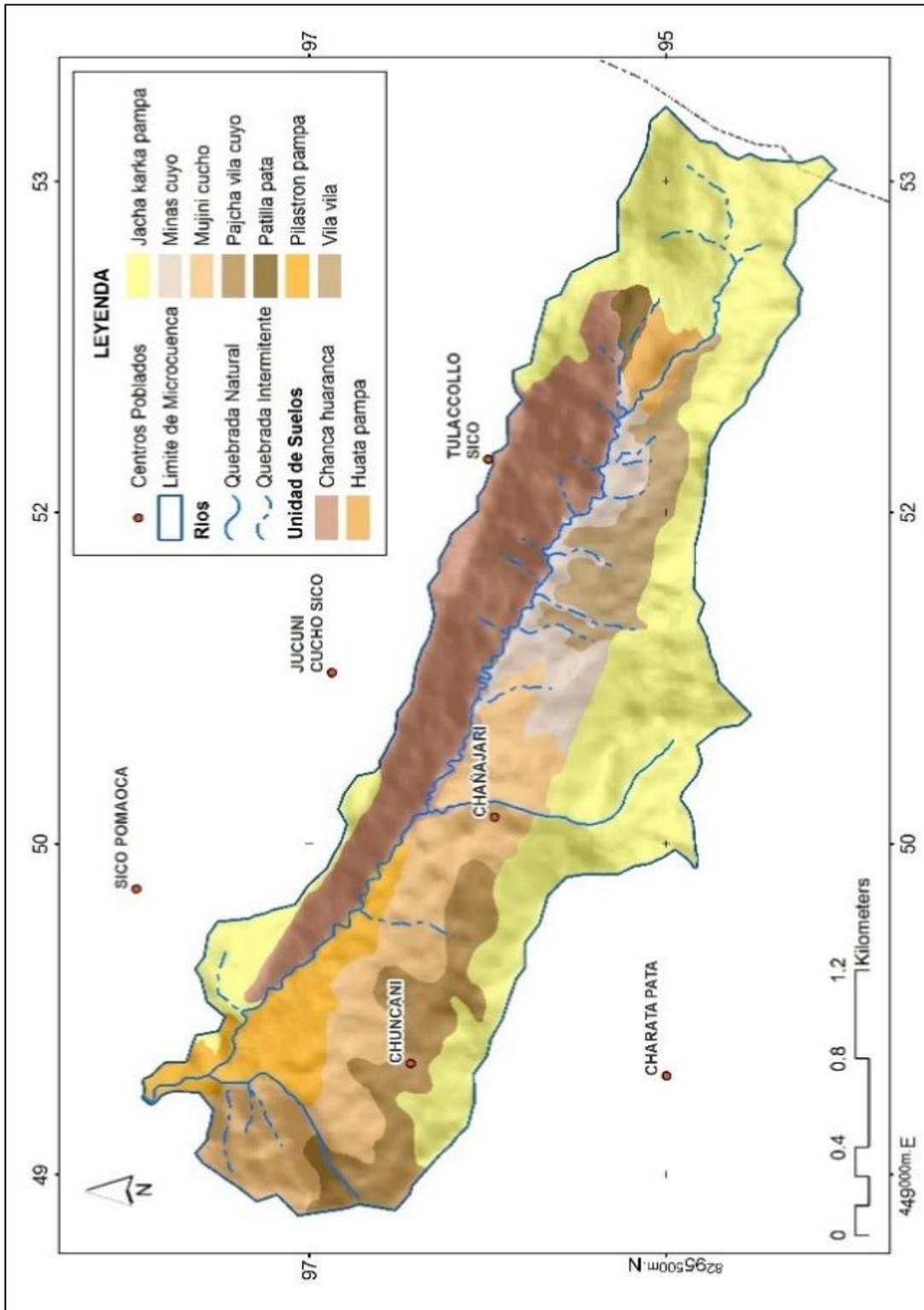


Figura 9. Mapa de suelos de la microcuenca del rio Chanajari

Luego de obtener el mapa de suelos, se determinó el factor de erodabilidad (K), utilizando los datos obtenidos de las calicatas, tales como permeabilidad, textura, estructura y materia orgánica del suelo, ya que esto es necesario debido a que son datos importantes para la aplicación de la fórmula para la obtención del factor (K).

$$K = \frac{((2.1 * 10^{-4} * M^{1.14} * (12 - a) + 3.25 * (b - 2) + 2.5 * (c - 3))}{100} * 1.317$$

Tabla 9  
*Determinación de factor K*

N°	Unidad de suelos	Textura	Ar	L	Arc	M	b	c	a	K
1	Mujuni cucho	masivo	12	55	33	4542.76	4	4	2.15	<b>0.52</b>
2	Pajcha vila cuyo	masivo	12	53	35	4173.16	4	4	2.85	<b>0.46</b>
3	Vila vila	masivo	95	2	3	9370.24	4	6	0.29	<b>1.28</b>
4	Huata pampa	masivo	13	62	26	5552.22	4	4	2.10	<b>0.63</b>
5	Jacha karka pampa	Media	37	37	26	5424.32	3	5	4.04	<b>0.51</b>
6	Patilla pata	masivo	16	72	13	7586.41	4	4	1.45	<b>0.89</b>
7	Karaña cucho	fino	11	57	33	4553.55	2	4	2.15	<b>0.44</b>
8	Minas cuyo	medio	60	11	30	4970.25	3	6	1.30	<b>0.63</b>
9	Chanca huaranca	fino	14	62	24	5760.80	2	4	2.15	<b>0.56</b>
10	Chilcani parque	fino	13	64	23	5975.29	2	4	1.80	<b>0.60</b>
11	Donato pampa	fino	11	55	35	4277.16	2	4	1.05	<b>0.45</b>
12	Pilastron pampa	masivo	43	27	30	4956.16	4	5	3.10	<b>0.55</b>

**b. Factor Topográfico (LS)**

Es el efecto de la topografía en la erosión, el factor (L) que viene a ser la longitud promedio del declive del terreno y el factor (S) que viene a ser la pendiente (Wischmeier y Smith, 1978).

**Longitud de la pendiente (L)**

La longitud se define como la distancia, desde el origen de la escorrentía superficial hasta el inicio del depósito de sedimentos, o que la escorrentía se concentre en un cauce.

Según Wischmeier y Smith (1978) el factor (L) viene a ser la longitud del declive que se estima con la siguiente ecuación:

$$L = (\lambda / 22.13) m$$

Donde:

L = Factor de longitud de pendiente

$\lambda$  = Longitud de la pendiente (m)

m = Exponente de la longitud de la pendiente

22.13 = Longitud de parcela unitaria USLE

El exponente de longitud de pendiente “m” determina la relación entre erosión en surcos (causada por flujo) y erosión entre surcos (causado por impacto de gotas de lluvia), puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$m = 0.1342 * \text{Ln} (\Theta) + 0.192$$

Dónde:

m = Exponente de la longitud de la pendiente

$\Theta$  = Ángulo de pendiente (%).

El exponente m depende de la inclinación de la pendiente de acuerdo a los valores de la Tabla 10.

Tabla 10

Valores del exponente m para el cálculo del factor L

Pendiente (%)	Valor de m
< 1.0	0.2
1 – 3.5	0.3
3.5 – 5.0	0.4
5.0 – 10.0	0.5
< 10	0.6

Fuente: Wischmeier y Smith (1978).

### Inclinación de la Pendiente (S)

Según Wischmeier y Smith (1978) el factor grado de la pendiente (S) se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S = 0.44 + 0.30 s + 0.043 s^2 / 6.613$$

Donde:

S = Factor de pendiente, adimensional.

s = Pendiente (%).

El mapa de pendiente se obtuvo en porcentajes que van de rangos de 0 a 2, 2 a 4, 4 a 8, 8 a 15, 15 a 25, 25 a 50, 50 a 75 y mayores a 75 %, tal como se muestra en la siguiente figura:

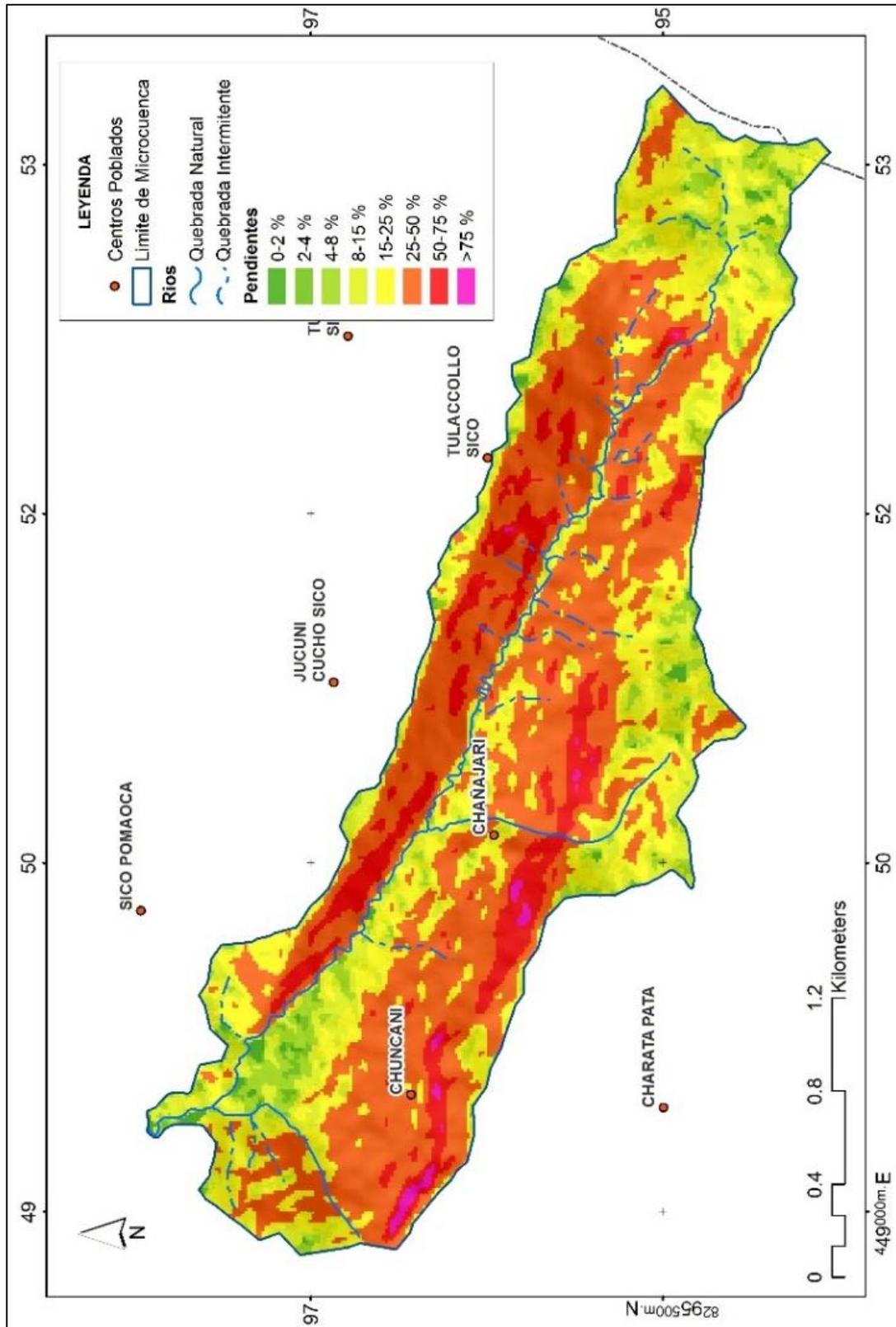


Figura 10. Mapa de pendientes de la microcuencia del río Chañajari

Para determinar el factor (LS) se emplea datos como: Longitud del río de 5280 m. pendientes y cotas de diferentes tramos. Para ello se utilizó el mapa de pendientes lo cual se obtuvo mediante el Modelo Digital de Elevación (DEM) de 12.5m de resolución espacial, obtenido de la siguiente página web <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Mediante interpolación y tomando en consideración los valores de (L) y (S) ya dadas y explicadas en párrafos anteriores se obtuvo el factor (LS).

Tabla 11  
*Determinación de factor LS*

Pendiente S %	Factor L-S	RANGO PENDIENTE	Factor LS
0	0.00		
2	0.33	0 a 2	0.17
4	0.71	2 a 4	0.52
8	1.56	4 a 8	1.13
15	3.40	8 a 15	2.48
25	7.37	15 a 25	5.38
50	15.90	25 a 50	11.63
75	22.92	50 a 75	19.41
100	28.50	75 a 100	25.71

### c. Índice de cobertura vegetal (C)

El índice de cobertura vegetal o factor (C) es la relación entre la pérdida de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y la pérdida correspondiente del suelo en barbecho continuo. Esta comparación se hace suponiendo que son semejantes las condiciones de suelo, pendiente y lluvia. El factor (C) se define como la relación entre las pérdidas de suelo que se producen bajo una alternativa y con unas determinadas técnicas de cultivo, y las pérdidas correspondientes al barbecho continuo.

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento; de modo que, su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo, mientras que los componentes subterráneos, como los

sistemas radicales, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 2005).

El factor de cultivo (C) combinado refleja la influencia de:

- Las secuencias en la cubierta vegetal (en el caso de cultivos)
- Los tipos de cubierta vegetal, y
- La cantidad de aguaceros caídos durante los períodos en que las prácticas agrícolas dejan desprotegido el suelo.

Para determinar este factor se empleó nuevamente la imagen basemap y trabajo de campo, lo cual consistió en mapear las diferentes unidades de cobertura vegetal que presenta dicha cuenca, luego de ello se dieron valores de acuerdo a la tabla 12. De valores de cobertura vegetal que se explican y se muestran en párrafos descritos con anterioridad.

