



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EL
EFECTO EN LA COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA DEL
RÍO ZAPATILLA**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. GIORNI BAUTISTA TICONA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2023



DEDICATORIA

A mi abuelo Braulio Bautista Mamani Q.E.P.D (†), que en su ausencia me hizo falta, pero sé que desde donde se encuentre estará orgulloso de las decisiones que tomé.

A mis padres, Ricardo Bautista Quispe y Pascuala Ticona Apaza quienes me dieron la vida, su amor y su apoyo en cada uno de los pasos que he dado; asimismo, por transmitirme sus sabios consejos, por enseñarme a valorar la vida, por motivarme a seguir superándome en todo momento y por darme la herencia más grande que pueda haber en este mundo. “El estudio”.

A mis hermanos Elmer Fredy, Mariluz y Richard, que me apoyaron en todo momento y esperando siempre lo mejor de mí.

*Con amor, cariño y respeto: **Giorni***



AGRADECIMIENTOS

Mi eterno agradecimiento a Dios, por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, brindándome paciencia y sabiduría, amor y las fuerzas para no rendirme y seguir esforzarme a culminar con éxito mis metas propuestas, a mi familia que con su apoyo incondicional me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para lograr este anhelo.

Mi infinito agradecimiento, a todos mis docentes de la Facultad de Ingeniería Agrícola, en mi deseo de superación, por haberme brindado sus conocimientos y valiosas enseñanzas en las aulas Universitarias.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2. ENUNCIADO DEL PROBLEMA	17
1.2.1. Pregunta general.....	17
1.2.2. Preguntas específicas	17
1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.3.1. Hipótesis general.....	17
1.3.2. Hipótesis específicas	17
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	18
1.5. OBJETIVOS	20
1.5.1. Objetivo general.....	20
1.5.2. Objetivos específicos	20



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES	21
2.1.1. Nivel internacional.....	21
2.1.2. Nivel nacional.....	24
2.1.3. Nivel local.....	26
2.2. MARCO TEÓRICO	28
2.2.1. Erosión.....	28
2.2.2. Erosión hídrica.....	28
2.2.2.1. Tipos de erosión hídrica.....	29
2.2.2.2. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.....	31
2.2.2.3. Factores en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.....	31
2.2.2.4. Estimación de erosión en campo.....	39
2.2.2.5. Índice topográfica de humedad.....	40
2.2.3. Cobertura vegetal.....	41
2.3. MARCO CONCEPTUAL	42
2.3.1. La cuenca hidrográfica.....	42
2.3.1.1. Características físicas de una cuenca.....	43
2.3.1.2. Perímetro de la cuenca.....	43
2.3.1.3. Área de la cuenca.....	44
2.3.1.4. Pendiente de la cuenca.....	45
2.3.1.5. Factor de Forma de Horton (Kf).....	45
2.3.1.6. Análisis hipsométrico.....	45
2.3.2. Hidráulica fluvial.....	46



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	47
3.1.1. Ubicación del área de estudio	47
3.1.2. Topografía.....	48
3.1.3. Clima e hidrología.....	48
3.1.4. Características geomorfológicas	49
3.1.5. Geomorfología	50
3.1.6. Uso de suelo	51
3.2. MÉTODOLÓGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	53
3.2.1. Tipo de investigación	53
3.2.2. Enfoque de investigación	53
3.2.3. Nivel de investigación.....	53
3.2.4. Diseño de la investigación	53
3.3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	54
3.3.1. Recopilación de la información	54
3.3.1.1. Material satelital.....	54
3.3.1.2. Datos climatológicos.....	54
3.3.2. Análisis de suelos.....	54
3.3.3. Identificación hídrica.	56
3.3.4. Aplicación del USLE	56
3.3.4.1. Factor de erosividad de lluvia	56
3.3.4.2. Factor de erodabilidad del suelo	58
3.3.4.3. Factor de longitud pendiente e inclinación pendiente.....	61
3.3.4.4. Obtención del mapa de factor de inclinación de pendiente	64



3.3.4.5. Obtención del mapa de factor de manejo de cobertura	65
3.3.4.6. Obtención del mapa de prácticas de control	67
3.3.5. Estimación de erosión en campo.....	68
3.3.5.1. Método de pedestales	68
3.3.5.2. Capa de armadura.....	69
3.3.6. Información utilizando el método de Tukey	71
3.3.7. Influencia de la cobertura vegetal como función ecosistémica en el riesgo de erosión.....	72
3.3.7.1. Índice de humedad topográfica	72
3.3.7.2. Índice de potencia de flujo superficial	75

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EROSIÓN HÍDRICA MEDIANTE MÉTODOS DE ESTUDIO.....	76
4.1.1. Estimación de erosión hídrica método USLE	76
4.1.1.1. Factor de agresividad de la lluvia R.....	76
4.1.1.2. Factor de erodabilidad del suelo K	77
4.1.1.3. Factor longitud pendiente e inclinación de pendiente L	78
4.1.1.4. Factor de manejo de cobertura C	80
4.1.1.5. Cálculo de pérdida de suelo por erosión hídrica.....	82
4.1.2. Estimación de erosión hídrica en campo.....	83
4.2. COMPARACIÓN DE MÉTODOS USLE Y CAMPO DE PEDESTAL Y CAPA DE ARMADURA.....	85
4.3. INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL COMO FUNCIÓN ECOSISTÉMICA EN EL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA.....	89
4.3.1. Índice de humedad topográfica	89



4.3.2. Índice de potencia de flujo superficial	90
V. CONCLUSIONES.....	93
VI. RECOMENDACIONES	94
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXOS.....	107

Área : Recursos Hídricos

Tema : Erosión del Suelo

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 12 de enero de 2023



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de cobertura vegetal C	37
Tabla 2. Factor P de prácticas de conservación	39
Tabla 3. Unidades geomorfológicas de la cuenca del río Zapatilla	51
Tabla 4. Uso actual de tierras en la cuenca del río Zapatilla.....	52
Tabla 5. Análisis de clase textural de suelos.....	55
Tabla 6. Precipitación media mensual de 20 años de registro	56
Tabla 7. Datos procesados para el factor R.....	57
Tabla 8. Datos obtenidos del factor K.....	60
Tabla 9. Rangos de clasificación para la cobertura vegetal en función del NDVI	66
Tabla 10. Valores de erosión activa (EA)	67
Tabla 11. Datos obtenidos en campo	71
Tabla 12. Valores de métodos de campo y el método USLE.....	86
Tabla 13. Análisis de varianza de los métodos de campo y el método USLE.....	87
Tabla 14. Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%	88



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Zapatilla	48
Figura 2. Red de drenaje de la cuenca del río Zapatilla	49
Figura 3. Geomorfología de la cuenca del río Zapatilla	50
Figura 4. Uso actual de tierras	52
Figura 5. Interpolación de factor R	58
Figura 6. Conversión de polígono a ráster del factor K	61
Figura 7. Herramientas de hidrología para dirección de flujo y acumulación de flujo	63
Figura 8. Medición de pedestales.....	69
Figura 9. Capa de armadura	70
Figura 10. Factor R (agresividad de lluvia)	77
Figura 11. Mapa de erodabilidad	78
Figura 12. Mapa del factor de longitud de pendiente	79
Figura 13. Factor de inclinación de pendiente	80
Figura 14. Factor de manejo de cobertura C.....	81
Figura 15. Pérdida de suelo por erosión hídrica	82
Figura 16. Ubicación de puntos de análisis de campo	84
Figura 17. Índice de humedad topográfica	90
Figura 18. Mapa de índice de potencia de flujo superficial	91



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ALOS PALSAR	: Radar de apertura sintética
CA	: Capa de armadura
DEM	: Modelo de elevación digital
FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
INADE	: Instituto Nacional de Desarrollo.
IGN	: Instituto Geográfico Nacional
INGEMMET	: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
ITH	: Índice topográfica de humedad
K	: Erodabilidad del suelo
MINAM	: Ministerio del ambiente
NDVI	: Índice de vegetación estandarizada
P	: Prácticas de conservación de suelos
PSI	: Índice de potencia de flujo superficial
R	: Erosividad de lluvia
SAVI	: Índice de vegetación ajustada al suelo
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SIG	: Sistema de Información Geográfica.
TOA	: Tope de la atmosfera
USLE	: Ecuación Universal de Pérdida de Suelo
WGS	: Word Geographic Sistem (Sistema Geográfico Mundial).



RESUMEN

La presente investigación se realizó en la cuenca del río Zapatilla, perteneciente a la cuenca del lago Titicaca, zona con mayores riesgos de erosión hídrica, generalmente ocurre en la zona alta de la cuenca, por lo que es imprescindible cuantificar la pérdida de suelos. Cuyo objetivo es estimar la erosión hídrica y su efecto en la cobertura vegetal en la cuenca del río Zapatilla. Las metodologías empleadas fueron por el modelamiento USLE, que permitió determinar: la agresividad de lluvia, erodabilidad, longitud de ladera, el grado de pendiente y factor de cobertura vegetal del suelo, con el método de pedestales se midió la altura de pedestal de la última labranza y por último con el método de capa de armadura se contabilizó la cantidad de piedras en la superficie en un área de 50x50 cm, para la comparación respectiva, además, se realizó la prueba de rango múltiple de Tukey y finalmente se determinó los índices morfométricos como el índice de humedad topográfica de suelo, índice de potencia del comportamiento de flujo superficial para la influencia de la cobertura vegetal. Los resultados obtenidos fueron tasas de erosión en mm de altura, que mediante la prueba de rango múltiple de Tukey al 95 de probabilidad, el método de Capa de Armadura y método Pedestal son estadísticamente iguales con valores de 5.865mm y 4.950mm respectivamente y el método USLE ocupa el último lugar con un valor de 1.738mm, que es diferente a los métodos; determinación de los índices morfométricos determinados como el índice de humedad topográfica varía de alta, media y baja, índices de potencia de flujo superficial fueron más alta en las quebradas.

Palabras clave: erosión hídrica, cobertura vegetal, método capa de armadura, morfometría.



ABSTRACT

This research was carried out in the Zapatilla river basin, belonging to the Lake Titicaca basin, an area with the highest risk of water erosion, generally occurring in the upper area of the basin, so it is essential to quantify soil loss. Whose objective is to estimate water erosion and its effect on vegetation cover in the Zapatilla river basin. The methodologies used were by the USLE modeling, which allowed to determine: the aggressiveness of rain, erodibility, length of slope, the degree of slope and factor of vegetation cover of the soil, with the method of pedestals the height of the pedestal of the last was measured. tillage and finally with the armor layer method, the amount of stones on the surface was counted in an area of 50x50 cm, for the respective comparison, in addition, the Tukey multiple range test was carried out and finally the morphometric indices were determined. such as the topographic soil moisture index, power index of surface flow behavior for the influence of vegetation cover. The results obtained were erosion rates in mm of height, which by Tukey's multiple range test at 95 probability, the Armor Layer method and the Pedestal method are statistically equal with values of 5,865mm and 4,950mm respectively and the method USLE ranks last with a value of 1,738mm, which is different from the methods; determination of the morphometric indices determined as the topographic humidity index varies from high, medium and low, surface flow power indices were higher in the ravines.

Keywords: water erosion, vegetation cover, armor layer method, morphometry.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El suelo a nivel mundial es muy importante para el desarrollo de diferentes actividades económicas; sin embargo, sufre degradaciones por diferentes causas, principalmente la erosión hídrica (Belizario, 2021), por lo que FAO (2016) considera que el suelo es esencial para la vida, pero la presión humana sobre el recurso suelo está llegando a su límite y la pérdida de suelos más productivos podría conducir a una mayor variabilidad en los precios de los alimentos, conduciendo a muchas personas a la pobreza y esta realidad es evitable. La gestión adecuada de los suelos podría incrementar el suministro de alimentos y proporcionar herramientas valiosas para la regulación del clima y vías para proteger los servicios de los ecosistemas terrestres.

La erosión hídrica, es un fenómeno ocasionado por agentes erosivos y sus modalidades muy diversas. Se entiende por erosión a la degradación del suelo que es transportado a la parte baja y depositados las partículas de suelo, materia orgánica y nutrientes disueltos; en intensidades variables, que a menudo alcanza puntos irreversibles, generando desequilibrios de inestabilidad armónica a nivel de la cuenca. Es importante tener en cuenta, que la erosión es un proceso que elimina la capa orgánica superficial del suelo y reduce los niveles de materia orgánica, creando un ambiente desfavorable para el crecimiento de las plantas. La erosión del suelo es uno de los procesos más dinámicos en la gestión de cuencas, y es causada principalmente por la lluvia producto de la escorrentía, generando pérdidas irreversibles de suelo para efectos prácticos al ser un recurso no renovable (Sabino et al., 2017).



El suelo es uno de los recursos naturales que aparece en la superficie de la corteza terrestre definida por sus características morfológicas, propiedades físicas y químicas, cambiando longitudinal y lateralmente. Dado que la tierra es donde se produce la agricultura, su conocimiento y valoración de las diferentes unidades de suelo, que permite ayudarnos a alcanzar la visión del potencial económico que ofrece la naturaleza. Las principales actividades son la producción de alimentos, las fibras textiles y madera para diversos usos. Pero el uso de la tierra por el hombre siempre provoca cambios, que muchas veces ven signos negativos cuando no se aplican medidas para proteger la cubierta vegetal y el suelo. Al alterar las condiciones bajo las cuales ocurren los procesos naturales, creando fenómenos que perturban aún más el medio ambiente (Yapur, 2010).

La erosión hídrica, es el principal agente que ocasiona la degradación de suelos, especialmente en las en zonas montañosas con pendientes pronunciadas e irregulares. Los daños causados por esta erosión son cada vez más severos manifestados por fenómenos climáticos erráticos. Las tierras agrícolas dañadas pierden su capacidad productiva, lo que provoca problemas económicos, sociales y ecológicos (Portuguez, 2015).

Los factores que intervienen en el proceso de la erosión son: el agua en la superficie y el viento. Existen otros agentes erosivos que provocan el movimiento del suelo a diferentes escalas; como la gravedad, la maquinaria y algunos procesos biológicos. En cualquier caso, la erosión hídrica es de suma importancia en el Perú, ya que la mayor parte de la actividad económica del país se desarrolla en el sector agropecuario (Sabino et al., 2017). El impacto de las gotas de lluvia combinado con la escorrentía, forma el primer microflujo. Desde el punto de vista energético, la erosión por las gotas de lluvia es muy importante, por que generan velocidades de flujos altas (0.30 a 0.60 m/s). Estas gotas de lluvia separan la energía las partículas del suelo y aumentan la sedimentación, llenando los vacíos en la capa superficial y relentizando la infiltración y



cuando el flujo superficial se concentra, el agua actúa sobre el suelo desprendido por la escorrentía que forman canales o arroyos pequeños bien definidos conocidos como surcos o canalillos, este tipo de canales se vuelven estables a consecuencia de ello, se ve con facilidad el desprendimiento por el arrastre y/o transporte de sedimentos, son más severos porque las velocidades de escurrimiento son más altas y el esfuerzo hidráulico cortante aumenta con el grado de la pendiente, el radio hidráulico de la sección del canal, el flujo concentrado, desprendiendo el suelo en el perímetro mojado del surco y transportando junto con el material aportado del área entre surcos; donde generalmente ocurre erosión por salpicado y erosión laminar. La cantidad de suelo transportado por el efecto de la erosión en surcos depende directamente de la relación entre la capacidad de desprendimiento y transporte, así como la carga de sedimentos. Por lo tanto, cabe mencionar que la capacidad de desprendimiento disminuye con la carga de sedimentos y viceversa.

Las interacciones complejas que ocurren en cuencas pequeñas, requieren la integración de objetivos institucionales y productivos, para lograr estrategias equilibradas. Los procesos de toma de decisiones, deben necesariamente involucrar a los usuarios y consenso para obtener planes de manejo técnica y socialmente sólidos que reflejen el equilibrio de intereses negociados en la región. Existe la necesidad de aunar esfuerzos de instituciones, investigadores e ingenieros enfocados en la solución de problemas relacionados con el manejo de los recursos naturales (Loredo et al., 2007).

En el ámbito de la cuenca del río Zapatilla, carecen de estudios específicos en cuanto a la determinación de la cantidad de suelo a ser erosionado, y esta situación con el pasar del tiempo puede traer consecuencias severas, para ello es de suma importancia plantear sistemas de manejo de conservación de suelos y su influencia de la vegetación.



1.2. ENUNCIADO DEL PROBLEMA

Por la descripción de la realidad problemática sobre la erosión del suelo en la cuenca en estudio, se pretende responder a las interrogantes siguiente.

1.2.1. Pregunta general

¿Cómo es la erosión hídrica y su efecto en la cobertura vegetal de la cuenca del río Zapatilla?

1.2.2. Preguntas específicas

- ¿Cuánto es la erosión hídrica mediante el modelamiento USLE y los métodos de campo de pedestal y capa de armadura?
- ¿Existe diferencia entre el modelamiento USLE y los métodos de campo de pedestales y capa de armadura en la determinación de erosión hídrica en la cuenca del río Zapatilla?
- ¿Cómo influye la cobertura vegetal en la función ecosistémica en el riesgo de erosión hídrica?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

El análisis de estimación de la erosión hídrica y el efecto de la cobertura vegetal permite cuantificar la erosión en la cuenca del río Zapatilla.

1.3.2. Hipótesis específicas

La estimación de la erosión hídrica mediante el modelamiento USLE y los métodos de campo de pedestal y capa de armadura permite cuantificar la erosión hídrica ocasionada en la cuenca del río Zapatilla.



La determinación de la diferencia entre el método USLE y los métodos de campo de pedestales y capa de armadura, y son semejantes entre los métodos de campo, en la determinación de erosión hídrica en la cuenca del río Zapatilla.

La determinación de la influencia de la cobertura vegetal como función ecosistémica, permita estimar el efecto en el riesgo de la erosión hídrica.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En la región de Puno, la erosión hídrica del suelo es alta por las fuertes precipitaciones pluviales bastante irregulares y por las fuertes tasas de evaporación por el incremento de la temperatura se vienen presentándose el deterioro de la cobertura vegetal en las cabeceras de las cuencas principalmente; además, en muchos lugares la topografía es muy empinada, donde la pendiente supera el 50%: El suelo se forma debido a las condiciones de retención extremadamente desfavorables, por rocas ígneas, metamórficas y sedimentos; con rocas ígneas muy expuestas con fuertes pendientes que oscilan entre 25 a 50%, en condiciones desfavorables para la retención del suelo, están conformados por: arenisca roja fina sobre yacimientos de conglomerados, andesita soldada y toba, algo de basalto y conglomerado y andesita media, con pendiente que varía de 8 a 15%; ligeramente inclinada con pendiente de 0 a 8%: La presencia de suelo contribuye a su conservación. Tiene andesita volcánica baja; y micro pendiente: El suelo tiene condiciones favorables para la conservación de los depósitos de limo y arena existentes (Gobierno Regional de Puno, 2011).

Cuando el agua de lluvia drena de la ladera de una montaña, crea una corriente de agua, esta corriente puede arrastrar partículas del suelo lentamente. La erosión de placa no es el caso cuando el flujo de agua se concentra en un punto y sigue un surco natural desde allí; predecir y cuantificar este fenómeno es muy importante por un proceso de



degradación del suelo que no puede prevenirse cuando tienen altos niveles de erosión hídrica. La aparición de signos evidentes en el suelo, es la primera etapa del mecanismo de erosión se intensifica y se vienen formando surcos. La cuantificación y predicción de la erosión de los acuíferos nos permite tomar medidas preventivas para evitar la pérdida del suelo aún cuando los signos de degradación no son evidentes (IDER Ingeniería y Desarrollo Rural, 2005).

La cuantificación de la producción de sedimentos es muy importante para resolver los problemas de transporte de sedimentos, ya que hay muchos factores temporales y espaciales que afectan la producción de sedimentos en la cuenca de un curso de agua (Paco Arpita, 2022).

Debido a su amplia perspectiva, los recursos de la tierra se han convertido en una herramienta importante para evaluar los cambios espaciales y temporales en la cobertura del suelo y demostrar los registros históricos de varios procesos. Los métodos para evaluar estos cambios varían global y localmente mostrando variaciones en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo (Pérez Falls, 2018).

La cuantificación de la erosión hídrica en la cuenca, es necesario y de trascendental importancia; su determinación de la cantidad de suelo perdido mediante una metodología planteada adecuadamente en esta investigación, que está basada en modelos y estimación en campo. La cuantificación del suelo perdido podría permitir tomar una adecuada decisión, así estimar para diferentes tipos de obras como: caso de represas entre otras infraestructuras hidráulicas. Permitiendo mejorar su funcionamiento y durabilidad de estas estructuras, así como la conservación de los suelos agrícolas principalmente.

Aún no se han realizado estudios concretos sobre la erosión del suelo en la cuenca del río Zapatilla. La falta de conocimiento sobre las tasas de erosión hídrica



principalmente y donde la degradación física por la precipitación y las pérdidas de tierras son más severas, afectando negativamente a la toma de decisiones sobre la sostenibilidad del desarrollo y la mitigación de los impactos del cambio climático en el área de estudio. Es por tal razón me ha intuido realizar el estudio de análisis de erosión hídrica y la influencia de cobertura vegetal como función ecosistémica en el riesgo de la erosión.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Estimar la erosión hídrica y su efecto en la cobertura vegetal en la cuenca del río Zapatilla

1.5.2. Objetivos específicos

- Estimar la erosión hídrica mediante el modelamiento USLE y métodos de campo de pedestal y capa de armadura.
- Determinar la diferencia entre el método USLE y los métodos de campo de pedestal y capa de armadura en la cuenca del río Zapatilla.
- Determinar la influencia de la cobertura vegetal como función ecosistémica en el riesgo de erosión hídrica.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Nivel internacional

Nájera González et al., (2016) en su estudio de riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México, evaluó el riesgo de erosión y pérdida de suelos sobre unidades de la geomorfología de origen volcánico en la cuenca del río Mololoa de México, donde utilizaron la ecuación universal de pérdida de suelo con el apoyo de SIG. En este estudio indica que el 57.60% de la superficie del ámbito está en riesgo de erosión potencial, por encima de las 50 t/ha/año (alta y muy alta); las que presentan esta condición son sierras de San Juan, Volcán, laderas de sierra volcánica, las asociadas al volcán Sangangüey y laderas del volcán Tepeltitic, laderas lomeríos y laderas asociadas al volcán Sangangüey y Tepeltitic, así como los piedemonte y relieves del San Juan. Los grupos referenciales de suelos predominantes en estas unidades son Acrisoles, Andosoles, Regosoles, Cambisoles y Feozem. El 30.30 % del área presenta pérdida de suelo por encima de las 10 t/ha/año, con niveles que van de muy alta a moderada. Las lomas complejas volcánicos del San Juan y relieves agrupados al Pre-San Juan; el piedemonte de la caldera de Tepic y los Lomeríos y coladas del Sangangüey y Tepeltitic, presentan los niveles más significativos de pérdida de suelo.