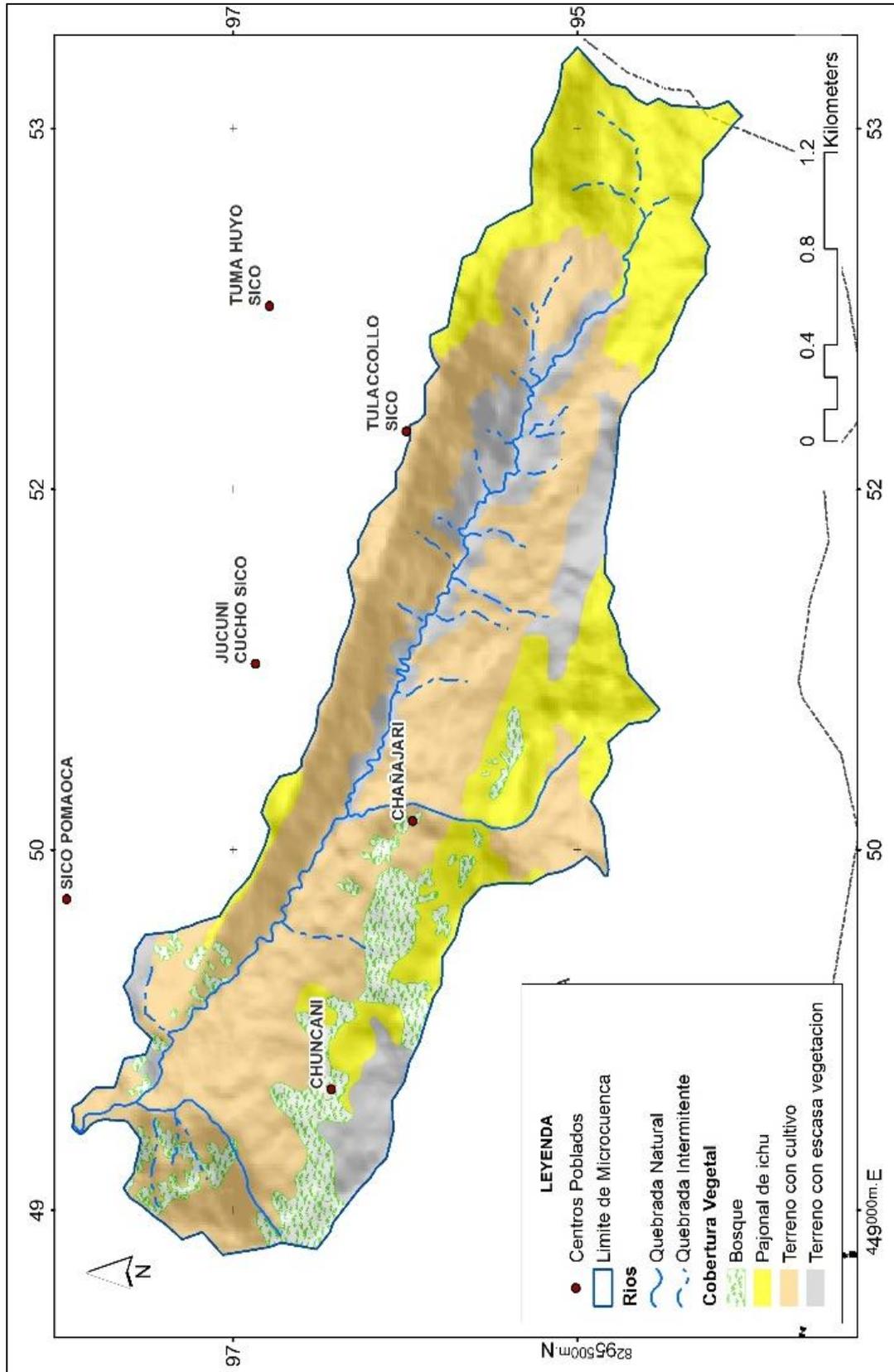


Figura 11. Mapa de cobertura vegetal de la microcuencia del río Chañajari

Dicho factor (C), se muestra a continuación, donde se muestran los valores asignados de acuerdo a la unidad de cobertura vegetal que presenta dicha microcuenca.

Tabla 12  
*Determinación de factor C*

N	COBERTURA VEGETAL	C
1	Bosque	0.001
2	Pajonal de ichu	0.01
3	Terreno con cultivo	0.15
4	Terreno con escasa vegetación	1

#### d. Factor de prácticas de conservación de suelos (P)

Muchas veces la presencia de vegetación no siempre evita la producción de escurrimiento superficial; en ese sentido, el empleo de prácticas de conservación en el suelo minimiza el efecto del flujo de agua. Al respecto, USLE incluye el factor (P) de prácticas de conservación para tres situaciones:

- El empleo de labranza siguiendo las curvas de nivel (cultivo en contorno)
- El empleo de fajas de cultivo en contorno
- El empleo de terrazas

Tabla 13  
*Factor P de prácticas de conservación*

Pendiente (%)	Cultivo en contornos o curvas de nivel		Cultivos en terrazas
	P	Longitud máxima de ladera (m)	P
1 - 2	0.60	122	0.12
3 - 5	0.50	91	0.10
6 - 8	0.50	61	0.10
9 - 12	0.60	37	0.12
13 - 16	0.70	24	0.14
17 - 20	0.80	18	0.16
21 - 25	0.90	15	0.18

Fuente: Mancilla (2008) y (Wischmeier y Smith, 1978)

Para determinar este factor se empleó datos de prácticas de conservación. Para ello se elaboró el mapa denominado: Uso Actual de Tierras, lo cual se obtuvo mapeando la microcuenca en estudio, obteniendo así el siguiente mapa.

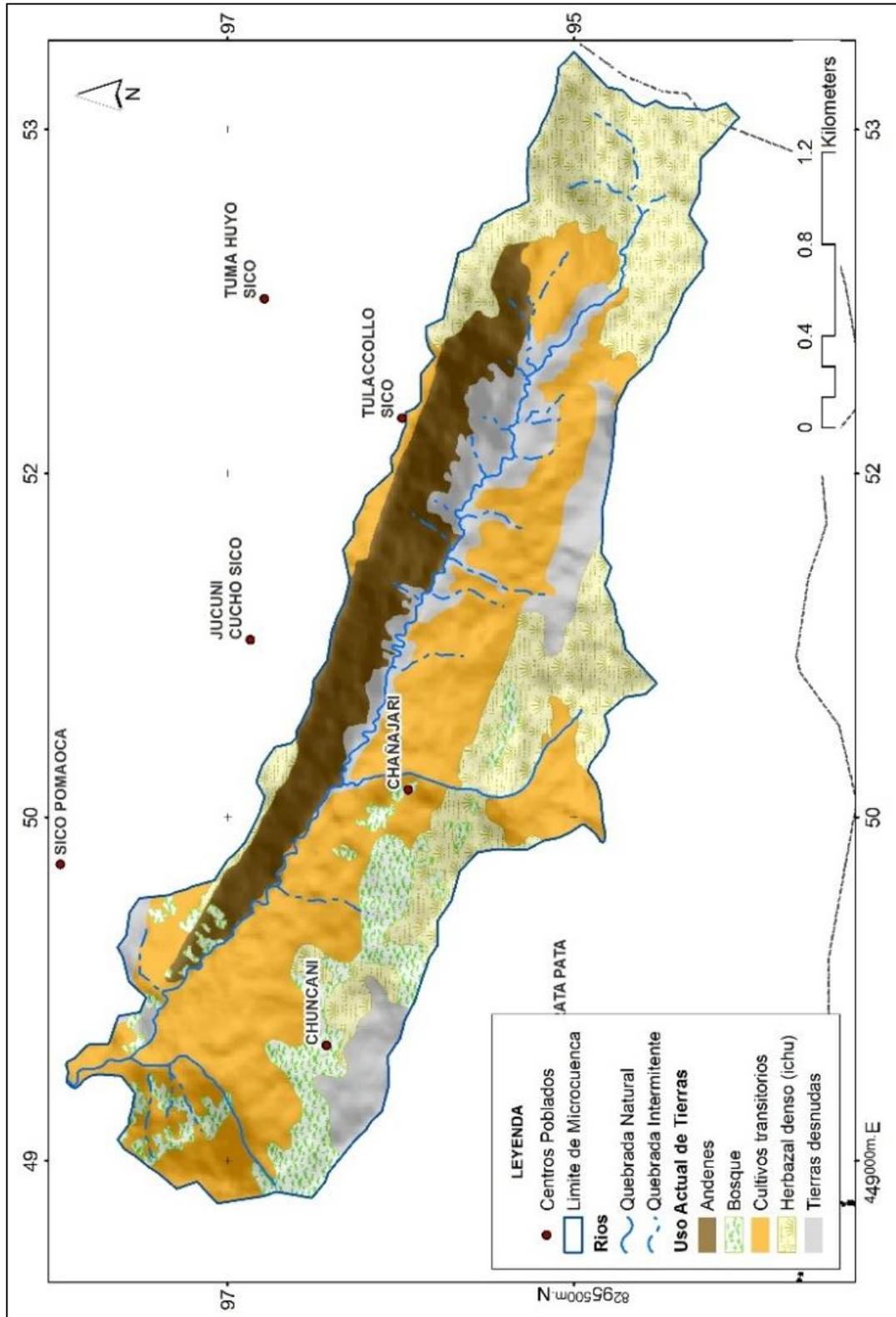


Figura 12. Mapa de uso actual de tierras de la microcuenca del río Chañajari

Como se observa en el mapa se identificó unidades de andenes, lo cual es considerado como un tipo de práctica de conservación de suelo, tomando en consideración dicha práctica se valoró las unidades considerando la tabla 14. De prácticas de conservación que se explicó en páginas anteriores.

Tabla 14  
*Determinación de factor P*

N	Uso Actual de Tierras	P
1	Andenes	0.5
2	Bosque	0.01
3	Herbazal denso (ichu)	0.4
4	Cultivos transitorios	0.4
5	Tierras desnudas	0.4

### 3.8.2.2 Pérdida de suelo por erosión hídrica

Según el modelo de USLE Wischmeier y Smith (1978) los niveles de pérdida de suelo considerados van desde erosión baja hasta erosión crítica, muy similares a los niveles erosivos de la clasificación ICONA (1991a); cuyos valores se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15  
*Niveles de erosión*

Niveles de erosión USLE	Valores de erosión
Erosión baja	$E < 5$ t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Erosión moderada	$E = 5-25$ t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Erosión media	$E = 25-50$ t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Erosión alta	$E = 50-100$ t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Erosión muy alta	$E = 100-200$ t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Erosión crítica	$E > 200$ t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>

Fuente: Wischmeier y Smith (1978).

Una vez obtenida los factores que determinan la pérdida de suelo por erosión hídrica, se procesó en el software ArcGIS, utilizando la herramienta model builder, de manera que se obtuvo dicho resultado que se explica en las páginas posteriores.

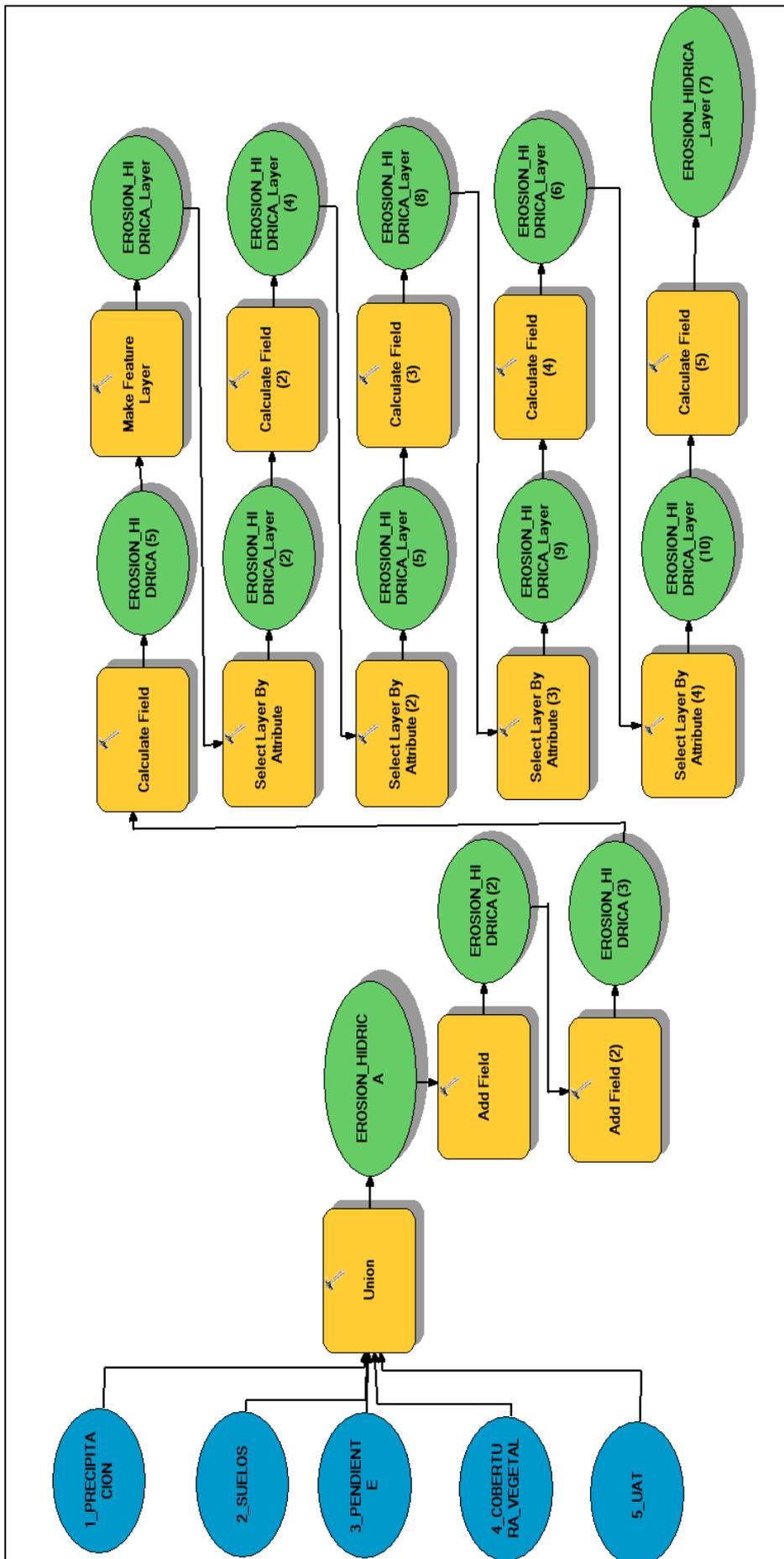


Figura 13. Proceso de modelamiento para la obtención de erosión hídrica

Tabla 16  
*Resultados de la pérdida de suelos por erosión hídrica*

NIVEL DE EROSION HÍDRICA	PÉRDIDA DE SUELO t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	PÉRDIDA DE SUELO %
Crítica	49.75	9.34
Muy Alta	55.77	10.47
Alta	82.17	15.42
Media	62.30	11.69
Moderada	81.17	15.24
Baja	201.58	37.84
TOTAL	532.74	100.00

### 3.8.3 Objetivo específico 3

Proponer acciones de conservación del suelo para disminuir la pérdida de suelos por erosión hídrica en la microcuenca de río Chañajari.

#### 3.8.3.1 Propuesta de actividades de conservación de suelos

Para un plan de manejo y conservación de suelos, se debe partir del hecho, que toda la utilización del medio físico debe sustentarse en el conocimiento del comportamiento dinámico e interrelación de los distintos elementos que se presentan en la superficie, en el planteamiento debe considerarse la preocupación de mejorar y conservar los tres elementos del ecosistema cuenca: agua, suelo y planta, mejorando así la habitad de la fauna y del hombre, de modo que permita un desarrollo armónico sostenido entre la sociedad y la naturaleza.

#### 3.8.3.2 Diagnóstico situacional de la microcuenca

##### a. Actividad agrícola

La actividad agrícola constituye una de las actividades productivas más importantes para la seguridad alimentaria en la comunidad de San Francisco de Chañajari, la producción de cultivos de pan llevar como: papa, quinua, cebada, habas y tuberosas andinas, son fuente alimenticia para las familias campesinas.

En la comunidad desarrollan la agricultura en secano en todas las áreas de cultivo, en laderas y en partes bajas; en donde los rendimientos de los cultivos agrícolas varían de un año a otro, debido a las variaciones climáticas que ocurren cada año. En muchos casos se pierde la cosecha por las inclemencias climáticas adversas como: heladas, granizadas, veranillos o sequías; sin embargo los productores a través de sus experiencias tratan de superar estos inconvenientes a través de las siembras tempranas como milli.

#### **b. Actividad forestal**

La forestación y producción forestal en la microcuenca del río Chañajari es la especie eucalipto para leña, no existe la agroforestería de especies nativas. Como: Kolle, queñua, pino y ciprés. Las plantaciones son a nivel familiar.

#### **c. Actividad pastizal**

La composición florística de pastos y especies nativas de la microcuenca es una fuente importante para la alimentación de los ganados: vacunos, ovinos y camélidos; las especies naturales determinadas son: Ichu (*stipa ichu*), grama ichu (*stipa brachyphylla*), la chilligua (*Festuca dolichophylla*), chiji (*Muhlebergia fastigiata*), llama pasto (*Nasella puniflora*), parbayo pasto (*Calamagrotis vicunarun*), trebol, layu (*trifolium amabili*) y otros.

Los pastos naturales soportan un proceso de degradación continuo, debido a que la composición florística de las especies más palatables y la cobertura vegetal va disminuyendo paulatinamente en la producción de biomasa forrajera a causa del sobrepastoreo que pone de manifiesto en desequilibrio el ecosistema de las praderas nativas.

#### **d. Uso de suelos**

Los suelos de esta microcuenca se destinan principalmente para cultivos intensivos de productos de pan llevar como: Papa, quinua, cebada, habas

y tuberosas andinas; otros en menor escala para pastos naturales y áreas destinadas a la producción forestal.

#### **e. Degradación de suelos**

En las zonas altas y medias se observan pendientes desde moderadas a fuertes, los mismos que por la gravedad y presencia de lluvias intensas arrastran las partículas de suelo desde los horizontes superficiales hacia las zonas más bajas, provocando la pérdida de horizontes fértiles de estas zonas, en muchos casos hasta llegar al afloramiento rocoso.

En la zona baja que es destinado a una actividad agrícola intensa, presenta problemas de falta de riego, baja fertilidad, problemas de drenaje y el mulch después de la cosecha es sobre pastoreado.

Entre los problemas que contribuyen a la degradación de suelos son:

- Incremento de la erosión de los suelos, por efecto del agua y del viento en tierras de actividad agrícola en fuertes pendientes,
- Progresivo aumento del proceso de descertificación por falta de medidas de manejo y conservación de suelos y prácticas de cultivos inapropiados. En el área de estudio muchas hectáreas se ha perdido, la capa arable está en proceso de degradación.
- Degradación de pastos alto andinos debido a irracional manejo de pasturas, así como la práctica extensiva del pastoreo.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos, al aplicar la metodología descrita en el capítulo anterior y su discusión se presenta a continuación.

#### 4.1 Del objetivo específico 1

Determinar el índice de erosión de las precipitaciones mediante métodos indirectos durante el período 2008 al 2017 en la comunidad de San Francisco de Chañajari.

##### 4.1.1 Del índice de erosividad de las precipitaciones (R)

Los registros de la información pluviométrica de las estaciones meteorológicas de Huaraya – Moho e Isla Soto, se adjuntan en el anexo 1, períodos de 10 años (2008-2017) donde la precipitación media anual en la estación Huaraya – Moho es de 813.60 mm. Y en la estación Isla Soto es de 952.30 mm.

En la Tabla 6 se presenta los resultados del índice o factor de erosividad (R) para el ámbito de la microcuenca del río Chañajari, en ella se puede apreciar que la erosividad en la estación Isla Soto es mayor en  $29.43 \text{ MJmm ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{año}^{-1}$  que la estación Huaraya - Moho. Utilizando la herramienta de interpolación Spline se tuvo como resultado lo siguiente.

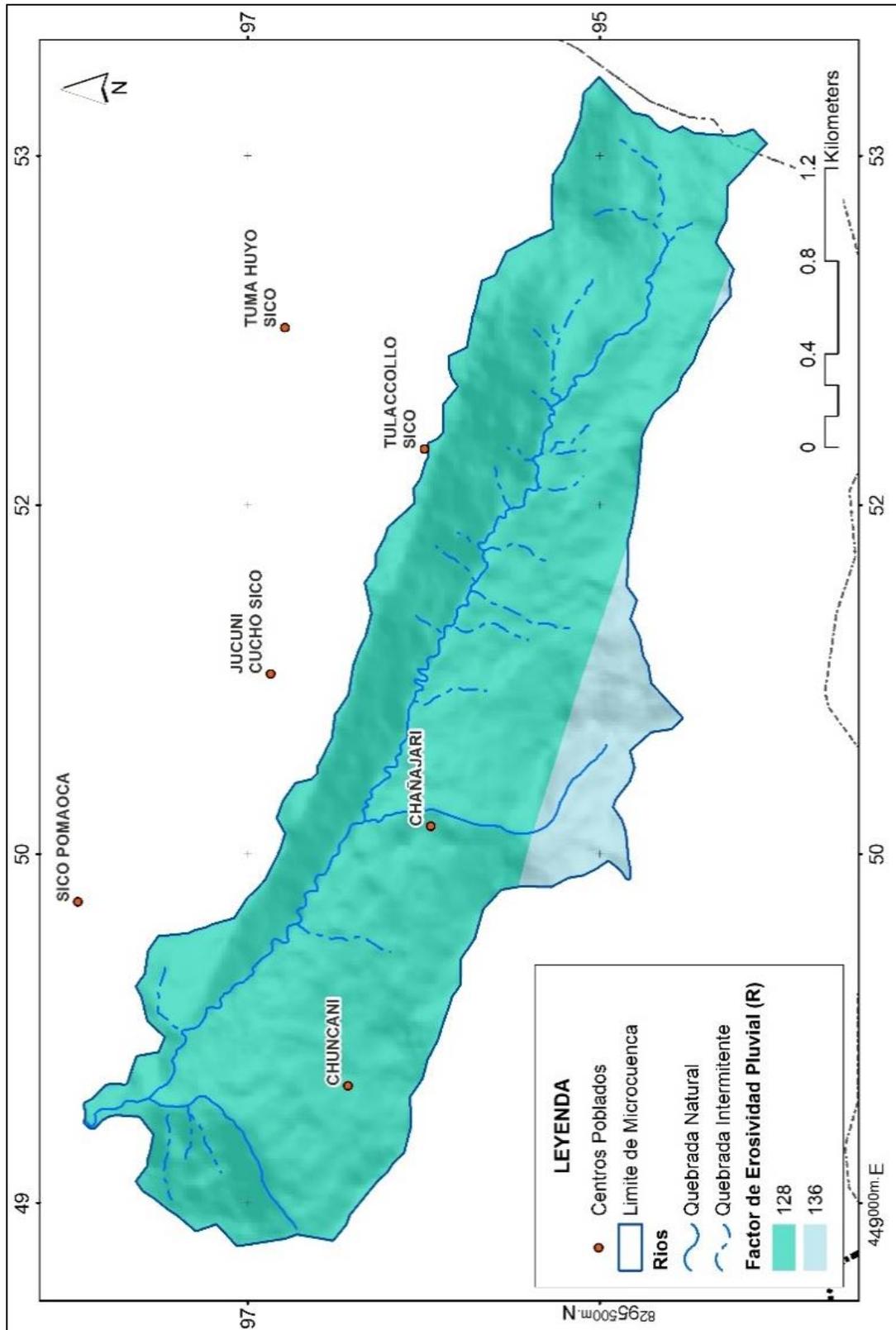


Figura 14. Mapa de Índice de Erosividad Pluvial (R) de la microcuenca del río Chañajari

El mapa muestra los resultados de la erosividad de las lluvias durante el periodo 2008 - 2017, en las estaciones Huaraya -Moho e Isla Soto; en ella se puede apreciar que el factor de erosividad en la estación Huaraya Moho es  $121.82 \text{ MJmm ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{año}^{-1}$ , mientras que la estación Isla Soto es de  $151.25 \text{ MJmm ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{año}^{-1}$ , lo cual es considerado como un tipo de erosividad de la lluvia moderado, de acuerdo a la tabla 17 propuesto por la FAO se muestra el rango de valores de (R) y el tipo de erosividad que varía de 50 a 500  $\text{MJmm ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

Tabla 17  
*Tipo de erosividad de las lluvias*

Tipo de erosividad	Rango de valores de R
Ligero	0 – 50
Moderado	50 - 500
Alto	500 – 1000
Muy alto	>1000

Fuente: FAO (1980).

#### 4.1.2 De la prueba estadística t de Student

En la Tabla 18 se presentan los parámetros estadísticos de las dos muestras, que son los resultados del factor de erosividad (R) de las lluvias mensuales durante el periodo 2008 -2017 en las estaciones meteorológicas de Huaraya e Isla Soto; y en la Tabla 19 se presentan los resultados de la prueba estadística t, en ella se puede apreciar que el valor del estadístico t calculado es de 0.34 es mucho menor que el valor crítico de t igual a 2.20; en consecuencia, se puede concluir que la media de la serie de erosividad de la estación Huaraya es estadísticamente igual a la media de la serie de erosividad de la estación Isla Soto, no hay diferencias significativas.

Tabla 18  
*Resultados de los parámetros estadísticos de la muestra*

Parámetro estadístico	Huaraya	Isla Soto
Media	10.15	12.60
Desviación estándar	13.91	17.94
Varianza de la muestra	193.74	322.07
Curtosis	3.24	3.58
Coefficiente de variación	1.37	1.42
N° de observaciones	10	10

Tabla 19  
*Resultados de la prueba estadística t*

Parámetros prueba t	Huaraya	Isla Soto
Media	10.15	12.60
Desviación estándar	13.91	17.94
Observaciones	10	10
Grados de libertad	18	
Estadístico t calculado	0.34	
Valor crítico de t	2.20	
Conclusión	No significativo	

Los resultados de la regresión lineal simple de la serie de erosividad de las lluvias estimados para la estación Huaraya Moho y la serie de erosividad de las lluvias estimados para la estación Isla Soto son:

Ecuación de la regresión:  $Y = 0.5204 + 0.76416 * X$

Coefficiente  $r^2 = 0.97$

De los resultados de la regresión se puede concluir que existe una alta correlación (97 %) entre los resultados de erosividad estimados en la estación Huaraya Moho y los resultados de erosividad estimados para la estación Isla Soto.

## 4.2 Del objetivo específico 2

Obtener los parámetros de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) para el ámbito de la comunidad de San Francisco de Chañajari.

### 4.2.1 Del factor de erodabilidad del suelo (K)

Para estimar el factor (K) se determinaron las unidades de suelo y es frecuente la presencia de material fino mezclado con partículas gruesas, a este grupo pertenecen los suelos francos, arcillosos y franco-arcillo-arenosos; en consecuencia, de acuerdo a la clasificación de la FAO corresponde a la textura fina y gruesa, interpolando los valores de (K) se obtienen entre 0.458 a 1.276;  $t$  ha h  $MJ^{-1}mm^{-1}ha^{-1}$  de acuerdo a la tabla 20 de categoría de erosionalidad por unidad de suelo, se ubica en la categoría moderada tendiendo para crítica.

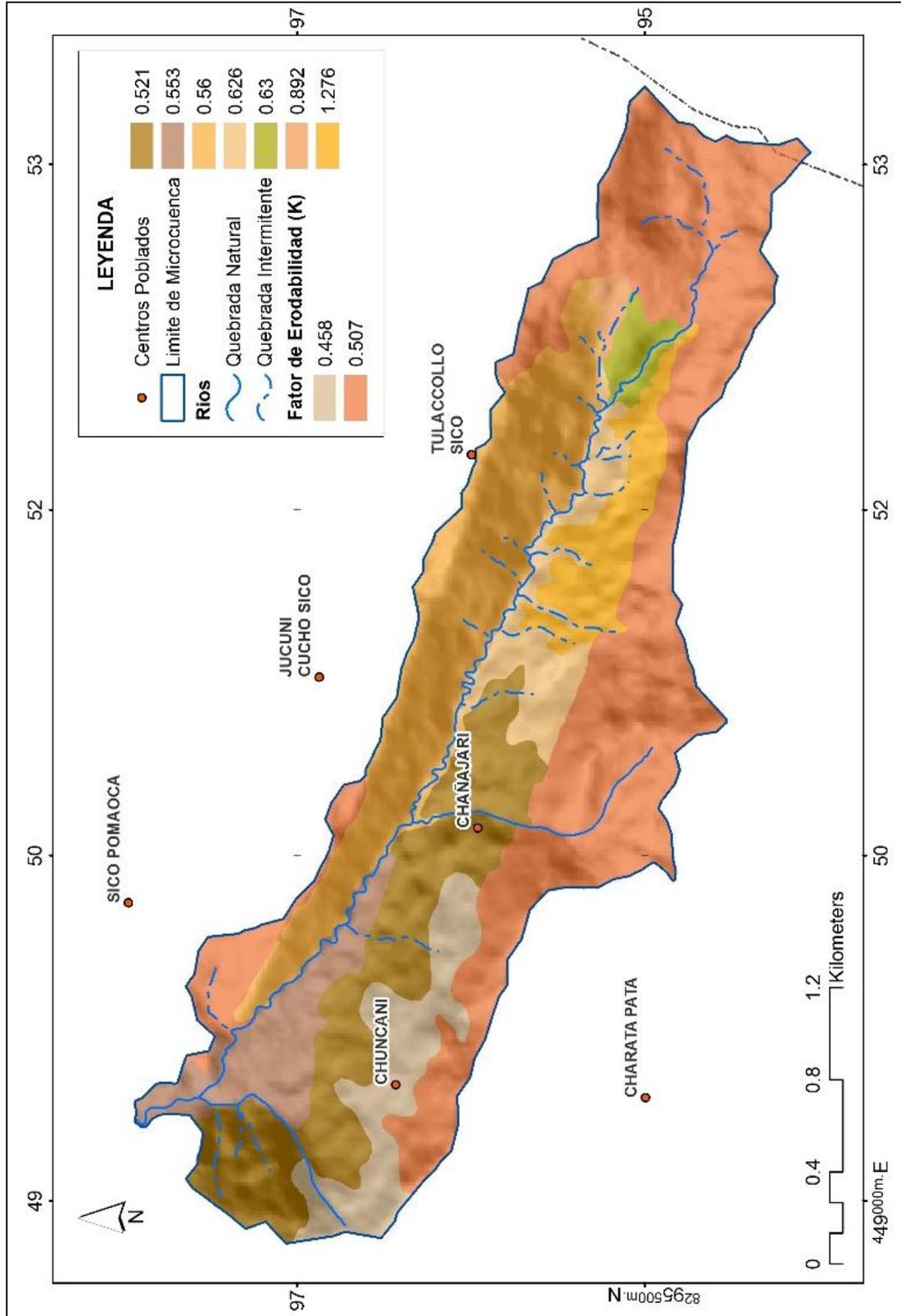


Figura 15. Mapa de Índice de Erodabilidad (K) de la microcuenca del río Chañajari

Dada la dificultad que existe para calcular el factor de erosionabilidad del suelo por el método original, se optó por emplear un método alternativo propuesto por FAO, (1980), que se basa en las unidades, subunidades y clases textural de los suelos. La erosionabilidad por unidad de suelo es clasificada en tres categorías: ligera, moderada y alta, a las cuales se les asigna un valor numérico, como se reporta en la Tabla 20.