En el estudio y control de la erosión hídrica de León Peláez (2001), hace referencia que la literatura actualmente especializada sobre la erosión del suelo es muy alta. Sin embargo, algunos textos integran los aspectos teóricos y prácticos fundamentales que no solo son relevantes para el estudio del fenómeno en cuestión, sino que también



intervienen para regular sus diversas manifestaciones dentro de un marco de gobernanza. Los límites señalados se complican al indicar que la mayoría de dichos materiales se originan de regiones geográficas donde las condiciones climáticas y topográficas son típicas de los trópicos, en ese texto que presenta trata este tema de manera integral, sintetizando las consideraciones teóricas y prácticas de la erosión hídrica, con énfasis en las condiciones tropicales, húmedas y más específicamente colombianas que están tratando de subsanar. Como tal está estructurado con miras a brindar asesoría básica a los estudiantes en programas de educación técnica y vocacional relacionados con el manejo de los recursos naturales y el medio ambiente en general.

En la investigación de Gaitan et al., (2017) se estudia sobre la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina, en donde se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), para estimar la erosión hídrica actual y potencial de los suelos en la República Argentina. Además, en este estudio se tiene algunas limitaciones ya que a menudo faltan los datos necesarios para aplicar la metodología USLE original a nivel de país. Por este motivo se han realizado diversas aproximaciones para calcular los factores que intervienen en la ecuación. Por ejemplo, el coeficiente de erosión por lluvia requiere datos de intensidad de lluvia para un cálculo preciso, se estima a partir de la precipitación media anual. Esto puede subestimar el potencial de erosión inducida por la precipitación en áreas con frecuentes lluvias torrenciales, típicamente en áreas áridas y semiáridas (como la ecorregión del Monte). Otra limitación son los datos del atlas de suelos utilizados para la estimación del factor K, recopilados en su mayoría hace 40 o 50 años. Por lo tanto, se espera que el contenido de materia orgánica del suelo sea menor principalmente en tierras agrícolas, esto hace que el valor actual de K sea más bajo que el estimado y subestima la tasa de erosión de las tierras de cultivo (aproximadamente 5 - 10%). A pesar de estas limitaciones asumieron que los mapas de erosión hídrica actual y



potencial reflejan adecuadamente las áreas de mayor y menor riesgo de erosión de manera cualitativa. La consistencia de los mapas de erosión actuales se demostró en las pruebas de validación realizadas, mostrando una correlación positiva entre los índices semicuantitativos de erosión hídrica (obtenidos de mapas) y los índices (obtenidos de sensores remotos) en 26 cuencas hidrográficas del país, hay una relación entre cantidad de sedimentos en suspensión transportados por los ríos. En la República Argentina, sus investigaciones indican que la tasa promedio actual de erosión del suelo es de unas 6 t/ha/año para todo el país, lo que corresponde a unos 1,500 millones de metros de masa de suelo, es decir, una capa de 0.50 mm de espesor perdido cada año, hay diferencias significativas entre regiones dentro del país. Aproximadamente el 60% del territorio es con baja tasa de erosión (menos de 2 t/ha/año) principalmente áreas de alta vegetación de pastizales naturales, bosques y bosques densos. Cerca del 12% del territorio presenta una tasa de erosión superior a 10 t/ha/año, pero se ubica principalmente en zonas áridas y semiáridas con fuertes pendientes y escasa cobertura vegetal. El potencial de erosión, la tasa máxima de erosión que ocurre cuando la tierra está desprotegida y descubierta por vegetación, ha aumentado significativamente a un promedio nacional de alrededor de 170 t/ha/año. En este estudio, los valores de tasa de erosión permisibles propuestos (que no afectan la salud del agroecosistema) variaron en el rango de 0.50 t/ha/año para suelos de tierras muy baja agricultura. Para suelos profundos en áreas húmedas hasta 10 t/ha/año. De acuerdo con estos límites de tolerancia, nuestros resultados muestran que alrededor del 26% del país tiene una tasa de erosión que excede la tolerancia. Se hicieron estimaciones del impacto potencial de la erosión del suelo en los rendimientos de los tres principales cultivos del país (soja, maíz y trigo). De acuerdo con estos cálculos, la pérdida de tierras reduciría la producción a valor actual, lo que resultaría en una pérdida de alrededor de \$30 millones. Esta cantidad se agrega anualmente al impacto acumulativo



de la erosión hídrica en la historia del uso de la tierra agrícola (no estimado en este estudio). Creemos que los mapas producidos serán una herramienta útil para las autoridades nacionales y estatales responsables de la gestión del uso de la tierra.

2.1.2. Nivel nacional

Huerta & Figueroa (2014), en su investigación tratan sobre la erosión hídrica en la cuenca alta del río Moche, cuyo objetivo fue estudiar la pérdida de suelo y la influencia de las precipitaciones pluviales como factor en la erosión hídrica, se cuantificaron la escorrentía superficial y la pérdida de suelo bajo condiciones de uso del suelo en las microcuencas de Huangamarca y Pollo de la cuenca alta del río Moche. En el cual concluye que la degradación del suelo para las microcuencas Huangamarca y Pollo, fueron del orden de 7.29 a 33.40 t/ha/año, respectivamente. Estas pérdidas son elevadas, los cuales afectan de manera sistemática a agroecosistemas frágiles. La erosión hídrica es mayor en la microcuenca Pollo, por su alta erodabilidad este incrementa la erosión potencial por las condiciones geomorfológicas, fisiografía del medio poco favorables, escasa cobertura vegetal y el efecto de las precipitaciones pluviales, el factor geomorfológico representado por las pendientes que llegan hasta 15% y 35% en las microcuencas Huangamarca y Pollo, influyen en la erosión de los suelos.

Vásquez & Tapia (2011), elaboraron el estudio de conservación de suelos cuantificando la erosión hídrica superficial en laderas semiáridas en la sierra peruana. La misma que se realizó en 22 pequeñas cuencas de ríos andinos, en 12 regiones del país, cuyo objetivo era cuantificar la cantidad de suelo perdido por la erosión y el impacto de construir una zanja de infiltración controlada; es una región semiárida con terreno accidentado, precipitación media anual de 350 – 1,200 mm/año; los índices de pobreza y pobreza extrema más altos del país, así como los índices de pobreza más altos. Los resultados obtenidos indican una tasa de erosión promedio de 45.04 t/ha/año en las laderas



de alta montaña, lo que corresponde a un nivel de pérdida de suelo de 3.20 mm/año. De manera similar, se ha demostrado que la construcción de zanjas permeables reduce la pérdida de suelo en 20.60 t/ha/año, o 1.47 mm/año. Estos resultados son útiles porque la pérdida de suelo se cuantificó por primera vez. Esta será la base para la planificación de posibles actividades de conservación de la tierra en esta importante área.

En el estudio de efecto de humedad vegetal sobre la erosión ocasionado por la lluvia en la comunidad de San Mateo - Lima, realizado por Quispe (2018), tuvo como objetivo de evaluar el grado de pérdida de masa del suelo debido a la erosión hídrica. La obra se desarrolló en la ladera de la comunidad de San Mateo en Lima, desde septiembre de 2015 a agosto de 2016, ubicado entre las coordenadas UTM 358153502, Este a 358159545 y Norte 8699926305 a 8699941252 a 3320 msnm, en cuatro bloques, utilizando 16 tallos por celda indicadora, utilizado así: células indicadoras. La erosión de una losa de tronco de árbol con una superficie total de 129.96 m², el diseño del estudio fue experimental, longitudinal, prospectivo, utilizando un diseño completamente al azar y la prueba de Tukey con un 95% de confianza para determinar diferencias entre tratamientos. Los resultados mostraron que las parcelas que contenían vegetación nativa (*Festuca amethystina* L.) tuvieron una menor pérdida de suelo de 10.90 t/ha/año en comparación con las 18 t/ha/año de 17 parcelas que contenían parcelas de cobertura. Parcela fue cubierta naturalmente 28.65 t/ha a 44.85 t/ha/año para suelo desnudo, esta cifra final es 11 veces el máximo permitido por la FAO de 4 t/ha/año para suelo agrícola. La cubierta vegetal actúa como un protector eficaz del suelo y reduce significativamente la erosión hídrica.

Tapia & Pérez (2018), en su tesis denominada estimación de la erosión hídrica mediante la utilización de la metodología USLE en la cuenca del río Piura, tuvo como objetivo estimar mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), los impactos



erosivos (de pérdida de suelo) en la cuenca del río Piura también identificar zonas potenciales de mayor riesgo ante el fenómeno de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Piura. En el cual concluye que la estimación de la tasa de erosión hídrica en la cuenca del río Piura se obtuvo a través del procesamiento de variables con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE).

2.1.3. Nivel local

En su investigación Ccama (2012) sobre la estimación de la pérdida de suelos por erosión ocasionada por la lluvia en la cuenca del río Ilave con tecnologías de GIS, en base a los análisis de los datos obtenidos mediante sensores remotos y SIG, con el objetivo de obtener un mapa digital de cada variable que afecta la vulnerabilidad a la erosión, se elaboró con el modelo USLE de recursos de suelo actuales por erosión hídrica en la cuenca del río Ilave. Erosión hídrica actual por estimación de pérdidas por subcuencas y los resultados ofrecen una visión cualitativa y cuantitativa de la degradación espacial de los últimos años en las zonas más sensibles a la erosión hídrica de la cuenca del río Ilave, constituyen una herramienta de gestión fundamental ya que la planificación puede lograr la conservación del suelo en la cuenca hidrográfica. Los valores obtenidos mediante el modelo USLE sugieren que el 5.90% de la cuenca del río Ilave está en riesgo de degradación por erosión hídrica severa (>200 t/ha/año). Severamente degradado (100 - 200 t/ha/año), 9.65% de superficie en riesgo severo de degradación (50 - 100 t/ha/año), 21.23% de superficie en riesgo moderado de deterioro (25 - 50 t/ha), el 34.71% de la superficie terrestre presenta riesgo moderado de degradación (5 - 25 t/ha/año) y el 14.32% de la superficie terrestre con riesgo moderado de degradación presenta riesgo bajo de degradación (<5 t/ha/año). El 70.26% de las cuencas presentan problemas de degradación baja, media y moderada, lo que puede derivar en altos niveles de erosión, erosión muy severa si no se toman medidas de mitigación a tiempo.



Guevara et al. (2019), realizaron el estudio sobre las características hidrológicas del distrito de Vilque, la pérdida de suelo por erosión hídrica, obtenida por el método USLE, alcanzó un promedio de 14.90 t/ha/año en el período 1981-2018, un valor de 26.47 t/ha/año en un 78% superior a la media. La tasa de erosión mínima actual en 1992 es de 4.98 t/ha/año con una reducción del 66% respecto a la media; también se produjo una erosión masiva en 1986, 2001 y 2012.

Condori (2018), en su investigación denominado pérdida de partículas de suelo por erosión hídrica en comunidades de San Francisco de Chanyajali Mojo-Puno, tuvo como objetivo estimar la cantidad de tierra pérdida por erosión hídrica en la comunidad antes mencionada, incluyendo la microcuenca del río Chanyajarri en Puno, Mojo, realizado entre 2018-2019, en este estudio menciona que la erosión del suelo es un problema particularmente grave en áreas de actividad agrícola que conducen a la reducción de los rendimientos, el propósito fue estimar la cantidad de suelo perdido debido a la erosión hídrica utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), un modelo utilizado en todo el mundo por las autoridades de la gestión de tierras y cuencas hidrográficas para determinar la erosión. Este método se utiliza para definir los parámetros geográficos de la cuenca, estableciendo una matriz de variables e indicadores, seguida de mapas conceptuales y el progreso del proceso SIG. Parámetros como información pluviométrica del SENAMHI Puno, información cartográfica del Instituto Geográfico Nacional y datos de ubicación: El coeficiente de erosión pluvial (R) oscila entre 121.82 y 151.25 MJ mm t/ha/año; el coeficiente de erosión (K) varía de 0.458 a 1.276 t/ha/MJ/mm/ha. El factor de terreno (LS) varía de 0.17 a 25.71, el factor de cobertura vegetal (C) varía de 0.001 a 1 y el factor de actividad de conservación del suelo (P) varía de 0.01 a 0.5. La pérdida de suelo anual estimada para la microcuenca usando USLE es de 49.75 t/ha/año con 9.34% de su superficie en riesgo de erosión hídrica severa



y 10.47% de su superficie en riesgo de erosión hídrica, el riesgo es de 55.77 t/ha/año, con base en los resultados obtenidos, proponer acciones de conservación de suelos y medir prácticas de trabajo de mecánica estructural tales como: prácticas culturales y agrícolas.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Erosión

La erosión hídrica en la región andina “se caracteriza por fuertes lluvias y el suelo es fácilmente erosionado por las laderas de las montañas. De manera similar las prácticas inadecuadas de manejo de la tierra han aumentado las disputas ambientales sobre la disponibilidad de áreas fértiles o la integridad de los ecosistemas” (Rengifo-Rengifo, 2022, p. 2). La preparación del suelo modifica sus condiciones físicas superficiales y subsuperficiales y, en consecuencia, influye en los valores de cada uno de los factores que se relacionan con la erosión hídrica. Considerando estos aspectos, se realizó un experimento de erosión en campo, bajo la acción de lluvia simulada (Bertol et al., 2006). La calidad del agua en un curso de agua depende de la conformación del terreno, cobertura vegetal y su distribución en el paisaje, uso del suelo y grado tecnología aplicada en actividades económicas predominante en la cuenca hidrográfica, la cuenca surge como la unidad a ser considerada cuando se desea obtener el efecto del uso y la ocupación del suelo sobre la calidad y cantidad del agua drenado durante los eventos de lluvia. De esa manera, el río es un integrador de los fenómenos que ocurren en las laderas de las cuencas (Rasche Álvarez et al., 2014).

2.2.2. Erosión hídrica

Es un proceso de erosivo causado por la acción del agua, generalmente por sedimentos que penetran en la superficie del suelo, penetrando parcialmente y el resto fluyendo hacia la superficie, transportando materia en suspensión (Chañajari et al., 2019).



La erosión del agua comienza cuando las gotas de lluvia caen y se asientan en la superficie del suelo desnudo, las partículas finas como los sedimentos suspendidos en las corrientes de agua, se desplazan y crean trincheras a lo largo de los caminos a medida que se mueven hacia abajo. Cada lluvia posterior erosiona aún más el suelo a esto se le llama degradación del suelo. La separación del flujo comienza cuando el arrastre ocasionado por el agua excede la resistencia al corte del suelo, resistencia a la tracción del agua depende de la velocidad y la viscosidad, mientras que la resistencia al corte del suelo depende del grado y la estabilidad de la estructura y el tamaño de las partículas. El tamaño máximo de partícula posible para la separación es de alrededor de 200 micras (arena muy fina y fina), lo que significa que se requiere la velocidad mínima del agua. Las partículas más grandes son más pesadas y las partículas más pequeñas son más cohesivas (Manuel et al., 2012).

La pérdida de tierras debido a la erosión ocasionada por agua es uno de los problemas que puede tener un impacto significativo en el desempeño agrícola a mediano y largo plazo. El suelo está erosionado en cierta medida, observación es para identificar áreas críticas, el tamaño de la cuenca es útil en la toma de decisiones en el control de este proceso (Flores H., 2003).

2.2.2.1. Tipos de erosión hídrica

Según Cisneros et al. (2012), los siguientes tipos de erosión ocurren cuando hay separación y transporte de partículas del suelo por la acción del agua:

- **Erosión Laminar:** esta erosión es la eliminación uniforme de una capa delgada de suelo. Los suelos generalmente se aflojan por la causa de las gotas de lluvia más que por el flujo laminar. Si la superficie se nivela durante el trabajo agrícola, la disminución del suelo se vuelve menos notable.



- Erosión interna: La erosión es la lixiviación de partículas de suelo en grietas y huecos en el suelo. La descarga de agua aumenta debido a la reducción de la capacidad de filtración. Esta erosión no es dañina porque el suelo nunca sale del campo.
- Erosión por surcos, cárcavas y corrientes: La erosión de surcos ocurre cuando el agua superficial se encuentra con una depresión y comienza a fluir a lo largo del camino de menor resistencia. Por lo tanto, las corrientes superficiales con partículas de limo suspendidas se mueven a lo largo de un pequeño barranco.

La erosión en cárcavas y canalillos se produce frecuentemente después de la erosión laminar y de la erosión en surcos.

La erosión de surcos suele ir seguida de erosión de placas y surcos. Esta erosión ocurre cuando la escorrentía de las laderas aumenta la masa y la velocidad lo suficiente como para erosionar profundamente el suelo, o cuando el agua atraviesa como gaviotas el tiempo suficiente para que se formen gaviotas (Manuel et al., 2012).

Teniendo en cuenta cómo se produce la erosión, podemos distinguir entre las siguientes secuencias de erosión hídrica que se analizan a continuación.

- Salpicadura (rainplash/splash erosión),
- Erosión laminar (interrill erosion, sheet erosión),
- Erosión por surcos (rill erosión),
- En cárcavas (gully erosión),
- Erosión por remoción o movimientos en masa (mass movement) y
- Erosión de cursos permanentes (streambank erosión).



2.2.2.2. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

USLE es una metodología diseñada para cuantificar la pérdida de suelo por escorrentía en zonas o en cuencas y áreas específicas dentro de los sistemas de gestión.

(Wischmeier & Smit, 1978)

La USLE está expresado, en sistema métrico internacional, como:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

Donde:

A: Tasa de erosión de suelo (T/ha*año).

R: Factor de agresividad de lluvia (MJmm/ha*año).

K: Factor por textura del suelo (t/ha)/(MJmm/ha*h)

L.S: Factor topográfico longitud-pendiente del suelo.

C: Factor cobertura de cobertura vegetal.

P: Factor prácticas de conservación del suelo.

2.2.2.3. Factores en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS).

a) Factor agresividad de la lluvia (R).

El factor R de lluvia, representa para un área específica de la energía potencial de la lluvia y su escorrentía asociado. Es un factor climático que indica el potencial de la erosión causada por las precipitaciones (Montes et al., 2011).

El coeficiente de erosión por lluvia R corresponde a un término en la ecuación universal de pérdida de suelo de la USLE y es un coeficiente de tipo climático que indica el potencial de erodabilidad de la lluvia. Se expresa en unidades del Índice de Erosión por Lluvia (IE), que es la multiplicación de la energía cinética de la lluvia y la intensidad máxima durante un período de 30 minutos (Valenzuela & Salinas, 2004).

Es la energía con la que las gotas de lluvia golpean el suelo con cierta intensidad y rompen los agregados superficiales del suelo en partículas de tamaño transportable. Es un factor activo en los procesos de erosión. Se han calculado y diseñado muchos índices para ser utilizados en ecuaciones de predicción del riesgo de erosión, este último el más conocido el coeficiente R (Wischmeier & Smit, 1978).

El factor de agresividad se deriva de la multiplicación de la energía cinética liberada por la lluvia (E) y la intensidad de precipitación máxima de 30 minutos de la tormenta ocurrida (I_{30}) utilizando la siguiente ecuación:

$$R = \sum EI_{30} \quad (2)$$

Arnoldus (1977), plantea también el Índice de Fournier, que se da como:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} \quad (3)$$

Donde:

P_i : Precipitación mensual total del mes “i” (mm)

P: Precipitación anual. (mm)

En este ámbito, es necesario efectuar algunos ajustes de regresión entre el factor R calculado por la metodología de USLE y el correspondiente IMF (Renard & Freimund, 1994). Presentaron la fórmula de regresión para distintas regiones climáticas del mundo:

$$R = 0.07397 * IMF^{1.847} \quad (4)$$

Donde:

R : Índice de erosividad de la lluvia

IMF : Índice de Fournier.



Sin embargo, debido a que estas ecuaciones dan un alto coeficiente de determinación ($r^2 = 0.81$) y un mejor ajuste para los mismos autores (Renard & Freimund, 1994), debido a los altos errores estándar, da EI_{30} de erosividad:

$$EI_{30} = 5.954 * R^{0.6987} \quad (5)$$

Para los cálculos respectivos, se utilizó las estaciones meteorológicas de Ilave, Juli y Mazocruz. Los valores de R fueron obtenidos en la tabla de Excel, después llevados al software de Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS 3.4.1) e importados. Posteriormente se realizó la interpolación de los valores de R utilizando la metodología adoptada de interpolación Kriging avanzado con una aproximación 70%, lo cual es una interpolación aceptable.

b) Factor erodabilidad del suelo (K).

Este coeficiente describe la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica y su valor depende de la textura de la superficie, estructura, la permeabilidad y el contenido de materia orgánica. (Oñate-Valdivieso, 2004) .

El factor K representa la erosión del propio suelo, es decir indica vulnerabilidad a la acción del agua. Es una propiedad inherente del suelo y depende de la acción individual de las propiedades físicas, químicas y biológicas y de su manejo (Montes-León et al., 2011)

Según Mancilla (2008), los coeficientes de erosión del suelo se pueden estimar directamente con ecuaciones o gráficos. Sin embargo, ambos métodos requieren predefinir ciertas características que serán consideradas a continuación:

- Textura. La cantidad de arena, limo, arcilla (de 0.05 a 0.10 mm de diámetro) utilizando el método de pipeta. Según el manual de USLE, la arena muy fina actúa como limo para la erosión del suelo.



- Materia Orgánica. Según USLE, el porcentaje de MO varía de 0 a 4% y es un valor entero. Se asume un 4% si los activos fijos son mayores que el rango especificado.
- Estructura del suelo. Su identificación es por observación visual y tacto. Según USLE, solo se utilizan cuatro categorías y códigos.
- Permeabilidad del suelo, en USLE, se dan seis valores o códigos diferentes de acuerdo a la conductibilidad de un suelo determinado.

El factor K en el (SIU) está dado en (ton-ha-h/ha-MJ-mm), que la expresión la resistencia del suelo en la superficie y tiempo.

Método de la ecuación

Según Wischmeier y Smit (1978), establecieron la siguiente ecuación:

$$K = 1.313 * \frac{[2.1*10^{-4}(12-MO)*M^{1.14}+3.25*(S-2)+2.5*(P-3)]}{100} \quad (6)$$

Donde:

MO : Contenido en materia orgánica (%).

S : Factor de la estructura del suelo.

P : Código de permeabilidad.