Tabla 20  
*Valores numéricos de las categorías de erosionabilidad por unidad de suelo*

Categoría de erosionabilidad	Valor numérico
Ligera (I)	0.5
Moderada (II)	1.0
Alta (III)	2.0

Fuente: FAO (1980).

Con respecto a la clase textural, la FAO distingue tres tipos de textura del suelo: fina, media y gruesa, como aparece a continuación en la Tabla 21.

Tabla 21  
*Valor textural y coeficiente*

Textura	Coficiente K
Gruesa	0.2
Media	0.3
Fina	0.1
Pedregoso	0.5

Fuente: FAO (1980).

Las características de la textura son:

- Textura gruesa (< 18% de arcilla y > 65% de arena).
- Textura media (< 35 % de arcilla y > 65 % de arena, o < 18 % de arcilla y > 82 % de arena).
- Textura fina (< 35 % de arcilla)

#### 4.2.2 Del factor topográfico (LS)

El factor (LS), varía entre 0.17 a 25.71, lo que indica que existe más probabilidad a que se presente erosión hídrica en aquellos valores altos en este caso a los valores de 11.63 a 25.71 así como se muestra en el siguiente mapa.

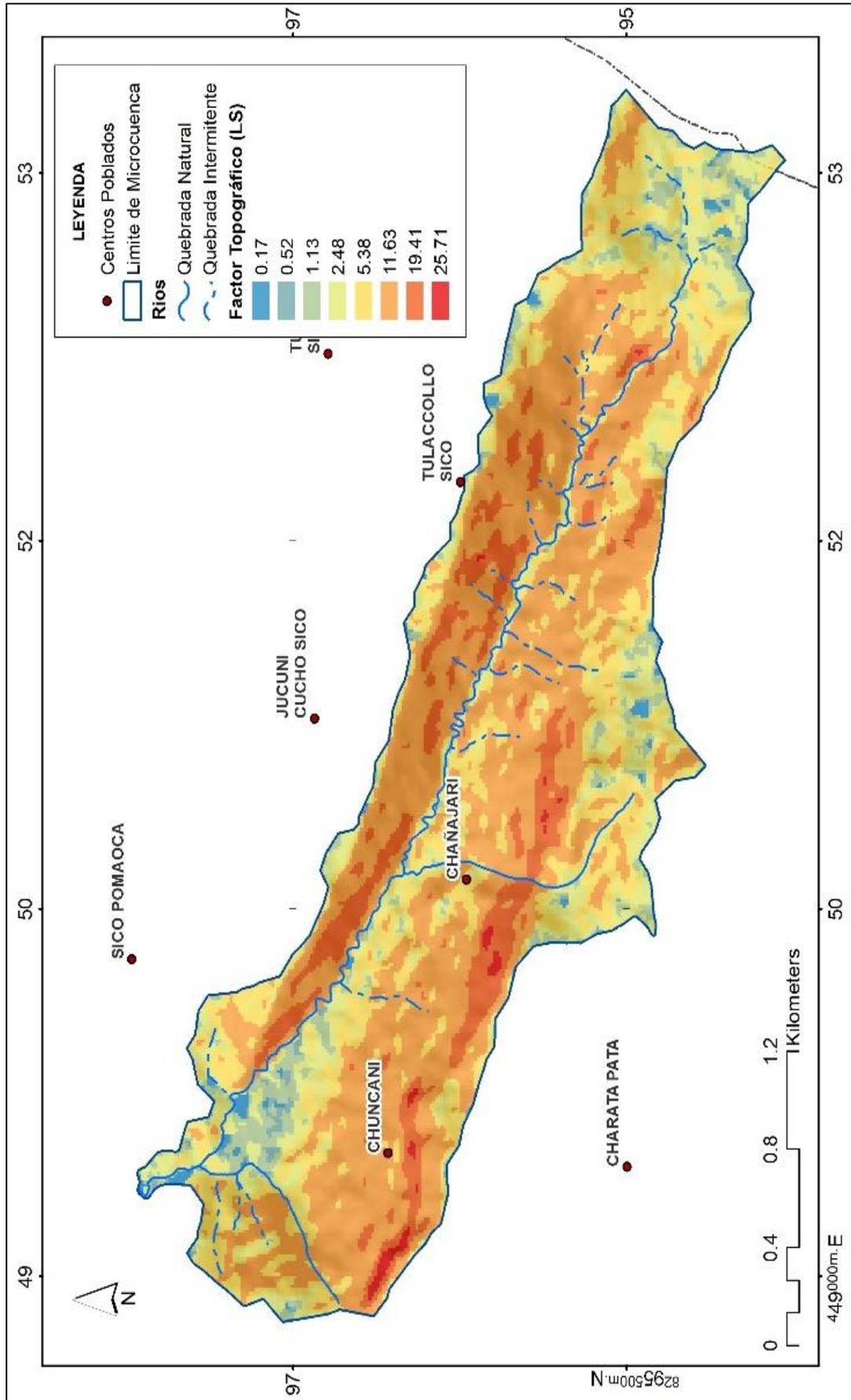


Figura 16. Mapa de Factor Topográfico (LS) de la microcuencia del rio Chañajari

### 4.2.3 Del factor de cobertura vegetal (C)

El factor (C) de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, representa la cantidad de suelo perdido de un terreno bajo condiciones específicas de uso y vegetación. El factor (C) en tierras arables combina la composición de cultivos y las prácticas de manejo (Panagos *et al.*, 2015).

Para determinar el factor (C) se usa la Tabla 22 publicada por (Wischmeier y Smith, 1978).

Tabla 22  
*Valores de cobertura vegetal Factor C*

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1.000
Bosque o matorral denso (alto mulch)	0.001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0.010
Pradera sobrepastoreada	0.100
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	0.01-0.80
Caña de azúcar	0.56
Arbolado denso	0.001-0.003
Arbolado forestal clareado	0.003-0.009
Arbolado muy clareado (25-60%)	0.041
Matorral con buena cobertura	0.003-0.013
Matorral ralo y eriales	0.20-0.013
Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Pasturas	0.15
Plantas herbáceas y matorros (100%)	0.003
Plantas herbáceas y matorros (60%)	0.035
Cubierta escasa (60%)	0.15-0.09
Cubierta inapreciable	0.45

Fuente: Cayo (2011)

La condición estándar sin cobertura vegetal y con barbecho continuo, condición extrema favorece la erosión, el valor de (C) es la unidad y será cada vez menor, a medida que haya una cobertura vegetal sobre el terreno, de esta manera los valores de (C) fluctúan entre 0.0 a 1.0, estos valores corresponden a un terreno totalmente protegido (0.0) y totalmente desprotegido (1.0) (Becerra, 1999).

Es preciso indicar que los factores (C) estimados se utiliza como criterio para seleccionar un sistema de rotación apropiado para reducir el riesgo de erosión en el sitio (Gabriels, Ghekiere, Schiettecatte, y Rottiers, 2003), así considerar los siguientes criterios:

- La consecuencia de la rotación de cultivos en la permanencia de la cobertura vegetal y su efecto residual sobre el suelo.
- Los trabajos de labranza que puede dejar la superficie del suelo con o sin residuos de la cosecha anterior; asimismo, pueden dejarla con diversos grados de rugosidad. La eficiencia de los residuos vegetales en el control de la erosión depende de la cantidad disponible de los mismos.
- La eficiencia de un cultivo para evitar la erosión depende de cuánta lluvia erosiva ocurra durante los distintos períodos de crecimiento del cultivo, efecto dosel.

De acuerdo a la cobertura vegetal en el ámbito de estudio se identificaron bosque, pajonal de ichu, terreno con cultivo y terreno con escasa vegetación. Como factor de cobertura vegetal se identificaron valores de 0.001 a 1, lo que indica que las unidades consideradas con valor 1 tienen mayor probabilidad de que exista erosión hídrica.

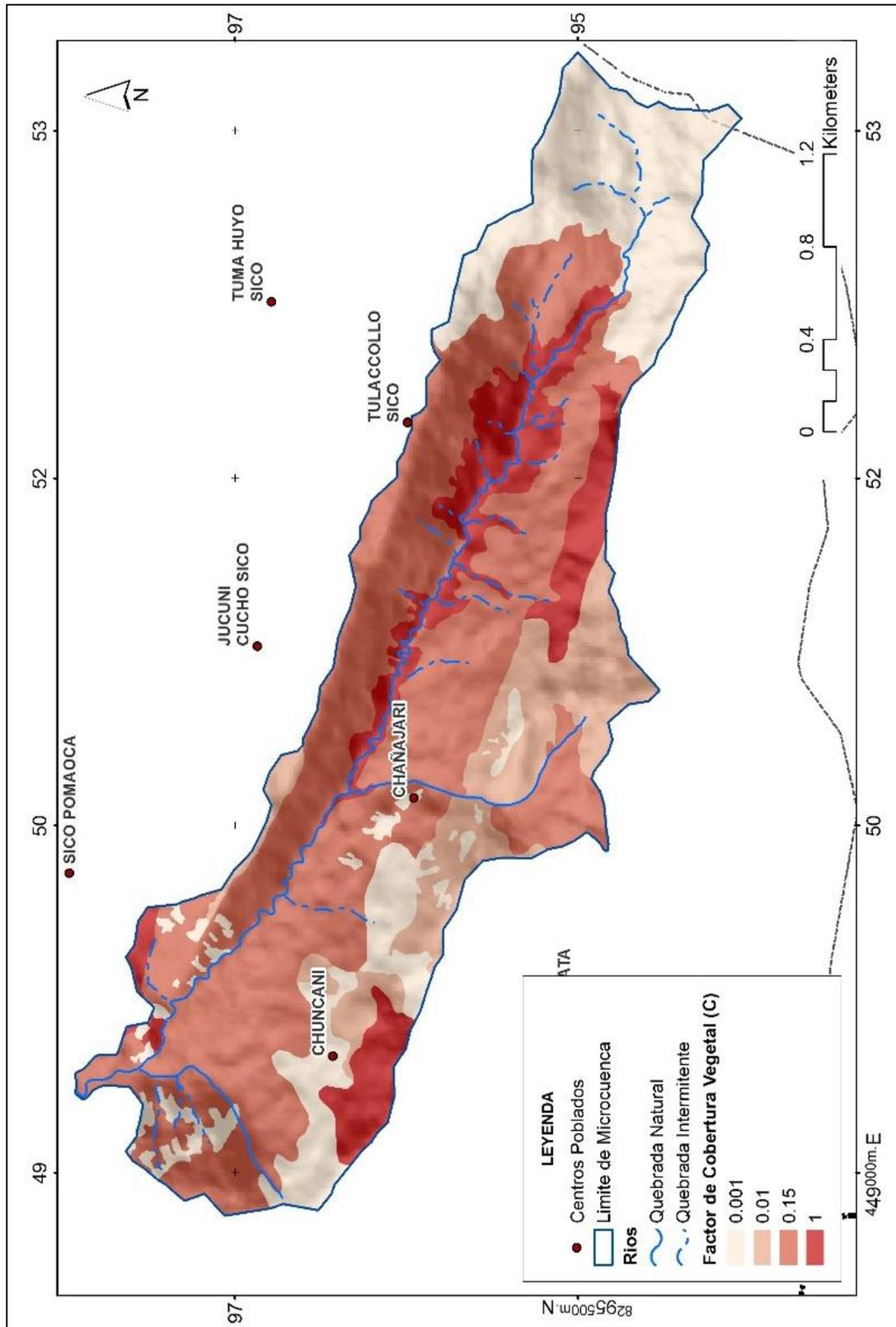


Figura 17. Mapa de Índice de Cobertura Vegetal (C) de la microcuencia del río Chañajari

#### 4.2.4 Del factor de prácticas de conservación (P)

Considerando que el mayor porcentaje de las tierras están protegidos ya sea por los cultivos o en las laderas por construcciones de obras de infraestructura de conservación de suelos como andenes, zanjas de infiltración o terrazas de formación lenta, ejecutados por los pobladores ancestrales, de acuerdo a la tabla 9, se obtiene un valor de  $P = 0.01$  a  $0.5$ .

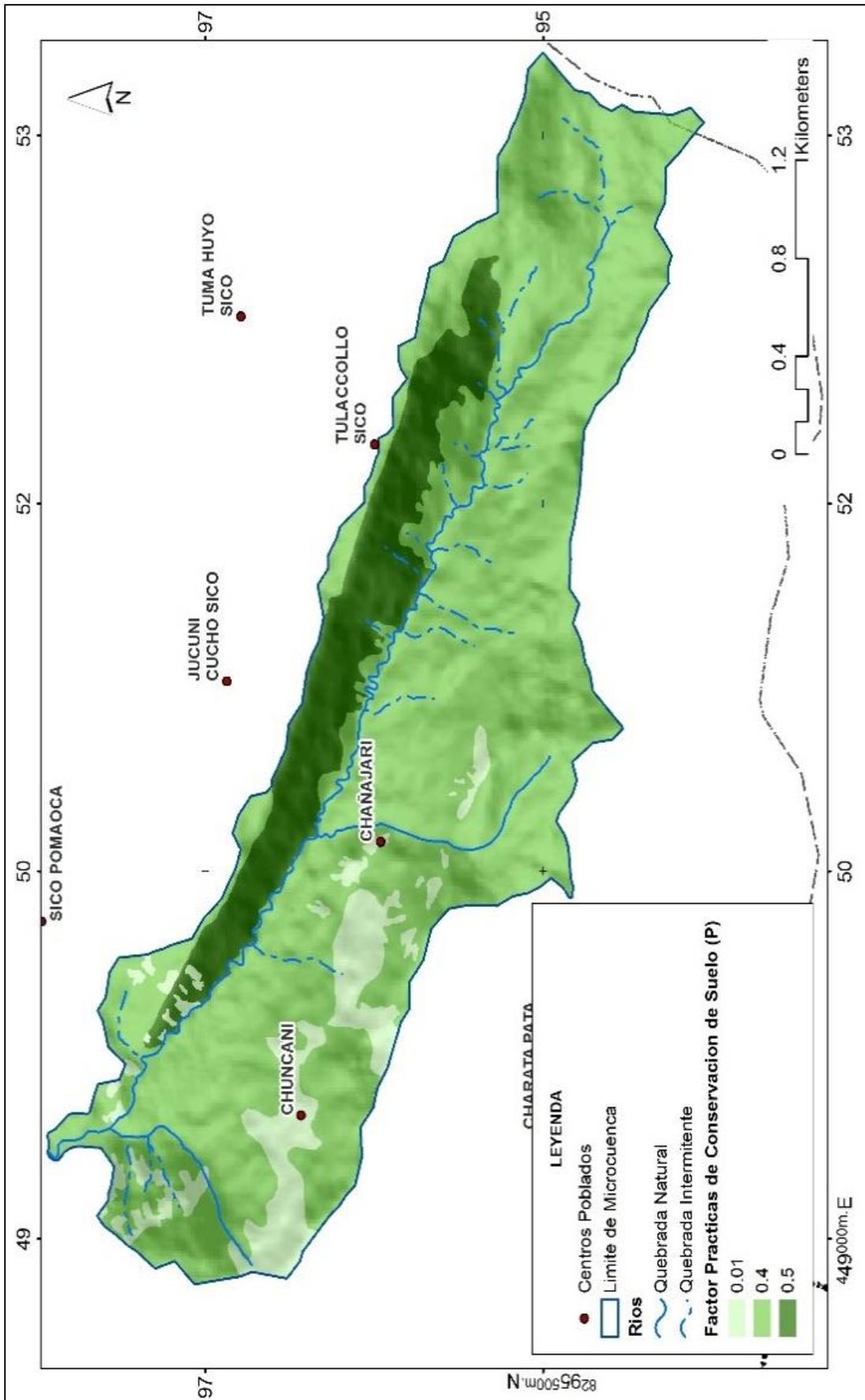


Figura 18. Mapa de Índice de Prácticas de Conservación de Suelos (P) de la microcuenca del río Chañajari

#### 4.2.5 De la pérdida de suelos en la cuenca (E)

Con el proceso de modelamiento para la obtención de la erosión hídrica de la figura 13, cuyos resultados se muestran en la tabla 16, con ellos se representa el mapa temático de erosión hídrica de la microcuenca del río chañajari, figura 19.