M : Es el factor dado por el producto de la sumatoria de los porcentajes de limo y arena muy fina con la suma de los porcentajes de arena y limo. En términos matemáticos M corresponde a (%limo + %arena muy fina) *(100-%arcilla).

Podemos decir que esta ecuación es válida para suelos que tienen 70% o menos de fracción limosa.

Método de la ecuación

El método de monograma robusto es la forma más fácil de estimar el factor K, pero es menos preciso porque el analista puede cometer errores visuales, es mejor confiar

en una regla u otro elemento lineal para minimizar el error. De acuerdo con el diagrama presentado, se utilizan dos gráficos conectados (Mancilla, 2008, p. 8).

La erosión y su factor de erodabilidad (K) es la susceptibilidad del suelo a los procesos de erosión, conocer el valor K de un área es importante para planificar actividades de conservación de la tierra considerando sus usos potenciales. Especialmente en áreas donde la actividad es dominante, es importante para la estimación y el mapeo. El orden y las propiedades del suelo que gobiernan la erosión y sus cambios (Augusto et al., 2019)

c). Factor de longitud y grado de pendiente (LS)

Según Wischmeier (1978), este indicador corresponde al efecto de relieve que se puede obtener sobre la erosión del suelo y este incrementa de acuerdo conforme se aumenta la longitud del terreno (L) grado de la pendiente y la inclinación de la tierra (S) se hace mayor, para lo cual se sugiere la siguiente ecuación:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m (0.065 + 0.045s + 0.0065s^2) \quad (7)$$

Donde:

λ : Longitud de la inclinación y pendiente del terreno (m).

s : Grado de inclinación del terreno (%)

m : Expresión del factor de la longitud de la inclinación.

Sabemos que el valor de “m” varía en función del grado de inclinación del terreno, propone la siguiente ecuación (McCool, 1989):

$$m = \frac{\sin\theta}{0.05 + \sin\theta + 0.269(\sin\theta)^{0.8}} \quad (8)$$

Donde:

θ : Ángulo de la inclinación

En vista de que la fórmula para calcular “LS”, propuesta por la USLE, no representa bien el efecto del relieve en la erosión del suelo para pendientes o inclinación mayores de 16 %, se tiene la siguiente ecuación para pendientes mayores a 9%:

$$S = 16.8 * \sin\theta - 0.5 \quad (9)$$

Donde:

θ : Angulo de la pendiente

d) Factor de cobertura vegetal (C).

El factor de cultivo y la cobertura del suelo C es la relación entre la pérdida de tierras de cultivo en unas condiciones dadas, la pérdida debida a una sucesión de tierras desnudas y en barbecho en las iguales condiciones de suelo, ángulo de pendiente y precipitaciones (Wischmeier & Smit, 1978, p. 5)

Pocos indicadores cuantifican la relación entre la vegetación y la pérdida de tierras. El índice más conocido y utilizado, es el índice de protección de la cobertura vegetal frente a la erosión hídrica. Un estudio más detallado puede evaluar el factor de cobertura vegetal en base a fórmulas establecidas para el cálculo de la biomasa (Renard & Freimund, 1994).

Para el presente estudio, se utilizó imagen satelital de Landsat 8, con lo cual se calculó NDVI que siendo la diferencia de las banda5 y banda4 sobre la sumatoria de banda5 y banda4, reclasificados de rango de clasificación de cobertura vegetal, de esa clasificación fueron llevados a la tabla 1.

Tabla 1. Valores de cobertura vegetal C

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo sin vegetación	1.000
Bosque o matorral poca vegetación	0.001
Pradera herbácea, en buenas condiciones	0.010
Pradera muy pastoreada	0.100
Maíz, sorgo, alto rendto., laboreo convencional	0.20 – 0.55
Maíz, sorgo, alto rendto., sin laboreo convencional	0.50 – 0.90
Maíz, sorgo, bajo rendto., laboreo mínimo	0.20 – 0.10
Maíz, sorgo, alto rendto.	0.12 – 0.20
Maíz, sorgo, bajo rendto.	0.30 – 0.45
Algodón	0.40 – 0.70
Pradera herbácea	0.01 - 0.025
Soya	0.20 – 0.50
Trigo	0.10 – 0.40
Arroz	0.10 – 0.20
Cacahuate	0.30 – 0.80
Frutales con cobertura vegetal	0.01 – 0.80
Caña de azúcar	0.56
Arbolado denso	0.001 – 0.003
Arbolado forestal clareado	0.003 – 0.009
Arboleado muy clareado (25 – 60 %)	0.041
Matorral con buena cobertura	0.003 – 0.013
Matorral con poca vegetación y eriales	0.20 – 0.013
Cultivos anuales herbáceos	0.25
Pastura	0.15
Plantas herbáceas matojos (100%)	0.003
Plantas herbáceas matojos (60%)	0.035
Cubierta escasa (60%)	0.15 – 0.09
Cubierta inapreciable	0.45

Fuentes: Wischmeier y Smit (1978)



Las ecuaciones que ayudan a actualizar los valores del factor R son utilizadas por el programa EROSION 6.0, se utiliza para obtener cantidades que coinciden con los valores del factor R publicados en las bibliografías, las estimaciones de factor R basadas en 30 años de información pluviográfica, realizadas con las dos ecuaciones empleadas no fueron diferentes (Bidegain Mario et al., 2017).

e) Factor de prácticas de conservación (P)

El componente de acción de conservación, refleja la eficacia demostrada en el manejo de la erosión obtenida mediante la implementación de diversas medidas de conservación. Las tecnologías que se están considerando son la nivelación, la alternancia de andenes y el cultivo en terrazas (Wischmeier & Smit, 1978).

Según Wischmeier & Smit (1978), incluyen el factor P de prácticas de conservación para tres situaciones:

- El empleo de labranza siguiendo las curvas de nivel o llamados cultivo en contorno.
- La utilización de fajas de cultivo en contorno
- La utilización de terrazas de formación lenta

En el siguiente estudio se utilizó la tabla 2, se tiene prácticas de conservación de suelos.

Tabla 2. Factor P de prácticas de conservación

Pendiente del terreno (%)	Cultivo en contorno		P para cultivos en líneas en contorno	P para cultivos en terrazas
	P	Longitud tope de ladera (m)		
1-2	0.60	122	0.30	0.12
3-5	0.50	91	0.25	0.10
6-8	0.50	61	0.25	0.10
9-12	0.60	37	0.30	0.12
13-16	0.70	24	0.35	0.14
17-20	0.80	18	0.40	0.16
21-25	0.90	15	0.45	0.18

Fuente: Wischmeier & Smit (1978).

2.2.2.4. Estimación de erosión en campo

Para la estimación de erosión en campo independientemente es importante el tipo de suelo y del material geológico de partida, el contenido de materia orgánica de los horizontes superficiales presenta importantes reducciones, sobre todo en aquellas laderas en las que el manejo y acondicionamiento ha sido particularmente intenso, observándose una relación directa entre el tipo de manejo, conservación de suelos y el contenido en materia orgánica. Al igual que ocurre con la materia orgánica, estas mismas labores de acondicionamiento determinan importantes reducciones en el contenido de nitrógeno y azufre de los suelos analizados (Edeso, 1997, p. 23).

Otra definición de interés, en que la estimación de la erosión hídrica en el lugar de estudio, es la que considera a las cárcavas permanentes como una formación de canales muy marcados originados por erosión y transporte de suelo, roca blanda o ambas cosas simultáneamente, bajo la acción de fuerzas originadas por flujos concentrados, avance de



cabeceras y derrumbe de taludes. Una vez establecidas, estas cárcavas son permanentes. Las secciones transversales tienden a ser estrechas en comparación con la profundidad, las paredes, a ser verticales y la cabecera de la cárcava, es decir, su límite aguas arriba, aparece como una estructura claramente diferenciada y prominente. Las cárcavas permanentes tienden a desarrollarse en base a un modelo dendrítico a lo largo de cursos naturales de agua y la metodología de desarrollo puede ser no dendrítico en estructuras artificiales, como zanjas de carreteras, terrazas o canales de derivación o de desagüe (López, 1997, p. 10).

Las funciones matemáticas son ecuaciones útiles para la predicción de las pérdidas de suelo por erosión hídrica. El modelo WEPP desarrollado recientemente y su uso para evaluar el riesgo de erosión en pastizales naturales representan un paso emocionante en el campo del control de la erosión del suelo y la conservación en los ecosistemas. Este método investiga la efectividad del modelo WEPP en la predicción de procesos hidrológicos y erosión del suelo en los pastizales naturales semiáridos del noreste de la provincia de Chubut (Chartier et al., 2009, p. 1).

2.2.2.5. Índice topográfica de humedad

La estimación del ITH se realiza por métodos directos, que implican muestreo destructivo y la colecta de hojas del suelo, e indirectos, basados en el registro del espectro electromagnético por sensores para radiaciones y modelos de transferencia radiactiva. La teledetección representa la única opción viable por escala, cobertura, temporalidad y costo, para caracterizar y monitorear el estado de la vegetación (Rodríguez-Moreno & Bullock, 2013, p. 6).

Los índices topográficos (IT), son obtenidos computacionalmente del modelo numérico de elevación del terreno, se incorporan algoritmos computacionales aplicados en la simulación de procesos hidrológicos, erosivos y de transporte de contaminantes. A



través de estos índices, las zonas de acumulación de humedad en una cuenca, por ejemplo, pueden predecirse espacialmente a través de IT, que tiene en cuenta los efectos de la orientación de drenaje y la inclinación del terreno. La utilización de este trabajo es presentar una revisión bibliográfica sobre este tema y demostrar la aplicabilidad de estos índices a través de algunos ejemplos, aplicados a la modelación agrícola y ambiental (Gomes Minella et al., 2012, p. 1).

La extracción de vegetación es uno de los temas relacionados con el desarrollo y manejo de humedales diseñados. La cosecha generalmente se evita en la mayoría de los lugares debido a la baja cantidad de nutrientes eliminados en relación con el costo de producción. La cosecha puede ser importante bajo ciertas condiciones para reducir la producción de materia orgánica y mejorar la inactivación bacteriana. La mitad de los humedales de construcción del aliviadero de totora se cosechan y la mitad de esta área está separada de la parte no cosechada por una membrana impermeable (Torres Villamizar et al., 2011, p. 2).

2.2.3. Cobertura vegetal

La pérdida de ecosistemas es una realidad de nuestro tiempo, tanto a nivel local como regional. Además, varios ecosistemas están globalmente amenazados, cuando un ecosistema desaparece no solo pierde todos sus componentes, sino también todos los servicios ambientales que brinda. Cuando se pierden ecosistemas, la captación, depuración y almacenamiento de agua en las aguas subterráneas (acuíferos) regula y reduce el cambio climático, la acumulación de biomasa, los suelos y el medio ambiente. Valor económico y cultural, factores actuales y potenciales (Urbina & Martínez, 2006).

Se puede pensar en un paisaje como una superficie espacialmente heterogénea que se puede representar como un mosaico compuesto por un conjunto de unidades



homogéneas denominadas matriz espacialmente compuesta, o se establece un espacio artificial (Monedero & Gutiérrez, 2001).

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. La cuenca hidrográfica

El aumento y el desarrollo de la población han llevado a un uso excesivo de los recursos naturales que afecta negativamente a los ecosistemas y degrada el medio ambiente. Lograr un desarrollo sostenible requiere una planificación del tipo de uso del suelo. Este comportamiento concilia el uso de los recursos disponibles con el disfrute. Componente integral del ciclo hidrológico y fuente fundamental de vida, el agua es un pilar del desarrollo social y requiere un marco legal que rijas su uso y gestión (Ferrer, 2015).

Una cuenca hidrográfica es un sistema de organismos y entornos físicos existentes e interdependientes. Una cuenca fluvial puede constar de uno o más sistemas. También es importante señalar la existencia e interrelaciones de otros subsistemas, como el social, el demográfico y el económico. Considerada parte integrante del área de la vía fluvial, se define como un espacio natural donde el agua de precipitación se capta en depósitos naturales y se derrite o deposita. Por sistemas de drenaje definidos por líneas divisorias, topográficamente conocidos como cuerpos de agua y las cuencas hidrográficas se mapean como cuencas hidrográficas definidas a escalas de 1:500.000 y 1:250.000. El suelo y el agua son recursos naturales, están ubicados en espacios geográficos que pueden ser delimitados como cuencas hidrológicas, pero también están sujetos a procesos territoriales determinados por el uso diario de los objetos que habitan el área, es decir, la historia de ocupación y actividad de la organización, estas regulaciones rigen el acceso a la tierra y al agua a través de normas y reglas legales. Informalmente, a través de las relaciones de poder. En las zonas urbanas y periurbanas se regulan varios usos para



satisfacer demandas domésticas, industriales y de servicios, y en las zonas rurales se regulan usos agrícolas, pero por su desvío y uso surgen conflictos (Burgos, 2015).

Una cuenca hidrológica es el espacio territorial delimitado por la parte más alta de la cordillera, donde confluyen todos los arroyos y/o ríos) y un punto común posiblemente embalse o un lago, también conocido como desembocadura del caudal de la cuenca interna, formando las llamadas cuencas endógenas u océanos llamadas cuencas exocrinas. Dentro de estas áreas, ambientes biofísicos (suelos, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructuras geomorfológicas y geológicas), modos de desviación de tecnológicos y/o mercados e instituciones (sociedades, instituciones culturales, normas y/o leyes) (Semarnat, 2013).

2.3.1.1. Características físicas de una cuenca

Un canal o cauce es un curso de agua natural a través del cual se produce el agua de una cuenca fluvial, el perfil vertical de un canal representa cómo varía la altura del canal con la longitud y la ruta, esto determina el punto de partida a partir de las condiciones impuestas por la parte superior de la boca en el punto de contacto con otro canal, lago o laguna para reflejar la pendiente. Una representación gráfica de este tipo de sección representa el potencial de erosión de un río como una relación de la distancia que recorrió desde su fuente y la elevación relativa de cada punto de la sección. Tenga en cuenta que los perfiles longitudinales y los mapas topográficos son descripciones continuas de la superficie terrestre (Gaspari et al., 2013).

2.3.1.2. Perímetro de la cuenca

La medición del borde de la cuenca es un factor muy importante y esto se debe a que las conexiones a las áreas brindan información del tamaño y la forma de las cuencas. Solo comparando cuencas de la misma superficie se puede tener una idea de la forma a partir del valor de la circunferencia (Cañibano, 2016, p. 2).



La longitud del borde del plano horizontal que interseca la cuenca. Este parámetro se mide en distancia de longitud, normalmente expresado en metros o kilómetros (Hernández, 2012, p. 4).

Cada cuenca hidrográfica está delimitada por líneas formadas por puntos en el nivel topográfico más alto, conocidos como límites, que dividen la precipitación que ingresa a las cuencas hidrográficas adyacentes y dirigen la escorrentía superficial resultante hacia regiones o sistemas fluviales específicos. Esta línea se divide linealmente alrededor de las cuencas, cruzando solo las fuentes de agua en las salidas y conectando los puntos de máxima elevación entre las cuencas (Hernández, 2012, p. 4).

2.3.1.3. Área de la cuenca

Se define como la proyección horizontal de toda la superficie del sistema de drenaje de flujo dirigido o indirectamente dirigido hacia el mismo cauce natural. Pertenece a la superficie delimitada por el área de captación del área de estudio. Este parámetro suele expresarse en km^2 . Este valor es muy importante ya que cualquier error de medición afecta directamente al resultado. Se deben realizar mediciones de contraste para confiar plenamente en este valor (Hernández, 2012, p. 4).

El área es uno de los parámetros más importantes que se utiliza en los cálculos implicados en los numerosos modelos hidrológicos (Cañibano, 2016, p. 2).

Este es el plano de la vista en sección delimitada por la línea de las partes altas de la cuenca (divisoria) de aguas. El área suele definirse en metros planos y se mide en kilómetros y metros cuadrados, excepto en las cuencas pequeñas, que se expresan en hectáreas (Aguirre, 2007, p. 13).

Hoy en día existen softwares que nos permiten determinar con mayor exactitud y precisión las superficies y longitudes de las cuencas, los cuales tenemos:

- Software ArcGIS.



- Software QGIS.
- Software AutoCAD Civil3D.

2.3.1.4. Pendiente de la cuenca

Este es uno de los parámetros clave de la clasificación, ya que nos permite comparar cuencas y observar los fenómenos de erodabilidad que se producen en la superficie (Hernández, 2012).

Es una importante relación, pero compleja con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución de las aguas subterráneas a la escorrentía. Es uno de los factores físicos que controla la duración de las corrientes superficiales y afecta directamente la intensidad de las crecidas e inundaciones (Wisler & Brater, 1959).

2.3.1.5. Factor de Forma de Horton (Kf)

Esta es la relación entre el área y la longitud de la cuenca al cuadrado. $k_f = A/L^2$ da una medida de cuán cuadrada (alargada) es la cuenca. Las cuencas con un factor de forma más bajo están menos inundadas que las cuencas en la misma área y tienen un factor de forma más alto. Básicamente los factores geológicos son los responsables de configurar las características fisiológicas del área y la forma de la cuenca. Un valor de Kf superior a 1, nos dice que un grado de aplanamiento de la corriente principal o corriente principal corta, que tiende a concentrar fuertes corrientes de lluvia y formar grandes inundaciones (Horton, 1932).

2.3.1.6. Análisis hipsométrico

Para comparar cuencas hidrográficas con otros sistemas hidrológicos se utiliza un criterio propuesto por Campos en 1999 y citado por Cardona (2010), teniendo en cuenta la relación entre elevaciones parciales, totales y superficies parciales. Con base en análisis



isométricos, deberíamos poder determinar la duración y etapa evolutiva de la corrosión de la cuenca (León, 1999).

2.3.2. Hidráulica fluvial

Los movimientos de agua y sedimentos son de gran importancia en el estudio de los recursos hídricos, en donde se analiza la topografía y la dinámica de los ríos, documenta la investigación sobre la variedad de procesos que ocurren en las cuencas hidrográficas cuando los flujos y los sedimentos se concentran. Debido a los factores morfológicos del terreno y la mecánica, esta es una herramienta poderosa. Es posible reconstruir la historia de los flujos de las cuencas hidrográficas y predecir desarrollos potenciales (Rodríguez, 2010).

La utilización de las simulaciones de los campos hidráulicos en las corrientes naturales tiene una importancia creciente en muchas disciplinas, la modelación hidráulica es necesaria para la predicción confiable de avenidas, así como para el análisis y diseño de obras hidráulicas de diferentes tipologías. Adicionalmente, la comprensión correcta de las características del flujo resulta básica para el estudio de los procesos relacionados con el transporte de sedimentos, la calidad del agua y la protección del hábitat acuático (Díaz Hernández & Burbano, 2007).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1. Ubicación del área de estudio

a) Ubicación política

La cuenca del río Zapatilla, políticamente se encuentra ubicada en varias localidades, del distrito de Ilave, provincia de El Collao de la región de Puno.

b) Ubicación hidrográfica

La cuenca es nominada como cuenca del río Zapatilla, se ubica al lado derecho de la cuenca del río Ilave, hidrográficamente se encuentra ubicada en la cuenca del río Zapatilla, del sistema hídrico de Titicaca, Desaguadero, Popo y Salar de Coipasa (TDPS), de la vertiente de Titicaca.

c) Ubicación geográfica

El sitio de estudio está ubicado geográficamente en las coordenadas geográficas (WGS84): a 16°13'21" Latitud Sur y 69°36'2" Longitud Oeste, que se muestra en la figura 1, la ubicación de la cuenca del río Zapatilla, con una Superficie de 440.77 km² y con un perímetro de 111.40 km.

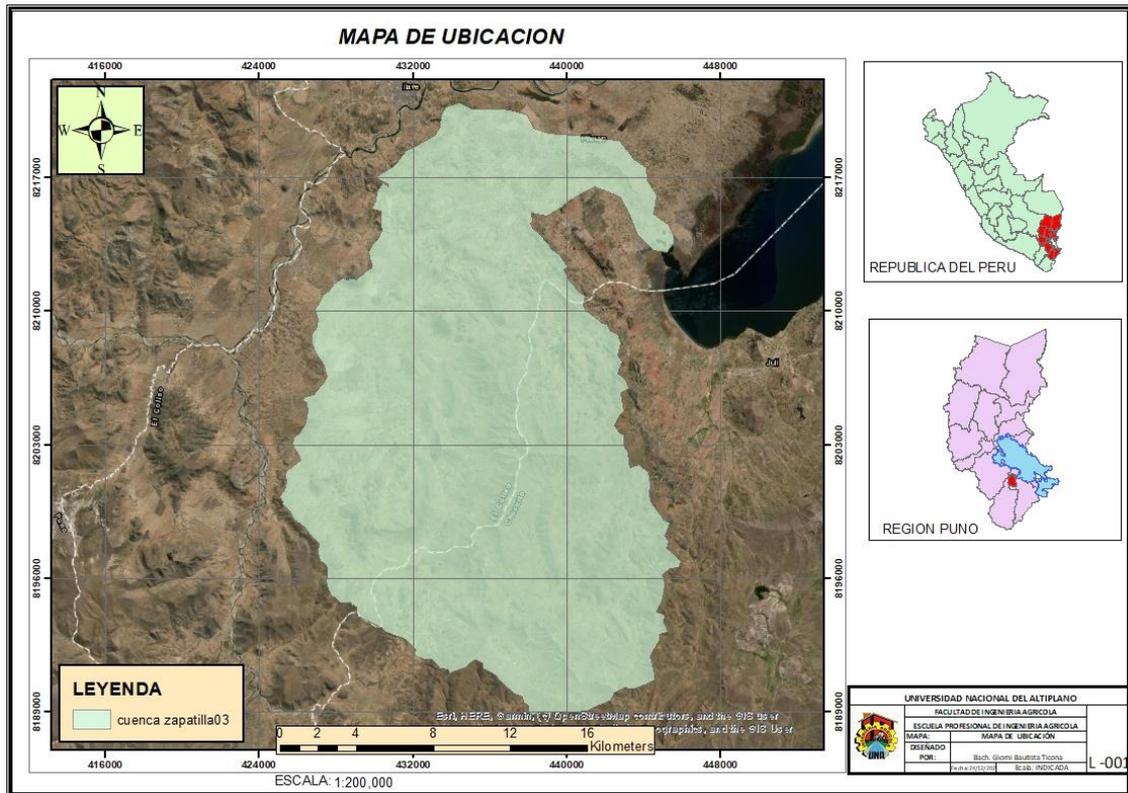


Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Zapatilla

Nota. Esta figura muestra la ubicación de la cuenca del río Zapatilla, dentro de la región Puno y el país.

3.1.2. Topografía

La cuenca del río Zapatilla tiene una topografía con pendientes variables. El ángulo de inclinación de la pendiente, es medianamente empinada con alturas que oscilan entre 3820 a 4667 msnm, la altitud promedio del lugar es 4320 msnm.

Un aspecto fundamental para hacer un análisis territorial es reportar en el mapa todos los temas considerados. Un mapa, es una herramienta y una forma de comunicación para analizar una región, presentar sus hallazgos y recomendaciones (Huaranca, 2014).

La información utilizada en la gran mayoría para los cálculos respectivos fue, imágenes de ALOS PALSAR con una resolución espacial de 12.50 m.

3.1.3. Clima e hidrología

La cuenca del río Zapatilla, cuyas nacientes se encuentran sobre los 4667 msnm. hasta el punto de desembocadura hacia el lago Titicaca

Las temperaturas medias en el área de estudio de la cuenca del río Zapatilla oscilan entre 8 °C; registrándose temperaturas más altas entre octubre a marzo, con un promedio de 14 °C y las más bajas en junio y agosto que alcanzan una temperatura de -2 °C.

La cuenca es alargada y tiene una densidad de drenaje de 1.14 km/km², lo que indica que la microcuenca del río Zapatilla, tendría un drenaje regular y una vulnerabilidad moderada a inundaciones.

3.1.4. Características geomorfológicas

En el presente trabajo, se optó la utilización de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USDA, 1987), para estimar la cantidad de suelos perdidos en la cuenca del río Zapatilla debido a procesos naturales y antropogénicos. El mapa geomorfológico se obtuvo del mapa Zonificación Ecológica y Económica de la región Puno.

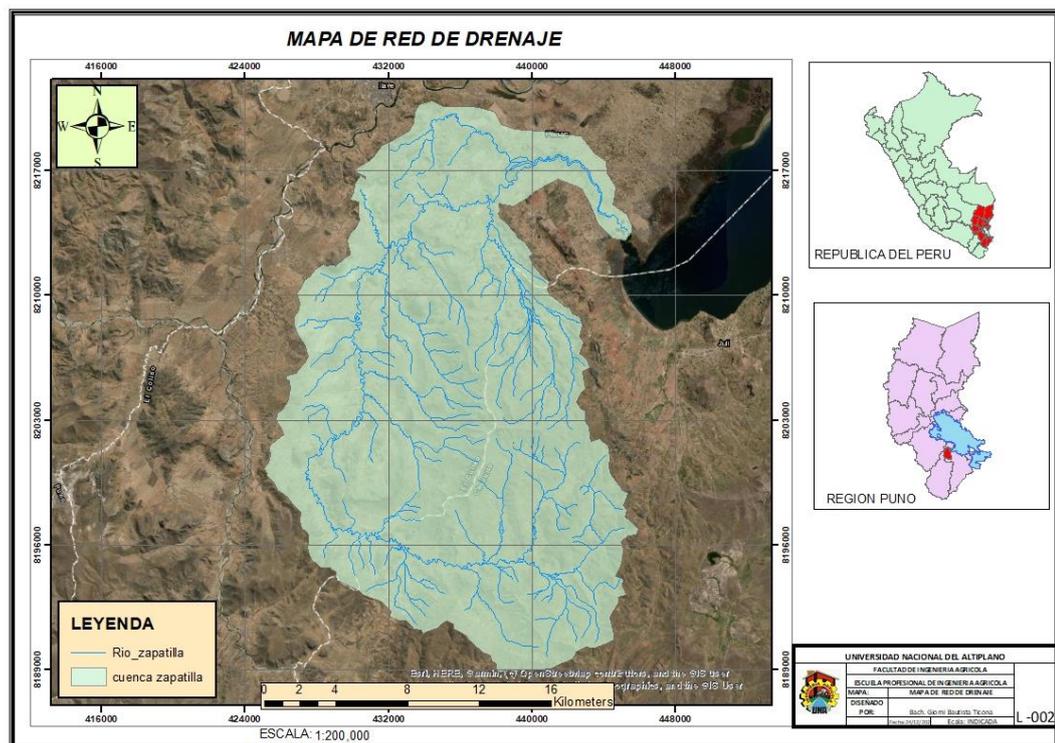


Figura 2. Red de drenaje de la cuenca del río Zapatilla

Nota. Esta figura muestra el sistema de red de drenaje de la cuenca del río Zapatilla y sus afluentes.

3.1.5. Geomorfología

Las unidades geomorfológicas de cuencas hidrográficas (figura 3) se determinaron a partir de imágenes Landsat en 2018, se empleó método de clasificación geomorfológica para ríos y su desarrollo por SIG flexibilidad e información concisa y rápida. La caracterización y la ramificación de la red fluvial se basan en la topografía del valle, las pendientes y la morfología de los canales. En este se distinguen 16 estratos hidrogeológicos, dominados por valles moderadamente inundados y profundos con canales aluviales serpenteantes (Horacio & Ollero, 2011). Para la cuenca en estudio se basó en los estudios de la geomorfología de ZEE de la región Puno.

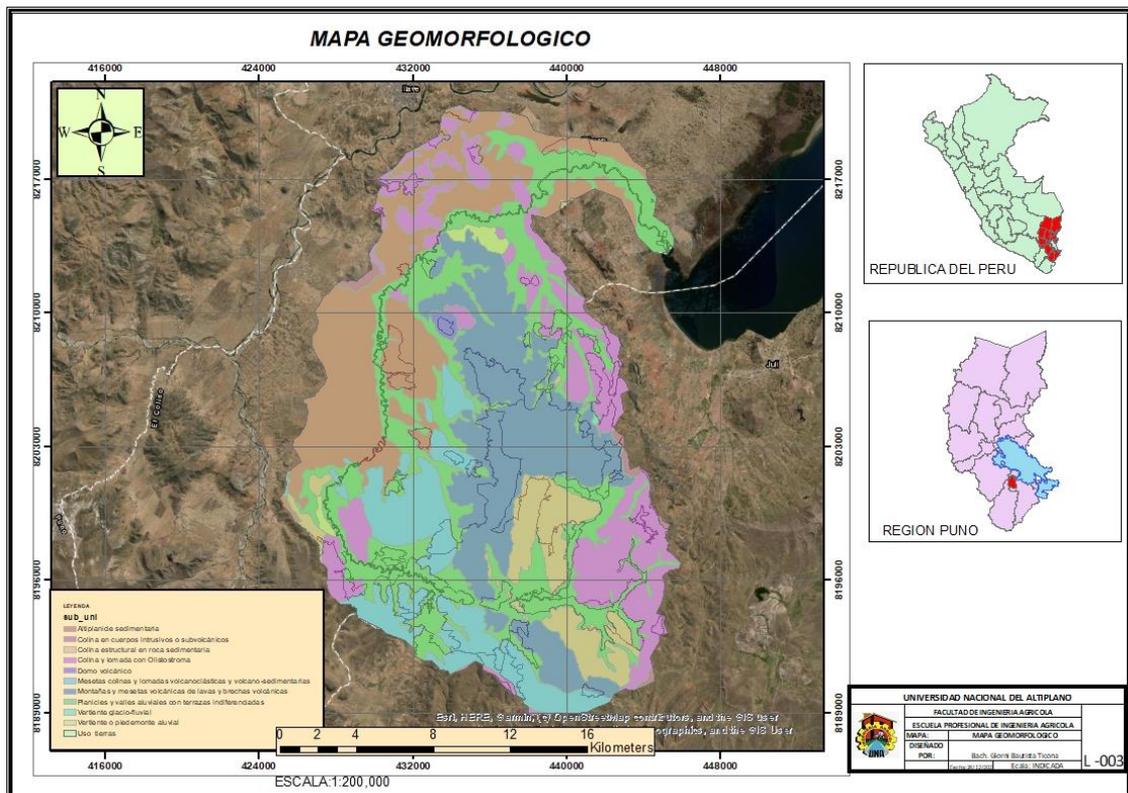


Figura 3. Geomorfología de la cuenca del río Zapatilla

Nota. En la figura, se muestra las principales unidades geomorfológicas de la cuenca del río Zapatilla.

Tabla 3. Unidades geomorfológicas de la cuenca del río Zapatilla

N°	Sub unidades geomorfológicas	Área km ²	Área %
1	Altiplanicie sedimentaria	86.77	19.69%
2	Colina en cuerpos intrusivos o subvolcánicos	2.82	0.64%
3	Colina estructural en roca sedimentaria	29.59	6.71%
4	Colina y lomada con Olistostroma	71.24	16.16%
5	Domo volcánico	1.63	0.37%
6	Mesetas colinas y lomadas volcanoclásticas y volcano-sedimentarias	48.47	11.00%
7	Montañas y mesetas volcánicas de lavas y brechas volcánicas	87.11	19.76%
8	Planicies y valles aluviales con terrazas indiferenciadas	109.62	24.87%
9	Vertiente glacio-fluvial	0.19	0.04%
10	Vertiente o piedemonte aluvial	3.33	0.76%
Total		440.770	100.0%

Nota. En esta tabla mencionamos las unidades sub morfológicas de la cuenca del río Zapatilla.

La tabla 3 ilustra las unidades geomorfológicas que tiene cada unidad de relieve en el ámbito de la cuenca, vale decir que la superficie ocupada con mayor extensión es: Planicies y valles aluviales con terrazas indiferenciadas que representa el 24.87%, seguido por montañas y mesetas volcánicas de lavas y brechas volcánicas con 19.76% y con menor área es la vertiente glacio-fluvial con solo 0.04%.

Los datos seleccionados así mismo los criterios y el análisis empleado durante el flujo de procesos, los responsables del modelo proceden a elegir los métodos de análisis y procesamiento que puede ser a través del método de aptitud y evaluación multicriterio o el método de integración y selección de datos o una combinación de ellos.

3.1.6. Uso de suelo

El mapa de uso de suelo, se realizó mediante la recolección de datos de campo y apoyo de imágenes satelitales de Landsat 8 y 9, haciendo una clasificación de imágenes se obtuvo el mapa de uso actual de tierra, como menciona en la figura 4 que representa el uso actual de tierras dentro de la cuenca del río Zapatilla.

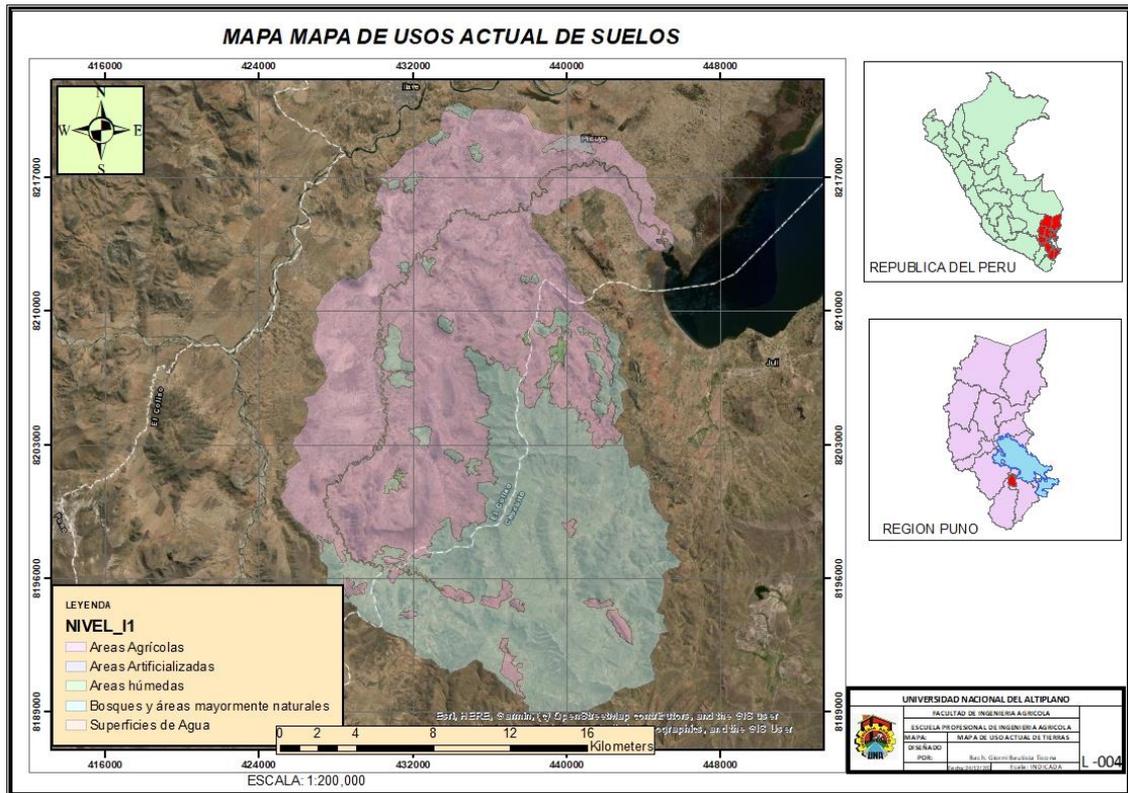


Figura 4. Uso actual de tierras

Nota. Esta figura representa el uso actual de tierras dentro de la cuenca del río Zapatilla.

Tabla 4. Uso actual de tierras en la cuenca del río Zapatilla

N°	Uso actual de tierras	Área ha	Área %
1	Áreas agrícolas	24618.902	56.30%
2	Áreas artificializadas	166.156	0.38%
3	Áreas húmedas	111.794	0.26%
4	Bosques y áreas mayormente naturales	18524.090	42.36%
5	Superficies de agua	304.600	0.70%
Total		43725.541	100%



En la tabla 4 se aprecia, el uso actual de tierras. Áreas agrícolas tiene una extensión de 24,618.902 ha que representa el 56.30% de la superficie total, seguido por bosques y áreas mayormente naturales con 18,524.090 ha que representa el 42.36% y superficie de agua de 304.600 ha que es el 0.70% del área total.

3.2. MÉTODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Tipo de investigación

Tipo de investigación básica, orientada a la búsqueda de nuevos conocimientos sin una finalidad práctica específica e inmediata. Busca principios y leyes científicas, pudiendo organizar una teoría científica de la investigación. Es llamada también investigación científica básica (Sánchez et al., 2018). En esta investigación se utilizó la investigación básica.

3.2.2. Enfoque de investigación

Se utilizó el enfoque cuantitativo, para ello se empleó la recolección de datos, para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico. Este enfoque utiliza la medición y aplicación de la estadística con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías (Hernández et al., 2014).

3.2.3. Nivel de investigación

De acuerdo a la metodología utilizada el nivel de investigación es descriptiva. En donde este tipo de metodología es describir y explicar lo que se investiga (Hernández et al., 2014).

3.2.4. Diseño de la investigación

La investigación realizada se basó en observaciones y mediciones directas, este tipo de diseño es no experimental, es decir transversal descriptiva. La investigación que se realiza sin manipular deliberadamente las variables. Trata de estudios donde no



hacemos variar en forma intensional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables (Gómez, 2014).

3.3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

3.3.1. Recopilación de la información

3.3.1.1. Material satelital

Se utilizó imágenes satelitales de Landsat 8 y 9, descargados de la página de la NASA con resolución espacial de 30 m y con una resolución espectral de 12 bandas, siendo imagen multiespectral. También se utilizó imágenes de ALOS PALSAR, con una resolución espacial de 12.50 m, estas se utilizaron para modelos elevación digital.

3.3.1.2. Datos climatológicos

Los datos climatológicos se obtuvieron de SENAMHI, con los datos de lluvia media mensual de los últimos 20 años.

3.3.2. Análisis de suelos

Los análisis de suelos se realizaron en el laboratorio de la Estación Experimental Illpa Puno del INIA, los parámetros físicos que se obtuvieron son los porcentajes de arena, limo, arcilla y materia orgánica.

Tabla 5. Análisis de clase textural de suelos

ITEM	1	2	3	4	5	6
Codigo de laboratorio	SU339-ILL-22	SU340-ILL-22	SU341-ILL-22	SU342-ILL-22	SU343-ILL-22	SU344-ILL-22
Matriz Analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de Muestreo	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08
Hora de Inicio de Muestreo (h)	7:30 a.m.	7:30 a.m.	7:30 a.m.	7:30 a.m.	7:30 a.m.	7:30 a.m.
Condicion de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada
Codigo/identificacion de la Muestra por el cliente	Parcela M 1/Distrito Ilave	Parcela M 2/Distrito Ilave	Parcela M 3/Distrito Ilave	Parcela M 1/Distrito Ilave	Parcela M 2/Distrito Ilave	Parcela M 3/Distrito Ilave
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
Análisis de Mecánico						
Materia Organica	%	..	3.25	4.65	1.54	..
Densidad Aparente	gr/cc	..	..	..	1.35	1.165
ITEM	7	8	9	10	11	12
codigo de Laboratorio	SU345-ILL-22	SU346-ILL-22	SU347-ILL-22	SU348-ILL-22	SU349-ILL-22	SU350-ILL-22
Matriz Analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de Muestreo	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08
Hora de inicio de Muestreo (h)	7:30 a.m.	7:30 a.m.	7:30 a.m.	7:30 a.m.	7:30 a.m.	7:30 a.m.
Condicion de la Muestra (h)	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada
Codigo/identificacion de la Muestra por el cliente	Parcela M 1/Distrito Ilave	Parcela M 2/Distrito Ilave	Parcela M 3/Distrito Ilave	Parcela M 1/Distrito Ilave	Parcela M 2/Distrito Ilave	Parcela M 3/Distrito Ilave
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
Análisis de Mecánico						
Arena	%	..	43.04	35.04	31.04	..
Limo	%	..	47.28	47.28	47.28	..
Arcilla	%	..	9.68	17.68	21.68	..
Clase Textual	..	..	franco	franco	franco	..
Capacidad de Campo	%	..	..	..	22.83	31.77

Fuente: Certificado del Laboratorio Estación Experimental Illpa Puno del INIA (2022)

3.3.3. Identificación hídrica.

En la cuenca en estudio fueron identificados tres factores como más importantes en la contribución a la susceptibilidad del área a la erosión hídrica, las cuales son; la cobertura vegetal, la fisiografía y el clima.

3.3.4. Aplicación del USLE

Este estudio se basó en el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USDA, 1987) para determinar la pérdida de suelo de la cuenca debido a procesos naturales y antropogénicos y cuantificación de erosión con métodos de campo. La tasa de pérdida de tierras y los mapas de riesgo de erosión se determinan para identificar las áreas que deben abordarse en los planes de conservación del suelo.

3.3.4.1. Factor de erosividad de lluvia

Para determinar el factor R de erosividad, se consideró el siguiente procedimiento:

Paso 01

Primeramente, se obtuvo los datos de las estaciones meteorológicas proporcionados por SENAMHI Puno, de las estaciones Ilave, Juli y Mazocruz.

Tabla 6. Precipitación media mensual de 20 años de registro

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Ilave	173.5	137.8	116.0	44.3	10.9	6.3	5.2	16.8	24.4	34.3	51.6	87.9	708.9
Juli	199.2	184.1	152.8	53.5	12.8	5.8	5.5	15.6	27.8	39.4	55.0	117.0	868.4
Maso cruz	138.3	117.1	86.2	23.3	5.8	2.0	2.1	8.2	8.0	16.0	33.3	76.6	516.8

Fuente: SENAMHI (2022)

Nota. En la tabla 6, se muestra los datos de precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas de Ilave, Juli y Mazocruz; los datos so de 20 años de registro.



Paso 02

Para el cálculo de R de erosividad, se utilizó las ecuaciones (2, 3, 4, 5) y se muestra los datos procesados en la tabla siguiente:

Tabla 7. Datos procesados para el factor R

Estación	Anual ²	F	R	El ₃₀
Ilave	77138.620	108.8161	433.6245	414.3432
Juli	119286.090	137.3594	667.2215	559.9204
Mazocruz	48208.237	93.2900	326.1570	339.5784

Nota. Esta tabla muestra los datos procesados del factor R, para luego ser interpolados con el software SIG.

Paso 03

Los datos procesados se han importado a software SIG, para interpolar

Paso 04

Posteriormente se realizó la interpolación de los datos con el módulo de herramientas de análisis espacial de ArcGIS, sub módulo de interpolación y la herramienta kriging, obteniendo como resultado el mapa “Factor_R.tif”.

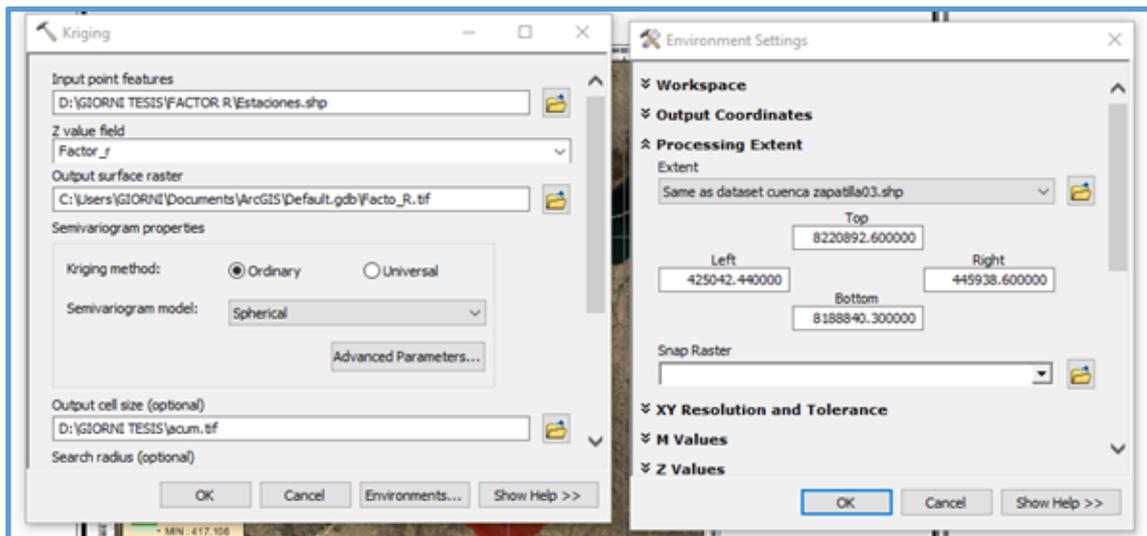


Figura 5. Interpolación de factor R

Nota. La figura 5 representa la interpolación del factor R, en el software del Sistema de Información Geográfica SIG

3.3.4.2. Factor de erodabilidad del suelo

Se realizaron estudios de campo e identificación de unidades de relieve para obtener un mapa estructural de la cuenca del río Zapatilla. Durante la visita se tomaron muestras de suelo para análisis físico en el laboratorio de la Estación Experimental Illpa Puno del INIA. Se trazó estos puntos en un mapa topográfico para determinar la estructura de la unidad.