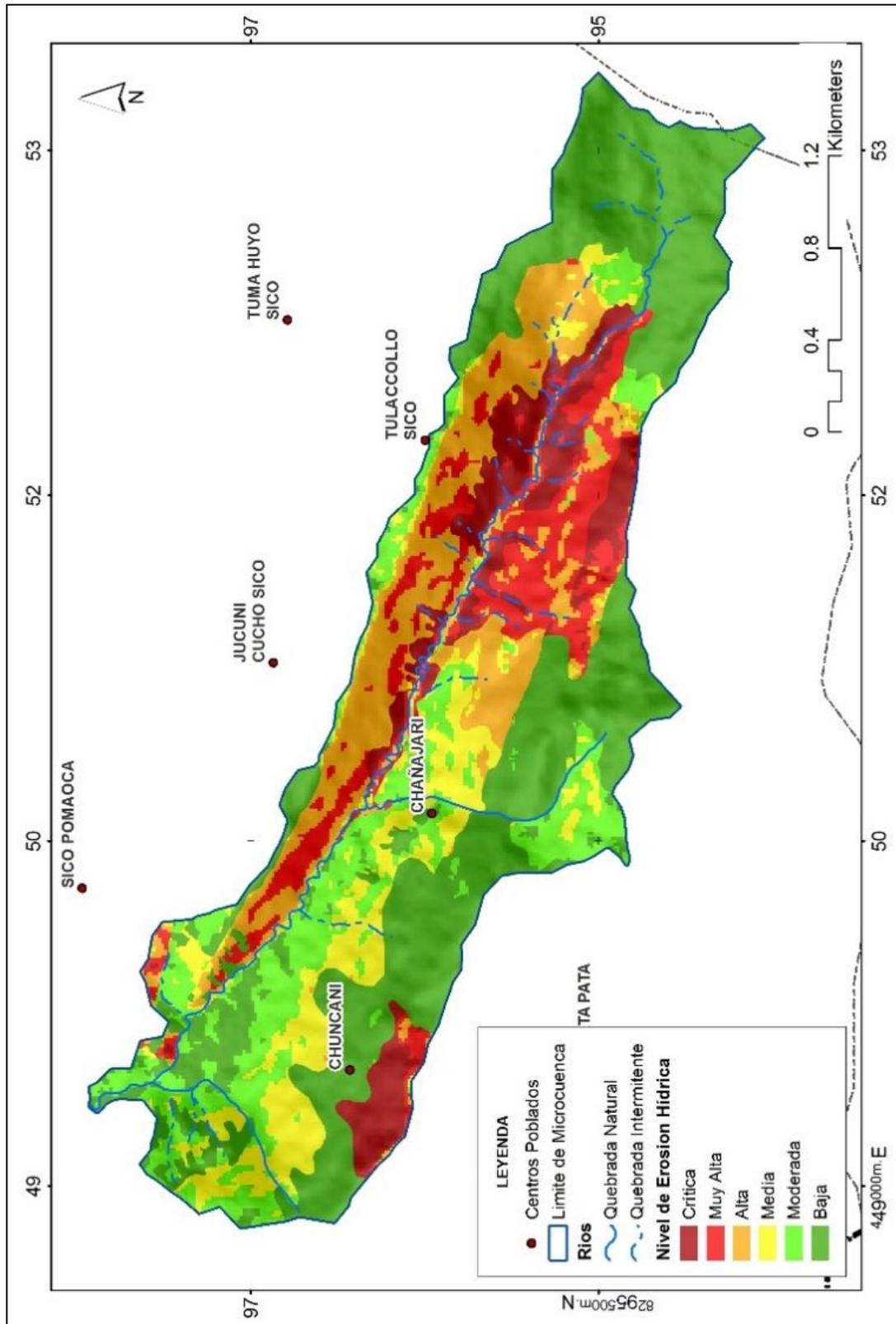


Figura 19. Mapa de Erosión Hídrica de la microcuencia del río Chañaajari

Los resultados obtenidos muestran que:

El 9.34% de su superficie tiene riesgos de degradación por erosión hídrica crítica de  $49.75 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$

El 10.47% de su superficie tiene riesgos de degradación por erosión hídrica muy alta de  $55.77 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$

El 15.42% de su superficie tiene riesgos de degradación por erosión hídrica alta de  $82.17 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$

El 11.69% de su superficie tiene riesgos de degradación por erosión hídrica media de  $62.30 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$

El 15.24% de su superficie tiene riesgos de degradación por erosión hídrica moderada de  $81.17 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$

El 37.84% de su superficie tiene riesgos de degradación por erosión hídrica baja de  $201.58 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$

De acuerdo a la categoría de pérdida de suelos por erosión hídrica en la microcuenca del río Chañajari tiene un grado de erosión de suelos de mediano con tendencia a alto, sino se toman las medidas de prevención estas podrían llegar a niveles muy altos hasta críticos.

El rango de los valores determinados son concordantes con las investigaciones realizadas por Ccama (2012) en la cuenca del río Ilave, obtuvo un rango de 25 a  $50 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; Tapia (2011) en 22 microcuencas de la sierra peruana obtuvo un rango de 24.4 a  $45.09 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; Benites (2017) obtuvo valores mayores a los estimados en la investigación 53 a  $96 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; Canaza (2008) en la microcuenca Chinchera - Puno determinó un índice de erosión anual de  $57.1 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ; Cordova (2015) obtuvo  $15.74 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  valor menor al rango estimado en esta investigación y Castro (2017), obtuvo un rango más amplio de 26 a  $100 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ .

### 4.3 Del objetivo específico 3

Proponer acciones de conservación de suelos para disminuir la pérdida de suelos por erosión hídrica en la comunidad de San Francisco de Chañajari.

#### 4.3.1 Propuesta de alternativas de manejo y conservación de suelos

Para disminuir la pérdida de suelos por erosión hídrica y con el objeto de conservar y preservar los suelos de la microcuenca del río Chañajari, se propone realizar actividades como:

#### 4.3.2 Prácticas de obras mecánicas estructurales

Son trabajos de infraestructura, tanto a nivel de parcela como en conjunto muy grandes, con la finalidad de reducir la escorrentía superficial del agua de lluvia, facilitar la infiltración y posibilitar el riego.

##### a. Terrazas de formación lenta o bargones

Es una práctica de conservación de suelos denominado terrazas con muros de piedra, que los bancales se forman progresivamente por efecto de arrastre y acumulación de sedimentos del suelo erosionado, retenidos por el muro de contención de piedras, manteniendo la capa arable y de aprovechamiento inmediato, combinado con surcos de contorno.

Características técnicas de las terrazas de formación lenta

- Pendiente de ladera : 12 a 45 %
- Profundidad de capa arable : 0.30 m.
- Altura de muro : 1.00 m.
- Profundidad de cimentación : 0.20 m.
- Ancho de cimentación : 0.70 m.
- Ancho de corona de muro : 0.40 m.
- Talud de muro : 0.15:1
- Ancho de terraplén : 9.00 a 6.00 m.
- Longitud de muro - terraplén : 20 m.

En el proceso de construcción se debe considerar los siguientes aspectos:

- Reconocimiento del terreno; con la finalidad de verificar las condiciones del suelo, si son aparentes para su construcción,
- Limpieza del terreno; con el desbroce de las especies arbustivas existentes para facilitar el trazo,
- Trazo; que consiste en trazar las líneas de las zanjas empleando el nivel “A”,
- **Apertura de zanjas para la cimentación; siguiendo la línea de trazo, considerando el ancho y la profundidad,**
- Extracción, acopio y traslado de materiales; que consiste en extraer piedras de una cantera o el acopio, para luego ser trasladados al lugar de la construcción,
- Construcción del muro; de mampostería de piedra seca dando la inclinación adecuada y para dar mayor solidez y estabilidad al muro, durante la construcción, introducir especies nativas como la “sewinka” (*Cortaderia selloana*) que tiene la propiedad de enraizamiento fasciculada y profundo para evitar la erosión,
- Nivelación del terraplén; remoción total del banco con la finalidad de dar utilidad para una campaña agrícola,
- Obras de acceso; construcción de caminos con piedras en forma de escaleras transversales y camino para vehículos si la pendiente favorece y,
- Mantenimiento; se recomienda después de cada campaña agrícola.

Tabla 23

*Criterios técnicos para la construcción de terrazas de formación lenta*

Pendiente del terreno (%)	Ancho de banco (m)	Longitud de muro (ml./ha)	Altura de muro (m)	Profundidad de cimentación (m)	Número de muros
15	12	700	0.80	0.15	7
25	10	800	1.00	0.20	8
35	8	900	1.20	0.25	10
45	6	1200	1.50	0.30	14
55	4	1500	2.00	0.30	20

Fuente: Vásquez *et al.*, (2016).

### **b. Zanjas de infiltración**

De sección trapezoidal o rectangulares, asimétricas que se aperturan transversalmente a la pendiente del terreno, de acuerdo a las curvas de nivel. El objetivo principal de esta práctica es interceptar el agua de escorrentía que proviene de las partes altas de la ladera, anulando su velocidad permitiendo una mayor infiltración y conservación de la humedad; por tanto, aumentar la producción de pastos, árboles o cultivos; reducir la erosión hídrica de los suelos.

#### **Construcción y uso**

Se construyen en laderas con profundidad de suelo no mayor a 30 cm, subsuelo permeables, en terrenos francos o moderadamente arcillosos de 10 m de longitud con gradiente cero, con tabiques de 1 m, no en terrenos susceptibles a deslizamientos porque se estaría contribuyendo a la erosión antrópica; para el trazo se emplea en nivel "A", a mayor pendiente menor distancia, a menor pendiente menor distancia y para la apertura de zanjas se tiene las siguientes medidas:

Ancho superior	: 0.50 m.
Ancho de base	: 0.30 m.
Ancho de camino longitudinal	: 0.30 m.
Altura media	: 0.40 m.
Talud	: 0.75:1 m.
Longitud de zanja	: 10.0 m.

Luego compactar la tierra extraída para evitar la erosión eólica.

En la Tabla 24 se muestra el distanciamiento entre zanjas en función de la pendiente.

Tabla 24  
*Distanciamiento de las zanjas de infiltración*

Pendiente (%)	Distanciamiento entre zanjas (m)
05 – 10	20
10 – 20	15
20 – 30	10
30 – 40	05

Fuente: Vásquez *et al.*, (2016).

Tapia (2011) en su investigación obtiene promedios de erosión con zanjas de infiltración y sin zanjas fueron de 24.44 y 45.04 t.ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> respectivamente concluye que, las zanjas de infiltración son una práctica efectiva para el control de la erosión y la captación de agua de lluvia en laderas.

#### **c. Cercos de piedra**

Es una práctica muy generalizada en la zona, debido a la abundancia de piedras. Forman cercos transversales y/o longitudinales a la máxima pendiente, que en muchos casos sirven de linderos de las parcelas y en otras forman barreras para contener el suelo (bargones), se comporta como cortinas contra las heladas y para impedir el paso de animales a la parcela.

#### **d. Andenes**

Constituyen terrazas escalonadas sobre pie de montes y montañas empinadas, cubriendo varios pisos altitudinales, de modo que mantienen una diversificación de cultivos y especies forestales tanto en el tiempo como en el espacio. Su estructura es complementada con especies forestales y arbustivas, conformando una estructura muy sólida y sostenible; controlando de esta manera la erosión del suelo.

Un sistema de andenes debe contar necesariamente de un sistema de drenaje adecuado para alcanzar niveles óptimos de gestión de los recursos hídricos.

### **4.3.3 Propuesta de prácticas culturales y agronómicas**

La distribución adecuada de la vegetación en una cuenca hidrográfica es la base de todo programa de conservación del agua y suelo. Los pastos y los bosques son

coberturas muy eficaces en la protección del suelo contra la erosión, los restos de los vegetales que se acumula sobre el suelo es el principal agente de defensa, absorbe el impacto de las gotas de lluvia, evita la porosidad y contribuye a elevar el contenido de humus, que conjuntamente con las raíces favorecen la formación de agregados estables del suelo.

Las principales prácticas culturales y agronómicas en la microcuenca son:

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

Esta práctica consiste en disponer las hileras o surcos de siembra en el sentido transversal a la máxima pendiente del terreno, siguiendo las curvas de nivel o líneas de contorno; cada hilera de plantas constituye un obstáculo que se opone al paso del agua de escorrentías, el cual disminuye su capacidad de arrastrar el suelo, favoreciendo de esta manera una mayor infiltración del agua e incremento en la productividad.

#### **Trazo y construcción**

Una vez definido los parámetros de diseño se procede a localizar en el terreno las líneas guías cada 5 – 30 m según la naturaleza y pendiente de la ladera, las mismas que sirven de base para el surcado, la profundidad del surco dependerá del tipo de suelo y cultivo a instalar, la pendiente longitudinal será cero, puede tener una ligera pendiente del orden 1 – 5 ‰ de acuerdo a las condiciones del suelo.

#### **b. Control de cárcavas**

En la microcuenca la erosión se manifiesta en diferentes formas: laminar, surcos y cárcavas profundas en el pie de monte y montañas empinadas, huaycos, deslizamientos, derrumbes y eólica.