Cada unidad geomorfológica utilizó un pozo, porque se observó durante la visita de campo que las texturas del suelo de las unidades geomorfológicas no diferían. La determinación del contenido de arena, limo y arcilla estas se realizó por métodos de granulación por tamiz y por los procedimientos de Bouyoucos, clases de textura definidas según la clasificación (USDA, 1987).

Una vez determinados los porcentajes de arena, limo, arcilla y contenido de materia orgánica se procedió a realizar el cálculo de los factores de erosión del suelo en

base a la relación de las ecuaciones (Williams & Berndt, 1977), realizando el siguiente procedimiento:

Paso 01

Se utilizó los datos de suelo del mapa mundial de suelos de la FAO, proporcionado en el formato Excel y en el formato shapefile. Se realizó la extracción del mapa mundial de suelo “MAP_SOIL.shp” obteniendo el mapa “SOIL_Zap.shp”, este mapa no tiene sistema de referencia, por lo tanto, se realizó la corrección de coordenadas de referencia geográfica.

Paso 02

Los datos proporcionados por la FAO de formato Excel, se han seleccionado los siguientes códigos I, TH y TV que corresponden a la cuenca del río Zapatilla, en esa misma tabla nos proporciona el porcentaje del contenido de arena, limo, arcilla y materia orgánica.

Paso 03

Cálculo del factor K utilizando la fórmula de Williams & Berndt (1977).

$$K = 0.1317 f_{sand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (10)$$

$$f_{sand} = \left(0.2 + 0.3 \text{EXP} \left[-0.0256(m_s) \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad (11)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad (12)$$

$$f_{orgc} = \left[1 - \frac{0.25 \text{orgC}}{\text{orgC} + \exp[3.72 - 2.95 \text{orgC}]} \right] \quad (13)$$

$$f_{hisand} = \left[1 - \frac{0.70 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + EXP[-5.51 + 22.9 \left(1 + \frac{m_s}{100} \right)]} \right] \quad (14)$$

Teniendo como resultado el factor K.

A continuación, los datos obtenidos presentamos en la siguiente tabla 8.

Tabla 8. Datos obtenidos del factor K

Tipo de suelo	Arena	Limo	Arcilla	Carbono orgánico	Arena	Limo arcilla	Carbono orgánico	Parámetro relacionado con la arena		
								Fcsand	Fcl-si	Forg	F hisand	K
Soil unit symbol	Sand % topsoil	Silt % topsoil	Clay % topsoil	OC % topsoil	Fcsand	Fcl-si	Forg	F hisand	K	
I	58.9	16.2	24.9	0.97	0.285	0.756	0.927	1.000	0.200	0.026
TV2	42.5	39.7	18	2.3	0.356	0.894	0.755	1.000	0.240	0.032
TV3	40	35	25	3	0.354	0.851	0.750	1.000	0.226	0.030

Nota. En esta tabla se muestra los datos obtenidos del factor K.

Paso 04

Los datos calculados en Excel fueron importados a la tabla de atributos del mapa “SOIL_UTM.shp”, este mapa se convirtió en formato ráster, utilizando las herramientas del módulo de conversión “tolos” y “poligon to raster”.

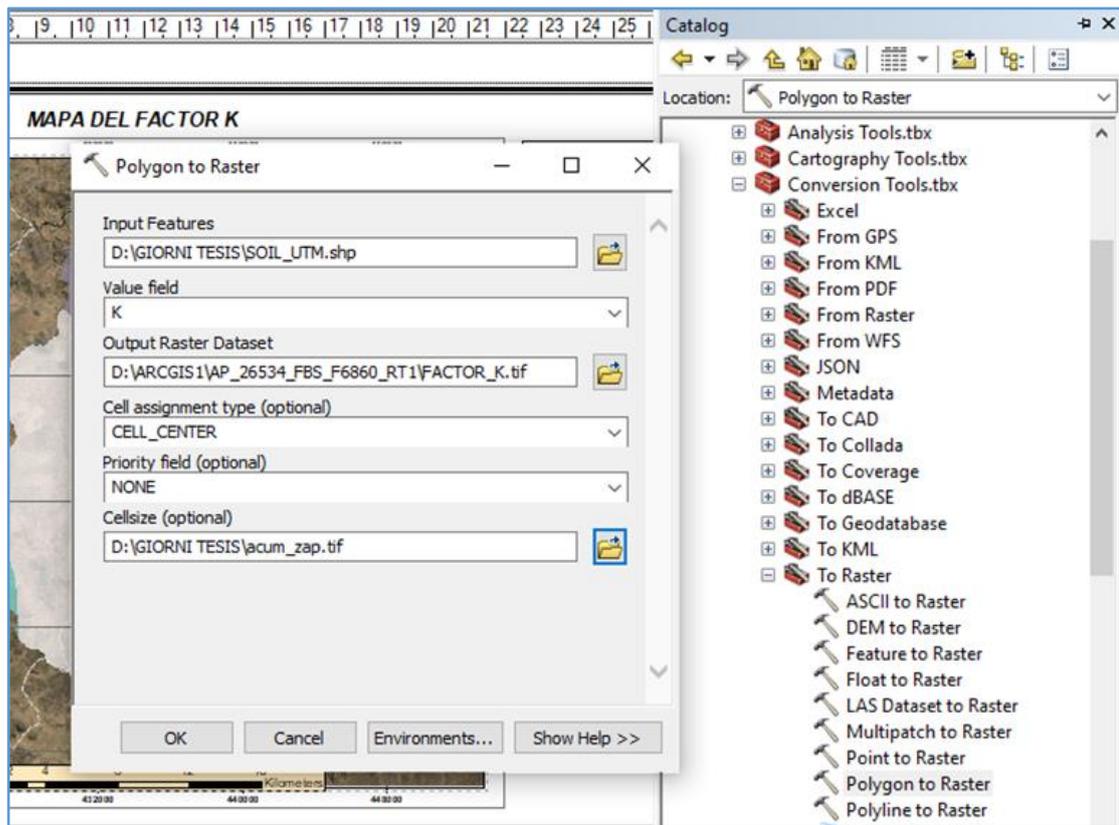


Figura 6. Conversión de polígono a ráster del factor K

Nota. Esta figura muestra la conversión de polígonos a ráster para calcular el factor K.

3.3.4.3. Factor de longitud pendiente e inclinación pendiente

Se utilizó la relación propuesta por Montenegro & Malagon (1990), para obtener un mapa de factores de longitud. La longitud de la pendiente corresponde al índice de transporte de sedimentos (TS) obtenido mediante el cálculo del índice compuesto hidrológico y modelo digital de elevaciones.

Los mapas TS resultantes están corregidos para valores extremos e indican que estos valores no deben exceder de 700. Este valor se define como el promedio de varias distancias medidas entre el punto correspondiente a la cuenca y los puntos de la red de drenaje, obtenidos en el mapa de acumulación de caudales por Montenegro & Malagon (1990).



Para el cálculo de factor de longitud de pendiente se utilizó las herramientas de Sistemas de Información Geográfica, con el siguiente procedimiento:

Paso 01

Primeramente, se descargó el modelo digital de elevaciones (MED) del satélite ALOS PALSAR, con una resolución espacial de 12.50 m y una resolución espectral de 01 banda, lo cual nos proporciona el relieve de la cuenca del río Zapatilla. El MED se realizó el relleno de superficies en zonas que presentan depresiones utilizando el software ArcGIS, módulo de hidrología y la herramienta de relleno.

Paso 02

La imagen corregida y/o relleno, se procedió a determinar la dirección de flujo, el cálculo es realizado en el software ArcGIS utilizando la herramienta de dirección de flujo, que se encuentra dentro del módulo de hidrología.

Paso 03

Una vez obtenido la dirección de flujo, procedemos a calcular la acumulación de flujo utilizando el módulo de hidrología del programa antes mencionado.

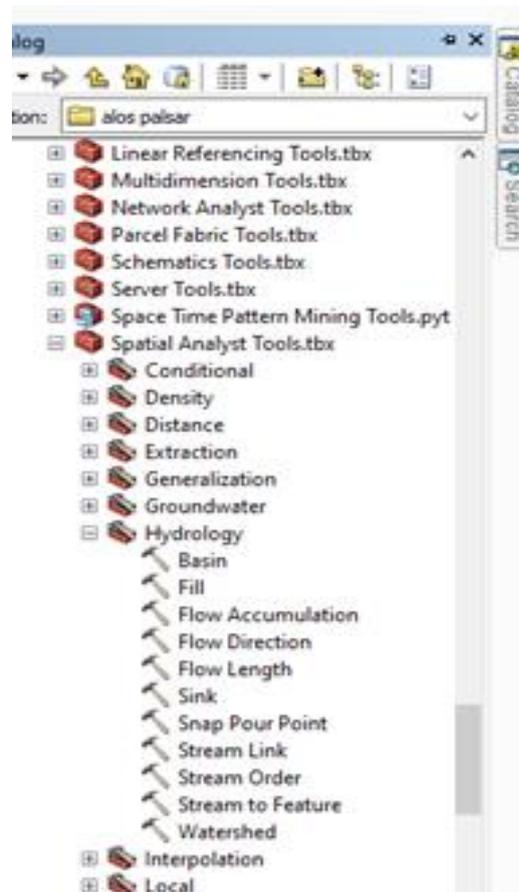


Figura 7. Herramientas de hidrología para dirección de flujo y acumulación de flujo

Nota: En la figura 7 se visualiza las herramientas para determinación de dirección de flujo y acumulación de flujo en software.

Paso 04

Con la imagen corregida procedemos a calcular la pendiente en grados, utilizando el módulo de herramientas de análisis espacial, sub módulo superficie y la herramienta slope.

Paso 05

La pendiente calculada en grados se convirtió en radianes, utilizando el módulo de herramientas de análisis espacial, sub módulo de algebra de mapas y la herramienta calculadora de ráster, ingresando la siguiente fórmula:

$$RS = (([SLOPE] * 1.570796)/90) \quad (15)$$

En la calculadora ráster se ingresó la siguiente ecuación:

$$SR = ([PEND_GRAD.tif] * 1.570796)/90 \quad (16)$$

Paso 6

Calculo factor F, utilizando la siguiente expresión en el ArcGIS.

$$F = ((Sin("pendiente.tif" * 0.01745)/ 0.0896)/(3 * Power(Sin("pendiente.tif" * 0.01745),0.8) + 0.56)) \quad (17)$$

Teniendo como resultado “factor_f.tif”.

Paso 7

Cálculo del factor m, para el procesamiento se utilizó las herramientas de Sistema de Información Geográfica, módulo de análisis espacial, sub módulo de algebra de mapas y la herramienta calculadora ráster, a partir de la siguiente expresión:

$$M = "FACTOR F" / (1 + "FACTOR_F") \quad (18)$$

Teniendo como resultado “factor_m”.

Paso 8

Finalmente, se calculó el factor de longitud de pendiente, ingresando la siguiente ecuación:

$$L = (Power(("acum.tif" + 126.5), ("Factor m" + 1)) - Power("acum.tif", ("Factor M" + 1)))/(Power(25, ("Factor_m" + 2)) * Power(22.13, "Factor_m")) \quad (19)$$

3.3.4.4. Obtención del mapa de factor de inclinación de pendiente

Los mapas de coeficientes de pendientes se calculan en base a la relación propuesta por Montenegro & Malagon (1990), donde las pendientes se representan en porcentaje y grados.



Para la elaboración de mapas en Sistemas de Información Geográfica, se utilizó la calculadora ráster, con la siguiente expresión:

$$S = \text{Con}((\text{Tan}(\text{"pendiente.tif"} * 0.017745) < 0.09), (10.8 * \text{Sin}(\text{"pendiente.tif"} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \text{Sin}(\text{"pendiente.tif"} * 0.01745) - 0.5)) \quad (20)$$

Se obtuvo como resultado el “factor_s”

3.3.4.5. Obtención del mapa de factor de manejo de cobertura

Se obtuvo un índice de vegetación normalizado (NDVI) utilizando las bandas 4 y 5 de Landsat 8, con el sensor OLI. Las relaciones propuestas por (Bastiaanssen, 1998), se utilizan para determinar el NDVI, el Leaf Area Index (LAI) y la porción de la superficie terrestre cubierta por vegetación, para realizar los cálculos, se utilizó el siguiente procedimiento:

Paso 01

Se utilizó las imágenes satelitales de Landsat 8 del sensor OLI, descargados de la página de earth explorer, que contiene 11 bandas espectrales, “LC08_L1TD_002007.tif”

Paso 02

Las imágenes Landsat fueron corregidas atmosféricamente con Qgis 3.28, utilizando el complemento “Semi_automat classification Plugin”, cuyo resultado fueron las imágenes en reflectancias corregidas

Paso 03

Las imágenes corregidas se utilizaron para calcular el índice diferencial de vegetación normalizada, con la ecuación planteada por Bastiaanssen (1998).

$$NDVI = \frac{\text{banda5} - \text{banda4}}{\text{banda5} + \text{banda4}} \quad (21)$$

Para el cálculo se utilizó el módulo de herramientas de ArcGIS, sub módulo map álgebra y la herramienta calculadora de ráster, obteniéndose como resultado el mapa “NDVI.tif”.

Paso 04

Las imágenes obtenidas de landsat son ubicadas en la zona norte; por tanto, el NDVI calculado se realizó el resampleo respectivo con el módulo de herramientas de “Data management tools”, sub módulo proyección de ráster y la herramienta proyección ráster. Posteriormente se corto para la cuenca en estudio.

Paso 5

Los valores de NDVI se clasificación segun la tabla 9.

Tabla 9. Rangos de clasificación para la cobertura vegetal en función del NDVI

Clase	Valores de NDVI	Cobertura vegetal	Descripción
1	< -0.1	Clases no vegetales	Ríos, lagunas, nubes
2	-0.1 – 0.15	Tierra desnuda	Suelos degradados, asentamientos, carreteras, suelos desnudos
3	0.15 – 0.25	Vegetación dispersa	Suelos con cultivo, herbazales, arbustos, pastizales, suelo arado para cultivo.
4	0.25 – 0.4	Vegetación abierta	Vegetación leñosa, plantación arbustiva, bosque seco.
5	>0.40	Vegetación cerrada	Plantas densas en crecimiento, bosque humedo.

Fuente: Vargas (2017).

Nota, En la tabla 9 se muestra la clasificación del NDVI según rangos de cobertura vegetal.

La clasificación se realizó con la herramienta de SIG, específicamente con el módulo de análisis espacial, sub módulo reclasificación y la herramienta reclasificar, obteniéndose el mapa “Factor_c.tif”.

3.3.4.6. Obtención del mapa de prácticas de control

En la visita de campo se pudo visualizar que no existen medidas de conservación de suelos, por lo que este factor no es considerado en el cálculo de pérdida de suelos. Por lo tanto, se consideró el valor de P igual a 1.

Coefficiente de erosión activa del suelo

El coeficiente de erosión activa, depende de las condiciones de la zona respecto a la actividad de la erosión en la zona. Estos valores están en la tabla 10.

Tabla 10. Valores de erosión activa (EA)

Factor	Extremo	Valor	Alto	Valor	Normal	Valor	Bajo	Valor
Erosión activa (EA)	Muchos barrancos con erosión activa que drenan cursos de agua principales o secundarios	80	Muchos barrancos con erosión activa que drenan directamente cursos de agua principales o secundarios	60	Muchos barrancos con erosión activa que drenan directamente cursos de agua principales o secundarias	20	Muchos barrancos con erosión activa que drenan directamente cursos de agua secundarias	0

Fuente: Flores (2003).



3.3.5. Estimación de erosión en campo

3.3.5.1. Método de pedestales

Pedestales de piedra se forman debajo de piedras que lo protegen de la energía erosiva de las gotas de agua de lluvia. Al medir la altura de suelo de los pedestales y estimar el porcentaje de cobertura de pedregosidad, se puede estimar el grado de erosión. Esta metodología permite estimar la erosión de terrenos en descanso y sin cobertura. La aproximación abarca la erosión, tanto hídrica como eólica, ocasionada en el suelo durante un período determinado de descanso y sin cobertura. La aproximación abarca la erosión, tanto hídrica como eólica, ocasionada en el suelo durante un período determinado de descanso.

1. Altura media de los pedestales (h) en mm
2. Estimación de la pedregosidad en la superficie del suelo, (p) fracción del área total, cubierta con piedras.
3. Lamina de suelo perdida C en metros:

$$(C = (h * (1 - p))/1000) \quad (22)$$

4. Volumen de suelo erosionado por hectáreas, (V) en metros cúbicos por hectáreas:

$$(V=C*10000) \quad (23)$$

5. Masa de suelo erosionado por hectárea al año (S) en toneladas por año: (S= (V*1.3 (densidad del suelo)) / años de la última labranza).

Para este estudio se ha utilizado 20 unidades de muestreo, considerando suelos que han sido labrados entre 01 y 02 años.



Figura 8. Medición de pedestales

Nota. En la figura 8 se representa la medición pedestales en mm.

3.3.5.2. Capa de armadura

El número de piedras dejada sobre una superficie específica del suelo comparado con el numero en el perfil del suelo puede indicar el grosor de la capa removida.

1. En una tarea específica (digamos 100 cm^2 , pero dependería de la población de piedras), contar el número de piedras presentes, (n).
2. Sacar las piedras ubicadas sobre la superficie del suelo
3. Cavar el suelo a una profundidad de unos 25 mm, y contar el número de piedras presentes (m) en esa profundidad.
4. Calcular la capa de suelo perdida, C mm: $(C=n*25/m)$.

5. Calcular el volumen de suelo perdido por hectárea (V) en metros cúbicos por hectárea: ($V = (C * 10,000) / 1,000$).
6. Calcular la masa de suelo perdida por hectárea (M) en toneladas por hectárea ($M = V * 1.3$ (densidad del suelo))
7. Calcular el suelo perdido por año, (S) en toneladas por hectárea por año: ($S = M / \text{años de cultivo del suelo desde el último barbecho}$)

Lo más importante es el impacto visual que se puede mostrar al agricultor, al amontonar las piedras encontradas en la superficie, se puede comparar con el montón más pequeño encontrado en la capa arable, y el volumen del suelo que las contenía. Luego se puede imaginar el volumen más grande del suelo que contenía las piedras superficiales y que haya perdido por la erosión.



Figura 9. Capa de armadura

Nota. En esta figura 9 representa la aplicación de la metodología de capa de armadura.

La capa de armadura muy utilizada para estimar la pérdida de suelos, para este estudio se ha utilizado 20 lugares de muestreo, considerados entre 01 y 02 años de la última labranza.



Tabla 11. Datos obtenidos en campo

N°	Nombre	X	Y	m	n
1	Punto01	429272	8208680	313	50
2	Punto02	429448	8204095	104	10
3	Punto03	427724	8201749	240	25
4	Punto04	431782	8201449	238	10
5	Punto05	433142	8198144	232	25
6	Punto06	436135	8194503	198	33
7	Punto07	440381	8192885	208	25
8	Punto08	440622	8195690	107	11
9	Punto09	438311	8197636	298	51
10	Punto10	442268	8199416	163	12
11	Punto11	437668	8201001	313	50
12	Punto12	440791	8202430	50	5
13	Punto13	440171	8205753	100	10
14	Punto14	437116	8207258	199	33
15	Punto15	439372	8209644	200	10
16	Punto16	436002	8210366	110	10
17	Punto17	435192	8207557	208	25
18	Punto18	433771	8212644	227	50
19	Punto19	432879	8215687	125	10
20	Punto20	435936	8216852	50	2

Nota. En la tabla 11 se muestran los datos obtenidos en campo para el método de capa de armadura.

3.3.6. Información utilizando el método de Tukey

Se consideró 20 puntos de muestreo, dentro de la cuenca en estudio como se aprecia en la figura 16 y posterior a ello. Se ha comparados con los cálculos obtenidos de método USLE y los métodos de campo.



Utilizando el método, existe alta significancia estadística mediante la prueba de rango múltiple de Tukey al 95% de probabilidad, donde el método de la Capa de Armadura y método Pedestal son estadísticamente iguales con valores de 5.865 y 4.950 respectivamente y el método USLE ocupa el último lugar con un valor de 1.738 mm, esto indica que son diferentes los valores encontrados, respecto a los primeros.

3.3.7. Influencia de la cobertura vegetal como función ecosistémica en el riesgo de erosión

Uno de métodos utilizados para determinar la influencia de la cobertura vegetal es a través de índices morfométricos, para esta investigación se estimó que los datos obtenidos a partir del modelo USLE y demás otras metodologías se ajustarán utilizando dos índices morfométricos, indicadores de signos de erosión. Los mismos serán obtenidos a partir del modelo digital de elevaciones y se mencionan a continuación:

3.3.7.1. Índice de humedad topográfica

El índice de humedad fue originalmente desarrollado para predecir las áreas saturadas y la profundidad del nivel freático del suelo. Posteriormente ha sido empleado para predecir el contenido de humedad del suelo y para identificar áreas de erosión y/o deposición potencial de materiales y para la predicción del desarrollo de cárcavas. Permite identificar los potenciales lugares donde se concentra la humedad o las zonas de acumulación de agua. La obtención de este indicador está basada en el análisis morfológico de la superficie de la cuenca en estudio, pudiendo ser utilizado para la elaboración de inventarios de potenciales zonas húmedas o identificar los límites de las láminas de una masa de agua ya existente (Gis-Beers, 2018).

La determinación del índice topográfico de humedad se realizó haciendo la secuencia de los análisis de modelos de elevación digital (MED) y su morfometría para



identificar las zonas de mayor potencial de acumulación de humedad en la cuenca del río Zapatilla.

En este estudio se utilizó la metodología propuesta por Gis-Beers (2018), con el siguiente procedimiento:

Paso 01

Se realizó la descarga del modelo digital de elevación (MED) del satélite ALOS PALSAR, con una resolución espacial de 12.50 m y una resolución espectral de 01 banda, lo cual nos proporciona el relieve de la cuenca del río Zapatilla. Con el MED se realizó el relleno de superficies que presentan depresiones utilizando el software ArcGIS, módulo de hidrología y la herramienta de relleno.

Paso 02

La imagen corregida y/o relleno se procedió a determinar la dirección de flujo. Se calculó en el software ArcGIS con la herramienta de dirección de flujo que se encuentra dentro del módulo de hidrología.

Paso 03

Una vez obtenido la dirección de flujo, procedemos a calcular la acumulación de flujo, que se encuentra dentro de módulo de hidrología del programa antes mencionado.

Paso 04

Con la imagen corregida procedemos a calcular pendiente en grados, utilizando el módulo de herramientas de análisis espacial, su módulo superficie y la herramienta slope.

Paso 05

La pendiente calculada en grados se convirtió en radianes, utilizando el módulo de herramientas de análisis espacial, sub módulo de álgebra de mapas y la herramienta calculadora de ráster, utilizando la siguiente fórmula:



$$RS = (([SLOPE] * 1.570796)/90) \quad (24)$$

Dentro de calculadora ráster se ingresó la siguiente ecuación:

$$SR = (([PED_ - GRAD.tif] * 1.570796)/90) \quad (25)$$

Paso 06

Para calcular la tangente de la pendiente se utilizó la calculadora ráster, para ello incorporamos la siguiente expresión, luego obtener los valores tangenciales.

$$ST = \text{con}([SR] > 0, \tan[RS]),0.001 \quad (26)$$

Por consiguiente, se ingresó a la calculadora ráster la siguiente expresión:

$$ST = \text{con}([SR] > 0, \tan[RS]),0.001 \quad (27)$$

Paso 07

El cálculo de la superficie de contribución de agua se utilizó el módulo de herramientas de análisis espacial, sub módulo algebra de mapas y la herramienta calculadora de ráster, la siguiente ecuación:

$$UCA = ([ACUMULACION] + 1) * TAMANODE PIXEL \quad (28)$$

En la calculadora de ráster se ingresó de la siguiente forma:

$$UCA = (["Acum_zap.tif"] + 1) * 12.5 \quad (29)$$

Paso 08

Finalmente, se calculó el índice topográfico de humedad con el módulo de herramientas de análisis espacial de ArcGIS, submódulo de álgebra de mapas y la herramienta calculadora de ráster, utilizando la siguiente ecuación:

$$TWI = \text{Ln}([UCA]) /([ST]) \quad (30)$$

Ingresando en la calculadora ráster, la siguiente expresión:

$$ITH = \log(("UCA.tif")/("ST.tif")) \quad (31)$$



3.3.7.2. Índice de potencia de flujo superficial

El índice de potencia de flujo superficial es un estimador de la fuerza erosiva del flujo superficial en la cuenca del río Zapatilla.

Este índice fue concebido con el fin de predecir las áreas potenciales con riesgo de desarrollo de cárcavas debido a la concentración del flujo superficial. Para este trabajo se utilizó las ecuaciones propuestas por Gis-Beers (2018), con la siguiente ecuación:

$$SPI = (Acumulación\ de\ flujo * 2500) * pendiente\ en\ radianes \quad (32)$$

La ecuación utilizada para determinar el SPI, fue de la siguiente manera:

$$SPI = ("Acum_zap.tif" * 2500) * "PEND_RAD.tif" \quad (33)$$



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan de acuerdo a los objetivos planteados de la presente investigación:

4.1. EROSIÓN HÍDRICA MEDIANTE MÉTODOS DE ESTUDIO

4.1.1. Estimación de erosión hídrica método USLE

4.1.1.1. Factor de agresividad de la lluvia R

El factor de erosión hídrica en la cuenca del río Zapatilla, es variable obteniendo un valor de 417.106 a 533.522 MJ/ha*mm/h/año. El régimen de lluvias que se registran se caracteriza por su variabilidad temporal y espacial de mayor frecuencia e intensidad entre los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, mientras que el resto del año es bajo considerándose casi nula en los meses de junio a agosto.

La figura 10, muestra la variabilidad espacial de los valores del factor R de agresividad y/o agresividad de lluvia, cuya representación espacial de mapa ha sido elaborado mediante el análisis espacial del SIG y con una resolución espacial de 12.50 m por celda.

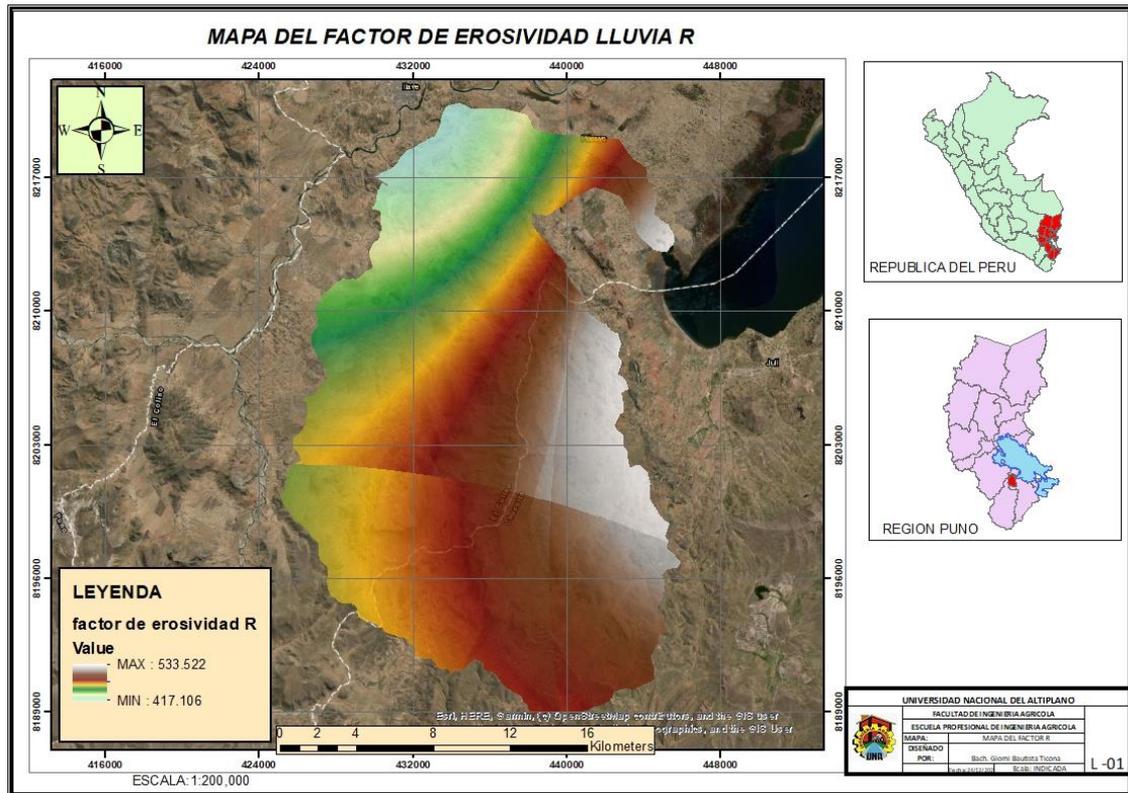


Figura 10. Factor R (agresividad de lluvia)

4.1.1.2. Factor de erodabilidad del suelo K

En la cuenca del río Zapatilla, los valores del factor K están comprendidos entre 0.026 y 0.032 t.ha.h/ha.MJ.mm, siendo el valor de mayor impacto en el ámbito de la cuenca $K= 0.026$ t.ha.h/ha.MJ.mm, que corresponde a arenas aluviales, que corresponde a suelos moderadamente susceptibles al desprendimiento.

En la figura 11 se muestran los valores de K, que constituye la erodabilidad del suelo. La estructura principal de la cuenca es arena franca y la a relación arena con limo, varía con un valor de 0.032 cubriendo casi el 53% del área total de la cuenca del río Zapatilla.

Teóricamente, los suelos son más susceptibles a la erosión si su composición no contiene partículas aglomeradas. Comparando los resultados y según la clasificación

USDA (1987), las muestras contenían muy poca arcilla, lo que hace que estos suelos sean susceptibles a la erosión y son suelos arenosos de textura rugorosa.

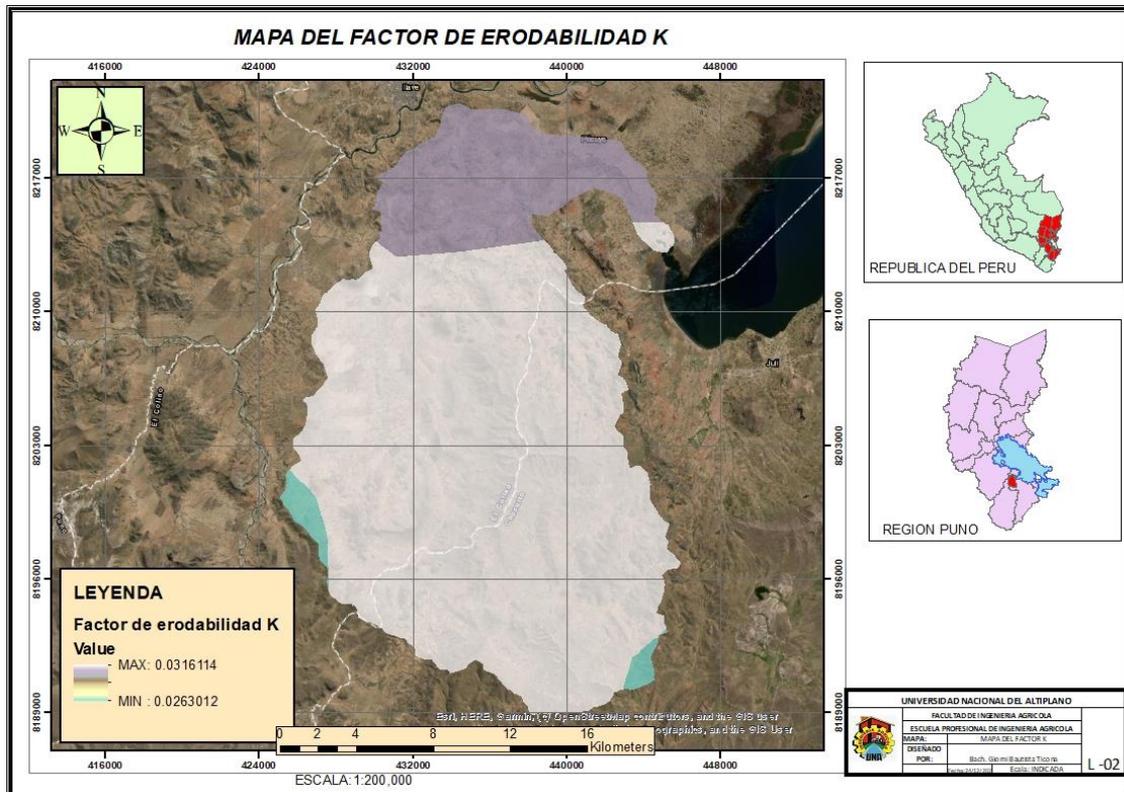


Figura 11. Mapa de erodabilidad

Nota. Esta figura muestra los valores del factor K, que constituye la erodabilidad del suelo.

4.1.1.3. Factor longitud pendiente e inclinación de pendiente L

El factor L se determinó utilizando el software de Sistema de Información Geográfica, considerando pendiente en radianes. El mapa de longitud de pendiente (figura 13), muestra que los valores más altos se encuentran al borde del río, en la zona media se tiene una pendiente bastante suave, el mapa de longitud y pendiente muestran los cambios del terreno y su impacto en los procesos de erosión hídrica, los valores de longitud pendiente varían de 0.096 a 139.447.

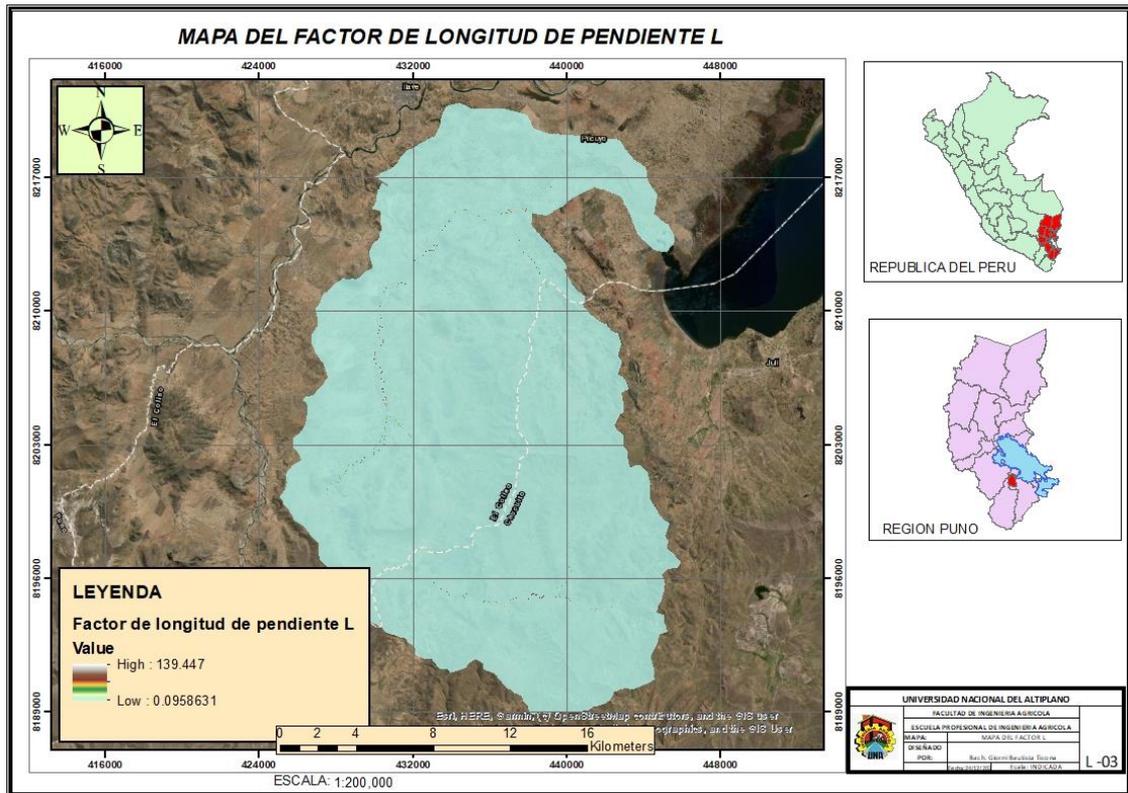


Figura 12. Mapa del factor de longitud de pendiente

Nota. La figura representa la variación espacial de longitud de pendiente en la cuenca del río Zapatilla.

En la figura 13, presenta la variación espacial de inclinación pendiente de la cuenca del río Zapatilla, cuyos valores son de 0.030 a 16.290 en radianes.

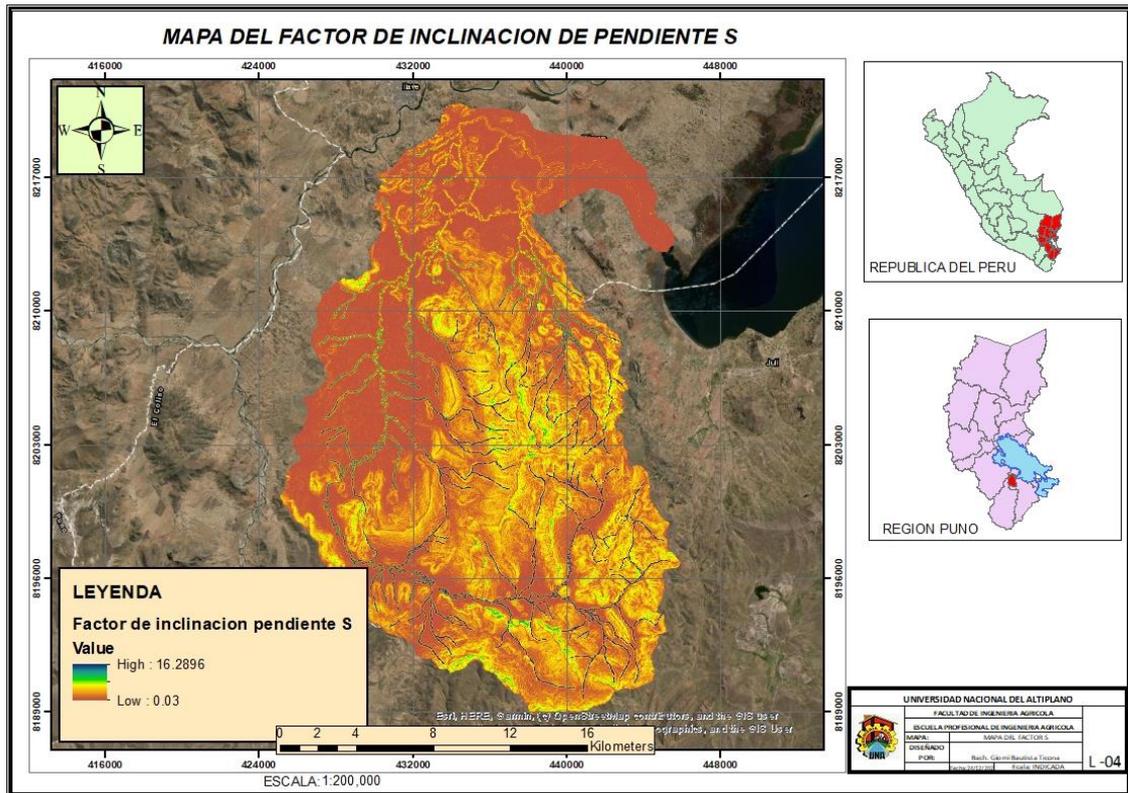


Figura 13. Factor de inclinación de pendiente

Nota. La figura representa la variación espacial de inclinación en la cuenca del río Zapatilla.

4.1.1.4. Factor de manejo de cobertura C

El factor C, se refiere a la protección que la cobertura vegetal proporciona al suelo al interceptar las gotas de precipitación pluvial y detener su energía de impacto y de escorrentía disminuyendo la cantidad de erosión. Los valores del factor C se obtuvieron

los valores de la tabla 1, obteniendo el mapa con la distribución espacial del factor C (figura 14) a partir del mapa de cobertura y uso.

Para manejo de cobertura, los valores obtenidos varían de 0.50 a 1.00, obteniéndose los valores más altos en tierras de cultivo, valles y humedales. En pastizales los valores oscilaron entre 0.10 y 0.20.

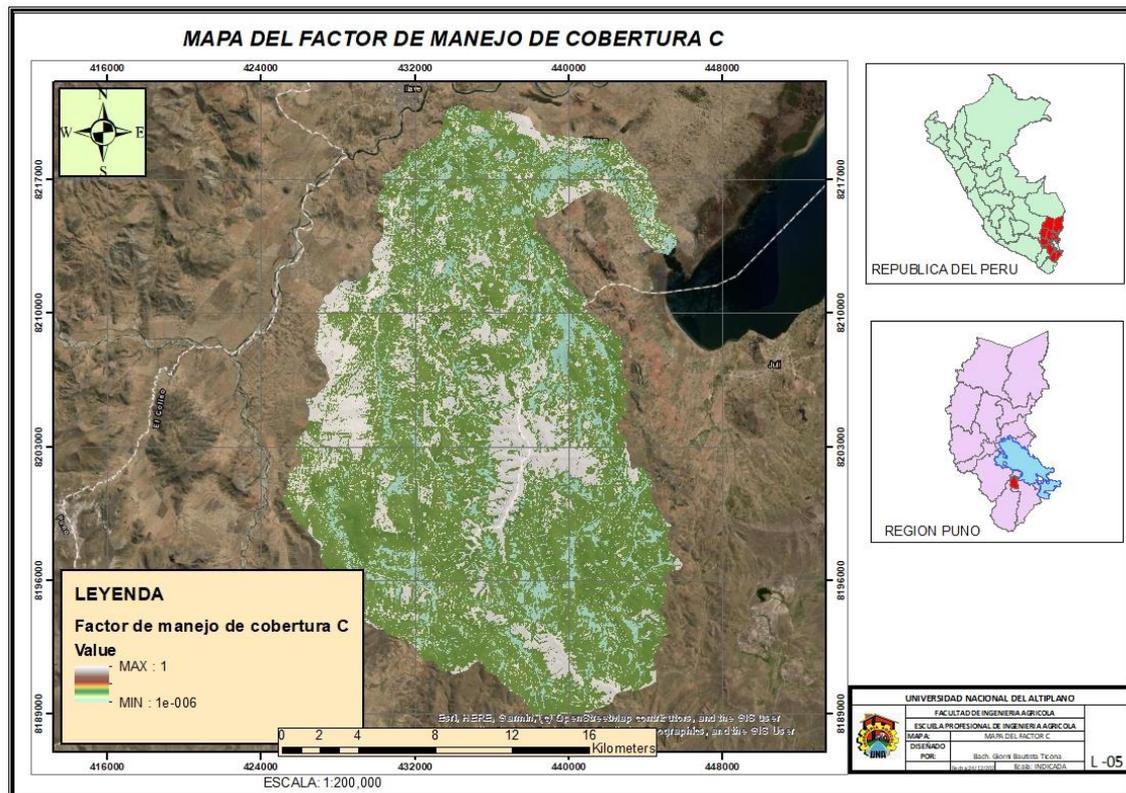


Figura 14. Factor de manejo de cobertura C.

Nota. Esta figura muestra la variación espacial de manejo de manejo de cobertura.

Estos resultados se asemejan con los de Condori (2018), donde el coeficiente de erosión pluvial (R) oscila entre 121.82 y 151.25 MJ mm t/ha/año; el coeficiente de erosión (K) varía de 0.458 a 1.276 t/ha/MJ/mm/ha, factor de terreno (LS) varía 0.17 a 25.71.

Además, el factor de cobertura vegetal (C) varía de 0.001 a 1 y el factor de actividad de conservación del suelo (P) varía de 0.01 a 0.5; estos valores se también se asemejan con estudios de Guevara et al. (2019), Ccama (2012) y Gaitan et al. (2017).

4.1.1.5. Cálculo de pérdida de suelo por erosión hídrica

La erosión y pérdida de suelo se muestran en la figura 15, los valores encontrados aplicando la Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo por la acción erosiva de las precipitaciones pluviales.