El suelo es de la formación Vilquechco disectadas como lutitas de color marrón rojizo de grano fino con gran acumulación de material detrítico en el fondo de los ríos, para crear terrazas de formación o bargones, aplicar plantaciones de especies nativas como: “sewinka” (*Cortaderia selloana*), que tiene la propiedad de enraizamiento fasciculada y profundo para atenuar la erosión, propagar el cultivo de otras especies como: “la mullaka” (*Muhlembeckia volcanica*), “el pinco

pinco” (*Ephedra americana var.rupestris*) y “la yareta” (*Azorella compacta*) que tienen las mismas propiedades de enraizamiento profundo y perenne.

### **c. Forestación**

La plantación es la acción de plantar un árbol en el terreno para que se arraigue, en forma oportuna, durante los periodos de precipitación, en días de baja insolación, si hay ausencia de lluvias complementar con el riego.

El concepto de calidad antes de la cantidad se ha generalizado en el ambiente forestal, como una norma de acción para la instalación de plantones que deben ser sanas, vigorosas y de buena calidad.

Las ventajas que ofrece este tipo de plantaciones agroforestales son:

Protección de los factores climáticos adversos, crea un microclima, disminuye la erosión del suelo debido a que las hojas del arbusto amortigua la velocidad de caída de la gota de lluvia, disminuyendo el impacto de las gotas al suelo, embellece el paisaje, y sus desventajas son mínimas como: Ocupa espacio, dificulta labores culturales, alberga plagas aves que ocasiona daños en la cosecha de granos.

### **d. Cultivos asociados**

Practica que consiste en sembrar dos cultivos en un mismo terreno simultáneamente, con sistemas radiculares que se desarrollan a diferentes profundidades. Las asociaciones más comunes son habas-cebada (leguminosa-cereal) y papa-quinua (tuberosa-cereal).

La primera asociación ofrece una mejor protección al suelo, disminuyendo de esta manera la escorrentía y la erosión, la segunda asociación cubre parcialmente la superficie del suelo.

### **e. Rotación de cultivos**

Se define como la sucesión recurrente y más o menos regular de diferentes cultivos en el mismo terreno. Es una práctica ancestral la cual se utiliza apropiadamente, contribuyendo de modo eficaz a controlar la erosión y a mantener la productividad

de los terrenos; el efecto benéfico de la práctica depende de la selección que se haga de las plantas que van a rotar.

En lo posible la rotación debe tener exigencias alimenticias diferentes, no ser susceptibles a las plagas y enfermedades y ofrecer grados diferentes de protección del suelo; la rotación más generalizada es: Papa-quinua-cebada-habas y descanso.

#### **4.3.4 Propuesta de acciones de capacitación para conservación de suelos y otros**

La capacitación se realiza con la finalidad de motivar, crear conciencia y lograr la participación efectiva de las organizaciones campesinas, en la conservación de los suelos y el medio ambiente.

##### **4.3.4.1 Objetivo**

El objetivo principal debe responder a la pregunta: ¿para qué realizamos la capacitación?

Las acciones de capacitación tiene por finalidad transferir tecnologías adecuadas, para el manejo de los recursos naturales y el fortalecimiento de las organizaciones campesinas, promoviendo la participación activa de los beneficiarios, hasta conseguir una plena identificación en todas las actividades planificadas.

##### **4.3.4.2 Acciones**

Las acciones para los eventos de capacitación se determinan, después de realizar la planificación con la participación activa de los miembros de la comunidad y se plantean temas relacionados a la conservación y manejo de los recursos naturales.

Temas principales como:

- Construcción, calibración y uso del nivel A,
- Construcción de terrazas de absorción y terrazas de formación lenta,
- Construcción de zanjas de infiltración,

- Construcción de diques para el control de cárcavas,
- Construcción de surcos en contorno,
- Aplicación de enmiendas orgánicas,

Temas secundarios como:

- Siembra de cultivos y forrajes,
- Labores culturales de los cultivos andinos,
- Instalación de pastos cultivados,
- Control de plagas,
- Manejo del agua para riego,
- Transformación de productos agropecuarios,
- Organización de pequeñas empresas y comercialización.

#### **4.3.4.3 Técnicas de aprendizaje**

La metodología es un marco de referencia mediante el cual se desarrolla un programa de aprendizaje, con el objeto de dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Cómo aprenderán los campesinos o beneficiarios el manejo adecuado de recursos, tierra y agua?.

Las técnicas son los métodos a utilizar para que el campesino o beneficiario pueda lograr un aprendizaje significativo sobre el tema de la capacitación.

Las técnicas de capacitación son los siguientes:

- El método activo participativo,
- Técnicas explicativas,
- Técnicas demostrativas,
- Técnicas de creatividad,

- Técnicas lúdicas (juegos)

#### **4.3.4.4 Acciones de seguimiento**

El seguimiento nos permite conocer:

- La expectativa que tienen los participantes al empezar el evento y cuanto saben respecto a los contenidos del tema a tratar.
- Si se cumplen durante el evento los objetivos planteados, o se tiene que mejorar sobre la marcha de la ejecución del evento.
- Cuanto aprendieron los participantes sobre el tema de la capacitación.

## CONCLUSIONES

- La microcuenca del río Chañajari presenta una erosión de nivel crítico, con una tasa de  $49.75 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ , pudiendo incrementarse si no se toman las medidas de conservación de suelos.
- El índice de la erosividad en el ámbito de la microcuenca Chañajari varía de 121.82 a  $151.25 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , que se consideran erosivas, la precipitación media anual varía de 813.59 mm y 952.30 mm registradas en las estaciones meteorológicas de Huaraya - Moho e Isla Soto respectivamente.
- Los parámetros de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos obtenidos son: Factor de erodabilidad (k) varía de 0.458 a  $1.276 \text{ t ha h MJ}^{-1}\text{mm}^{-1}\text{ha}^{-1}$ , el factor topográfico (LS) varía de 0.17 a 25.71, el factor de cobertura vegetal (C) varía de 0.001 a 1 y el factor de conservación de suelos (P) varía de 0.01 a 0.5, siendo los factores de lluvia, erodabilidad y topográfico los que contribuyen a la erosión y en menor escala los factores de cultivo y prácticas de conservación.
- Del resultado del grado de erosión y distribución es posible implementar prácticas de conservación de suelos con la construcción de terrazas de formación lenta, zanjas de infiltración, control de cárcavas, surcos en contorno, conservación de pastos naturales y forestación, que disminuyen los efectos de la erosión en el proceso de degradación de los suelos.

## RECOMENDACIONES

- En el marco de aporte sostenible a la inmensa tarea de conservación de suelos en el país y con el resultado del presente trabajo de investigación se recomienda:
- En base a los resultados descritos se recomienda utilizar la ecuación universal de pérdida de suelo en otras regiones por que obtienen los resultados con cierto grado de confiabilidad para cuantificar y comparar las pérdidas.
- Realizar estudios similares en la región de Puno con la finalidad de elaborar y confeccionar un mapa de zonificación del índice de erosión lo que facilitaría la identificación de las lluvias erosivas.
- En base a los resultados del factor lluvia, establecer medidas de control y prevención de la erosión hídrica, con prácticas culturales y agronómicas de conservación de suelos como: la construcción terrazas de formación lenta y zanjas de infiltración, prácticas de preparación de surcos en contorno y control de cárcavas con plantas de especies nativas de la zona.
- Generar procesos participativos en los pobladores de la comunidad el plan de manejo y conservación de suelo, el cuidado del medio ambiente y sus recursos naturales elementos básicos en la producción de alimentos para el hombre y los seres vivos.

**BIBLIOGRAFIA**

- Al-Taai, T., Al-Hassani, A. y Mehdi, M. (2016). Estimating the Soil Erosion by Using Rainfall Data for Selected Stations in Iraq. *Open Access Library Journal*, 3, 1–15. <https://doi.org/10.4236/oalib.1102494>
- Alegre, C. y Rao, R. (1996). Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 57(1), 17–25. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-8809\(95\)01012-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-8809(95)01012-2)
- Alfaro, R. (2011). *Erosion y Transporte de Sedimentos* (2da ed.). Puno, Perú: UNA Puno, Unidad de Publicaciones.
- Almoza, Y. (2006). *Análisis de la influencia de las precipitaciones en la erosión de la cuenca del río Cuyaguateje. Zonas Aridas*, (12).
- Álvarez, R., Taboada, Á., Bustingorri, C. y Gutiérrez, H. (2006). Descompactación de suelos en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Ciencia Del Suelo*, 24(1), 1–10.
- ANA. (2008). *Plan regional de reforestación y conservación de suelos en las cuencas hidrográficas de la región Piura*. Lima, Perú.
- Añó, C. y Peris, M. (2003). *El olivar y la lucha contra la erosión*. Valencia. España. Retrieved from [http://www.infoagro.com/olivo/olivar\\_erosion.htm](http://www.infoagro.com/olivo/olivar_erosion.htm)
- Bagarello, V., Ferro, V. y Pampalone, V. (2013). A new expression of the slope length factor to apply USLE-MM at Sparacia experimental area (Southern Italy). *CATENA*, 102, 21–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.06.008>
- Becerra, A. (1999). *Escorrentía, erosión y conservación de suelos*. Retrieved from <https://books.google.com.pe/books?id=DUI-AAAACAAJ>
- Benites, O. (2017). *Análisis Comparativo de la erosión hídrica por los métodos de USLE y varillas en la Subcuenca del río Pusmalca – Piura*. (Tesis de pregrado).

- Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.
- Benítez, A. (2007). Evaluación del Método de predicción y de las medidas de control de la sedimentación en el embalse “San Jacinto.” *Ingeniería Civil*, 145, 151–160. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2275991>
- Bodoque, M., Pedraza, J., Martín-Duque, F., Sanz, A., Carrasco, M., Díez, A. y Mattera, M. (2012). Evaluación de la degradación específica en la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta (Segovia) mediante métodos de estimación directos e indirectos. *Cuaternario y Geomorfología*; 15, (3-4). Retrieved from <https://recyt.fecyt.es/index.php/CUGEO/article/view/17082>
- Camacho, K. (2012). *Evaluación de la erosión hídrica por efecto de la precipitación máxima en la subcuenca de Cumbaza*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Retrieved from <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/967>
- Camargo, C., Pacheco, C. y López, R. (2017). Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Gestión y Ambiente*, 20(3), 265–280. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/63917>
- Campos, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. México: Universitaria Potosina. Retrieved from <http://ninive.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331>
- Canaza, D. (1993). *Evaluación de procesos factores de erosión y plan de manejo y conservación de suelos en la Microcuenca Chinchera-Puno* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.
- Castro Mendoza, Itzel. (2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), 3-16. Retrieved from [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382013000200001&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382013000200001&lng=es&tlng=es)
- Castro, A. (2017). *Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del departamento de Quindío*. (Tesis de maestría). Universidad de Manizales, Colombia.
- CAZALAC. (2004). *Simulador de lluvia, construcción y especificaciones*. Nota Técnica. centro del agua para zonas áridas y semiáridas de América Latina y El Caribe, La Serena, Chile.

- Ccama, U. (2012). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Ilave utilizando técnicas de teledetección y SIG*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Chow, T., Maidment, R. y Mays, W. (1993). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Clérici, C. y Préchac, G. (2001). Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia (Uruguay)*, 5(1), 92–103. Retrieved from <http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/index.php/directorio/article/view/574>
- Cordova, J. (2015). *Estimación de la tasa de erosión en la microcuenca de la quebrada Chaye Grande de la subcuenca del río Yapateria*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Piura, Piura, Perú.
- Cuitiño, C. (1999). *Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos de la Precordillera Andina y Valle Central de la VII Región*. (Tesis de pregrado. Universidad de Talca, Talca, Chile. Retrieved from <http://dspace.otalca.cl/handle/1950/3245>
- Dagar, C. y Singh, K. (2018). *Introduction BT - Ravine Lands: Greening for Livelihood and Environmental Security*. 1–18. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-8043-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8043-2_1)
- De Sousa, L., Wambua, R., Raude, J. y Mutua, B. (2019). Assessment of Water Flow and Sedimentation Processes in Irrigation Schemes for Decision-Support Tool Development: A Case Review for the Chókwè Irrigation Scheme, Mozambique. *AgriEngineering*, 1, 100–118. <https://doi.org/10.3390/agriengineering1010008>
- Dingman, L. (2015). *Physical hydrology*. Long Grove, IL, USA: Waveland Press Inc.
- Dutta, D., Das, S., Kundu, A. y Taj, A. (2015). Soil erosion risk assessment in Sanjal watershed, Jharkhand (India) using geo-informatics, RUSLE model and TRMM data. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(4), 37. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0034-1>
- FAO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma Italia: FAO.
- FAO. (2015). *Status of the world's soil resources: main report*. Retrieved from <http://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/>
- Farfan, J. (2002). *Determinación del índice de erosividad pluvial (R) de la ecuación universal de pérdida de suelos, para dos estaciones pluviográficas de la VII*

- región del Maule*. (Tesis de maestría). Universidad de Talca Talca, Chile.
- Farhan, Y. y Nawaiseh, S. (2015). Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 4649–4669. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4430-7>
- Faustino, J. (2006). *Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas*. Lima, Perú: Escuela de Post Grado - Universidad Nacional Agraria la Molina,.
- Fernández, G., Vázquez, L., Palacio, L., Peralta-Higuera, A. y García-Romero, A. (2018). Geomorfometría y cálculo de erosión hídrica en diferentes litologías a través de fotogrametría digital con drones. *Investigaciones Geográficas*, (96). Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n96/2448-7279-igeo-96-00003.pdf>
- FitzPatrick, A. (2011). *Introducción a la ciencia de los suelos*. México: Trillas.
- Fournier, F. (1960). *Climatet erosion. La relation entre erosion du sol par l'eau et les precipitations atmospheriques*(3ra ed.). Paris: PVF.
- Gabriels, D., Ghekiere, G., Schiettecatte, W. y Rottiers, I. (2003). Assessment of USLE cover-management C-factors for 40 crop rotation systems on arable farms in the Kemmelbeek watershed, Belgium. *Soil and Tillage Research*, 74(1), 47–53. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00092-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00092-8)
- García-Chevesich, A. (2015). *Control de la Erosion y Recuperacion de Suelos Degradados*. Arizona: Outskirts Press Inc.
- Hardaha, K. (2018). Modeling Soil Erosion by Water. In *Ravine Lands: Greening for Livelihood and Environmental Security*, 549–572. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-8043-2\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8043-2_25)
- Honorato, R. (2000). *Manual de Edafologia* (4ta ed.). Chile: Alfaomega.
- Honorato, R., Barrales, L., Peña, I. y Barrera, F. (2001). *Evaluación del Modelo Usle en la Estimación de la Erosión en Seis Localidades entre la IV y IX Región de Chile. Ciencia e Investigación Agraria: Revista Latinoamericana de Ciencias de La Agricultura*, 28(1), 7–14.
- Hudson, N. (1997). *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía*. Roma, Italia: Boletín de suelos de la FAO.
- ICONA. (1991). *La erosión en España*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, Síntesis, Madrid, España.
- INGEMMET. (1993). Geología de la cordillera occidental y Altiplano al oeste del lago Titicaca - Sur del Perú. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico: Boletín N° 42. Serie A: Carta Geologica Nacional.