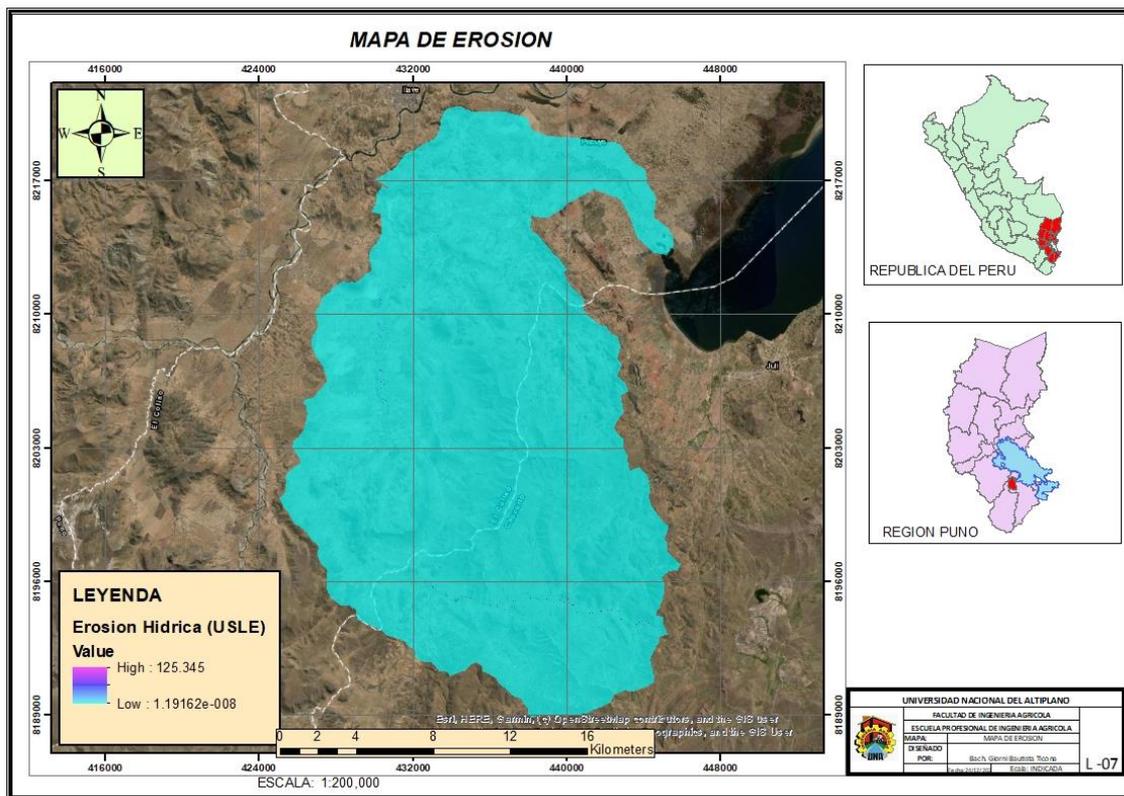


Figura 15. Pérdida de suelo por erosión hídrica

Nota. La figura representa la erosión ocasionada en la cuenca del río Zapatilla.

Valores de pérdida de suelo por erosión hídrica oscilan entre 1.19 y 125.345 t/ha/año. Los valores más altos se encuentran en zonas más empinadas y suelos con textura conformado por arenas, que son menos representativas del tamaño de la cuenca. Con base a este resultado, se puede decir que la cuenca hidrográfica tiene un riesgo bajo a moderado de erosión hídrica. Los factores predominantes son como la textura del suelo, la vegetación, el uso y la pendiente.



Análogos resultados encontraron Nájera González et al., (2016) en su estudio de riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México, que el 57.60% de la superficie del ámbito está en riesgo de erosión hídrica potencial alta y muy alta con valores por encima de las 50 t/ha/año; en la condición sierra de San Juan, y el 30.30% del área presenta pérdida de suelo por encima de las 10 t/ha/año, consideradas entre erosión de muy alta a moderada; además, Gaitan et al., (2017) encontró semejantes resultados usando USLE en Argentina. Y a nivel nacional Huerta y Figueroa (2014), en el estudio de la erosión hídrica en las microcuencas Huangamarca y Pollo de la cuenca alta del río Moche, encontraron en el orden de 7.29 a 33.40 t/ha/año, y, Tapia & Pérez (2018) en la cuenca del río Piura. Además, Ccama, (2012), en la cuenca del río Ilave ha obtenido una variación de 5 a 200 t/ha/año, mientras en la cuenca del río Sigwas se tiene una erosión que varía desde 0 a 1400 t/ha/año (Portuguez, 2015).

Asimismo, Guevara et al. (2019), realizaron el estudio sobre las características hidrológicas del distrito de Vilque, determinaron una pérdida de suelo por erosión hídrica con el método USLE, alcanzaron un promedio de 14.90 t/ha/año en el período 1981-2018, un valor de 26.47 t/ha/año en un 78%, superior a la media. La tasa de erosión mínima actual en 1992 es de 4.98 t/ha/año con una reducción del 66% respecto a la media; también se produjo una erosión masiva en 1986, 2001 y 2012. Estos resultados se encuentran entre 1.19 y 125.345 t/ha/año, que se lograron obtener en la presente investigación, dichos resultados se encuentran en el rango de los resultados obtenidos.

4.1.2. Estimación de erosión hídrica en campo

Los resultados con la metodología planteada, del método de pedestales que consiste en medir la altura del pedestal y capa de armadura, los cuales se muestra en el

mapa de la ubicación de los puntos de análisis de campo (Figura 16), donde se tomaron las muestras y los análisis de campo por el método de pedestal y capa de armadura.

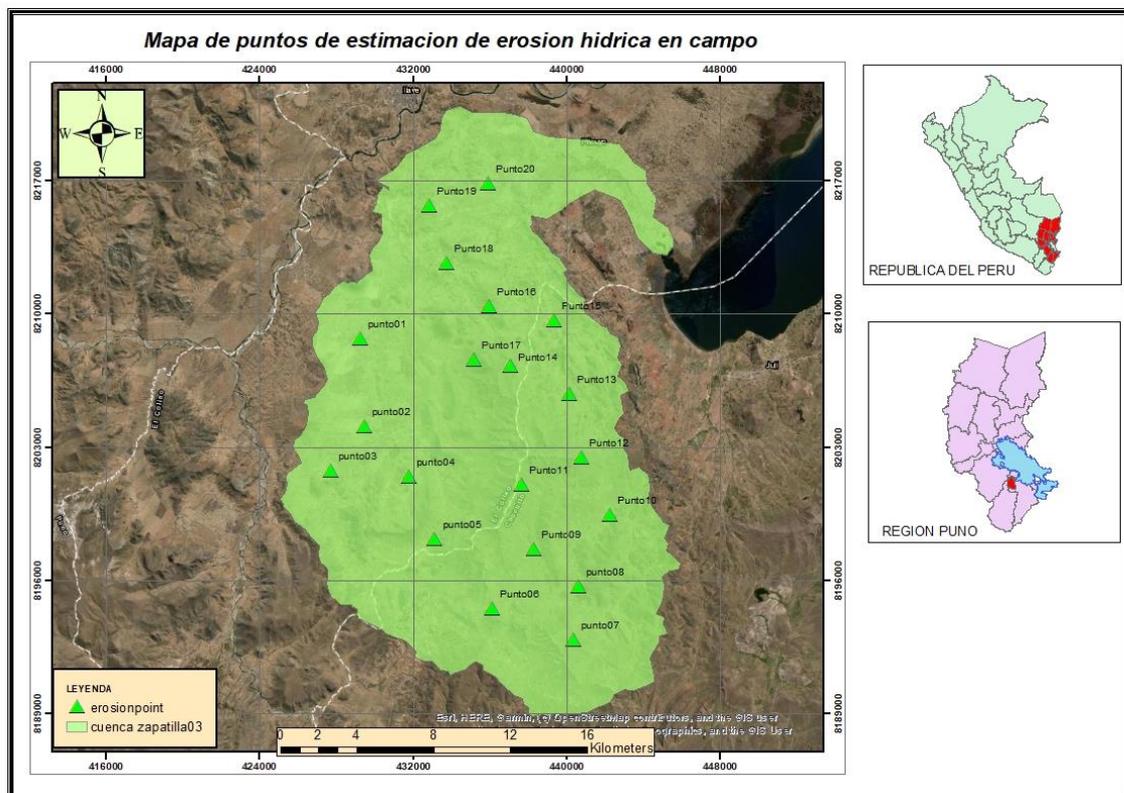


Figura 16. Ubicación de puntos de análisis de campo

Nota. La figura 16 representa los puntos de muestreo y de análisis en el campo.

En tabla 12, los métodos pedestal y capa de armadura son métodos de campo que se utilizaron en la cuenca del río Zapatilla, no habiendo otros estudios similares de la aplicación de método de pedestal y capa de armadura, sin embargo, muestran resultados altos en los puntos de análisis de campo 1, 6 y 18, zonas de fuertes pendientes y 2, 19 y 20 son los valores más bajos, que indica que la pérdida del suelo es bajo, por considerarse parte baja.

Las fuertes pérdidas de suelo en pendientes pronunciados, estos resultados coinciden con los estudios de León Peláez (2001); además, podría atribuirse a las fuertes precipitaciones pluviales e irregulares en las partes altas de la cuenca y pérdida de



cobertura vegetal en épocas de estiaje (Aroni-Quispe et al., 2021; Belizario, 2014; Belizario et al., 2013), esta pérdida del suelo afecta directamente a la actividad agropecuario (Belizario, 2021), donde se va perdiendo la capa arable aprovechable para las actividades agropecuarias, tal como indica Condori (2018).

4.2. COMPARACIÓN DE MÉTODOS USLE Y CAMPO DE PEDESTAL Y CAPA DE ARMADURA

La comparación de métodos de estimación de erosión hídrica tales como por modelamiento por el método de USLE y los métodos de campo, tenemos la comparación de método de pedestal, método de capa de armadura y USLE, como indica los valores en la tabla 12.



Tabla 12. Valores de métodos de campo y el método USLE

N°	Nombre	X	Y	Pedestal (mm)	Capa de armadura (mm)	USLE (mm)
1	punto01	429272	8208680	9	8	2.674
2	punto02	429448	8204095	5	4.8	0.724
3	punto03	427724	8201749	5	5.2	0.600
4	punto04	431782	8201449	3	2.1	0.409
5	punto05	433142	8198144	3	5.4	0.984
6	Punto06	436135	8194503	5	7.3	0.908
7	punto07	440381	8192885	5	6	1.338
8	punto08	440622	8195690	2	5.2	1.287
9	Punto09	438311	8197636	3	6.5	1.245
10	Punto10	442268	8199416	4	3.4	0.514
11	Punto11	437668	8201001	3	8	2.686
12	Punto12	440791	8202430	9	10	4.417
13	Punto13	440171	8205753	3	5	1.094
14	Punto14	437116	8207258	9	8.4	2.814
15	Punto15	439372	8209644	5	2.5	1.009
16	Punto16	436002	8210366	6	5.5	2.779
17	Punto17	435192	8207557	7	6	2.120
18	Punto18	433771	8212644	9	12	5.900
19	Punto19	432879	8215687	2	4	0.984
20	Punto20	435936	8216852	2	2	0.279

Nota. Esta tabla representa los valores determinados por el método de USLE y por los métodos de campo (pedestal y capa de armadura).

Los resultados encontrados en mm por los métodos de estudio, es decir los puntos de análisis 1, 12 y 18 presentan valores más altos con los tres métodos, mientras que los valores más bajos se encuentran en los puntos 4, 19 y 20, podríamos atribuir a las pendientes del terreno de estudio.

Además, estos resultados se asemejan con los estudios de Bertol et al. (2006), probablemente depende de los factores climatológicas y la formación geológica del suelo dentro de la cuenca en estudio según Cardona (2010) y Chañajari et al. (2019); pero todos estos estudios se asemejan con los resultados presentados, pero estas diferencias se atribuirían a la precesión de los instrumentos.

Los resultados de la tabla 12, muestran una semejanza entre los valores de los puntos de análisis, en función a los pendientes del terreno tal como indica Chañajari et al. (2019) y por uso de los instrumentos de medición caseros no calibrados hacen que presenten esta baja correlación entre estos métodos, según indica Cisneros et al. (2012), además, se puede atribuirse a los estiajes prolongados que generan grandes pérdidas de cobertura vegetal (Belizario, 2021).

Los resultados de comparación estadística según la información de la tabla 13, de los métodos de determinación de la erosión hídrica se presentan en la tabla 13.

Tabla 13. Análisis de varianza de los métodos de campo y el método USLE

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Variables	2	187.9	93.944	18.95	0.000
Error	57	282.6	4.958		
Total	59	470.5			

Nota. De acuerdo al análisis de varianza para comparar los tres métodos de determinación de la erosión hídrica según la tabla 13, con $F_C(2.23) < F_T(18.95)$, con una probabilidad $p \leq 0.05$.

Tabla 14. Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Métodos	n_i	Media	Agrupación
Capa de armadura	20	5.865	A
Pedestal	20	4.950	A
USLE	20	1.738	B

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Entre métodos existe alta significancia estadística mediante la prueba de rango múltiple de Tukey al 95% de probabilidad, donde el método de la Capa de Armadura y método Pedestal son estadísticamente iguales con valores de 5.865 y 4.950 respectivamente y el método USLE ocupa el último lugar con un valor de 1.738 mm, esto indica que son diferentes los valores encontrados, respecto a los primeros.

Los resultados podrían deducir que son muy similares, lo que indica que la pendiente del terreno influye en su determinación de la pérdida del suelo, tal como manifiestan Condori (2018) y Flores (2003), pero estos resultados de tabla 13 son semejantes en función a los pendientes del terreno, lo que conforma uno de los variables que influyen grandemente es la pendiente y la cobertura vegetal (Ccama, 2012; Belizario, 2021), generan pérdidas de suelo por la erosión hídrica, por las precipitaciones irregulares Gaitan et al. (2017) por largos periodos de estiaje e incremento de la temperatura tal como indica Gobierno Regional de Puno (2011).

4.3. INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL COMO FUNCIÓN ECOSISTÉMICA EN EL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA

En este estudio se utilizó el método de índices morfométricos para determinar la influencia de la cobertura vegetal en el riesgo de erosión, a continuación, mencionamos de la siguiente forma:

4.3.1. Índice de humedad topográfica

En la figura 19, mostramos el mapa de índice de humedad topográfica, lo cual nos muestra la humedad existente para el desarrollo de la cobertura vegetal, en este mapa vemos que existe un índice muy alto lo cual indica que se pueden desarrollar mucha vegetación silvestre y de cultivo en la cuenca del río Zapatilla. Los valores varían de muy alto hasta mediano, son áreas en donde se pueden desarrollar bastante vegetación, por lo tanto, la erosión hídrica es baja.

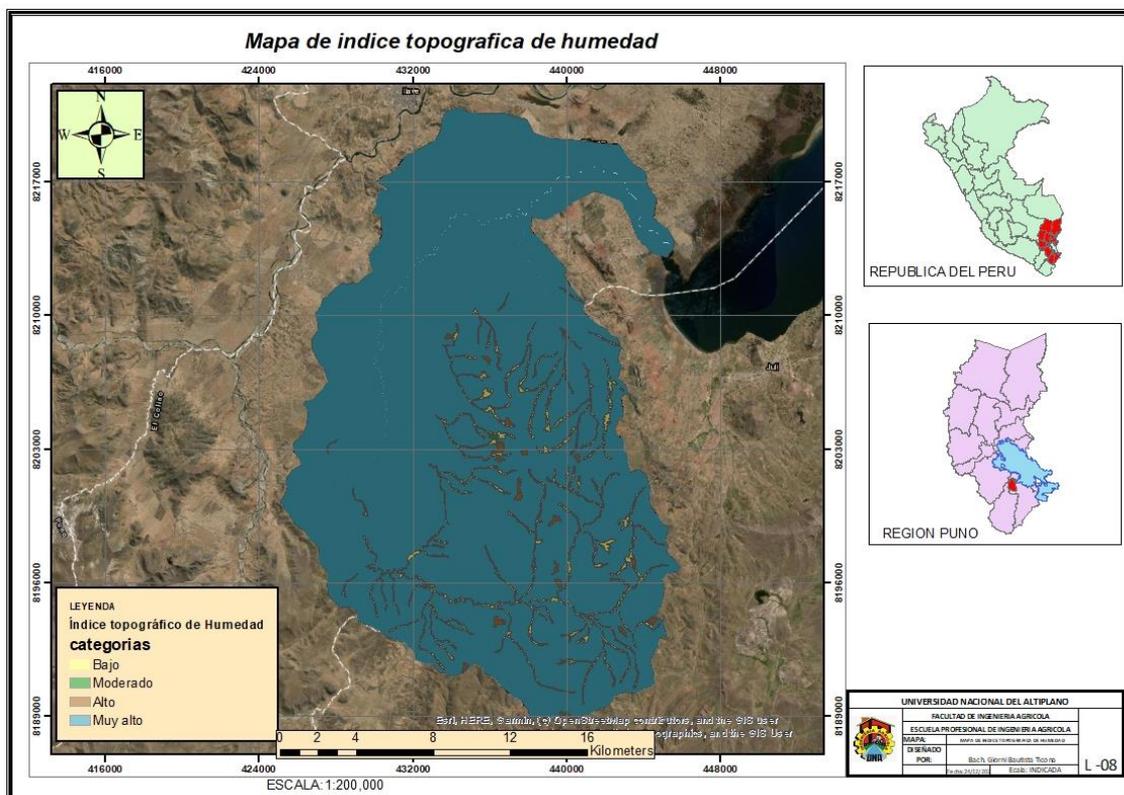


Figura 17. Índice de humedad topográfica

Nota. Esta figura muestra la variación espacial de índice de humedad topográfica en la cuenca del río Zapatilla.

La humedad del suelo dentro cuenca es una opción para el desarrollo de la cobertura vegetal, por su índice muy alto que permitiría un adecuado desarrollo de la vegetación silvestre y de cultivo en la cuenca del río Zapatilla, logrando así la erosión hídrica baja tal como indica Belizario (2021) y esta concepción también tiene Ccama (2012), por lo que se podría deducir como una alternativa de conservación de los suelos dentro de la cuenca en estudio según manifiesta López (1997).

4.3.2. Índice de potencia de flujo superficial

El proceso y las herramientas para el desarrollo del índice de fuerza de flujo superficial desarrollado con el software ArcGIS.

En la figura 20, representa la variación espacial del índice de potencia de flujo superficial, según los resultados obtenidos, se tiene que el índice potencial de flujo se encuentra en las quebradas o pequeños ríos, los valores fueron obtenidos a través de modelamiento espacial en Sistemas de Información Geográfica de la zona de estudio, lo cual permite que el índice de potencia del flujo superficial alta prevé el mejor desarrollo de la vegetación.

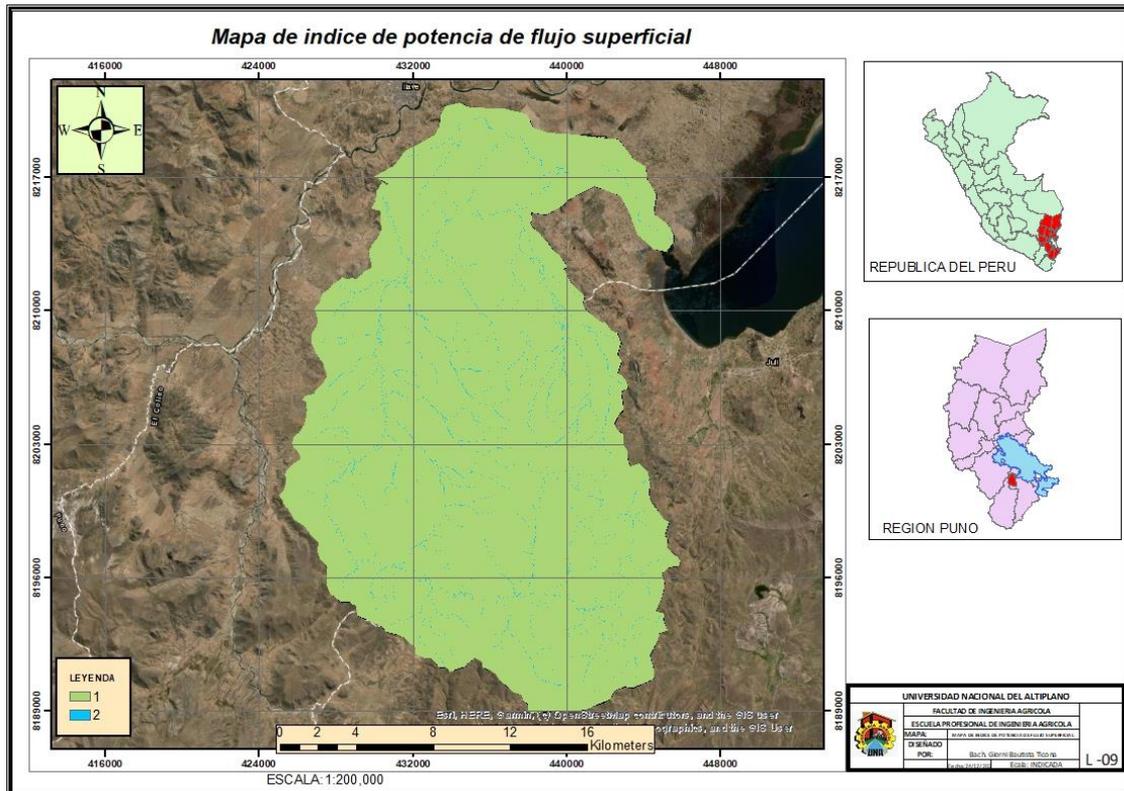


Figura 18. Mapa de índice de potencia de flujo superficial

Nota. Esta figura representa la variación espacial del índice de potencia de flujo superficial.

Los resultados obtenidos de la influencia de la cobertura vegetal como función ecosistémica en el riesgo de la erosión, fueron determinados como el índice de humedad topográfica, los valores determinados varían de bajo a muy alto, según la clasificación de índice de humedad para alto y muy alto el 95.35%, para moderado y bajo el 3.8% de la superficie de la cuenca, estos se asemejan con Ccama (2012). Para el índice de potencia de flujo superficial los valores han sido clasificados como alto y bajo, obteniéndose que para bajo el 98% y alta 2% que corresponde zona de mayor potencia de flujo superficial, incluido los ríos y bofedales. El índice de humedad fue originalmente desarrollado para predecir las áreas con bastante humedad y la profundidad del nivel freático del suelo estudiado, estas realidades son semejantes con Loredo et al. (2007), Monedero y Gutiérrez (2001), y Paco (2022).



Posteriormente ha sido empleado para predecir el contenido de humedad del suelo y para identificar áreas de erosión y/o deposición potencial de materiales, y para la predicción del desarrollo de cárcavas que asemejan a los resultados de Portuguez (2015). Valores altos del índice de humedad indican potencial para la acumulación de agua en el suelo, y coincide con aquellas zonas de baja pendiente y con un valor de área de drenaje específica alto. Valores bajos del índice de humedad indican bajo potencial topográfico para la acumulación de agua en el suelo, estas realidades se aproximan a estudio Rodríguez-Moreno y Bullock (2013).



V. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en la cuenca del río Zapatilla por el modelamiento USLE, la erosión hídrica varía entre 1.19 a 125.345 t/ha/año, mientras la erosión estimada en campo por el método de pedestales varía entre 2 a 9 mm de altura del pedestal y 2 a 12 mm de altura por el método de la capa de armadura, los tres métodos son muy útiles para la estimación del suelo perdido ocasionado por erosión hídrica. se puede decir que la cuenca hidrográfica tiene un riesgo bajo a moderado de erosión hídrica.