- Jiménez, L., Martínez, P., Ruiz, M., Dunin, M. y Guerrero, D. (2008). Metodología para la zonificación del riesgo de erosión en cuencas andinas: estudio de caso en el río Chalaco, Piura. *Espacio Tiempo y Forma. Serie VI, Geografía*, 1, 11–32. <https://doi.org/doi.org/10.5944/etfvi.1.2008.1456>
- Ketema, A. y Dwarakish, S. (2019). Water erosion assessment methods: a review. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1567398>
- Kinnell, P. (2010). Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: a review. *Journal of Hydrology*, 385(1–4), 384–397.
- Kisan, V., Khanindra, P., Narayan, K. y Kumar, S. (2015). Remote sensing and GIS based assessment of soil erosion and soil loss risk around hill top surface mines situated in Saranda Forest, Jharkhand. *Journal of Water and Climate Change*, 7(1), jwc2015100. <https://doi.org/10.2166/wcc.2015.100>
- Lai, C., Wang, Z., Chen, X., Xu, Y., Yang, B., Meng, Q. y Huang, B. (2016). A procedure for assessing the impacts of land-cover change on soil erosion at basin scale. *Hydrology Research*, 47(5), 903–918. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.094>
- Lal, R. (2015). Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability*, 7. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Lee, M.-H. y Lin, H.-H. (2015). Evaluation of Annual Rainfall Erosivity Index Based on Daily, Monthly, and Annual Precipitation Data of Rainfall Station Network in Southern Taiwan. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(6). <https://doi.org/10.1155/2015/214708>
- Leon-Pelaez, J. (2001). *Estudio y Control de la Erosión Hídrica*. Medellín: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia.
- León, B. (2014). *Análisis espacio temporal de las precipitaciones y caudales durante El Niño (1982-83) y (1997-98) en la costa peruana*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Retrieved from [http://www.met.igp.gob.pe/proyectos/manglares/Karen\\_Leon.pdf](http://www.met.igp.gob.pe/proyectos/manglares/Karen_Leon.pdf)
- Liu, Y., Fu, B., Liu, Y., Zhao, W. y Wang, S. (2019). Vulnerability assessment of the global water erosion tendency: Vegetation greening can partly offset increasing rainfall stress. *Land Degradation & Development*, 30(9). 1061-1069. <https://doi.org/10.1002/ldr.3293>
- López, H., Herrera, M. y Tobías, A. (1990). *Evaluación de prácticas de conservación de suelos en la cuenca del río Pensativo, Sacatepéquez*. Guatemala: Universidad de

- San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. Retrieved from [http://cedia.fausac.usac.edu.gt/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=9904&query\\_desc=](http://cedia.fausac.usac.edu.gt/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=9904&query_desc=)
- Mahala, A. (2018). Soil erosion estimation using RUSLE and GIS techniques—a study of a plateau fringe region of tropical environment. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(13), 335. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3703-3>
- Mancilla, G. (2008). *Uso de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo en el Campo Forestal*. Chile: Universidad de Chile. Retrieved from <http://es.slideshare.net/solecinha/apuntes-docentes-usle>
- Mays, W. (2011). *Water resources engineering*. Estados Unidos: John Wiley.
- McCool, K. y Williams, D. (2008). Soil Erosion by Water. *Encyclopedia of Ecology*, 3284-3290. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00296-2>
- Mejia, A. (2012). *Hidrología Aplicada*. Lima, Perú: EDIAGRARIA.
- Mintegui, Á., Fábregas, S., Robredo, C. y Huelin, P. (2016). Evaluación de los efectos de la restauración hidrológico-forestal en la atenuación de los riesgos naturales en las cuencas de montaña: aplicación en el Pirineo aragonés. *Lucas Mallada*, 18, 311–378. Retrieved from <http://revistas.iea.es/index.php/LUMALL/article/view/2639>
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería*. México: Alfaomega.
- Morgan, C. (2005). *Soil Erosion and Conservation* (3ra ed.). UK: Blackwell Science Ltd.
- Mustefa, M., Fufa, F. y Takala, W. (2019). GIS estimation of annual average soil loss rate from Hangar River watershed using RUSLE. *Journal of Water and Climate Change*. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.181>
- Nearing, M., Pruski, F. y O'Neal, M. (2004). Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 59(1), 43–50.
- Nolan, C., Vliet, v., Goddard, W. y Flesch, K. (1997). Estimating storm erosion with a rainfall simulator. *Canadian Journal of Soil Science*, 77(4), 669–676. <https://doi.org/10.4141/S96-079>
- Olivares, B., Lobo, D. y Verbist, K. (2014). Aplicación del modelo USLE en parcelas de erosión bajo prácticas de conservación de suelos y aguas en San Pedro de Melipilla, Chile. *Ciencia e Ingeniería*, 36(1), 3–9. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507550627001>
- Olmos, L., Borsellino, M., Mattar, M., Pilán, M. y Farias, H. (2003). *Estimación de la tasa de producción de sedimentos en la cuenca del río Horcones* (Prov. de Salta

- y Santiago del Estero). *Nuevas Tendencias en Hidraulica de ríos*. Santiago del Estero, Argentina. Retrieved from [http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2003/TC/TC\\_2\\_8.pdf](http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2003/TC/TC_2_8.pdf)
- Oñate-Valdivieso, F. (2004). Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. *Revista Electrónica de La REDLACH*, 1(1), 27–32.
- Osman, T. (2014). Soil Erosion by Water. *Soil Degradation, Conservation and Remediation*, 69–101. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7590-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7590-9_3)
- Ovalles, J. (2013). *Análisis Comparativo de la Pérdida de Suelo de la Cuenca Alta de la Presa de Sabana Yegua, usando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Métodos Directos*. (Tesis de Maestría). Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.
- Oyarzun, C. (1993). *Estimación de los procesos de erosión hídrica en un ambiente montañoso de la cuenca del río Biobío, IX Región, Chile*. (Tesis de Doctorado) Universidad de Concepción, Concepción, Región del Bío Bío, Chile.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E. y Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, 48, 38–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- Parikh, J. y James, R. (2012). Soil: The Foundation of Agriculture. *Nature Education Knowledge*, 3(10), 2. Retrieved from <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/soil-the-foundation-of-agriculture-84224268>
- Peralta, M. (1976). *Uso, clasificación y conservación de suelos*. Santiago, Chile: SAG Ministerio de Agricultura.
- Pérez-Sánchez, J. y Senent, J. (2017). Curvas intensidad–duración–frecuencia de tormentas de corta duración en la cuenca del río Segura, España. *Agrociencia*, 51(6), 607–616. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30252708002>
- Pidwirny, M. (2006). Erosion and Deposition. *Fundamentals of Physical Geography*. Retrieved from <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10w.html>
- Pizarro, R., Flores, P., Sangüesa, C., Martínez, E. y García, L. (2004). Diseño de obras para la conservación de aguas y suelos. *Bosque (Valdivia)*, 29(2). <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002008000200006>

- Ponce, M. (2014). *Engineering Hydrology, Principles and Practices* (2da ed.). Retrieved from <http://ponce.sdsu.edu/enghydro/>
- Porta, J., Lopez-Acevedo, M. y Poch, M. (2014). *Edafología: uso y protección de suelos*. España: Mundi-Prensa Retrieved from <https://books.google.com.pe/books?id=7x1fAwAAQBAJ>
- Prado-Hernández, V, Rivera-Ruiz, P., León-Mojarro, B., Carrillo-García, M. y Martínez-Ruiz, A. (2017). *Calibración de los modelos de pérdidas de suelo usle y musle en una cuenca forestal de México: caso El Malacate*. *Agrociencia*, 51(3), 265–284. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30250596002>
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S. y Geetha, N. (2012). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 209–215. <https://doi.org/10.1016/J.GSF.2011.11.003>
- Quiñonez, G. (2012). *La degradación del suelo por erosión hídrica en cultivos de granos básicos y café en la microcuenca Torjá, cuenca del río Grande de Zacapa, Guatemala*. (Tesis de maestría). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica.
- Quiroga, A. y Bono, A. (2012). *Manual de Fertilidad y Evaluación de Suelos*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA.
- Ramos, C. (2001). Modelamiento Ambiental Para Análisis de Susceptibilidad Erosiva en la Cuenca Media y Alta del Río Cañete y Determinación del Mapa de Erosión. *Modelo de erosión hídrica*. Lima, Perú.
- Renard, G., Foster, R., Weesies, G., AMcCool, K. y Yoder, C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to Equation, planning with the revised Universal Soil Loss (RUSLE)*. *Agricultural handbook.*, (703). <https://doi.org/DC0-16-65-100,048938-5>
- Renard, G. y Freimund, R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1), 287–306. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Roncal, W. (2006). *Influencia de las Plantaciones Forestales Sobre la Escorrentía Superficial y la Erosión Hídrica en Porcon, Cajamarca*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Sangüesa, C., Arumí, J., Pizarro, R. y Link, O. (2010). A Rainfall Simulator for the in situ Study of Superficial Runoff and Soil Erosion. *Chilean Journal of Agricultural*

- Research*, 70(1), 178–182. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392010000100019>.
- Somarrriba-Chang, M., Obando, M. y Alonso, J. (2005). *Manual de métodos sencillos para estimar erosión hídrica*. Suiza: Programa de Agricultura Sostenible en Laderas de América Central (PASOLAC)
- Suárez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander.
- Taboada-Castro, M., Rodríguez-Blanco, L., Taboada-Castro, T. y Oropeza-Mota, L. (2011). Vulnerabilidad estructural en suelos de textura gruesa bajo cultivo y huerta. *Terra Latinoamericana*, 29(1), 11–21.
- Tapia, S. (2011). *Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la sierra peruana*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Tshikeba, M., Muamba, R., Onema, M., Gumindoga, W. y Tshimpampa, J. (2018). A GIS-based estimation of soil erosion parameters for soil loss potential and erosion hazard in the city of Kinshasa, the Democratic Republic of Congo. *Proc. IAHS*, 378, 51–57. <https://doi.org/10.5194/piahs-378-51-2018>
- Unger, W. (1984). Tillage systems for soil and water conservation. *FAO Soils Bulletin* (54). Roma, Italia.
- Vahrson, W. y Dercksen, P. (1990). Intensidades críticas de lluvias para el diseño de obras de conservación en Costa Rica. *Agronomía Costaricense*, 14(2), 141–149.
- Vásquez, A., Mejía, A. y Faustino, J. Teran, T., Vasquez, I., Dias, J., Vasquez, C., Castro, A., Tapia N., y Alcántara, J. (2016). *Manejo y gestión de cuencas hidrográficas*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Vásquez, A. y Tapia, M. (2011). Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana. *Revista Ingeniería UC*, 18(3), 42–50. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70723269005>
- Vega, B. y Febles, M. (2006). Evaluación de la erosividad de la lluvia en regiones agropecuarias en la porción central de la provincia La Habana. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40(2), 215–220. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193017714012>
- Vinci, A., Todisco, F., Brigante, R., Mannocchi, F. y Radicioni, F. (2017). A smartphone camera for the structure from motion reconstruction for measuring soil surface variations and soil loss due to erosion. *Hydrology Research*, 48(3), 673–685.

- <https://doi.org/10.2166/nh.2017.075>
- Walker, M. (2008). *Soil*. In *Early Bird Earth Science Series*. Estados Unidos: Lerner Publishing Group. Retrieved from <https://books.google.com.pe/books?id=XubDHq16ULwC>
- Weil, R. y Brady, N. (2016). *The Nature and Properties of Soils*. (15<sup>ta</sup> edition). España: Pearson.
- Williams, R. (1975). *Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor*. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. Oxford, Mississippi: United States Department of Agriculture. ARS- S40, Washington.
- Wischmeier, W. y Smith, D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. *Agriculture Handbook*, (37). Retrieved from <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>
- Xiong, M., Sun, R. y Chen, L. (2019). Global analysis of support practices in USLE-based soil erosion modeling. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43(3). <https://doi.org/10.1177/0309133319832016>
- Yataco, A. (2007). *Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica utilizando varillas de erosión, en suelos con diferentes grados de cobertura vegetal de la comunidad campesina de Yuracmayo, Lima*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina. Retrieved from <http://www.lamolina.edu.pe/agricola/biblioteca/Tesis/2007/Evaluacion>
- Zachar, D. (1982). Chapter 1 Basic Terminology. In *Soil Erosion*, 10, 15–25. [https://doi.org/doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70644-5](https://doi.org/doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70644-5)
- Zavaleta-Huerta, E., Cruz-Jiménez, H. y Márquez, J. (2012). Potencial de infiltración de agua de lluvia a partir de la retención de una plantación forestal. *Foresta Veracruzana*, 14(1), 23–28. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49724122004>
- Zúñiga, J. (2017). *Determinación de la pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca - Arequipa aplicando USLE y técnicas geoespaciales*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina. Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3072>



**ANEXOS**

**Anexo 1. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología**

"SENAMHI ORGANO OFICIAL Y RECTOR DEL SISTEMA HIDROMETEOROLÓGICO  
NACIONAL AL SERVICIO DEL DESARROLLO SOCIO ECONÓMICO DEL PAIS"

ESTACION:	CO. 115038	LATITUD	15°23'17.8"	DEPARTAMENTO	PUNO
HUARAYA MOHO		LONGITUD	69°29'03.4	PROVINCIA	MOHO
		ALTITUD	3890	DISTRITO	MOHO

Tabla 25

*Precipitación total mensual, Estación Huaraya Moho*

AÑOS	ENE.	FEB.	MAR.	ABRL.	MAY.	JUN.	JUL.	AGOT.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2008	219.3	135.6	118.0	7	20.2	0	0	0	5.3	85	10.5	209.5
2009	85.2	87.8	47.8	15.5	2.2	0	4.6	0	12.5	48	124.4	158.6
2010	218.6	182.7	78.4	31.8	35.2	0.9	0	4.7	1.9	42.5	0.5	240.4
2011	56.7	140.5	107.8	8.6	9.9	0	5.6	2.3	48.6	45.9	55.6	186.6
2012	186.8	282.5	145	134.9	0.3	2.2	0	3.3	13.2	64.2	43.6	253
2013	190.4	184	67.2	11	25.3	16.3	8.3	11.8	0	115.2	36.6	186.3
2014	120.4	95.3	60.6	38.1	24	1	21.7	39.7	94.7	40.1	17.9	83
2015	215.5	158.3	50.4	157	11.1	1.5	9.5	10.4	38.7	65.7	108.9	117.5
2016	137.9	323.9	4.5	97.2	12.9	0	11.3	6.8	6.7	65.5	38.1	95
2017	183.0	67.6	218.0	86.9	40.3	0.0	2.5	0.0	62.3	74.5	41.3	96.4

Fuente: RCC. Información procesada para: Universidad Nacional del Altiplano.

ESTACION:	CO. 100065	LATITUD	15°33'44,2"	DEPARTAMENTO	PUNO
ISLA SOTO		LONGITUD	69°29'19,8"	PROVINCIA	MOHO
		ALTITUD	3815	DISTRITO	CONIMA

Tabla 26

*Precipitación total mensual, Estación Isla Soto*

AÑOS	ENE.	FEB.	MAR.	ABRL.	MAY.	JUN.	JUL.	AGOT.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2008	250.1	150.1	116	21.9	13.4	0	0.2	1.1	1.2	30.8	18.2	148.8
2009	119.7	172.7	105.8	36.3	0.3	0	10.2	0	15.1	5.2	130.3	249.7
2010	265.8	226.9	103.2	100.1	46.1	8.2	0	1.5	0	32.2	4	240.7
2011	70	257.8	208.7	10.4	14.9	3.1	16.2	0.8	25.7	84.1	36.1	222.2
2012	265.4	290.4	169.7	114.7	6.2	2.5	2.8		5.5	46.1	68.9	229
2013	242.9	258.4	83.1	15.0	45	9.7	25.7	13.6	0	92.4	42.1	329.9
2014	208.8	188.4	91.8	62	13.5	0	11.5	67.9	81	66.9	38.7	95.1
2015	247.1	141.2	88.72	184.2	12	0	1.2	18.04	33.5	47.1	60.9	110.3
2016	96	291.6	37.8	121.4	0	0	12.5	0.6	6.2	33.8	25.1	133
2017	192.1	165.9	243.4	98.2	55.9	3.6	6.6	0.4	83.5	39.5	7.9	63.7

Fuente: RCC. Información procesada para: Universidad Nacional del Altiplano.

**Anexo 2.** Datos de perfiles y calicatas, ensayos de laboratorio

Tabla 27  
*Datos de perfiles y calicatas*

MUESTRA N°	PROFUNDIDAD DE HORIZONTES (m)	COLOR TABLA MUNSELL	NOMBRE DEL LUGAR	COORDENADAS UTM 19		ALTITUD m.s.n.m	OBSERVACIONE S
				N	E		
1. PERFIL	A	1.20	Pardo rojizo	Mujuni cucho	8296749	449090	4000
	B	>1.20	Pardo rojizo				Base manto lutita
	C						
2. PERFIL	A	0.90	Rojo amarillento	pajcha vilacuyo	8296390	450098	4029 Base manto lutita
	B	>0.90	Pardo rojizo				
	C						
3. PERFIL	A	0.55	Pardo rojizo	vila vila	8295851	451381	4122
	B	>0.55	Pardo rojizo				Base manto lutita
	C						
4. PERFIL	A	3.00		Huata pampa	8295656	452621	4157
	B	>3.00	Pardo rojizo				Base manto lutita
	C						
5. PERFIL	A	0.37	negro	Jacha karka	8295476	452869	4228 capa arable
	B	0.45	pardo oscuro	Pampa			Arcilla
	C	>0.45	Rojo amarillento				
6. PERFIL	A	0.30	Pardo rojizo	patilla pata	8295685	452918	4278
	B	>0.30					Base manto lutita
	C						
7. PERFIL	A	0.40	Pardo rojizo	karaña cucho	8295940	452391	4193
	B						Base manto lutita
	C						
8. PERFIL	A	>30	Pardo rojizo	minas cuyo	8295735	452242	4087 gran base mano lutita
	B						
	C						
9. PERFIL	A	0.50		chanca huaranca	8296025	452009	4160
	B	>0.50	Pardo rojizo				Base manto lutita
	C						
10. PERFIL	A	1.00		chilcali parque	8296146	451454	
	B	4.50	rojo pardo				Base manto lutita
	C	>4.5					
11. PERFIL	A	1.00	pardo	donato pampa	8295468	450656	3957
	B	>1.00					Base manto lutita
	C						
12. CALICATA	A	0.30	rojizo	pilastron pampa	8295974	449864	3910 capa arable
	B	0.45	oscuro				Arcilla
	C	>0.45					nivel freatico

Fuente: Elaboración propia (2019).

Tabla 28  
*Ensayos de laboratorio de suelos*

MUESTRA N°	UNIDAD DE SUELO	ARENA	LIMO	ARCILL A	CLASE	PERMEABILI DAD	M.O.
1	Mujini cucho Pajcha vila	12.30	55.10	32.60	Franco arcilla limoso	bajo	2.15
2	cuyo	11.60	53.00	35.40	Franco arcilla limoso	bajo	2.85
3	Vila vila	95.10	1.70	3.20	Arena	alta	0.29
4	Huata pampa Jacha Karka	12.80	62.23	26.00	Franco arcilla limoso	bajo	2.80
5	pampa	36.70	37.00	26.40	Franco arcilloso	medio	4.04
6	Patilla pata	15.50	71.60	12.90	Franco limoso Franco arcilla	bajo	1.45
7	Karaña cucho	10.50	56.98	32.52	limoso Franco arcilla	bajo	2.15
8	Minas cuyo	60.00	10.50	29.50	limoso Franco arcilla	bajo	1.30
9	Chanca huanca	13.70	62.30	24.20	limoso Franco arcilla	bajo	2.15
10	Chilcani parque	13.00	64.30	22.70	limoso Franco arcilla	bajo	1.80
11	Donato pampa Pilastron	10.90	54.50	34.60	limoso franco arcilla	muy alta	1.05
12	pampa	43.40	27.00	29.60	arenoso	bajo	3.10

**Anexo 3. Imágenes de perfiles y calicatas**



*Figura 20. Perfil Mujuni Cucho*



*Figura 21. Pajcha Vila Cuyo*



*Figura 22. Vila Vila*



*Figura 23. Huata Pampa*



*Figura 24. Jacha Karka Pampa*



*Figura 25. Patilla pata*

**Anexo 4.** Tablas de composición florística de pastos y especies nativas

Tabla 29

*Composición florística de pastos y especies nativas*

MUESTRA N°	LUGAR DE RECOLECCION	NOMBRE COMUN	ESPECIE	COORDENADAS UTM 19		ALTITUD m.s.n.m
1	cani amaya	Ichu	stipa ichu scirpus rigidus	8296879	448876	4009
2	Qorpa parque	totorilla	boeck	8296665	449713	3983
3	pajcha vila cuyo	Ichu	stipa ichu	8296374	450052	4032
4	vilina pata	Ichu kactus	stipa ichu opundia flocusa	8296218	450589	4011
5	vilavila	pasto plumilla	stipa brachy phylla	8295808	451373	4122
6	vilacerva	Ichu	stipa ichu	8295472	451992	4186
7	Qetamani	Ichu	stipa ichu	8295317	452522	4199
8	chulini parque	Ichu	stipa ichu	8295120	452814	4248
9	tiptirini	Ichu	stipa ichu	8295295	453172	4263
10	jacha karka punta	grama ichu	stipa brachy phylla	8295554	453114	4296
11	patilla pampa	sillo sillo	alchemilla pinnata festusa dolichophy ila	8295970	452442	4259
12	huata pampa	chillihua	stipa brachy phylla	8295606	452606	4157
13	karaña cucho encima	grama ichu	stipa brachy phylla	8295970	452442	4209
14	chilcane parque	tola yareta	azorella compacta	8296305	451348	4050
15	jaqee huataña pampa	pasto plumilla	stipa brachy phylla gnaphalium	8296174	451302	4015
16	donato pampa	grama pasto	lacteam stipa ichu senecis	8296459	450657	3957
17	litera parque	ichu muña	vulgaris eliocharis	8296937	450119	3940
18	pilatron pampa	trebol o layo	albibracteata	8296976	449864	3910

Tabla 30

*Índice de erosividad de la lluvia estación de Huaraya - Moho*

AÑOS	ENE.	FEB.	MAR.	ABRL.	MAY.	JUN.	JUL.	AGOT.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	Total
2008	219.3	135.6	118.0	7.0	20.2	0.0	0.0	0.0	5.3	85.0	10.5	209.5	810.4
2009	85.2	87.8	47.8	15.5	2.2	0.0	5.8	0.0	12.5	48.0	124.4	158.6	587.8
2010	218.6	182.7	78.4	31.8	35.2	0.9	0.0	4.7	1.9	42.5	0.5	240.4	837.6
2011	56.7	140.6	107.8	8.6	9.9	0.0	5.6	2.3	48.6	45.9	55.6	186.6	668.2
2012	186.8	282.5	145.0	134.9	0.3	2.2	0.0	3.3	13.2	64.2	43.6	253.0	1129.0
2013	190.4	184.0	67.2	11.0	25.3	16.3	8.3	11.8	0.0	115.2	36.6	186.3	852.4
2014	120.4	95.3	60.6	38.1	24.0	1.0	21.7	39.7	94.7	40.1	17.9	83.0	636.5
2015	212.5	158.3	50.4	157.0	11.1	1.5	9.5	10.4	38.7	65.7	108.9	117.5	941.5
2016	137.9	323.9	4.5	97.2	12.9	0.0	11.3	6.8	6.7	65.5	38.1	95.0	799.8
2017	183.0	67.6	218.0	86.9	40.3	0.0	2.5	0.0	62.3	74.5	41.3	96.4	872.8
Prom.	161.08	165.83	89.77	58.80	18.14	2.19	6.47	7.90	28.39	64.66	47.74	162.63	813.60
R	31.89	33.80	9.91	4.25	0.40	0.01	0.05	0.08	0.99	5.14	2.80	32.51	121.82

Tabla 31  
*Índice de erosividad de la lluvia, estación Isla Soto*

AÑOS	ENE.	FEB.	MAR.	ABRL.	MAY.	JUN.	JUL.	AGOT.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	Total
2008	250.1	150.1	116.0	21.9	13.4	0.0	0.2	1.1	1.2	30.8	18.2	148.8	751.8
2009	119.6	172.7	105.8	36.3	0.3	0.0	10.2	0.0	15.1	5.2	130.3	249.7	845.2
2010	265.8	226.9	103.2	100.1	46.1	8.2	0.0	1.5	0.0	32.2	4.0	240.7	1028.7
2011	70.0	257.8	208.7	10.4	14.9	3.1	16.2	0.8	25.7	84.1	36.1	222.2	950.0
2012	242.7	290.4	169.7	114.7	6.2	2.5	2.8	3.7	5.5	46.1	68.9	229.0	1182.2
2013	256.1	258.4	83.1	15.0	45.0	9.7	25.7	13.6	0.0	92.4	41.7	329.9	1170.6
2014	208.8	188.4	91.8	62.0	13.5	0.0	11.5	67.9	81.0	66.9	38.7	95.1	925.6
2015	247.1	141.2	88.7	190.2	12.0	0.0	1.2	18.0	33.5	47.1	60.9	110.3	950.2
2016	96.0	291.6	37.8	121.4	0.0	0.0	12.5	0.6	6.2	33.8	25.1	133.0	758.0
2017	192.1	165.9	243.4	98.2	55.9	3.6	6.6	0.4	83.5	39.5	7.9	63.7	960.7
Prom.	194.83	214.34	124.82	77.02	20.73	2.71	8.69	10.76	25.17	47.81	43.18	182.24	952.30
R	39.86	48.24	16.36	6.23	0.45	0.01	0.08	0.12	0.67	2.40	1.96	34.87	151.25

**Anexo 5.** Imágenes de composición florística de pastos y especies nativas



*Figura 26.* Cani Amaya



*Figura 27.* Korpa Parque



*Figura 28. Vilina Pata*



*Figura 29. Vila Vila*



*Figura 30. Vila Cerca*



*Figura 31. Qetamani*



*Figura 32. Tiptirini*



*Figura 33. Huata pampa*

**Anexo 6. Deterioro de suelos - imágenes**



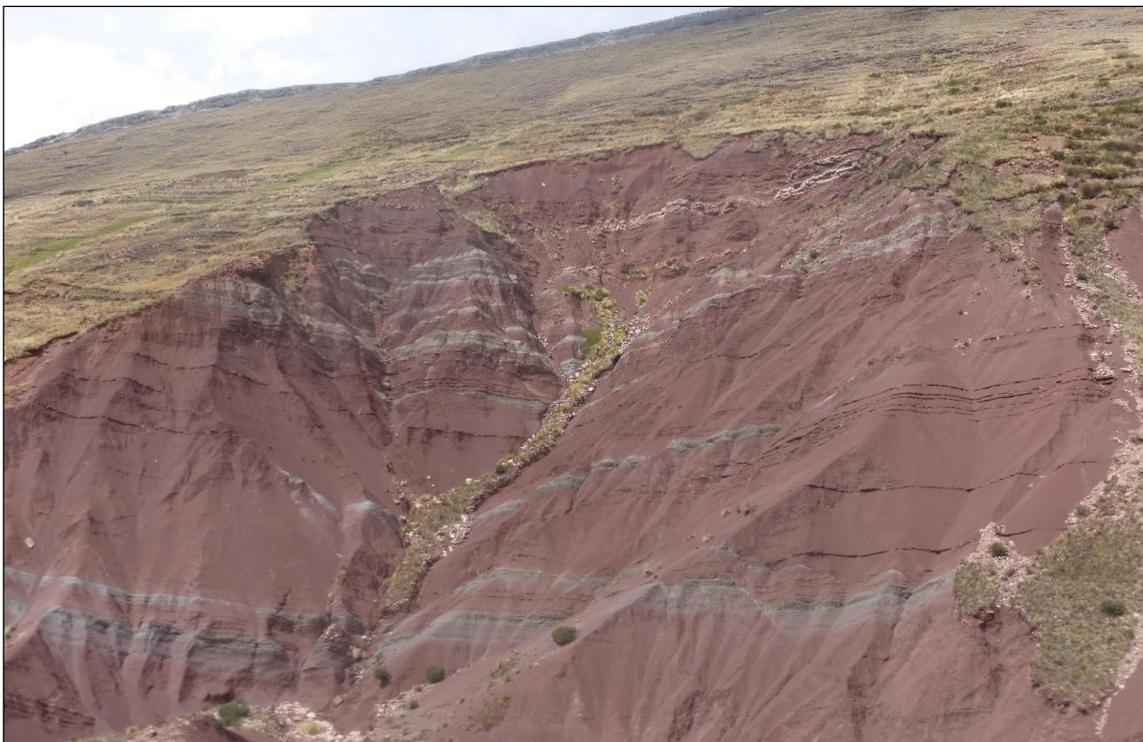
*Figura 34. Erosión del suelo hasta afloramiento rocoso*



*Figura 35. Suelo en erosión*



*Figura 36.* Perdida de suelo en el tiempo



*Figura 37.* Erosión crítica



*Figura 38.* Suelo erosionado



*Figura 39.* Suelo erosionado



*Figura 40. Erosión en cárcava*



*Figura 41. Suelo en deslizamiento*

**Anexo 7.** Imágenes de especies nativas atenuantes a la erosión



Figura 42. “Sejwinka” o “Sewinka” (*Cortaderia selloana*)



Figura 43. Rivera del río protegida con “Sejwinka” o “Sewinka” (*Cortaderia selloana*)



Figura 44. “Mullaka” (*Muhlebeckia volcánica*)



Figura 45. “Pinco pinco” (*Ephedra americana var. rupestris*)