Mediante la prueba de rango múltiple de Tukey al 95% de probabilidad, los métodos de campos son semejantes, mientras que el método USLE es diferente a los métodos de Pedestal y del Capa de Armadura con una alta significancia estadísticamente con un $p=0.000$.

En la influencia de la cobertura vegetal como función ecosistémica en el riesgo de erosión, se utilizó los índices morfométricos tales como índice topográfico de humedad y índice de potencia de flujo superficial, los valores obtenidos muestran que existe mayor humedad de la superficie en la zona baja de la cuenca del río Zapatilla; por lo cual, es apto para cualquier tipo de vegetación cultivada y silvestre, donde podría existe poca probabilidad de riesgo a erosión hídrica.



VI. RECOMENDACIONES

Es muy importante estudiar la erosión hídrica para cuantificar la pérdida de suelos y nutrientes; se recomienda realizar más estudios sobre cuantificación de pérdida de suelos en campo, ya que nuestro país es montañoso con pendientes y relieve muy variados.

Es necesario que se realice prácticas y estudios de manejo y conservación de suelos, ya que es uno de los temas muy importantes en el manejo de suelos en el altiplano.

En la región Puno, tenemos pendientes muy variados, en la zona alta existe erosión hídrica y en las zonas bajas se presentan riesgo de inundaciones y sedimentación, por lo tanto, se recomienda realizar planes de manejo, conservación y gestión de riesgo en las cuencas.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, N. (2007). *Manual de manejo de cuencas*. Revista Virtual REDESMA.
https://www.academia.edu/39307571/Cuencas_M_Aguirre
- Ana L. Burgos A, B. G., S. J. (2015). *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas*:
Vol. I (CIGA). Universidad Nacional Autónoma de México.
https://www.researchgate.net/profile/Ana-Burgos-5/publication/303383018_Dimensiones_Sociales_en_el_Manejo_de_Cuencas/links/573f731408aea45ee844feb1/Dimensiones-Sociales-en-el-Manejo-de-Cuencas.pdf#page=20
- Aroni-Quispe, D. X., Alfaro-Alejo, R., Huaman-Gutierrez, H. A., & Belizario-Quispe, G. (2021). Comparative analysis of evapotranspiration using the SEBAL model and the evaporimeter pan method in the Huancane basin of Puno, Peru. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII*, 11856, 74–84. <https://doi.org/10.1117/12.2600821>
- Augusto, L., Loreto, D., Raimo, D., Santos, R., Amorim, S., Torres, G. N., Dias Bocuti, E., & Couto, E. G. (2019). *Variabilidade espacial da erodibilidade no estado de Mato Grosso, Brasil, Spatial variability of erodibility in Mato Grosso State, Brazil*. *Revista de Ciências Agrárias*, 42(1), 55–67.
<https://doi.org/10.19084/RCA18122>
- Bastiaanssen, W. G. M. (1998). *Remote Sensing in Water Resources Matlagement: The State ofthe Art*. <https://publications.iwmi.org/pdf/H022865.pdf>
- Belizario, G. (2014). *Impactos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú* [Universidad Nacional del Altiplano].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/256>



- Belizario, G. (2021). *Epistemología ambiental aplicada al cambio climático y su impacto en la agricultura* (ILAE (ed.); Primera Ed). Instituto Latinoamericano de Altos Estudios. https://www.ilae.edu.co/web/Ilae_Files/Libros/202109231427551445415815.pdf
- Belizario, G., Huaquisto, E., & Chirinos, T. (2013). Efectos del cambio climático en la temperatura y precipitación - Capachica, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 15(4), 15–24.
- Bertol, I., Lemos Mello, E., Pedro Cogo, N., Vázquez, E., & Paz González, A. (2006). *Parámetros relacionados con la erosión hídrica sob taxa constante da enxurrada, em diferentes métodos de preparo do solo. Seção VI-Manejo e Conservação Do Solo e Da Agua*, 30, 715–722. <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/p9pQ5b749YdR9PCZ6TrRvTn/abstract/?lang=pt>.
- Bidegain Mario, P., Juan Manuel, P., Walter, B., & Préchac Fernando, G. (2017). *Actualización del factor erosividad de la lluvia en Uruguay*. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?pid=S2301-15482017000200091&script=sci_abstract&tlng=es
- Cardona, B. L. (2010). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. Trabajo de Maestría*, 1–8. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58750302/Conceptos_basicos_de_Morfometria_de_Cuencas_Hidrograficas_1-libre.pdf?1553987893=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DConceptos_basicos_de_Morfometria_de_Cuen.pdf&Expires=1671840983&Signature=TDYCFve1VWy8OXMCZp7UyQKXAZicKG9ooB3SLku0NEH78wIQzUI4z4LKSNTXcTvH~Oci3y40XeMqmO6CAZoS23oFmMIT3Vs-



oR1ITw2qokQQUj1hDtGilGDZCxYYeE7hFMIHV-
Wy2ogUJ4BASGhNEI9D9H73f0ivyJ32Y4Nh1h3qAnUWkBt-
7DnxVffTVqIIWGduIyRlNI0ANepjUHUzj0MP9PGNhsqggTdsJyEx96muby
b03-
a1TOzqvVAloCGBhsgsHByM81KIDaeiyFvp1JYsq~o56C7BOMEAIHHW
WDU9p04zJQLLL9IoPxWvEgKsav5J05TZyz9qBU1Yhtz5oQ__&Key-Pair-
Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Cañibano A., S. p. (2016). *Área y perímetro para la caracterización de formas.*
Sumat. Artículos.

<http://funes.uniandes.edu.co/12634/1/Canibano2016Area.pdf>

Ccama, U. (2012). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la
cuenca del río Ilave utilizando técnicas de teledetección y SIG* [Universidad
Nacional del Altiplano].

<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/5424>

Chañajari, M., Condori, M.P.V., Alfaro-Alejo, R., & Mamani, J. (2019). *Estimación
de la pérdida del suelo por erosión hídrica en la Microcuenca Chañajari,
Moho-Puno.*

<https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3279665>

Chartier, M. P., César, &, & Rostagno, M. (2009). *Evaluation of the WEPP model
to predict soil erosion in northeastern Patagonian rangelands.*

[http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-
20672010000100010](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672010000100010)

Choqueticlla, S. (2010). *Colmatación de la presa soraga por deposición de
sedimentos.*



- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero, A., Gonzales, J., Reynero, M., Diez, A., & Gergesio, L. (2012). *Erosión Hídrica. Principios y técnicas de manejo: Vol. I* (1ra Edición). Unirioja. www.unrc.edu.ar/unrc/comunicacion/editorial/
- Condori Apaza, V. (2018). *Estimación de la pérdida del suelo por erosión hídrica Chañajari, Moho-Puno*. Universidad Nacional Del Altiplano. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3221061>
- Díaz Hernández, J. M., & Burbano, L. (2007). *Modelos eco hidráulicos unidimensionales*. Avances En Recursos Hidráulicos, 78–88. <https://www.redalyc.org/pdf/1450/145016897007.pdf>
- Dioses Tapia, J. M., & Pérez Gómez, C. M. (2018). *Estimación de la erosión hídrica mediante la aplicación de la metodología RUSLE en la cuenca del río Piura*. Repositorio de Tesis - UNMSM. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/10055>
- FAO. (2016). *Estado mundial del recurso suelo: Resumen técnico*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/3/i5126s/i5126s.pdf>
- Ferrer V, P. T. (2015). *Manejo integrado de cuencas hídricas*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Jurídicas. https://redib.org/Record/oai_articulo1113534-manejo-integrado-de-cuencas-h%C3%ADdricas-cuenca-del-r%C3%ADo-gualjaina-chubut-argentina.
- Flores H., M. M. , O. J. (2003). *Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, M.* Terra Americana. Terra Americana. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57315595010.pdf>



- Gaitan, J. J., Navarro, M. F., Tenti Vuegen, L. M., Pizarro, M. J., & Carfagno, P. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. <http://repositorio.inta.gov.ar:80/handle/20.500.12123/1981>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra María, G. E., Delgado, I., & Besteiro, S. I. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas Libros de Cátedra*. www.editorial.unlp.edu.ar
- Gis-Beers. (2018, July 3). *Cálculo del Índice Topográfico de Humedad TWI*. www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-topografico-de-humedad-twi/
- Gobierno Regional de Puno. (2011). *Estudio de erosión de suelos de la Región de Puno*. <http://siar.minam.gob.pe/puno/tematica/erosion-suelos>
- Gomes Minella, B., Paolo, J., Merten & Henrique, G. (2012). *Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental*. *Ciencia Rural*, 1–9. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33123213005>
- Gómez, M. del C. (2014). *Diseño de Investigaciones*. http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/69957/secme-2549_2.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Hernández, C. (2012). *Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas*. https://www.academia.edu/38669884/Conceptos_b%C3%A1sicos_de_Morfometr%C3%ADa_de_Cuencas_Hidrogr%C3%A1ficas
- Hernández Sampiere, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación científica* (6ta Edición). <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>



- Horacio, J., & Ollero, A. (2011). *Clasificación geomorfológica de cursos fluviales a partir de sistemas de información geográfica* (S.I.G.).
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3722514>
- Horton E. (1932). *Water Diversion Between Drainage Basins. 1623–1683.*
- Huaranca, A. (2014). *Propuesta metodológica de microzonificación ecológica y económica-caso microcuenca del río Zapatilla-Puno* [Universidad Nacional del Altiplano].
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RNAP_544664d21c2f082a44c1419ee41fcea1.
- Huerta, P., & Figueroa, O. L. (2014). *Erosión hídrica en la cuenca alta del río Moche.* *Ecología Aplicada*, 13(1–2), 15–22.
<https://doi.org/10.21704/REA.V13I1-2.450>
- Hugo Sánchez, H., Carlos, C., Romero, R., & Mejía Sáenz, K. (2018). *Manual de términos en investigación científica: Vol. I* (Primera Edición).
<https://www.urp.edu.pe/pdf/id/13350/n/libro-manual-de-terminos-en-investigacion.pdf>
- IDER Ingeniería y Desarrollo Rural. (2005). *Mapa del grado de erosión hídrica de los suelos. Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente.*
https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/mapa_erosion/es_erosion/adjuntos/memoria.pdf
- J. EDES, P. M. A. M. J. G. (1997). *Determinación de la tasa de erosión hídrica en función del manejo forestal: la cuenca del río Santa Lucía* (GIPUZKOA). Departamento de Ingeniería Minera, Metalúrgica y Ciencias de Los Materiales.



E.U.I.T.I. e I.T. En Topografía.

<https://www.ingeba.org/lurralde/lurranet/lur20/20edeso/edeso20.PDF>

J. López, J. G. (1997). *Caracterización y control de la erosión por cárcavas*.

<https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/28648>

León, G. S. (1999). *Análisis hidrográfico e hipsométrico de la cuenca alta y media del río Chama*, estado Mérida, Venezuela. In Rev. Geog. Venez (Vol. 40, Issue

1). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=205802>

León Peláez, J. D. (2001). *Estudio y control de la erosión hídrica*.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/20071>

López Bermúdez, F. (2002). *Erosión y desertificación*. In Heridas de la tierra (Heridas de la tierra).

<https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/cig/article/view/2573>

Loredo, C., Beltrán López, S., Moreno Sánchez, F., & Casiano Domínguez, M.

(2007). *Riesgo ala erosión hídrica y proyección de acciones*. Instituto Nacional de Investigaciones.

<https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Llibre31.pdf>

Mancilla, G. A. (2008). *Conservación de suelos*. Apuntes de Dcentes.

https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120400/Apuntes_docentes_USLE.pdf?sequence=1

Manuel, J., Gloria, C., Gutiérrez, C., Gustavo, J., Ángel, M., Coautores del Capítulo, L., José, J., Coautor del Capítulo, A., & José, A. (2012). *Erosión hídrica*.

Principios y técnicas de manejo Autores. Universidad Nacional de Río Cuarto. www.unrc.edu.ar/unrc/comunicacion/editorial/



- Monedero, C., & Gutiérrez, M. (2001). *Análisis cuantitativo de los patrones espaciales de la cobertura vegetal en el geosistema montañoso tropical El Ávila*. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31811238/articulo3-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1670217268&Signature=dYy8MX3YL9NIF5YZDSh1C0yRWSMVqq9~jIN591sZEdMm4EO5dvOpV2aH5ILVwPEThHdMn699a~SOxoAPqSBRVm1GhJc~~PF-B2dltb01Ub8Xaca9vpOBo~DT4NGyyA7frD-tHfI8oR3L85PGwH73-wVygWR8w-5UqC387KY9DSmRUFN04mMMKbnI~0X4wz4Yv8kWc5igj08xVhrTgH6bw5TGE6hi1RypGUIVg9ni64~v0WVrKUJctac-MltySWf6zc~Peh2tlB3W3rZtwrxrd8zJrcuzB0x5DpmsgXCEB~Bvdk32zjWo kVj4EgeEoj8cDdq04XEj0MjZSmhsEVefVw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Montenegro, H., & Malagon, D. (1990). *Propiedades físicas de los suelos*. IGAC. <http://koha.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=4536602>
- Montes-León, A. L., Uribe-Alcántara, E., & García-Celis, E. (2011). *Mapa Nacional de Erosión Potencial. Tecnología y Ciencias del Agua*. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v2n1/v2n1a1.pdf>
- Nájera González, C., Serrano, B., Vílchez, F., Núñez, M., & García-Sancho, G. (2016). *Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México*. *Cultivos Tropicales*, 37(2), 45–55. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3942.5527>



- Oñate- Valdivieso, F. (2004). *Riesgo erosión*. Revista Electrónica REDLAH.
http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/riesgo_erosi%C3%B3n.pdf
- Paco Arpita, F. (2022). *Influencia de medidas de conservación de suelos en la erosión hídrica en la microcuenca del río temporal Escalerani – Puno* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Altiplano].
http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/17754/Paco_Arpita_Froilan_Yony.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pérez Falls, Z. (2018). *Análisis del cambio en la cobertura y erosión del suelo en la cuenca hidrográfica de Laguna de Términos, Campeche* [Tesis maestría, Instituto Politécnico Nacional].
<https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/26230/1/perezfa1.pdf>
- Portuguez M., D. M. (2015). *Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del río Sigwas Utilizando Geo informática*. Anales Científicos, 76(2), 324. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>
- Quispe, T. (2018). *Influencia de la cobertura vegetal en la erosión Hídrica del suelo en la Comunidad de San Mateo, Perú*. [Tesis de Posgrado, Universidad Nacional Agraria].
http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3600/quispe_ojeda-teodosio-celso.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). *Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE*. *Journal of Hydrology*, 157(1–4), 287–306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)



- Rengifo-Rengifo, O.-J. M.-G. (2022). *Modelo USLE para estimar la erosión hídrica de siete Municipios en la zona andina colombiana*. Biotecnología en el Sector Agropecuario. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v20n2/1692-3561-bsaa-20-02-29.pdf>
- Rodríguez Díaz, H. A. (2010). *Hidráulica fluvial. Fundamentos y aplicaciones*. Socavación. <https://Www.Librosyeditores.Com/Ingenieria/192-Hidraulica-Fluvial-Fundamentos-y-Aplicaciones-Socavacion-9789588060927.Html>
<https://doi.org/10.1/JQUERY.MIN.JS>
- Rodríguez-Moreno, V. M., & Bullock, S. H. (2013). *Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor*. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Vol. 4).
<https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v4n4/v4n4a10.pdf>
- Sabino, E., Felipe, O., & Lavado, W. (2017). *Atlas de Erosión de Suelos por Regiones Hidrológicas del Perú*. www.senamhi.gob.pe
- SEMARNAT. (2013). *Cuencas hidrográficas* (Primera Edición).
https://www.produccion-animal.com.ar/agua_cono_sur_de_america/80-Cuencas_hidrograficas.pdf
- Susana Yapur, S. (2010). *Determinación de la Erosión Hídrica Potencial de los Suelos de la Cuenca Inferior del Río Bermejo, Salta- Jujuy* [Tesina pregrado, Universidad Nacional de Salta]. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_erosionh_cirb_salta_jujuy.pdf
- Takahashi Guevara, K., Oscar Felipe Obando, I., & Sc Julia Acuña Azarte, M. (2019). *Caracterización Hidrológica del distrito de Vilque – Departamento de Puno*. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/263>



- Torres Villamizar, C., Alexandra, L., & Antonio, J. (2011). Bistua: *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas Universidad de Pamplona*. Ciencias Básicas, 9(1), 16–20. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90322640003>
- Urbina, J., & Martínez, J. (2006). *Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global*. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2010/10/4775mas_alla_del_cambio_climatico.pdf#page=123
- USDA. (1987). *Major Uses of Land*. <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT91946676/PDF>
- Valenzuela, B., & Salinas, L. M. (n.d.). *Estimación del factor de erosividad de las precipitaciones en la Región de Coquimbo*. Retrieved December 4, 2022, from https://www.researchgate.net/publication/259622676_ESTIMACION_DEL_FACTOR_EROSIVIDAD_DE_LA_LLUVIA_EN_LA_ZONA_SEMIARIDA_DE_SAN_PEDRO_CHILE
- Vargas, N. (2017). *Implementación de biomodelos estimativos de la calidad ecosistémica en el nevado del Cocuy al año 2030 producto del retroceso glaciar*. Instituto Geografico Agustin Codazi, 1–101. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/25624/HerreraVargasNicol%c3%a1s2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vásquez, A., & Tapia, M. (2011). *Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas*. *Revista Ingeniería UC*. <https://www.redalyc.org/pdf/707/70723269005.pdf>
- Walter H. Wischmeier, D. D. S. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning* (Vol. 2).



- Walter Rasche Alvarez, J., Pellegrini, A., Luciane Kochem, M., Luiz Schaefer, G., Capoane, V., Tiecher, T., Regina Fornari, M., & Rheinheimer dos Santos, D. (2014). *Erosão hídrica e perda de sedimento, água e nutrientes durante eventos pluviais em duas bacias hidrográficas rurais*. In *Investig. Agrar* (Vol. 16, Issue 2). <https://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/298>
- Williams, J. R., & Berndt, H. D. (1977). *Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology*. *Transactions of the ASAE*, 20(6), 1100–1104. <https://doi.org/10.13031/2013.35710>
- Wischmeier, W. H., & Smit, D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. - Supersides Agricultura. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=rRAUAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Predicting+soil+erosion+losses+smit&ots=cvrovOuuSS&sig=6K3NelukTGC4WK1oCOh5V_6N2x0#v=onepage&q=Predicting%20soil%20erosion%20losses%20smit&f=false
- Wisler, C. O., & Brater, E. F. (1959). *Hydrology* (1ra Edición). <https://www.amazon.com/-/es/Chester-Owen-Wisler/dp/B0007DNW6Y>



ANEXOS



ANEXO A: Resultado de análisis de suelo en laboratorio (textura de suelos)

PERU		Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego		Inia			
LABSAF		INFORME DE ENSAYO					
		N° 04040-22/SU/ILLPA					
I. INFORMACIÓN GENERAL							
Cliente	:	Giorni Bautista Ticona					
Propietario / Productor	:	--					
Dirección del cliente	:	C.P. Cocosani - Distrito de acora					
Solicitado por	:	Giorni Bautista Ticona					
Muestreado por	:	Cliente					
Número de muestra(s)	:	03 muestras.					
Producto declarado	:	Suelo Agrícola					
Presentación de las muestras(s)	:	Bolsas de polietileno					
Referencia del muestreo	:	Rio zapatilla a 1500 metros de la carretera panamericana					
Procedencia de muestra(s)	:	Ácora-Puno.					
Fecha(s) de muestreo	:	2022.04.08					
Fecha de recepción de muestra(s)	:	2022.04.22					
Lugar de ensayo	:	LABSAF Illpa					
Fecha(s) de análisis	:	2022.04.23					
Cotización del servicio	:	N° 044-2022-ILL					
Fecha de emisión	:	2022.05.06					
II. RESULTADO DE ANÁLISIS							
ITEM		1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio		SU339-ILL-22	SU340-ILL-22	SU341-ILL-22	SU342-ILL-22	SU343-ILL-22	SU344-ILL-22
Matriz Analizada		Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de Muestreo		2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08
Hora de Inicio de Muestreo (h)		7:30 a. m.	7:30 a. m.	7:30 a. m.	7:30 a. m.	7:30 a. m.	7:30 a. m.
Condición de la muestra		Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente		Parcela M-1/Distrito llave	Parcela M-2/Distrito llave	Parcela M-3/Distrito llave	Parcela M-1/Distrito llave	Parcela M-2/Distrito llave	Parcela M-3/Distrito llave
Ensayo	Unidad	LC	Resultados				
Análisis de Mecánico							
Materia Orgánica	%	--	3.25	4.68	1.54	--	--
Densidad Aparente	gr/cc	--	--	--	--	1.35	1.165
Análisis de Mecánico							
ITEM		7	8	9	10	11	12
Código de Laboratorio		SU345-ILL-22	SU346-ILL-22	SU347-ILL-22	SU348-ILL-22	SU349-ILL-22	SU350-ILL-22
Matriz Analizada		Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de Muestreo		2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08	2022.04.08
Hora de Inicio de Muestreo (h)		7:30 a. m.	7:30 a. m.	7:30 a. m.	7:30 a. m.	7:30 a. m.	7:30 a. m.
Condición de la muestra		Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada	Conservada
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente		Parcela M-	Parcela M-	Parcela M-	Parcela M-	Parcela M-	Parcela M-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados				
Análisis de Mecánico							
Arena	%	--	43.04	35.04	31.04	--	--
Limo	%	--	47.28	47.28	47.28	--	--
Arcilla	%	--	9.68	17.68	21.68	--	--
Clase Textural	--	--	Franco	Franco	Franco	--	--
Capacidad de Campo	%	--	--	--	--	22.83	31.77




INFORME DE ENSAYO

N° 04040-22/SU/ILLPA

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Materia Orgánica	Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego -INIA Ed 1era.2017.Item 4.5. Pag 39. Determinación de carbono orgánico.
Textura	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Item 7.1.9 AS-09.2000. Determinación de la textura del suelo por procedimiento de Bouyoucos.
Densidad Aparente	Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, División of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpresión, octubre 1988. 195p.
Capacidad de Campo	Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, División of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpresión, octubre 1988. 195p.

IV. CONSIDERACIONES

- Estado en las que ingreso la Muestras: Buenas Condiciones de almacenamiento
- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- Medición de pH realizada a 25 °C

ANEXO B: Vista panorámica de la cuenca del río Zapatilla.





ANEXO C: Medición de pedestales



ANEXO D: Método de capa de armadura en forma circular



ANEXO E: Mapas

